



**EGE ÜNİVERSİTESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**KOMPOZİT MALZEMELER İÇİN YAPI**

**İZLEME VE BAKIM SİSTEMİ**

**Mahmut PEKEDİS**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan YILDIZ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 625.03.00**

**Sunuş Tarihi : 17.09.2014**

**Bornova-İZMİR**

**2014**

**E. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(DOKTORA TEZİ)**

**KOMPOZİT MALZEMELER İÇİN YAPI  
İZLEME VE BAKIM SİSTEMİ**

**Mahmut PEKEDİS**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan YILDIZ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 625.03.00**

**Sunuş Tarihi: 17.09.2014**

**Bornova-İZMİR**

**2014**

Mahmut PEKEDİS tarafından Doktora tezi olarak sunulan “Kompozit Malzemeler için Yapı İzleme ve Bakım Sistemi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 17.09.2014 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

**Jüri Başkanı : Prof. Dr. Hasan YILDIZ**  
**Raportör Üye : Prof. Dr. Kadri Turgut GÜRSEL**  
**Üye : Doç. Dr. Engin AKTAŞ**  
**Üye : Doç. Dr. Yeliz PEKBEY**  
**Üye : Yrd. Doç. Dr. Gürsoy TURAN**

## **EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

### **ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Kompozit Malzemeler için Yapı İzleme ve Bakım Sistemi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

17.09.2014

Mahmut PEKEDİS



**ÖZET****KOMPOZİT MALZEMELER İÇİN YAPI  
İZLEME VE BAKIM SİSTEMİ**

PEKEDİS, Mahmut

Doktora Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan YILDIZ

Eylül 2014, 198 sayfa

Mühendislik yapılarında gerçekleşen teknolojik gelişmelere bağlı olarak, bu yapılarda oluşabilecek hasarları tespit etmek hayati derecede zaruridir. İleri mühendislik yapıları, canlı organizmaların yapılarında bulunan sinir sistemlerine benzer olarak, sensör sinir ağlarıyla donatılarak sağlık durum değerlendirmesi yapılmaktadır. Otomatik kontrol sistemlerinde yapılan ilerlemeler, yapı sağlığı izleme (YSİ) uygulama alanlarına da yansıyor, insanın yapılardaki sağlık teşhisi için gerekli olan bilişsel motor kabiliyetleri azaltılarak, yerine otomatik olarak hasarı anlık teşhis edebilen matematiksel proseslere bırakmıştır. Son 20 yıldır, bu tekniğin kullanılması otomatik olarak hasarı belirleyebilen birçok algoritmanın geliştirilmesine olanak tanımıştır. Hâlihazırda, YSİ tekniklerinde uygulanan model tabanlı YSİ algoritmalarında, fiziksel kuramlara bağlı olarak model geliştirilip, daha sonra ölçüm verilerinin, modelde değerlendirilmesiyle tanılama yapılır. Veri tabanlı YSİ algoritmalarında ise, yapıya iliştirilen birçok sensörden ölçüm verileri alınarak, daha sonra alınan veriler üzerinde öz nitelik vektörleri çıkartma ve farklı tiplerde istatistiksel, nümerik veya zaman modellerinin uygulanmasıyla tanılama yapılmaktadır. Bu yaklaşımların kullanılmasıyla YSİ uygulamalarında ileri derecede gelişmeler kaydedilmiştir. Nitekim bu araştırmanın başlangıcında, tabakalı kompozit kiriş ve levhadaki hasar, model tabanlı YSİ tekniğiyle değerlendirilerek yapılarındaki delaminasyonlar tespit edilmiştir. Diğer taraftan, YSİ’de, yapılan tüm ilerlemelere rağmen, insanın bilişsel motor kabiliyetini, otomatik olarak hasar belirleyebilen model veya veri tabanlı YSİ araçlarından tamamen devre dışı bırakmak, başka problemlerin

## VIII

oluşmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, YSİ tekniğinin çözüm performansını artırmak için, bütünleşik olarak sayısal teknolojik araçlarından ve insanın motor bilişsel sistemlerinden yararlanılarak, geleneksel YSİ prosedürlerinden farklı olan yeni konseptlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Araştırmanın birinci temel hedefi, yapının sağlığını değerlendirmek için inovatif, kooperatif insan-makine ara yüz paradigması geliştirip insan katılımcıları üzerindeki etkinliğini belirlemektir. Geliştirilen kooperatif YSİ paradigmasının en önemli özelliği, tek başına hasar belirleme çözüm prosesine katkı sağlayan tek başına bir makineden veya tek başına katkı sağlayan tek insandan daima ilerdedir. Bütünleşik insan-makine arayüz paradigmasının geliştirilmesinde; insanın sinir sisteminden, YSİ sensör ağlarından, sinyal işleme tekniklerinden, öz nitelik çıkartma metotlarından, çok değişkenli istatistiksel yöntemlerden, psikofizik prosedürlerinden, haptik teknolojilerinden, nöral plastisite teorilerinden ve duyu ikamesi kuramlarından yararlanılmıştır. Duyu ikamede kullanılan tekniğe benzer olarak, yapının hasar durumunu belirten yeni bir duyunun insanlar tarafından kazanılabilme yeterliliğini belirlemek için, bu çalışmada, cıvatalı kafes elemanlarıyla inşa edilen çelik bir kule seçilerek üzerinde uygulanmıştır. Kuledeki hasar senaryoları, kompozit yapılardaki delaminasyon hasarını simüle eden, bir veya birden çok cıvatanın gevşetilip gevşetilmemesi durumlarıyla yapılmıştır. Sistemin dinamik tepkilerinin ölçülmesi amacıyla kuleyi oluşturan elemanların değişik bölgelerinde ivmeölçerler yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerden alınan veriler başlangıçta, ön işleme tekniklerine ve çok değişkenli istatistiksel bir yöntem olan asal değişken analiz tekniğine tabi tutularak haptik kodlar türetilmiş ve bu haptik kodlar, daha sonra katılımcıların üzerinde, fiziksel titreşim uyarısı oluşturacak şekilde üç farklı konfigürasyonla aktifleştirilmişlerdir. Kooperatif insan-makine arayüz paradigması sonuçları incelendiğinde; uyarımlar sırasıyla insanlara iletildiğinde, katılımcıların ortalama %  $88 \pm 20.21$  başarı skoru ve  $5.87 \pm 2.23$  s'de cevapladıkları, uyarıların hepsi aynı anda insanlara iletildiğinde ise, katılımcıların ortalama %  $68.98 \pm 30.91$  başarı skoru ve  $8.51 \pm 3.22$  s'de cevapladıkları görülmüştür. Geliştirilen insan-makine YSİ paradigması katılımcılar üzerinde test edilip, katılımcıların sonuçları araştırıldıktan sonra, destek vektör makineleri (DVM), YSİ ölçüm verileri üzerinde test edilip, DVM'nin çoklu karşılaştırma modülüyle, hasar kombinasyonlarını sınıflandırma kabiliyeti araştırılmıştır.

DVM’de kernel olarak lineer, polinom, radyal ve sigmoid fonksiyonları kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak analizleri yapıp değerlendirilmiştir. Destek vektör makinelerinde, en yüksek doğruluk değerleri, %  $60.63 \pm 13.53$  başarı skoru ve buna karşılık 6.043914 s ortalama işlemci çözüm süresiyle, radyal tabanlı kernelin kullanılması durumunda üretildiği görülmüştür. Sonuç olarak, insan-makine YSİ paradigmasından elde edilen katılımcıların sonuçları incelendiğinde, geliştirilen tekniğin soyutsal kavramların algılanmasında ve özellikle, YSİ sensor ağ uygulamalarında kullanışlı olacağı yönündedir.

Araştırmanın ikinci temel hedefi, YSİ’de uygulanan hasar tespit sürecinin yanında, hasara ilişkin bakım prosesinin yapılmasına yönelik bütünleşik YSİ+bakım algoritması geliştirmektir. Bu amaçla, geliştirilen algoritmanın temel konseptleri belirtilmiş ve düzlem dışı yüklemeye maruz, çatlak içeren bir boyutlu tabakalı kompozit bir kiriş üzerinde uygulanmıştır. Hasar teşhisinde, birim şekil değiştirme enerjisinden (BŞDE) yararlanılmıştır. Birim şekil değiştirme enerjisiyle, hasar bölgesi belirlendikten sonra, ortalama hata karelerinin toplam kökünden (OHKTK) elde edilen optimum değere göre, piezoelektrik aktüatör aktifleştirilip yapının emniyetli ve kontrollü bir şekilde çalışması amaçlanmıştır. Başka bir anlamda, piezoelektrik kullanılarak yapıdaki hasarın kısmen de olsa kontrol edilebilme seviyesi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, eğilmeye maruz basit mesnetli bir kompozit kirişteki çatlağın tespitinde, kırılma mekaniği denklemleri ile birlikte BŞDE algoritmasının başarılı bir şekilde kullanılabileceği ve kiriş için optimum bakım voltajının belirlenmesinde OHKTK uygulanarak, piezoelektrik aktüatörün kirişteki çatlağın iyileştirebileceği kanaatine varılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Yapı sağlığı izleme, Hasar tanınması, Hasarın hissedilmesi, İnsan-makine arayüzü, Nosiseptörler, Haptik sistemler, Duyusal ikame, Makine öğrenimi, Fiber takviyeli kompozit yapılar, Piezoelektrik aktüatörler, Hasar kontrolü, YSİ+Bakım sistemi





**ABSTRACT****STRUCTURAL HEALTH MONITORING AND MAINTANENCE  
SYSTEM FOR COMPOSITE MATERIALS**

PEKEDİS, Mahmut

Ph.D. in Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hasan YILDIZ

September 2014, 198 pages

Advances in engineering structures have focused on building structures that effectively integrated with nervous systems that similar to living organisms in order to detect, localize and quantify the damages. Through an increased automation, the human role has shifted from an emphasis on the perceptual-motor skills needed for manual diagnosis process to autonomous decision maker. Since the last two decades, developments in damage detection algorithms have greatly increased the potential for autonomous decisions of structural health. The model based structural health monitoring (SHM) approach is usually applied by building a physics-based model of the structure of interest. Once the model is built, based on a detailed physical description of the system, it is usually updated on the basis of measured data from the structure. The data-based approach is focused on collecting a wide array of measurements from sensors, extracting features from data, comparing data with models to determine the current state of system health. A number of advances have been made in SHM using these approaches. For example, the first case of this research was related to diagnose the delamination in laminated composite beam and plate by using the model based SHM technique. On the other hand, it is still struggling to build autonomous tools that can match the ability of a human to detect and localize a quantity of damage in structures by removing the human cognitive motor ability from these SHM tools. Therefore, there is a need for growing interest in merging the computational and cognitive technologies- techniques and concepts to improve the solution of SHM.

The first main object of this research is to explore the efficiency of the developed innovative human-machine cooperative paradigm for SHM applications on human subjects. The idea of the paradigm is that human-machine cooperation always outperforms a machine or a human, acting independently. The cooperation paradigm is including the human nervous system, SHM sensor networks, signal processing techniques, feature extraction methods, multivariate statistical methods, psychophysics procedures, haptic technology to create a harmonious collaboration among humans, neural plasticity and sensory substitution theories. In order to explore the possibility of giving humans a new sense, one that reflects the health of structure by using the similar philosophy, the investigation was performed using a steel tower structure that was constructed with bolted lattices. Damage scenarios in the structure were conducted by releasing some of the bolt loads which has a similar effect of delamination damage that mostly encountered in composite structures. Accelerometers were bonded to various locations of the tower members to measure the dynamic response of the system. Initially, the results obtained from the accelerometers were pro-processed with principal component analysis (PCA). Next, the scores obtained from PCA were encoded in three different ways to represent them as physical haptics stimuli for the human subjects. Results obtained from the human-machine cooperation paradigm demonstrated that subjects were able to recognize the damage with an accuracy of  $88 \pm 20.21$  % and response time of  $5.87 \pm 2.33$  seconds when the stimulations are represented in sequence. They were also able to determine the damage with an accuracy of  $68.98 \pm 30.91$  % and response time of  $8.51 \pm 3.22$  seconds when the encoded stimulations are represented simultaneously to the human subjects. Once the human-machine cooperative paradigm was tested on human subjects, the next task is to detect the damage via support vector machine on SHM measures by using the multi classification module. The SVM results were analyzed and evaluated in detail for linear, polynomial, radial and sigmoid kernels. The results of SVM showed that, the highest accuracy scores were observed in radial basis function kernel with an accuracy of 60.63 % in 6.043914 s of CPU time. As a result, it can be concluded that the human-machine cooperation concept, provides a useful framework to interact with abstract entities such as data from sensor network of SHM.

The second main object of this research is to develop an integrated SHM-maintenance algorithm to conduct maintenance process requirements for damages, beside the SHM technique. First, the basic concepts of algorithm were demonstrated. Next, it was applied on a cracked laminated composite beam that subjected to an out of axial plane force. The strain energy method (SEM) was used to detect to damage. Once the damage location was diagnosed, the piezoelectric actuator was activated automatically with an optimized voltage value that was obtained from root mean square error (RMSE) in order to control the integrity of composite beam in a safe manner. In other words, it was investigated that, whether the effect of damage in composite beam could be controlled via piezoelectric actuator. As a result, it can be concluded that, the developed SHM-maintenance coupling algorithm could be used in an effective way to detect the damage in cracked fiber reinforced composite beam that subjected to bending load as well as it can perform a maintain process for this cracked beam to decrease the effect of damage by using the fracture mechanics theories, SEM and RMSE indicators.

**Keywords:** Structural health monitoring, Damage diagnosis, Damage sensation, Human-machine interface, Nociceptors, Haptics systems, Sensory substitution, Machine learning, Fiber reinforced composite structures, Piezoelectric actuators, Damage control, SHM+Maintenance system



**TEŞEKKÜR**

Tezin hazırlanmasında değerli katkılarından dolayı hocam, Sayın Prof. Dr. Hasan Yıldız'a en içten dileklerimi sunar, yapı sağlığı izleme uygulamaları için insan-makine arayüz konseptinin geliştirilmesinde destek aldığım, Los Alamos Araştırma Laboratuvarından, Dr. Charles R. Farrar'a, Dr. David Mascerañas'a, Dr. Eric Flynn'e, Sheila M. Girard'a, tezin biçimlenmesinde fikirlerini aldığım, tez izleme komitesindeki hocalarım Prof. Dr. K. Turgut Gürsel'e, Doç. Dr. Engin Aktaş'a, deneysel kule testlerinin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Gürsoy Turan'a, Dr. Emre Ercan'a, İnş. Müh. Hasan Ceylan'a, deney tasarımında yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Mehmet Sarıkanat'a, Elekt. Tek. Faysal Yıldız'a, yurtdışı doktora bursunu sağlayan Yüksek Öğretim Kurumuna (YÖK), deney tasarımını finanse eden Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje (BAP) ofisine, deneysel insan-makine arayüz paradigmasının etkinliğinin belirlenmesinde, destek veren tüm katılımcılara ve maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bu araştırmanın bir kısmı YÖK ve Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma projesi (BAP), 12-MÜH-046 adlı proje numarasıyla desteklenmiştir. Psikofizik haptik deneyleri, Ege Üniversitesi, Tıp Fakültesi, etik kurulunun 13-11/104 sayılı araştırma etik izniyle yapılmıştır.



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	VII
ABSTRACT .....	XI
TEŞEKKÜR .....	XV
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XXI
TABLolar DİZİNİ.....	XXXI
KISALTMALAR DİZİNİ.....	XXXV
SİMGELER DİZİNİ .....	XXXVII
1. GİRİŞ .....	1
2. YAPI SAĞLIĞI İZLEME .....	6
2.1 Yapı Sağlığı İzleme Sistemlerine Neden İhtiyaç Duyulur? .....	8
2.2 Yapı Sağlığı İzleme Sisteminin Temel Elemanları.....	12
2.3 Yapı Sağlığı İzleme Sisteminin Temel Basamakları .....	16
2.4 Anlık Yapı Sağlığı İzleme .....	19
2.5 Anlık Olmayan Yapı Sağlığı İzleme.....	20
2.6 Pasif ve Aktif Yapı Sağlığı İzleme .....	22
2.7 Hasarın Tanımlanması .....	23



**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
2.8 Yapı Sağlığı İzleme Sisteminin Temel Aksiyomları.....	24
3. YAPI SAĞLIĞI İZLEME TEKNİKLERİ.....	26
3.1 Titreşim Tabanlı Hasar Tespit Teknikleri .....	26
3.2 X-Radyografik Tekniği .....	27
3.3 Birim Şekil Değiştirme Metotları.....	28
3.4 Fiber Optik Teknikleri.....	28
3.5 Eddy Akım Metotları.....	32
3.6 Görsel Muayene Yöntemleri.....	32
3.7 Ultrasonik Dalgalar Tekniği .....	33
4. TABAKALI KOMPOZİT BİR KİRİŞ VE LEVHADA HASAR TESPİTİNİN MODEL TABANLI YSİ TEKNİKLERİYLE BELİRLENMESİ ..	35
4.1 Giriş .....	36
4.2 Hasar Tespit Algoritmaları .....	39
4.2.1 Düzgün aralıklı metot .....	39
4.2.2 Birim şekil değiştirme enerjisi metodu.....	41
4.3 Kompozit Kiriş İmalatı.....	42
4.4 Nümerik Analiz.....	43

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
4.5 Kiriş ve Levhadaki Hasar Tespiti için Elde Edilen Sonuçlar .....	44
4.6 Tartışma ve Genel Değerlendirmeler .....	55
5. NON-İNVAZİF VİBRO-HAPTİK KOOPERATİF İNSAN MAKİNE ARAYÜZÜ İLE YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ .....	59
5.1 Giriş .....	60
5.2 Kooperatif İnsan-Makine YSİ Paradigmasının Metodolojik Konsepti .....	67
5.2.1 Deney tasarımı .....	69
5.2.2 Donanım tasarımı .....	72
5.2.3 İnsanın dokunma duygusu .....	74
5.2.4 Yazılım tasarımı .....	76
5.2.5 Uygulama prosedürü .....	79
5.2.6 Katılımcılar .....	81
5.2.7 Asal bileşenler analizi .....	82
5.2.8 Haptik uyarısının gösterilmesi .....	88
5.2.9 Katılımcıların sonuçları .....	94
5.3 Destek Vektör Makineleri ile Hasarın Belirlenmesi .....	101
5.3.1 Destek vektör makineleri sonuçları .....	107

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
5.4 Tartışma ve Genel Değerlendirmeler .....	122
6. TABAKALI KOMPOZİT BİR KİRİŞTE HASAR TESPİTİ VE PİEZOELEKTRİK AKTÜATÖRLE BAKIMININ YAPILMASI .....	127
6.1 Giriş .....	128
6.2 Enine Çatlak İçeren Kompozit Bir Kirişin Modellenmesi .....	131
6.3 Kompozit Kirişlere ait Temel Bağlıntılar .....	135
6.4 Kompozit Kirişin Piezoelektrik Aktüatörle Modellenmesi .....	138
6.5 Piezoelektrik Aktüatörle Kompozit Kirişin Bakımı .....	139
6.6 Deney Tasarımı .....	143
6.7 Deneysel Ölçüm Sonuçları .....	147
6.8 Analitik Sonuçlar .....	153
6.9 Tartışma ve Genel Değerlendirmeler .....	167
7. TARTIŞMA .....	169
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	175
ÖZGEÇMİŞ .....	193

**ŞEKİLLER DİZİNİ**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 İnsan ile yapının sinir ağları arasındaki analogi.....	7
2.2 Havacılık ve inşaat mühendisliğinde karşılaşılan kazalar. a) 29 Nisan 1988 tarihinde karşılaşılan Aloha uçağı kazası, b) Injaka köprüsünün yıkılması... 9	
2.3 YSİ sisteminin faydaları .....	10
2.4 YSİ sisteminin temel elemanları .....	15
2.5 Temel yapı sağlığı izleme sistemi .....	17
2.6 Anlık yapı sağlığı izleme sisteminin temel konsepti .....	19
2.7 Uçak yapılarındaki bakım eylem masraf dağılımı.....	20
2.8 Uçak yapılarında, bakım aşamasındaki insan işgücü masraf dağılımı .....	21
2.9 Pasif ve aktif YSİ sistemi (Aktif YSİ’de hem aktüatör hem sensör kullanılır. Pasif YSİ’de sadece sensör kullanılır.) .....	22
3.1 Fiber optik sensör teknolojileri .....	29
4.1 Kompozit malzemelerin üretilmesi. a) Kompozit malzemede oluşturulan delaminasyonlar, b) Sıcak pres ve sıcaklığın problemlerle izlenmesi.....	42
4.2 Hasar belirleme prosesi için üretilen kompozit kirişler (üst: Sağlıklı kiriş, alt: Delaminasyon hasarı) .....	43
4.3 Kompozit levhada, delaminasyonun modellenmesi (4 tabaka 0/90/90/0).....	44
4.4 Delaminasyon içeren kompozit kirişteki hasar tespitinin DAM ile yapılması .....	45

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.5 Delaminasyon içeren kompozit kirişteki hasar tespitinin BŞDE ile yapılması .....	46
4.6 Sağlam kompozit levha için elde edilen 2., 3. ve 4. eğrilik mod şekilleri ..	48
4.7 Delaminasyon içeren levha için edilen 2., 3. ve 4. eğrilik mod şekilleri ...	50
4.8 Durum 1’de, 2., 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen DAM hasar tespit sonuçları .....	51
4.9 Durum 1’de 2., 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen BŞDE hasar tespit sonuçları .....	52
4.10 Durum 2’de, 2., 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen DAM hasar tespit sonuçları .....	53
4.11 Durum 2’de 2., 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen BŞDE hasar tespit sonuçları .....	54
5.1 Geliştirilen insan-makine YSİ sistemine ilişkin akış şeması.....	68
5.2 Deneysel kule yapısı (a-Ön görünüm, b-İvmeölçer, c-Servo motor, c-Yan görünüm) .....	71
5.3 Giyilebilir haptik deneysel cihaz prototipi .....	73
5.4 Mikrokontroldeki puls modülasyonuna bağlı olarak vibro-haptik elemanda üretilen akım.....	74
5.5 Yönetici için geliştirilen grafik arayüzü.....	77
5.6 Katılımcılar için geliştirilen grafik arayüzü .....	79

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.7 Haptik uyarıların algılanıp birbirinden ayırt edilebilme performansının ölçülmesi için geliştirilen grafik arayüzü.....	81
5.8 Yapıya ilişkin 1. hasar senaryo (2. test) örneği için ön veri işleme örneği. a) Ham veri alımı, b) Filtreleme işlemi, c) Ölçeklendirme.....	85
5.9 2. durum 5. test için ABA analizinden elde edilen asal bileşenlerin varyanslarına ilişkin örnek.....	85
5.10 Yapıya ilişkin birinci durum (2. test) örneği için asal bileşen analiz uygulama prosedürü a) İki ekseninde ABA skorları, b) Üç ekseninde ABA skorları, c) İki ekseninde ABA yükleme skorları d) Üç ekseninde ABA yükleme skorları.....	87
5.11 Birinci ve ikinci asal bileşenlere ilişkin normalize edilmiş yüklenme değerleri.....	88
5.12 Yapıya ilişkin birinci durum (1. testinde) ve 1. haptik uyarısının uygulanma prosedürüne ilişkin örnek. a) 0-585.94 ms aralığında her sinyalin zaman noktalarının alınması, b) Alınan zaman noktalarının frekans bölgesindeki gösterimi, c) Zaman sinyallerinin 4.4373 faktörü ile düzeltilip modifiye edilmesi, d) Modifiye edilen sinyallerin frekans bölgesinde gösterimi, e) Modifiye edilen zaman noktalarının puls modülasyonunda kullanılmak üzere ölçeklendirilmesi.....	91
5.13 AB analizinde elde edilen yüklenme değerlerinin 1. ve 2. haptik uyarım tipinde uygulama örneği [Durum 1, test 1]. a) İkinci uyarımda haptik değerlerin aktifleşme sırası 1-2-3-4 şeklindedir. b) Üçüncü uyarımda tüm motorlar aynı anda aktifleştirilmiştir.....	93
5.14 Birinci uyarı tipi için katılımcılardan elde edilen performans skorları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi).....	95

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.15 İkinci tip uyarının uygulanması sonucu, katılımcılardan elde edilen performans skorları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi) .....	96
5.16 Üçüncü tip uyarının uygulanması sonucu, katılımcılardan elde edilen performans skorları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi) .....	97
5.17 Tüm hasar durumlarında ve üç farklı uyarının uygulanması sonucunda katılımcılardan elde edilen sonuçlar (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi) -Hata çubukları: % 95 güvenirlilik aralığı .....	99
5.18 Tüm hasar senaryolarında ve farklı haptik uyarım tiplerinin uygulanması sonucunda elde edilen katılımcıların sonuçları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi) Hata çubukları : % 95 güvenirlilik aralığı.....	99
5.19 Tüm hasar senaryolarında ve farklı haptik uyarı tiplerinin uygulanması sonucunda elde edilen katılımcıların sonuçları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi) Hata çubukları : % 95 güvenirlilik aralığı.....	100
5.20 Destek vektör makinelerinde doğrusal sınıflandırma. a) İki sınıflı veri seti için oluşturulan keyfi hiper düzlemler, b) Optimum hiper düzlem ve destek vektörleri .....	102
5.21 Kernel fonksiyonlarıyla, verilerin yüksek boyuta dönüştürülmesi.....	105
5.22 Ham verilerin destek vektör makineleriyle ikili sınıflandırılma örneği (Durum I ve Durum II) a- Lineer kernel [Sınıf I Skoru: % 34], b- 2. dereceden polinomial kernel [Sınıf I Skoru: % 36], c- 3. dereceden polinomial kernel [Sınıf I Skoru: % 57], d- Radyal tabanlı kernel, $C = 1$ , $\gamma = 0.7$ [Sınıf I Skoru: % 91].....	108

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.23 Ham verilerin normalize, filtreleme ve ABA prosesinden sonra elde edilen verilerin, destek vektör makineleriyle ikili sınıflandırılma örneği (Durum I ve Durum II), a- Lineer kernel [Sınıf I Skoru: % 89.3], b- 2. dereceden polinomal kernel [Sınıf I Skoru: % 89.6], c- 4. dereceden polinomial kernel [Sınıf I Skoru: % 91.66], d- Radyal tabanlı kernel, $C = 1$ , $\gamma = 0.7$ [Sınıf I Skoru: % 93.77].....	109
5.24 İkili sınıflandırmada, kernel tipi olarak, polinom kullanıldığında, polinom derecesine bağlı DVM'den elde edilen sınıflandırma performansı (Öğretilen durumlar: 1-2, Test edilen durum: 1).....	112
5.25 İkili sınıflandırma aşamasında, kernel tipi olarak, radyal tabanlı kullanıldığında, $\gamma$ parametresine bağlı DVM'den elde edilen sınıflandırma performansı (Öğretilen durumlar: 1-2, Test edilen durum: 1) .....	112
5.26 Çoklu sınıflandırmalarda ve değişik kerneller kullanıldığı durumlarda $C$ değişkenine bağlı olarak DVM'nin sınıflandırma performansı (Öğretilen durumlar 1-16, Test edilen durum: 5).....	115
5.27 Çoklu sınıflandırmalarda radyal tabanlı kernel kullanıldığında $\gamma$ ve $C$ parametrelerinin değişimine bağlı olarak DVM'nin sınıflandırma performansı (Öğretilen durumlar: 1-16, Test edilen: Durum 5).....	115
5.28 Çoklu karşılaştırmadaki tüm hasar senaryoları ve farklı kernel tiplerinin uygulanması sonucu elde edilen başarı skorları.....	120
5.29 Çoklu karşılaştırma aşamasında, farklı kernel tiplerinin uygulanması sonucunda elde edilen ortalama başarı skorları (Hata çubukları: Standart sapma).....	120
5.30 Tüm hasar durumları ve uyarı tiplerinde katılımcılardan elde edilen doğruluk yüzdelerinin, yanıtlama sürelerine oranları.....	124



**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.1 Enine çatlak içeren fiber takviyeli basit mesnetli kompozit bir kirişin geometrisi.....	133
6.2 Eğilmede tabakalı şeritin geometrisi.....	136
6.3 Enine çatlak içeren fiber takviyeli basit mesnetli kompozit kirişin piezoelektrik aktüatörle modellenmesi .....	140
6.4 Kompozit yapılara ilişkin, yapı sağlığı izleme ve bakım prosesi için uygulanan akış şeması.....	143
6.5 Deneysel olarak enine çatlak içeren fiber takviyeli basit mesnetli kompozit bir kirişin piezoelektrik aktüatörle bakımının yapılması .....	145
6.6 Deneysel test ortamı.....	147
6.7 Bir ucu ankastre bir ucu serbest haldeki kirişin deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre (-50 ile 250 V) aralığında dinamik voltaj uygulanması sonucu, $x = 230$ bölgesinde elde edilen veriler. (a- Zaman gölgesi, b- Frekans bölgesi) .....	148
6.8 Deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanması sonucu $x = 210$ mm noktasında elde edilen çökme-kuvvet ilişkisi [a- üst) -100 V için ölçülen veriler, a- alt) -100 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler, b- üst) -50 V için ölçülen veriler, b- alt) -50 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler].....	150

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.9 Deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanması sonucu $x = 210$ mm noktasında elde edilen çökme-kuvvet ilişkisi [a- üst) Voltajın uygulanmadığı durum için ölçülen veriler, a- alt) Voltajın uygulanmadığı durumda lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler, b-üst) 50 V için ölçülen veriler, b-alt) 50 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler].....	151
6.10 Deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanması sonucu $x = 210$ mm noktasında elde edilen çökme-kuvvet ilişkisi [a- üst) 100 V için ölçülen veriler, a- alt) 100 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler, b- üst) 150 V için ölçülen veriler, b- alt) 150 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler .....	151
6.11 Deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanması sonucu $x = 210$ mm noktasında elde edilen çökme-kuvvet ilişkisi [a- üst) 200 V için ölçülen veriler, a- alt) 200 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler, b- üst) 250 V için ölçülen veriler, b- alt) 250 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler .....	152
6.12 Piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanıp elde edilen veriler üzerinde lineer eğri uydurma sonucu, kuvvetin uygulandığı $x = 210$ mm noktasında elde edilen deneysel çökme- kuvvet ilişkisi .....	153
6.13 Piezoelektrik aktüatöre -50 V uygulanması sonucu, $x = 210$ mm'de elde edilen deneysel ve analitik çökme-kuvvet ilişki sonuçları .....	155
6.14 $x = 210$ mm'de $P = 1.5$ N uygulanması sonucu sağlıklı ve çatlak içeren bir kirişte uzunluk boyunca elde edilen çökme ve rotasyon değerleri (a- çökme, b- rotasyon) .....	156

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.15 $x = 210$ mm'de $P = 1.5$ N ve piezoelektriğe $-50$ V uygulanması sonucu elde edilen değerler (a- çökme, b- rotasyon) .....	156
6.16 $x = 210$ mm'de $P = 1.5$ N için BŞDE ile hasar tespit ve bakımı. a) Bakım öncesi hasar tespiti, b) Bakım sonrası ( $-50$ V ) hasar tespiti, c) Bakım öncesi ve sonrası öncesi hasar tespiti, d) Bakım miktarı .....	157
6.17 $x = 210$ mm'de $P = 1.5$ N ve piezoelektriğe değişik voltaj uygulanması sonucu elde edilen değerler (a- çökme, b- rotasyon) .....	158
6.18 $x = 210$ mm'de $P = 1.5$ N için, normalize ortalama hata karekök değerleri (optimum voltaj: $-150$ V ile $-200$ V arasında) .....	159
6.19 $x = 210$ mm'de $P = 1.5$ N için piezoelektriğe uygulanan voltaj ile G arasındaki ilişki .....	159
6.20 $x = 210$ mm'de $P = 1.5$ N için iterasyona bağlı olarak bakım aşamasında uygulanması gereken voltajın NOHKTK'e bağlı olarak optimize edilmesi [ $(a/h) = 0.333$ ] .....	160
6.21 $x = 210$ mm'de $P = 1.5$ N uygulanıp ve $G = (-600$ V.C/mm, $600$ V.C/mm) arasında arama yapılarak bakım aşamasında uygulanması gereken voltajın NOHKTK'e bağlı olarak optimize edilmesi [ $(a/h) = 0.333$ ] .....	160
6.22 Çatlak oranı $(a/h) = 0.33$ ve $x = 210$ mm'de $P = 1.5$ N uygulanıp voltajın optimize edildikten sonra, elde edilen optimum voltajın tekrar uygulanarak bakım uygulandıktan sonra elde edilen a) çökme, b) rotasyon değerleri. (Optimize edilen voltaj = $-154.3055$ ) .....	161
6.23 Kirişteki değişken çatlak büyüklüğü ve değişken kuvvete bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltajları (kontür grafik) .....	163

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.24 Kirişteki değişken çatlak büyüklüğü ve kuvvete bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltajları (yüzey grafik) .....	163
6.25 Kirişte uygulanan kuvvet lokasyonuna bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltajı .....	163
6.26 Kompozit kirişin bakımı için 1. ve 2. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri ( $a/h = 0.17$ , 3. tabaka oryantasyon açısı: 90) (kontür grafik) .....	165
6.27 Kompozit kirişin bakımı için 1. ve 2. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri ( $a/h = 0.17$ , 3. tabaka oryantasyon açısı: 90) (yüzey grafik) .....	165
6.28 Kompozit kirişin bakımı için 2. ve 3. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri ( $a/h = 0.17$ , Tabaka 1'in oryantasyon açısı: 0) (kontür grafik).....	166
6.29 Kompozit kirişin bakımı için 2. ve 3. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri ( $a/h = 0.17$ , Tabaka 1'in oryantasyon açısı: 0) (yüzey grafik).....	167



**TABLolar DİZİNİ**

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Tabakalı kompozit malzemenin özellikleri.....	43
4.2 Kompozit kirişte mevcut olan ve tahmin edilen delaminasyon bölgesinin yeri.....	45
4.3 Levha için elde edilen doğal frekanslar .....	46
4.4 Yüzey uydurma algoritması uygulanmasıyla elde edilen polinom katsayıları (% 95 güvenirlilik aralığı).....	47
4.5 Kompozit levhada tahmin edilen delaminasyon bölgesinin yeri .....	57
5.1 Yapıya ilişkin olarak oluşturulan hasar senaryoları (1, civatanın gevşetildiğini, 0 ise civatanın gevşetilmediği göstermektedir.).....	71
5.2 Farklı hasar konfügrasyonları ve farklı uyarı tiplerinde katılımcılardan elde edilen istatistiksel sonuçlar .....	98
5.3 Tüm hasar konfügrasyonlarında katılımcılardan elde edilen doğru cevaplama yüzdelik değerlerinin çoklu Tukey testi ile karşılaştırılması...	100
5.4 Tüm hasar konfügrasyonlarında katılımcılardan elde edilen yanıtlanma sürelerinin çoklu Tukey testi ile karşılaştırılması.....	101
5.5 Destek vektör makine sınıflandırıcılarında kullanılan temel kernel fonksiyonları ve parametreleri .....	106
5.6 İkili sınıflandırmada, farklı kernel tipi kullanıldığında DVM'den elde edilen sonuçlar .....	111

**TABLolar DİZİNİ (devam)**

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
5.7 Veriler ölçeklendirilme durumuna göre, ikili sınıflandırmada DVM'den elde edilen performanslar (Öğretilen durumlar 1-2, Test edilen: Durum I) .....	113
5.8 Çoklu sınıflandırmanın çapraz doğrulama aşamasında DVM kernel parametreleri için bulunan en iyi değerler.....	116
5.9 Çoklu sınıflandırmada DVM'de lineer tabanlı kernel kullanıldığında elde edilen sınıflandırma sonuçları (Öznitelik vektörü = 4, Veri Sayısı = 300, $C = 0.46652$ ).....	117
5.10 Çoklu sınıflandırmada DVM'de 2. dereceden polinom kerneli kullanıldığında elde edilen sınıflandırma sonuçları (Öznitelik vektörü = 4, Veri Sayısı = 300, $C = 1.8661$ ).....	117
5.11 Çoklu sınıflandırmada DVM'de radyal tabanlı kernel kullanıldığında elde edilen sınıflandırma sonuçları (Öznitelik vektörü = 4, Veri Sayısı = 300, $C = 1.8661$ , $\gamma = 3.7321$ ) .....	118
5.12 Çoklu sınıflandırmada DVM'de sigmoid kerneli kullanıldığında elde edilen sınıflandırma sonuçları (Öznitelik vektörü = 4, Veri Sayısı = 300, $C = 0.46652$ ).....	119
5.13 DVM'de farklı kernel tipleri için bulunan istatistiksel sonuçlar .....	121
5.14 DVM'de farklı kernel tiplerinin uygulanması sonucu elde edilen doğru sınıflandırma skorlarının çoklu Tukey testi ile karşılaştırılması .....	122
6.1 Ölçüm veriler üzerinde lineer eğri uydurma sonucu elde edilen polinoma ilişkin katsayılar .....	153
6.2 Kompozit kiriş ve piezoelektriğe ilişkin malzeme özellikleri.....	154

**TABLolar DİZİNİ (devam)**

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
6.3 Kirişteki çatlak büyüklüğü ve değişken kuvvete bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltajları .....	162
6.4 Kompozit kirişin bakımı için 1. ve 2. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj ( $a/h = 0.17$ , Tabaka 3. oryantasyon açısı: $90^\circ$ ).....	164
6.5 Kompozit kirişin bakımı için 2. ve 3. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj ( $a/h = 0.17$ , Tabaka 1. oryantasyon açısı: $0$ ).....	166





**KISALTMALAR DİZİNİ**Kısaltmalar

ABA	Asal Bileşenler Analizi
BŞDDO	Birim Şekil Değiştirme Dağıtma Oranı
BŞDE	Birim Şekil Değiştirme Enerjisi
DAM	Düzgün Aralıklı Metot
DVM	Destek Vektör Makineleri
GŞF	Gerilme Şiddet Faktörü
MEMS	Mikro Elektro-Mekanik Sistemler
Mİ	Mikro İşlemci
NOHKTk	Normalize Ortalama Hata Karelerinin Toplam Kökü
OHKTk	Ortalama Hata Karelerinin Toplam Kökü
PVDF	Polivinilidenflorit veya Polivinilidene Diflorit
PZT	Kurşun Zirconate Titanate
YSA	Yapay Sinir Ağları
YSİ	Yapı Sağlığı İzleme



## SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$H(\underline{x}_i, \underline{x}_j)$	DVM' de lineer olmayan sınıflandırmalarda, verilerin kernel fonksiyonlarıyla değerlendirilmesi
$D(\underline{x}_i)$	DVM' de lineer sınıflandırma ayırım fonksiyonu
$Q(\underline{w})$	DVM karar fonksiyonu
$\bar{A}_{ij}$	Malzeme özellik parametreleri
$\bar{x}$	Standartlaştırılmış veri seti
$\bar{Q}_{ij}^k$	Tabakadaki fiberlerin yöne bağlı olarak değişimini gösteren malzeme sabitleri
$\bar{a}$	Yanal ve açık çatlak parametresi ( $\bar{a} = a/h$ )
$\mu_x$	Veri seti ortalaması
$a$	Çatlak hasarı derinliği
$b$	i) DVM' de sınıflandırma fonksiyonunda kullanılan eğilim değeri, ii) Kompozit kiriş ve piezoelektrik aktüatörün genişliği
$b_i$	Bakım uygulanan kompozit kirişe ait $i$ . noktasında çökme değeri
$C$	DVM düzenleme parametresi
$C_1, C_2$	DVM' de ikili sınıflandırmada sınıf etiketleri
$C_{ij}$	Çatlak hasarından dolayı kirişteki lokal esneklik artışı
$C_v$	Piezoelektrik kapasitansı
$d$	DVM' de, polinom tip kernel için polinom derecesi
$D_{B\mathcal{S}DE}(x)$	Bir boyutlu durumlar için birim şekil değiştirme enerjisi hasar indeksi

## SİMGELER DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$D_{B\mathcal{S}DE}(x,y)$	İki boyutlu durumlar için birim şekil değiştirme enerjisi hasar indeksi
$D_{DAM}(x)$	Bir boyutlu durumlar için düzgün aralık metot hasar indeksi
$D_{DAM}(x,y)$	İki boyutlu durumlar için düzgün aralık metot hasar indeksi
$D_{ij}$	Kompozit malzemeler için eğilme rijitlikleri
$e_{31}$	Piezoelektrik katsayısı
$E_{ij}$	Elastisite modülleri
$E_{xx}$	Ortotropik malzemeler için elastisite modülü
<b>F</b>	Asal bileşenler analizine ilişkin faktör skor matrisi
$F_j(a/h)$	Düzeltilme faktörü
$g$	Piezoelektrik kontrol kazanç faktörü
$G_{ij}$	Kayma modül sabitleri
$h$	Kompozit kiriş kalınlığı
$I$	i) Atalet momenti, ii) Sensör âdeti
<b>I</b>	Birim matrisi
$J$	Sensör verisi
$K$	Eğrilik
$k$	i) Destek vektör makinelerinde kullanılan eğitim veri sayısı, ii) Tabaka numarası, iii) Kompozit kiriş bakım kontrol parametresi
$K_{li}, K_{lli}$	Gerilme şiddet faktörleri
$K_x, K_y$	$x$ ve $y$ eksenleri için eğrilik modları
$l$	Kompozit kiriş uzunluğu
$L$	<b>X</b> veri seti matrisine ilişkin rank

**SİMGELER DİZİNİ (devam)**

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$l_1$	Kompozit kirişe iliştirilen piezoelektrik aktüatöre ilişkin orta noktasının, $x$ ekseninde başlangıç noktasına olan mesafesi
$l_2$	Kompozit kirişe düzlem dışı olarak uygulanan kuvvetin $x$ ekseninde başlangıç noktasına olan uzaklığı
$M$	Moment
$m, n$	Lineer eğri uydurma katsayıları
$N$	Kompozit yapıdaki tabaka sayısı
$P$	Düzlem dışı kompozit kirişe uygulanan kuvvet
$p_1, p_2$	Piezoelektrik aktüatörün çatlak hasarının sol ve sağ bölgesindeki boyu
$Q$	ABA Yükleme matrisi
$Q$	Piezoelektrik tabakadaki şarj
$R(x,y)$	Artık polinom
$s$	DVM' de, sigmoid tabanlı kernel için boyut parametresi
$s_1, s_2$	Karakteristik denklem kökleri
$s_i$	Sağlıklı kompozit kirişe ait $i$ . noktasındaki çökme değeri
$U$	Şekil değiştirme enerjisi
$u$	Yer değiştirme
$U_c$	Çatlak hasarından dolayı oluşan ek deformasyon enerjisi
$V_a$	Piezoelektrik aktüatör tarafından uygulanan voltaj miktarı
$V_s$	Piezoelektrik sensör çıkış voltajı
$w$	DVM' de sınıflandırma fonksiyonunda kullanılan ağırlık vektörü

## SİMGELER DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\mathbf{X}$	Ölçeklendirilmiş veri matrisi
$y$	Çökme
$Y_j(\zeta)$	Anizotropik malzemeler için düzeltme faktörü
$\alpha$	Tabaka oryantasyon açısı
$\alpha_i$	Lagrange çarpanları
$\gamma$	DVM' de, radyal tabanlı kernel için kernel boyut parametresi
$\Delta$	ABA tekil değerlerin diyagonal matrisi
$\delta$	Piezoelektrik tabaka kalınlığı
$\eta_i$	Çatlak hasar lokasyonu
$\theta$	<i>i)</i> Çatlak hasarından dolayı kiriş boyunca lokal zayıflama, <i>ii)</i> Tabaka oryantasyon açısı
$\xi_i$	DVM' de lineer olmayan durumlarda eklenen yapay değişken
$\sigma_j$	Kırılan herbir modtaki gerilme
$\sigma_x$	<i>i)</i> Veri seti ortalaması, <i>ii)</i> Piezoelektrik aktüatörün kiriş üzerinde oluşturacağı eksenel gerilme
$\tau$	DVM' de iki düzlem arasındaki uzaklık
$\phi(x_k)$	DVM kernel fonksiyonu

## 1. GİRİŞ

Modern toplumların teknolojik olarak gelişmişlik düzeyleri, ağırlıklı olarak ürettikleri uçak, köprü, güç sistemleri, petrol platformları, binalar veya savunma sistemleri gibi yapılara bağlıdır. Aynı şekilde toplumların ürettiği yeni teknolojilerini sunabilmek ve tasarladıkları ürünlerin teknik olarak geliştirebilmelerine de bağlıdır. Son zamanlarda yeni ürün konusunda, ileri ve akıllı kompozitler de bu mühendislik yapıları içerisine girmektedir. Uçaklarda, otomobil gövdeleri, gemi inşaatında ve yüksek dayanım ve rijitlik gerektirecek durumlarda yapısal eleman olarak kullanılan polimerik kompozitler de bunlara örnek teşkil etmektedir. Mühendislik yapıları, bazen sıcaklık, yük ve gerilmelerin etkisi altında kalabilmektedirler Bu yapılarda, zamanla herhangi bir hasar oluştuğunda mal, zaman ve hatta bazı durumlarda can kayıplarına neden olabilmektedir. Son zamanlarda, mühendislik yapılarındaki hasarlardan dolayı oluşan faciaların artışlarına bağlı olarak, yapı sağlığı izleme gereksinimlerini de beraberinde getirmiştir. Bunları önlemek için, mühendislik yapıları için, geliştirilen her türlü hasar tespit, tanılama ve teşhis tekniklerine literatürde genel olarak Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) olarak adlandırılmaktadır (Farrar and Worden, 2013). Bunun yanında YSİ, yapının sağlık durumu hakkında bilgi veren ve bazı durumlarda, kalan ömrünü belirleyen bir proses olarak ta tanımlanabilmektedir. Bir başka ifadeyle YSİ, yapının güvenilirliğini artıran ve servis koşulları altında çalışan araçlarda, oluşabilecek maliyetleri azaltan bir sistem olarak ta tarif edilebilmektedir. YSİ nin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, mekanik, malzeme, istatistiksel yöntemler, sinyal işleme, nümerik modelleme ve elektronik gibi birçok multidisipliner bilimin anlaşılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Gopalakrishnan et al., 2011). YSİ sisteminin geliştirilmesinde, dikkat edilmesi gereken en önemli husus, yapıda ne tür değişimlerinin inceleneceğinin bilinmesi ve bunların tespiti için ne tür algoritmalarının kullanılması gerektiğidir (Balageas et al., 2006).

Deneysel YSİ algılamaları için, literatürde birçok sensörün kullanıldığı görülmektedir. İlerleyen bölümlerde bu sensörlerle ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Bunlardan bir kısmı, ivmeölçerler, piezoelektrik sensörler, yer



değiştirme sensörleri, birim şekil değiştirme sensörleri ve piezoelektrik sensörler şeklinde verilebilir. Bu araştırmada, ağırlıklı olarak ivmeölçerler ve piezoelektrikler kullanılmıştır.

Yapı sağlığı izleme, son zamanlarda özellikle uçak, inşaat ve makine mühendisliğinin temel çalışma alanlarından birisi olmuştur. YSİ'nin kullanılmasıyla, uçak sanayisindeki maliyetler de, en çok azalma olacağı beklenmektedir. Bilindiği üzere, uçak yapılarında oluşabilecek hasarlara bağlı olarak gelişen facialar çoğu zaman mal kayıplarına ve bazen can kayıplarına neden olabilmektedir. Sözü edilen bu kayıpların minimize edilmesi amacıyla, uçakların bakımları düzenli olarak yapılması gerekir. Bakım maliyetleri de, maliyet artışlarını beraberinde getirir. Hâlihazırda, ticari ve savunma uçaklarındaki maliyetlerin yaklaşık % 27'si bakım ve teşhis masrafları olarak harcanmaktadır. Ticarî ve askerî uçakların yapılarında, rijitliği ve dayanımı artırmak amacıyla kompozit malzemelerin bu yapılardaki kullanımları günden güne artmaktadır. Ancak, kompozit malzemelerin tabakaları arasındaki ara yüzey ve fiber kırılmaları gibi oluşabilecek hasarlar, klasik metal yapılara göre kompleks olduğundan, bunların önceden belirlenebilmesi zor olup, çoğu zaman da, tasarım süreçlerinin uzamasına neden olabilmektedir (Kessler, 2002). Bunun yanı sıra, kompozit malzemeler üzerinde YSİ tekniklerini uygulamak zordur. Bunun en önemli sebebi, malzeme anizotropisi ve hasarların daha çok dış yüzeylerde değil de, tabakalar arasındaki bölgelerde oluşmasından dolayıdır. Hâlihazırda, laboratuvar ortamında küçük geometriye sahip kompozit malzemeler için tahribatsız olarak X-radyografik ve C-Scan gibi yöntemler kullanılarak hasar tespiti yapılabilmektedir. Ancak servis şartlarında kullanılan kompozit yapılar için bu tür tekniklerin uygulanması mümkün değildir. Bunun yanı sıra Eddy-akım ve tek yönlü ultrasonik tekniği ile servis şartları altındaki kompozitlerde oluşabilecek hasarların belirleme hassasiyeti, metal malzemelere göre daha düşüktür.

Temel olarak YSİ sistemi, yapıda değişen parametreleri tespit eden bir sistem olarak tanımlanabilir. Bu parametreler, malzeme değişimi, katılık, sönümleme, kütle, geometrik değişim, sınır koşulları veya cıvata esnetilmesinden kaynaklanan etkileşim nonlineresitesi şeklinde olabilir.

Bu amaçla, YSI uygulamaları için bu tez çalışmasında yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

2. bölümde, yapı sağlığı izleme (YSİ) sisteminin temel tanımı yapılmış, YSI sisteminin mühendislik yapılarında kullanılması durumunda oluşturacağı avantajlar belirtilmiş, YSI sisteminin temel elemanları tanımlanmış ve buna bağlı olarak, YSI sisteminin temel basamakları detaylı olarak sıralanmıştır. Daha sonra, anlık YSI, anlık olmayan YSI, pasif YSI, pasif olmayan YSI'nin tanımlamaları yapılarak kullanım alanları belirtilmiştir. Bu bölümün sonunda da, YSI'nin ilgileneceği, hasarın tanımı yapılmış ve hasarın teşhisinde kullanılan temel aksiyomlar açıklanmıştır.

3. bölümde, akademik ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan YSI tekniklerinden, titreşim tabanlı hasar tespit yöntemleri, x-radyografik tekniği, birim şekil değiştirme enerjisi metotları, Eddy akım metotları, görsel muayene yöntemleri ve ultrasonik dalgalar yönteminin temel çalışma prensipleri tanımlanmış ve buna bağlı olarak kullanım alanları hakkında temel bilgiler verilmiştir.

4. bölümde, literatürde yaygın olarak kullanılan model tabanlı hasar tespit tekniğinin metodolojisi belirtilmiş, tekniğin uygulanacağı kompozit kirişe ait deneysel üretim prosedürü belirtilmiş, daha sonra YSI tekniği, iç bölgelerinde hasar olarak delaminasyon içeren kompozit malzemelere uygulanarak hasar tanımlamaları yapılmıştır. Hasar teşhislerinde kullanılan düzgün aralıklı metot (DAM) ile birim şekil değiştirme enerjisinin (BŞDE), deneysel ve nümerik veriler üzerinde nasıl uygulanacağı açıklanmış ve çözüm için nümerik yöntemde izlenen yol belirtilerek, deneysel ve nümerik yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra, hasar tespiti için başlangıçtaki hasarın bilinmesi durumu ile bilinmemesi durumları için, DAM ve BŞDE'nin uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar yüzey grafikleriyle verilmiştir. En sonunda da, genel olarak veri tabanlı YSI tekniğinde, uygulanan her iki algoritmanın iki farklı durum için hasar tespit hassasiyetleri araştırılmıştır.

5. bölümde, YSİ uygulamalarında kullanılmak üzere, invazif olmayan yeni vibro-haptik kooperatif insan-makine arayüz YSİ paradigmasının temel metodolojik konseptleri açıklanmış, motivasyon için böyle bir yaklaşımın neden yapılması gerektiği ayrıntılarıyla birlikte belirtilmiştir. Kompozit yapılardaki delaminasyon hasarının simülasyonu, kulenin bağlantı ekipmanlarında kullanılan cıvata esneme analogik benzetilmesiyle yapılmış, kule yapısı, kule yapısında kullanılan sensör ağ sistemi, veri alma ve deneysel sarsma tablasının titreşim hareketlerinin nasıl uygulandığı belirtilmiştir. Daha sonra, vibro-haptik kooperatif insan-makine arayüz YSİ paradigması için geliştirilen haptik deneysel donanımının tasarımı ve çalışma prosedürü belirtilmiş, insan-makine arayüzleri için geliştirilen grafik tabanlı arayüz yazılımlara ilişkin temel prensipler ve bunların kabiliyetleri belirtilmiş, vibro-haptik testinin uygulanma adımları detaylı olarak açıklanmış, katılımcıların haptik uyarımları ayırıklaştırabilmeleri için geliştirilen haptik ayırıklaştırma arayüzünün çalışma prensibi verilmiş, veri azaltma prosedürlerinde yaygın olarak kullanılan asal bileşenler analizine (ABA) ilişkin temel teorik bağıntılar verilmiş ve bunun akabinde ABA'nın ölçüm verileri üzerinde nasıl uygulandığı adım adım belirtilmiştir. Sonra, elde edilen verilerin haptik kodlarla nasıl gösterildiği belirtilerek bunların katılımcılar üzerinde ne çeşit uyarımlar la uygulandığı açıklanmıştır. Daha sonra, vibro-haptik insan-makine arayüz konseptinin katılımcılar üzerinde uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar, kontür grafikleriyle verilmiş, katılımcılardan farklı uyarım türleri için elde edilen sonuçlar arasında anlamlı ilişki olup olmadığı araştırılmış ve sonuçlar tablo, çubuk ve kontür grafikleriyle görselleştirilmişlerdir. Sonra, sınıflandırma tekniklerinde yaygın olarak kullanılan destek vektör makinelerine (DVM) ilişkin temel bağıntılar verilerek, YSİ ölçüm sonuçları üzerinde DVM'nin ikili sınıflandırma prosedürüyle ve kernel yapısında, lineer, 2. dereceden polinom, 3. dereceden polinom ve radyal tabanlı polinomları kullanılması durumunda DVM'nin sınıflandırma skorları araştırılmıştır. En sonunda, çoklu sınıflandırma işlemleri için, doğrulanma aşamasında, kernel yapısında lineer, polinom, radyal ve sigmoid kernellerine ilişkin parametrelerinin sınıflandırma sonuçlarına olan etkileri araştırılarak grafiklerle görselleştirilmiştir. Sınıflandırma performansı için DVM kernellerine ilişkin en iyi sonuçlar belirlenmiş ve en iyi parametreler bulunduktan sonra, çoklu karşılaştırma tekniği olan DVM, YSİ ölçüm verileri üzerinde uygulanmış, farklı kerneller için elde edilen sonuçlar, tablo ve çubuk

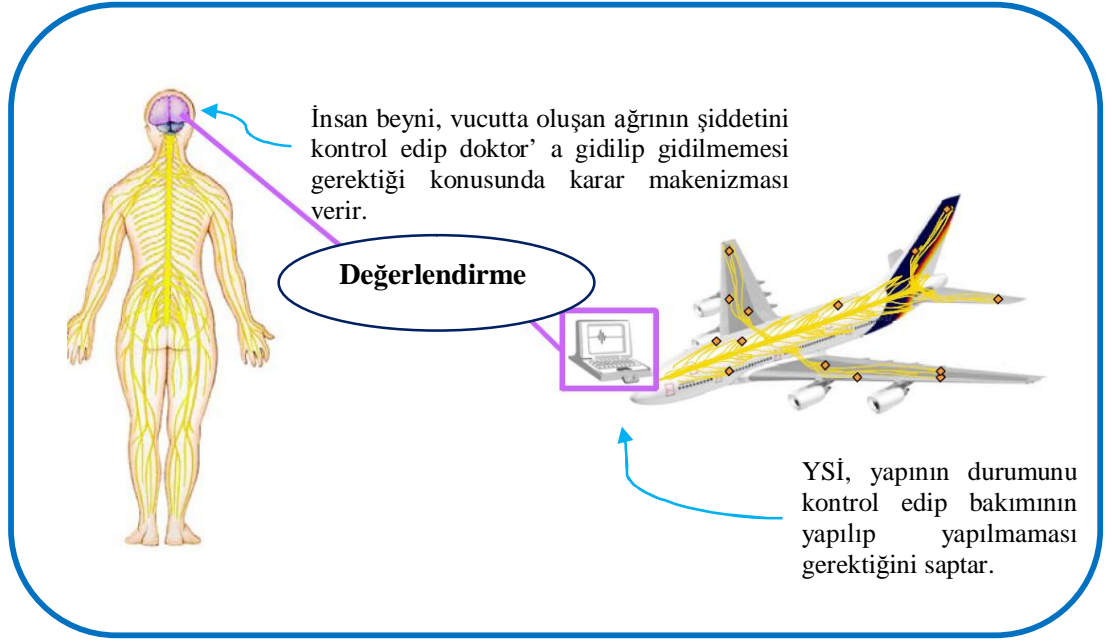
grafikleriyle görselleştirilmiştir. DVM'de farklı kernel kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar arasında anlamlı farklılıkların tespiti için istatistiksel testler uygulanmış ve YSI çözüm prosedüründe, insan, insan+makine veya sadece makine'nin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar, yüzdeler başarı skoru ve çözüm süresi açısından verilip sonuçlar irdelenmiştir.

6. bölümde, yapı sağlığı izleme sürecine bağlı olarak, bakım prosesini de içeren bütünlük YSI+bakım algoritmasının temel konseptleri verilmiş ve basit mesnetli çatlak içeren tabakalı bir kompozit kiriş üzerinde uygulanarak, algoritmanın hassasiyeti değerlendirilmiştir. Enine çatlak içeren tabakalı kompozit bir kirişe ait temel fonksiyonlar ve kompozit kirişin piezoelektrik aktüatörle modellenmesine ilişkin temel bağıntılar verilmiş, geliştirilen algoritmanın uygulanma prosedürü akış şemalarıyla belirtilmiştir. Sonra, deneysel olarak geliştirilen sistemin metodolojisi belirtilerek, piezoelektrik aktüatöre farklı voltajlar uygulanmasında, kompozit kirişin davranışları araştırılmış ve sonuçlar çizgi grafikleriyle görselleştirilmiştir. Teorik olarak, kompozit kirişteki değişken çatlak oranları, kuvvet miktarları, oryantasyon açıları gibi parametrelerinin kompozit davranışına olan etkileri araştırılmış ve bu değişken parametrelere bağlı olarak bakım için uygulanması gereken optimum piezoelektrik aktüatör voltajları belirlemiştir. Elde edilen sonuçlar tablo, çizgi, kontür ve yüzey grafikleriyle görselleştirilerek, veriler ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

## 2. YAPI SAĞLIĞI İZLEME

Teknolojide meydana gelen her yeni gelişme çoğu zaman doğadan, hayvanlardan ya da canlıların yapısından esinlenerek tasarlanmıştır. Buna en büyük örneklerden biri otomasyon sistemi diğeri de bilgisayar programlarıdır. Bütün canlıların genetik yapısında DNA vardır ve bu DNA'da canlının şeklini, işlevini ve bütün organlarının nasıl olacağını belirleyen kodlar mevcuttur ve bu kodlarda oluşabilecek herhangi bir değişme, canlının şeklinden fonksiyonlarına kadar her şeyini değiştirebilir. Bilgisayar programları ve otomasyon sistemleri de, işte bu DNA ve içinde bulunan kodlardan esinlenerek, belirli girişlere karşı çıktılar verilerek tasarlanmıştır. Canlılardaki sinir sistemi ve barındırdıkları reseptörler de, minyatür olarak mükemmel birer otomasyon sistemi olarak değerlendirilebilir. Son 20 yıldır, gerek akademik gerekse endüstriyel çalışmalarda, mühendislik yapıların da kendilerine özgü bir sinir sistemi olabileceği kanısı mevcuttur. Böyle bir sistemle güvenilirliğin çok artırılabileceği, yalnızca gerek duyulduğunda sistemlere bakım yapılabileceği, malzeme ve enerji kullanımında da çok daha etkin ve ekonomik katkılar olabileceği umulmaktadır. Biyomedikal çalışmalarında yapılan araştırmalara göre, insan derisinin bir santimetre karesinde, ağrı, basınç, sıcaklık veya soğukluğu algılayabilen binlerce sinir sensörleri bulunmaktadır. Her an, bu çok küçük algılayıcılar, durmaksızın, insanın durumu hakkında yaşamsal önem taşıyan bilgiyi alırlar ve her yana yayılan bir ağ içinden geçerek beyine aktarırlar.

Şekil 2.1'de verildiği üzere, insan makine analogisiyle, tıpkı insan sinir sistemindeki ağ gibi, modellenmiş elektronik bir ağ (kablosuzda olabilir), uçaklardan boru hatlarına, rüzgâr türbinlerinin pervanelerinden inşaat yapılarına, deniz altı gemilerinden gökdelenlere kadar, tüm teknik mühendislik yapılarının sağlık durumları hakkında bilgi vermeyi sağlayan sisteme "Yapı Sağlığı izleme" (YSİ) adı verilmektedir.



Şekil 2.1 İnsan ile yapının sinir ağları arasındaki analogi

YSİ yaklaşımları, erken bir aşamada, özellikle erişimi zor, önemli yerlerdeki zararları önlemek için delaminasyonları, çatlakları, korozyonları, cıvata esnemelerini, paslanmaları, vb öteki kusurları bulup ortaya çıkarıyor. Yapısal durum izlemede, geleneksel tahribatsız test yöntemlerinden farklı olarak, sensörler yapıya sıkıca tutturuluyorlar ve yapıyı sürekli, hatta günden güne değişen işlemler sırasında bile, izlenebiliyorlar. Özellikle ultrasonik tabanlı YSI'de yaygın olarak, mekanik enerjiyi elektriksel itmelere dönüştüren ya da tersini yapan, seramik piezoelektrikler (uygulandığında elektrik elde edilmesini sağlayan basınç) kullanılmaktadır. Bilindiği üzere, bir piezoelektrik ekipmanı, ya bir verici ya da bir alıcı gibi kullanılabilir. Bu eleman, aktif titreşim üretmek üzere, yapıyı uyarabilir ve yapıdaki titreşimleri kaydedebilir. Ultrason dalgaları, yapının tipine bağlı olarak, belirli bir örüntü (desen) yayılırlar. Tıpkı göle atılan bir taşın göldeki dalga örüntüsünü değiştirmesi gibi, çatlaklar ya da öteki kusurlar da bu dalga desenini değiştirirler. Günümüzde yapılan çalışmalar ekseninde, YSI sistemlerin, geleneksel test yöntemlerinin, en azından bir kısmının yerini alacağı kanaati mevcuttur. Belki de yapılara “duyumsamayı” öğretmek veya tersi durumda, insanın yapılardaki hasarı algılayabilmesi için çok fazla neden var. Böyle bir sistem, hem malzeme hem de enerji açısından, değerli kaynakların daha iyi kullanılmasına katkı yapacakmış gibi görünüyor. Bu katkılar, özellikle havacılık

sanayisinde, belki de uçak ağırlığının azaltılmasına bağlı olarak taşıyabileceği yüklerde artış görülebilir.

Sonuç itibarıyla mühendislik yapılarındaki hasar teşhisi için geliştirilen her türlü tanı ve stratejilerine yapı sağlığı izleme olarak tanımlanır. Önceki bölümde ifade edildiği gibi mühendislik yapılarındaki hasar, malzeme, geometrik lineer olmayan davranışlarından kaynaklanabilir. Bu kısımda, yapı sağlığı izleme sisteminin temel kuramları aşağıdaki gibi, alt başlıklarda verilmiştir.

## **2.1 Yapı Sağlığı İzleme Sistemlerine Neden İhtiyaç Duyulur?**

Birçok endüstriyel yapılarda kullanılan mühendislik malzemeleri, servis koşulları altında çeşitli yüklere maruz kalmaktadırlar. Yapıların servis koşullarında güvenilir bir şekilde çalışmalarını sağlamak veya bir başka deyişle yapılarındaki hasarları tespit etmek hayati derecede önem arz etmektedir. Halihazırda servis koşullarında çalıştırılan ekipmanlar düzenli aralıklarla bakımları yapılmaktadır. Yalnız bu ekipmanların bakımları sırasında aşağıda sıralanan problemlerle karşılaşılabilir.

- Bakım aralıkları bazen yüksek olabilir. Bundan dolayı küçük zaman aralıkları diliminde oluşan hasarlar zamanla büyüyebilir.
- Kritik yapısal elemanlara ulaşmak ve bu elemanların bakımlarını sağlamak bazen zor olabilir. Sökme, takma ve montaj işlemleri hem zaman, hem de maliyet artışlarına neden olabilir.
- Her ne kadar yapının sökülmesini gerektirmeyen tahribatsız muayene tekniklerinde kullanılan Eddy akım hasar tespit metodu kullanışlı gibi gözükse de, hassas ve uygun bir şekilde uygulanmadığı zamanlarda doğru sonuçlar alınmayabilir.
- Diğer tahribatsız muayene yöntemlerinin (x-ray, manyetik partikül gibi) uygulanabilmesi için yapıdaki tüm elemanların sökülmesi gerekir.

- Kompozit malzemelerden imal edilmiş yapısal parçaların içyapılarında oluşan hasarlar, hâlihazırda ultrasonik test gibi yöntemlerle belirlemek zordur.



a)

b)

Şekil 2.2 Havacılık ve inşaat mühendisliğinde karşılaşılan kazalar. a) 29 Nisan 1988 tarihinde karşılaşılan Aloha uçağı kazası, b) Injaka köprüsünün yıkılması.

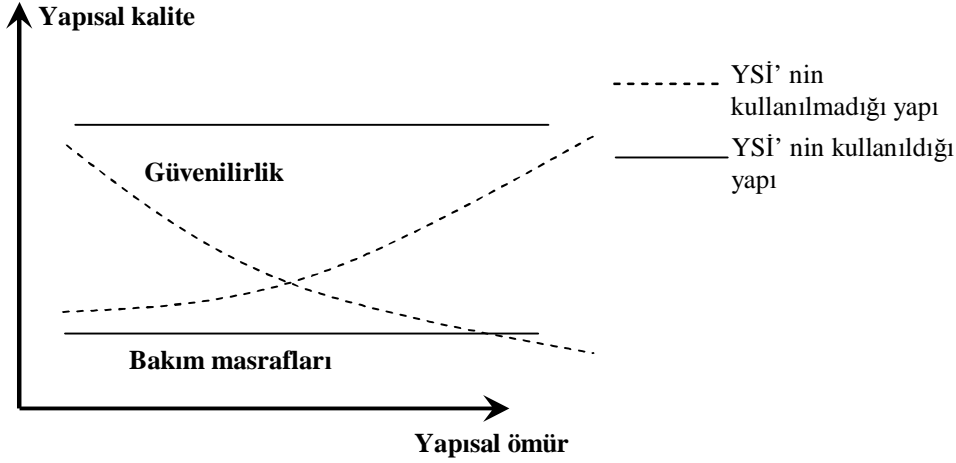
Yapı izleme sistemlerinin temel amacı, yapının emniyet ve güvenilirliğini artırarak bakım masraflarını azaltmaktır. Başarılı ve güçlü bir YSİ sisteminin geliştirilebilmesi için hassasiyeti yüksek sensörlere, aktüatörlere, iletişim sistemlerine, sinyal işleme tekniklerine ve güçlü hasar tespit tekniklerine gereksinim duyulur.

YSİ sistemleri, son zamanlarda yaygın olarak görülen kazalardan sonra üzerindeki araştırmalar ivme kazanmıştır. Örneğin, yapılan raporlarda, uçak alanında karşılaşılan, Alaho uçağının kazası, bakım aşamasında, korozyonun yeterince kontrol edilmediğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. İnşaat mühendisliği alanında, 1998 Temmuz ayında meydana gelen Injaka köprü kazası ise, yapının yetersiz konstrüksiyon kontrollerine bağlı olarak, eskimesinden dolayı kaynaklandığı belirtilmiştir (Şekil 2.2).

Özellikle uçak endüstrisinde, gerçekleşen kazaların nedenleri araştırıldığında bakım eksikliğinden veya düzgün bir şekilde bakımlarının yapılmaması durumuna bağlı olarak kazanın tetiklediği görülmüştür. Uçağın gövde kısımlarında oluşan hasarlar, % 14'lük bir oranla bakım eksikliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Goranson, 1997).



Bunun yanında yapının zayıflaması, yaklaşık olarak % 4'lük bir oranla kaza üzerinde etkisi olduğu belirtilmiştir. YSİ sistemlerinin havacılık endüstrisinde efektif olarak uygulanmaya başlamasıyla, uçak kazalarında yaklaşık % 10 değerlerinde azalma olacağı beklenmektedir (Kessler, 2002). Şekil 2.3'te verildiği gibi YSİ sisteminin kullanıldığı bir yapıda bakım masrafları ile güvenilirlik sabit kalırken, kullanılmadığı bir yapıda ise bakım masrafları artış gösterip, güvenilirliğin azaldığı belirtilmiştir (Balageas et al., 2006).



Şekil 2.3 YSİ sisteminin faydaları

Hâlihazırda, YSİ sistemlerinin havacılık yapılarında tam vaziyette kullanılmasıyla oluşturacağı ekonomik avantajlar, bu aşamada değerlendirmek biraz zordur. Çünkü kullanılan YSİ sistemi, maliyet açısından bazen yüksek olabilir.

Günümüzde, araçların tasarımları aşamasında belirli dizayn metodolojileri kullanılmaktadır. Örneğin, uçak araçlarının dizaynlarında; güvenilirlik-ömür, hasar toleransı ve şarta bağlı bakım olmak üzere üç metot kullanılmaktadır. Her bir metot, yapısal ve ekonomik anlamda, araçlara avantajlar sağlamaktadır. Güvenilirlik-ömür dizaynı, 1945 yılında Miner tarafından önerilip, aracın ilk tasarımı aşamasında uygulanarak, daha sonra değiştirilmesi gereken parça üzerinde çalışma ömürlerinin tayini için istatistiksel yöntemler kullanılarak belirlenir (Suresh, 1998). Bu yaklaşımda, üretilen parçalar analiz edilip, daha sonra servis şartlarındaki maruz kalacağı yükler uygulanarak ömürleri belirlenir. Bu ömür, daha sonra güvenilirlik katsayısı ile modifiye edilir. Güvenilirlik katsayısı

genellikle 2 ile 4 arasında değişebilmektedir (Amer, 1988). Daha sonra, tekrar analiz edilerek yorulma ömürleri tahmin edilir. Güvenilirlik-ömür metodolojisinin sağladığı avantajlardan birisi, test edilecek eleman üzerinde çok basit bir model kullanılarak yapılır. Bunun sonucunda da, parça üzerinde harcanacak muayene süresinin ve maliyetlerin azalmasına olanak tanır. Bunun yanında, özellikle muayenesi yapılacak zor olan elemanların tamirinde veya bunların değiştirilmesi gerektirdiğı durumlar için avantajlar sağlamaktadır. Bazen güvenilirlik katsayısının belirlenmesinde oluşabilecek belirsizliklerden dolayı parçada, hasarın oluşacağı veya oluşamayacağı bilgisi tam olarak belirlenmemektedir. Bu yüzden, bazı durumlarda, gerçekte parça hasara uğramadığı halde, tasarım kriterlerindeki güvenilirlik-ömür katsayısından dolayı parça hasara uğramış gibi veriler alınabilir. Bu durum dezavantaj olarak görülmektedir (Lee et al., 1997). Literatürde ortalama ve minimum ömür değerleri arasındaki farkın fazla olduğunu gösteren bazı çalışmalar mevcuttur (Suresh, 1998; Nyman, 1996; Michael et al., 1999). Güvenilirlik-ömür hasar toleransları ayrıntılı olarak, Amer KB'ye ait yorulma kitabında bulunabilir (Amer, 1988).

Hâlihazırda, aracı oluşturan elemanlarda oluşabilecek kusurlar, hasar tolerans model yaklaşımlarıyla dizayn edilmektedir. Bu metot, uzun zamandan beri uçak yapılarının hasar güvenilirliğinin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Ancak sıklık ve kontrol döngülerinde oluşan problemlerden dolayı, tam efektif bir yöntem olarak kabul edilmemektedir. İlerleyen yıllarda, şarta bağlı bakım sistemlerinin diğer yöntemlere nazaran daha avantajlı olacaklarına ilişkin kanaat hâkimdir (Balageas et al., 2006).

Şarta bağlı YSİ sistemlerinde mühendislik yapılarında uygulanmaya başlamasıyla araçların, belirli periyodik aralıklarda bakımlarının yapılmasına gereksinim duyulmadan, YSİ sisteminden elde edilen verilere göre, bakımlarının yapılacağı öngörülmektedir.

Mühendislik yapılarının bakımları genellikle belirlenen aralıklarda periyodik olarak yapılmaktadır. Bunlara en iyi örnek olarak, uçaklar belirli bir uçuş süresini tamamladıktan sonra hangarda bekletilerek bakımları yapılır. Tanılama işlemleri de, elemanların uçaktan sökülmesiyle gerçekleştirilir. Sonuç

olarak, her ne kadar mühendislik yapıları, maruz kalabilecekleri maksimum yüklere göre tasarlandıkları ve buna bağlı bakımları yapıldığı halde, metalik malzemelerde dikey ve yatay çatlaklar, kompozit yapılarda ise fiber kırılmaları, matris çatlakları ve delaminasyon şeklinde hasarlar oluşabilmektedir. Bu çeşit hasarlar, yapının bütünlük açısından davranışını bozduğundan oluşabilecek hasarların izlenilmesi gerekmektedir.

## 2.2 Yapı Sağlığı İzleme Sisteminin Temel Elemanları

Yapı sağlığı izleme sistemi, temel olarak yazılım ve donanım olmak üzere iki elemandan oluşmaktadır. Yapıya iliştirilen her türlü ekipman (sensör, aktüatörler) donanım kategorisi içerisine girmektedir. Sensörlerden alınan verilerin işlenmesi, filtrelenmesi, normalizasyonu, hasar modellemeleri ve her çeşit hasar tespit algoritmalarının geliştirilmesi yazılım kısmında yapılmaktadır. YSİ sisteminin güçlü olabilmesi için sensörlerden anlık veya belirlenen periyodik aralıklarda veri alınabilmesi gerekir. Bir başka deyişle, başarılı bir YSİ sistemi için kullanılacak sensörlerin algı seviyelerinin hassas olması gerekir. Sensörler genel olarak aktif veya pasif olmak üzere ikiye ayrılır. Mesela, şekil değişimlerinin izlenilmesinde kullanılan birim şekil değiştirme sensörleri, sadece veri alınmasına olanak tanıdıklarından pasif sensörler sınıfına dâhil edilmektedir.

Günümüzde malzeme alanındaki ilerlemeler sensör teknolojisine de yansıyor YSİ sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek hassasiyette sensörler üretilmektedir. Bunlara örnek olarak malzeme teknolojisindeki ilerlemeler güçlü PZT ve PVDF sensörlerinin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Piezoelektrikler, aynı anda hem aktüatör hem de sensör olarak kullanılabilirlerinden aktif sensör sınıfına dâhil edilmektedirler. Yaygın olarak kullanılan piezoelektrik sensörler, Poly Vinyle Dy Floride (PVDF), piezoseramik sensörleri (Zirkonat titanat malzemesinden üretilir ve daha çok PZT olarak adlandırılır) veya fiber optik sensörleri, YSİ sisteminde aktif olarak kullanılan sensörlerdir. Bunların yanında TERFENOLD-d tipi (magnetostrictive malzemesinden üretilmektedir) ve piezoelektrik yamalarında (P-876 DuraAct Patch Transducer) YSİ çalışmalarında aktif sensör olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında piezoelektronik teknolojisine sahip sensörlerle klasik MEMS tabanlı

sensörlere göre daha hassas veriler elde edilebilmektedir. Yalnız PZT teknolojisine sahip sensörlerin maliyetleri daha fazladır. Bunun yanında silikon teknolojisindeki ilerlemeler YSİ sistemlerine yansımıştır. Bunlara en iyi örnek olarak fiber optik sensörlerdir. Hâlihazırda, fiber optik sensörler birçok uçakta oluşan şekil değişimlerinin izlenmesinde kullanılmaktadır. Bunun yanında kablosuz sensör teknolojisinde yapılan gelişmeler de, etkili YSİ sisteminin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Kablosuz sensörlerin, YSİ’de kullanılmadan önce etki aralıklarının belirlenmesi gerekir. Bu tarz sensörler, özellikle inşaat ve uçak yapılarında kullanımları elverişli olarak görülmektedir.

Sensörlerden alınan çıktılar sensör tipine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, yapıda fiber optik sensörleri kullanılmışsa (ışığın dalga boyundaki değişim, yapıdaki şekil değişimine bağlıdır) çıktı olarak şekil değişimi verileri alınır. Eğer YSİ sisteminde piezoelektrik sensör veya ivmeölçerler kullanılmışsa çıktı olarak voltaj değerleri alınır. Daha sonra, ivmeölçerden alınan volt değerleri üreticiden tedarik edilen hassasiyet katsayısıyla ölçeklendirilerek ivme değerleri elde edilir. Son zamanlarda YSİ sisteminde kullanılmak üzere kablosuz ve yapıya iliştilirmeye gereksinim duymayan sensörlerde geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak yaygın olarak kullanılan taramalı lazer Doppler vibrometresi verilebilir. Bu çeşit yüzeye yapıştırılmaya gereksinim duymayan sensörlerin en önemli özellikleri, incelenmesi istenilen bölge, istenildiği kadar değiştirilebilir. Dolayısıyla birden fazla sensör ve irtibatlandırma kablolarına gereksinim duyulmadan hasar tespiti yapılabilir.

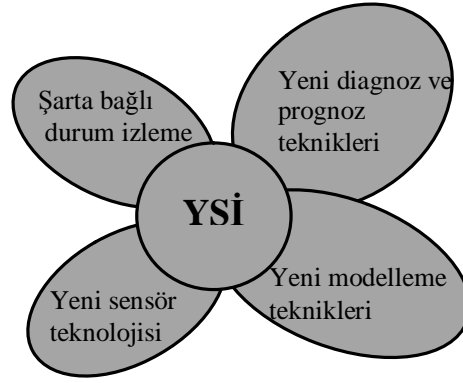
Yapı sağlığı izleme sisteminin konseptinde diağnoz ve prognoz olmak üzere iki kavram, yaygın olarak kullanılmaktadır. Diağnoz, yapıdaki tüm elemanların sağlık durumları hakkında bilgi verir. Dolayısıyla yapıda eğer hasar belirleme prosesleri yapılmak istenirse, yapı öncelikle diağnoz ile teşhisi yapılır. Bir başka deyişle yapıdaki hasarın lokasyonu ve büyüklüğünün belirlenmesi için geliştirilen her türlü paradigma diağnoz sınıfı içerisine dâhil edilmektedir. Bunun yanında diağnoz prosedürü aktif diağnoz ve pasif diağnoz olmak üzere iki farklı kategoriye ayırt etmek mümkündür. Pasif diağnoz metodolojisinde pasif sensörler kullanılır. Örneğin, yapının sağlık durumunun değerlendirilmesinde pasif sensör olarak kullanılan birim şekil değiştirme sensörlerinden elde edilen veriler pasif diağnoz

kuramıyla değerlendirilir. Burada, dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri, pasif sensörlerden alınan verilerle hasar değerlendirme işlemi, aktif sensörlere göre daha kısıtlı olduğudur. Çünkü yüksek frekanslardaki hassasiyetleri bazen düşük olabilir. Prognoz ise kırılma mekaniği kriterleri prensiplerinden yararlanılarak yapının kalan sağlıklı ömrünü tespit eder. Daha önce belirtildiği üzere diaagnoz tekniğiyle yapıdaki hasarın lokasyonu ve büyüklüğü belirlenir. Daha sonra uygulanacak prognoz ile tespit edilen hasarla, yapının kalan ömrü tanınır. Dolayısıyla sözü edilen bu iki bütünleşik prosesle YSİ sistemi, tahribatsız muayene yöntemlerinin bir üst versiyonu olarak kabul edilmektedir (Gopalakrishnan et al., 2011). Yapı izleme sistemlerinin tahribatsız muayene tekniklerinden ayrılan taraflarından bir kısmı; incelenecek yapı başlangıçta optimize edilen sensörlerle donatılması, veri iletimi, hesaplamalı nümerik modellemeler, sinyal işleme ve özellik çıkartma vs. şeklinde verilebilir.

Sonuç olarak YSİ sistemi aşağıda sıralanan ekipmanları kapsamaktadır.

- YSİ sisteminin uygulanacağı yapı
- Sensörler (Yapıya iliştilererek veya iliştilerilmeden uzaktan algılayabilen sensörler)
- Veri alma sistemleri
- Sinyal işleme sistemleri
- Hasar modelleme ve hasar tespit algoritmaları
- Veri kaydı ve veri saklama mekanizmaları
- Veri yönetimi

Başarılı bir YSİ sisteminin inşa edilebilmesi için mekanik, malzeme, elektronik, istatistik gibi birçok multidisipliner bilimin anlaşılması gerekir. YSİ sistemine ilişkin temel elamanlar Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 YSI sisteminin temel elemanları

Nümerik modelleme, YSI sisteminin önemli bir parçasını teşkil etmektedir. Çünkü sensörlerden elde edilen veriler hasarın lokasyonu ve büyüklüğü hakkında bilgi vermezler. Sözü edilen bu veriler, öncelikle gelişmiş matematiksel araç ve proseslerinden geçirildikten sonra yapının sağlık durumu yorumlanır. Dolayısıyla geliştirilen algoritmalar öncelikle sanal nümerik tekniklerle test edilip daha sonra gerçek sistemler üzerinde uygulanır. Nümerik metot olarak, en çok sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni karmaşık geometri yapıları ve komplike yapıdaki hasarlar kolaylıkla modellenmesidir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan birisi, nümerik modelleme aşamasında bazı giriş parametrelerinin dikkatli olarak tanımlanması gerekir. Buna örnek olarak ultrasonik yöntemlerle yapıdaki küçük bir hasarın tespiti yapılmak istenildiği durumda, yüksek frekanslarda dalga boyunun yakalanabilmesi için sonlu elemanlar modelinin yeterli düzeyde elemana bölünmesi gerekir. Dalganın yakalanabilmesi için teorik olarak, dalganın en az 8-10 eleman içermesi gerekir. Bunun yanında modelde çok fazla elemanın kullanılması durumunda çözüm süresinin uzayabilmesine neden olur. (Gopalakrishnan et al., 2011). Son zamanlarda ultrasonik yöntemlerle hasar tespitinde sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasına ek olarak spektral eleman yöntemi de kullanılmaktadır.

Modelleme, hasar modellemesi ve hasar tespit algoritmaları olmak üzere iki kısmı içermektedir. Metalik malzemelerde, hasar genellikle yatay ve dikey çatlaklar şeklinde oluşur. Metallerde yaygın olarak oluşabilen bir diğer hasar tipi de korozyondur. Korozyon, birçok tip ve konfigürasyonda olabilir. Nümerik olarak, çukurcuk korozyonunu modellemek diğerlerine nazaran daha zordur. Komplike hasar konfigürasyonlarının, nümerik olarak modellenmesinde genellikle

basitleştirilmiş matematiksel araçlarının geliştirilmesinde fayda vardır. Kompozit malzemelerde oluşabilecek hasar tipleri metalik malzemelere göre daha fazladır. Kompozit malzemelerde yaygın olarak karşılaşılan hasar tipleri, fiber kırılması, matris çatlakları ve tabaka ayrışmalarıdır. Bunun yanında bu tarz yapılarda üretim aşamasında içerdikleri yüksek poroziteden dolayı nemi absorbe edip iç bölgelerinde hasarlar oluşabilir.

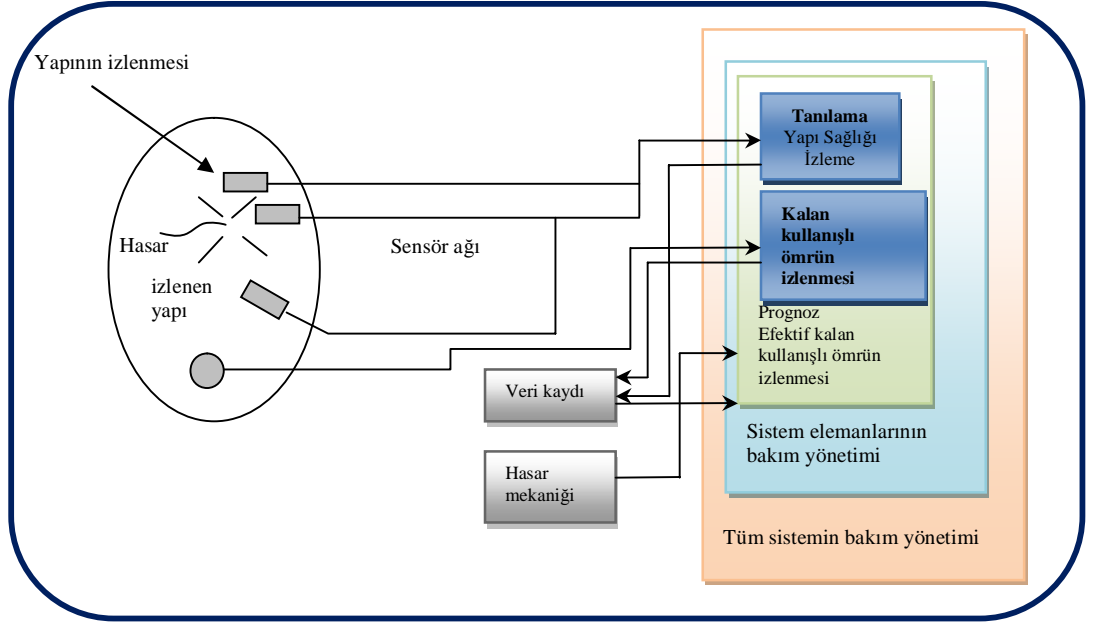
YSİ çalışmalarında kullanılan nümerik modellemenin sahip olması gereken önemli esaslardan birisi, sayısal çözücü içerisinde gömülen hasar tespit tekniğinin güçlü olması gerekir. Bunun yanında, uygulanacak hasar belirleme metodolojisinin deneysel olarak elde edilen gürültülü sinyaller üzerinde de uygulanabilmesi gerekir. YSİ yaklaşımlarında, hasar tespitinin yapılabilmesi için, yapının başlangıçtaki hasarsız durumu bilinmesi gerekir. Çünkü tespit aşamasında, hasarlı ile hasarsız arasında karşılaştırma yapılarak yapının hasar durumu belirlenir. Bazı durumlarda, alınan veriler komplike olduğundan mevcut verilerle hasar yorumlanabilmesi için veri azaltma veya silme prosedürleri kullanılır.

### **2.3 Yapı Sağlığı İzleme Sisteminin Temel Basamakları**

Yapı sağlığı izleme sistemi, yapıya donatılan sensörlerden veri alınıp, akabinde verilerin işlenmesiyle hasarı belirleyen tersinir bir yöntem olarak adlandırılabilir. Böylece, sistemin davranışı belirlenir. YSİ sisteminin temel basamakları aşağıdaki maddelerde verilmiştir (Doebing et al., 1996).

1. Yapıdaki hasarın belirlenmesi
2. Hasar bölgesinin belirlenmesi
3. Hasarın büyüklüğünün belirlenmesi (Diagnoz)
4. Hasarın büyümesinin engellenebilme ve kontrol edilebilme olasılığının belirlenmesi
5. Yapının kalan ömrünün belirlenmesi (Prognoz)

Temel YSİ sistemine ilişkin şema detaylı olarak Şekil 2.5’de verilmiştir. 1. basamakta, yapıya ilişkin bazı parametreler zamana bağlı olarak izlenip sağlık durumu belirlenir. Sözü edilen bu parametreler, şekil değiştirme enerjisi, temel doğal frekanslar, faz bilgisi veya sistemin katılık değişimi olabilir. Titreşim tabanlı hasar tespit tekniklerinde, en çok yapıdaki doğal frekans değişimi incelenir. Çünkü rijitlik değişimleri, yapının doğal frekansının değişmesine neden olur.



Şekil 2.5 Temel yapı sağlığı izleme sistemi

Yapının doğal frekanslarında eğer bir değişiklik varsa yapının herhangi bir bölgesinde bir değişiklik olduğu kanaatine varılır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan birisi, sistemin doğal frekansının değişimlerinin belirlenebilmesi için sistemde yeterli düzeyde rijitlik değişimleri oluşabilmesi gerekir. Çünkü bazen lokal bölgelerdeki minör rijitlik değişimleri sistemin global rijitlik değişimi üzerinde çok az tesir eder. Dolayısıyla sözü edilen bu lokal bazda oluşan minör rijitlik değişimleri, deneysel ekipmanlarla belirlemek bazen zor olabilir. Bunlara örnek olarak anizotropik davranış gösteren kompozit levhaların içyapılarındaki hasarlar yapının global bazda rijitliğini çok az değiştirir, hatta çoğu zaman ihmal edilebilecek değerlerdedir. Dolayısıyla deneysel olarak ölçülen ilk birkaç doğal frekansların analizleri yapılmasıyla, hasarın belirlenmesi oldukça güçtür. Böyle durumlarda, yüksek frekansların izlenmesi daha yararlı olacaktır. Ama çoğu zaman titreşim tabanlı hasar tespit teknikleriyle yüksek frekanslar



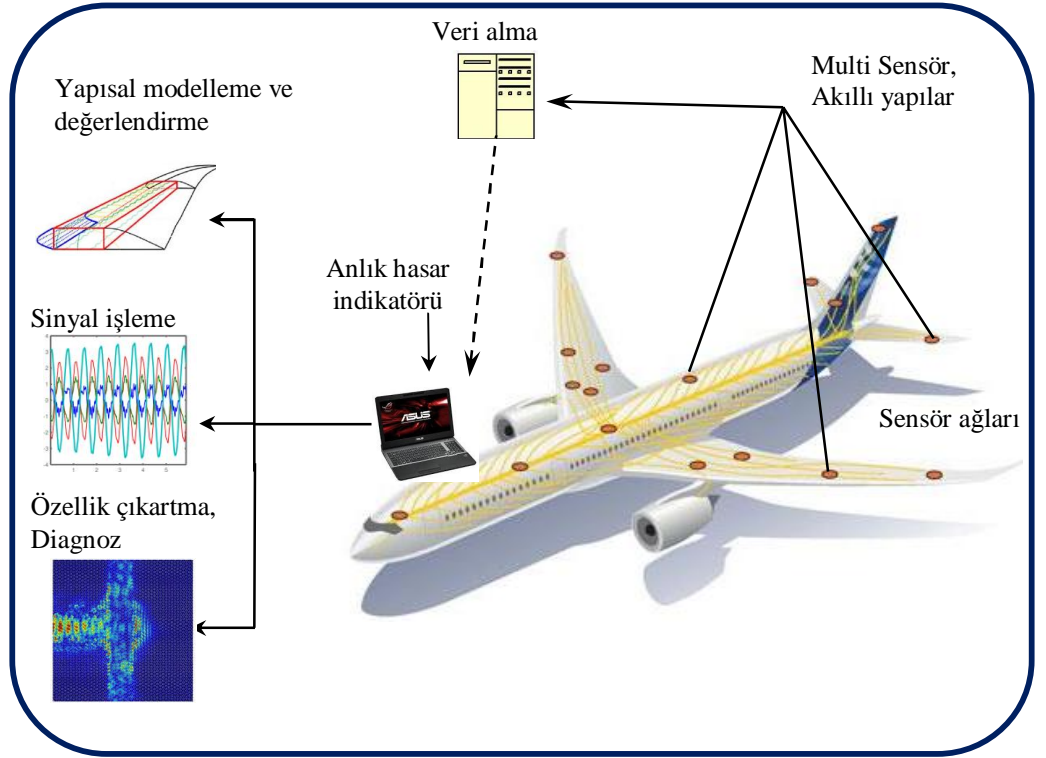
ölçülemiyor. Bunların üstesinde geçmek için bir başka deyişle yapıdaki küçük hasarların tespitinde dalga ilerlemelerinde dayalı ultrasonik YSİ sistemleri alternatif olarak kullanılabilir.

2. basamaktaki proseslerin uygulaması ilk basamağa göre daha zordur. Çünkü bu adımda sisteme verilen aktüatörlerin giriş verileri ile sistemde yer alan sensörlerden alınan çıkış verilerinin bilinmesi gerekir. Ultrasonik tabanlı hasar belirleme tekniğinde, aktüatörler yüksek frekansta triger edilip sensör verilerinden ölçülen sinyallerdeki yansımaların dalga hızları ile varış süreleri değerlendirilerek yapının durumu yorumlanır. Ancak birçok uygulamada, dalgalar yapının köşe ve irtibatlandırma noktalarından yansıdığından hasarın değerlendirilmesi zorlaşabilir. Dolayısıyla yapıya iliştirilen aktüatör ve sensörlerin konumları, başlangıçta iyi bir şekilde optimize edilmesi gerekir. Buna ek olarak, sensörlerden alınan sinyaller gürültü içerebilirler. Böyle durumlarda, yani kompleks gürültü içeren sinyallerden tam olarak hasarın lokasyonu belirlenemeyebilir. Hatta bazı zamanlarda bu gürültüler, hasarı maskeleyebilir. Ultrasonik yöntemlere dayalı olarak sağlıklı bir YSİ sisteminin geliştirilmesinde, yapının sağlıklı durumu yani hasara uğramamış başlangıçtaki durumu bilinmeden yapıdaki hasarı belirleyebilen algoritmalar başarılı olarak kabul edilmektedir.

2. basamakta hasarın lokasyonu belirlendikten sonra 3. adım, mevcut hasarın büyüklüğünü belirlemeye yöneliktir. Eğer hasar çatlak şeklindeyse, metallerde çatlak ile ilgili gerilme şiddet faktörü (GŞF) veya birim şekil değiştirme dağıtma oranı (BŞDDO) parametrelerinin hesap edilmesi gerekir. Eğer sözü edilen bu parametrelerden biri, eşik değerine ulaşması durumunda çatlağın ilerleyeceği anlamına gelmektedir. Hâlihazırda, PZT sensörlerden alınan voltaj sinyalleri GŞF parametresine karşılık gelecek şekilde korelasyonu yapılarak çatlağın büyüklüğü belirlenir (Gopalakrishnan et al., 2011). Burada, çatlağın ilerleme prosesinin engellemesi kompozit yapılarda uygulaması, metalik malzemelere göre daha güçtür. Çünkü kompozit malzemelerde tabakalar arasındaki delaminasyon şeklindeki hasarlar çok hızlı bir şekilde ilerleyebilir. Bu gibi durumlarda yani delaminasyonun ilerlemesini engellemek için genellikle kompozit yamalar kullanılmaktadır. (Baker, 1984; Baker and Jones, 1988; Baker, 1984).

## 2.4 Anlık Yapı Sağlığı İzleme

Anlık YSİ sisteminin temel konsepti temel olarak Şekil 2.6’da verilmiştir. Özellikle servis koşullarındaki araçlar için anlık YSİ elverişlidir. Anlık YSİ’de birçok sensör kullanılmaktadır. Burada, sensörler birbirleriyle ağlarla iletişim halinde tasarlanarak veri alımları yapılır. Genel olarak sensör ağları, insanın sinir sistemine benzetilmektedir. Sensör ağ verileri, harici işlemcide değerlendirilerek lokal bazda oluşan hasarların izlenilmesinde ve global bazda da yapı bütünlüğünün izlenilmesinde kullanılır.



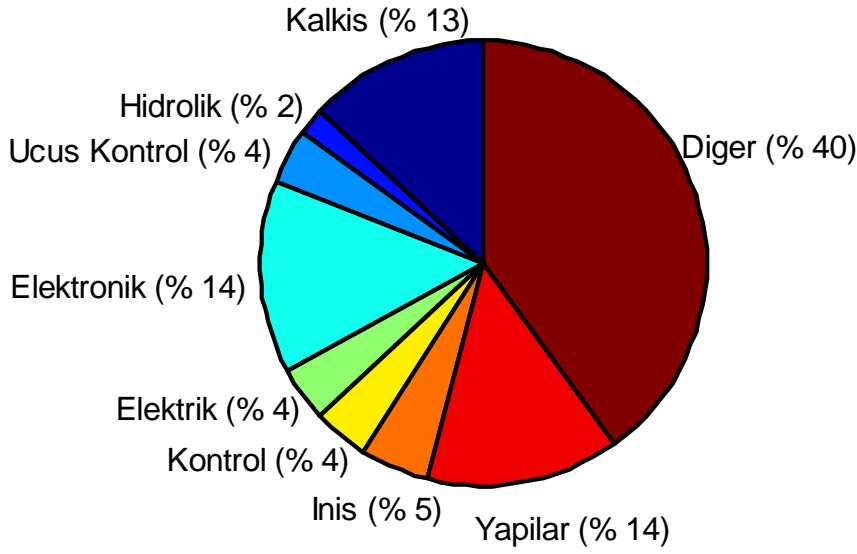
Şekil 2.6 Anlık yapı sağlığı izleme sisteminin temel konsepti

YSİ tekniğinin konvansiyonel tahribatsız muayene yöntemlerinden farkı, yapının içine veya yüzeyine iliştirilen sensörler, sıkıca tutturulup sürekli olarak yapının değerlendirilmesine olanak tanmasıdır ve alınan veriler kablosuz olarak harici sistemlere aktarılabilme özelliğini taşımasıdır. Tüm bu proseslerin gerçekleştirilebilmesi için birçok araçtan faydalanılması gerekmektedir. Güçlü ve anlık YSİ sisteminin tasarlanmasında etki alanı geniş bir tele metrik sisteminin kullanılması gerekir. Hâlihazırda anlık ve kablosuz YSİ sistemlerinde karşılaşılan en büyük problemlerden birisi yapıya iliştirilen sensörlerin çalışması için gereken gücün tedarik edilebilmesinde karşılaşılan zorluklardır. Bu gibi durumlarda

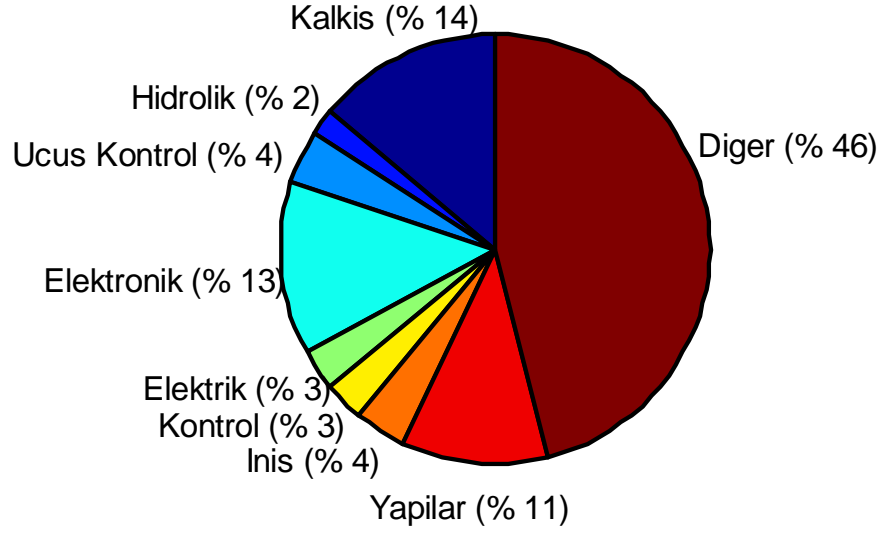
piezoelektrik ve termoelektrik jeneratörler veya güç tedarikinde kullanılmak üzere geliştirilecek her türlü teknoloji YSİ sistemlerine katkı sağlayacaktır.

## 2.5 Anlık Olmayan Yapı Sağlığı İzleme

Geliştirilecek YSİ sistemi, anlık veriye ihtiyaç duymuyorsa bu sisteme anlık olmayan yapı sağlığı izleme olarak adlandırılır. Günümüzde bu metot, yaygın olarak inşaat ve uçak yapılarına ilişkin bakım masraflarını azaltılmasında kullanılır. Çünkü uçakların bakımları masraflı olup, eskimelerine paralel olarak oluşacak maliyetler de artmaktadır. Ticari bir uçak ile ilgili maliyet dağılımlarına ilişkin eylem masraf dağılımları ve bakım aşamasında iş gücü dağılımları sırasıyla Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de verilmiştir (Chang, 2009, 2011, 2013). Bu kapsamda, YSİ sisteminin devreye girmesiyle bakım masraf ve periyotlarının azalması beklenmektedir.



Şekil 2.7 Uçak yapılarındaki bakım eylem masraf dağılımı

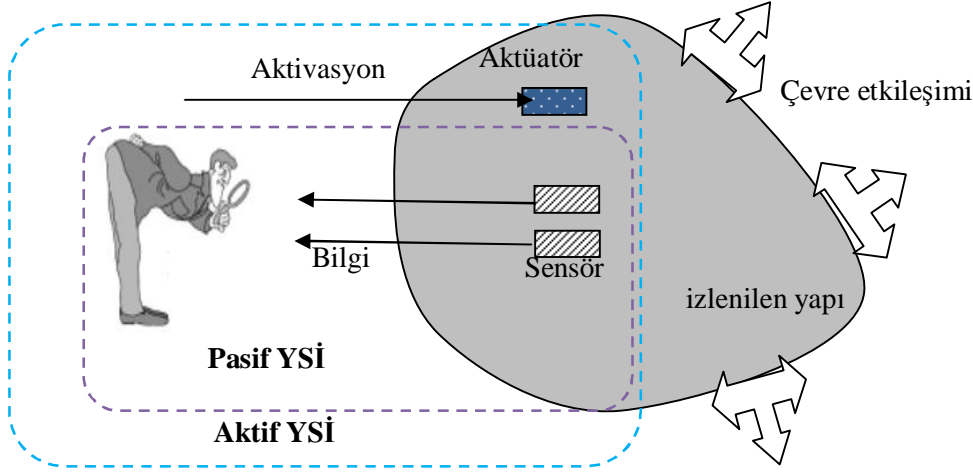


Şekil 2.8 Uçak yapılarında, bakım aşamasındaki insan işgücü masraf dağılımı

Anlık YSİ sistemi için gerekli olan tüm teknolojiler anlık olmayan YSİ sisteminde de gerekmektedir. Her ne kadar anlık olmayan YSİ sisteminde, anlık olarak veri gerektirmediği halde, burada da inovatif hasar tespit mekanizmalarının geliştirilmesinde fayda vardır. Hâlihazırda, uçaklara yönelik kompozit aksamalarının bakım ve durum değerlendirilmelerinde, yapıya bütünleşik olmayan taramalı lazer dopler vibrometresinden elverişli bir şekilde faydalanılmaktadır. Bu gibi tekniğin kullanılmasıyla çok büyük alana sahip yapılar kısa süre içerisinde izlenip yapının sağlığı tanılanmaktadır. Ancak, bazı durumlarda anlık olmayan YSİ ile yapının sağlık durumunu belirlemek için sensörlerden alınan veri komplike olmaktadır. Bundan dolayı, verilerin işlenmesinde güçlü veri işleme, azaltma ve filtreleme metodolojilerinin geliştirilmesi gerekir. Örneğin yaygın olarak anlık olmayan YSİ sistemlerinde kullanılan puls-akım metotları küçük geometrili yapılarda başarılı bir şekilde kullanılabilirken, büyük yapılarda uygulanabilmeleri için bu tekniğin geliştirilmesi gerekir. Bu gibi metodolojilerinin geliştirilmesi ile uçak yapılarında kullanımı yaygın olarak artan kompozit malzemelerin yapısal durumlarının tanılanmasında katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak başarılı bir YSİ için gelişmiş hatasız donanım ve yazılım araçlarının geliştirilmesi gerekir.

## 2.6 Pasif ve Aktif Yapı Sağlığı İzleme

Yapı sağlığı izleme, tahribatsız hasar belirleme yöntemlerinde olduğu gibi aktif veya pasif YSİ olarak iki şekilde kategorize edilebilir. Pasif ve aktif YSİ ile ilgili şema Şekil 2.9'de verilmiştir.



Şekil 2.9 Pasif ve aktif YSİ sistemi (Aktif YSİ’de hem aktüatör hem sensör kullanılır. Pasif YSİ’de sadece sensör kullanılır.)

Eğer yapının değerlendirilmesinde sadece yapıya iliştirilen sensörlerden yararlanılmışsa, buna pasif YSİ denilmektedir. Pasif YSİ, tahribatsız muayene yöntemlerinde kullanılan akustik emisyon tekniğinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dupont et al., 2000; Staszewski et al., 1999). Akustik emisyon da, yapıya iliştirilen sensörler yardımıyla hasarın ilerleme akustiğinin tanınmasıyla hasar belirlenir. Örneğin kompozit malzemelerde yaygın olarak karşılaşılan fiber kırılmaları bu yöntemle tespit edilebilir. Pasif YSİ sistemleri, genellikle operasyonel yükler altındaki yapılara uygulanmaktadır. Bunlara örnek olarak, köprü yapıları trafik yüklerine, bina yapıları rüzgâr ve zemin sarsma yüklerine, uçaklar ise rüzgâr yüklerine maruz kalarak aktifleştirilirler. Operasyonel ortamlarda çalışan yapıların yükleri deterministik olmadığından random olarak kabul edilir. Birçok YSİ sisteminde yapının, titreşim yükler altındaki fiziksel davranışının elde edilmesiyle sağlık durumu belirlenir. Bazı durumlarda sistemi aktifleştiren yükler deterministik olmayıp beyaz gürültü içerirler. Bu gibi durumlarda, stokastik yöntemler uygulanarak gürültü kısımları ham sinyallerden çıkartılır. Bu yöntemlerin uygulanmasında en çok rastgele eksiltme tekniği (random decrement technique (RDE) ve çapraz korelasyon (cross

corelation) fonksiyonunun kullanılmasıyla sisteme ilişkin serbest yanıt bozuklukları tahmin edilir (Lee et al., 2002). Çapraz korelasyon fonksiyonu kullanılarak sistemin doğal frekansı, sönümlenme oranı ve mod şekilleri gibi parametreler hesaplanır. Belirlenen parametrelerle hasarın lokasyonu ve büyüklüğü tespit edilir.

Aktif YSI'de hem aktüatörler hem de sensörler kullanılır. Aktif YSI tekniklerinde, yaygın olarak dalga ilerlemeye dayalı ultrasonik yöntem kullanılır (Paget et al., 2004). Sistem temel olarak tahribatsız muayene tekniklerine benzemektedir. Aktif YSI'nin tahribatsız muayene tekniklerinden farkı, yapıda aynı anda farklı sensör ve aktüatörlerin kullanılmasına olanak tanınmasıdır. Örneğin aktifleştirici olarak piezoelektrik yamalar, sensör olarak fiber optik sensörler kullanılabilir veya aktifleştirici ve algılayıcı olarak, aynı anda piezoelektrikler kullanılabilir (Giurgiutiu, 2003).

## 2.7 Hasarın Tanımlanması

Genel olarak, mevcut sistemin çalışma performansını etkileyen kasıtlı veya kasıtsız olarak oluşan her türlü değişiklik hasar olarak değerlendirilir. Çalışma şartlarındaki yapıların barındırdıkları hasarlar için önlem alınmaz ise zamanla bu hasarlar büyük facialara neden olabilirler (Farrar and Worden, 2013). Bunun yanında, yorulma veya korozyondan dolayı oluşmuş hasarlar da zamanla büyüyebilirler. Bazı durumlarda hasarlar ani olarak oluşabilir. Bunlara örnek olarak, ani olarak uçağa kuşun çarpması sonucu oluşan hasar veya doğa afeti, depremden dolayı yapılarda oluşan hasarlar buna örnek verilebilir. Daha önce belirtildiği üzere, YSI araştırmalarında hasar tespiti, yapıda oluşan değişikliklerin belirlenmesiyle yapılır. Örneğin, sistemde olan kütle değişimi, rijitlik veya enerji değişimleri de hasar kategorisi içerisine girmektedir. Bunun yanında, sistemin sınır koşulları, yapının dinamik tepki karakteristik özelliklerini etkilediğinden, sınır koşullarının değişmesi de hasar olarak değerlendirilir. Hasarın, yapı üzerinde oluşturacağı etkiler zamanla daha açık hale gelir. Genel olarak sistemin dinamik karakteristik özelliklerini değiştirebilecek parametreler, aşağıdaki örneklerde verilmiştir.

- Geometrinin değişmesinden dolayı oluşan hasarlar; Buna örnek olarak, çatlak hasarı, yapının geometrisini değiştirerek, sistemin rijitliğini değiştirirken yapının malzemesine veya sınır koşullarına etki etmez. Çatlağın, yapı üzerindeki etkileri büyüklüğüne ve lokasyonuna bağlı olarak ani veya zamanla sistemin performansını etkiler.
- Sınır koşullarının değişmesi sonucu oluşan hasarlar; Buna örnek olarak, nehir akışı, köprü ayaklarının bulunduğu toprağı zamanla aşındırarak, yapıya ait sınır koşullarının değişmesine neden olur. Değişen sınır koşulları da yapısal bütünlüğü etkilemektedir. Ancak sınır koşullarındaki değişimler, yapının kütle ve rijitlik parametrelerini etkilemez.
- Sınır etkileşimlerinin değişmesinden dolayı oluşan hasarlardır. Yapılardaki bağlantı ekipmanlarının esnemesi, yapının rijitliğini değiştirdiğinden hasar olarak değerlendirilir. Burada, bağlantı elemanlarının esnemesi, global olarak sistemin rijitliğini değiştirirken, lokal olarak yani elemanlar bazında herhangi bir rijitlik değişimine etki etmez. Bunun yanında esneme hasarı, sistemin sönümleme özelliklerinin artmasına neden olur.

## 2.8 Yapı Sağlığı İzleme Sisteminin Temel Aksiyomları

Son zamanlarda mühendislik araçlarında yapılan teknolojik gelişmelere paralel olarak bunlara yönelik güvenlik ihtiyaçlarını da beraberinde getirmiştir. Yapılara ilişkin güvenilirliğin maksimize edilmesi amacıyla, yapılarında oluşan hasarlar büyük facialara neden olmadan, YSİ ile izlenmesi gerekmektedir. Hâlihazırda, mühendislik yapılarındaki hasarın doğru olarak teşhisi için, birçok multidisipliner alandan yararlanılmaktadır. Bir başka deyişle, değişik teknolojilerde yapılan ilerlemeler, etkin bir YSİ sistemlerinin geliştirilmesine de yansımaktadır. Örneğin bilgisayar yazılım ve donanımlarında, sensörlerde, hesaplamalı mekanik alanlarında, deneysel yapı dinamiğinde istatistiksel algoritmalarda ve sinyal işleme tekniklerinde yapılan ilerlemeler daha güvenilir YSİ araştırmalarının yapılmasına olanak tanımıştır. Günümüze kadar yapılan çalışmalar ekseninde, YSİ sistemlerine ilişkin temel aksiyomlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Farrar and Worden, 2013).

1. Tüm malzemeler içyapılarında makro veya nano boyutta defekt içerir.
2. Hasarın değerlendirilebilmesi için iki sistem verisinin kendi aralarında karşılaştırılması gerekir.
3. Yapıda hasarın olup olmadığının anlaşılabilmesi ve hasar lokasyonunun tespiti, veri tabanlı YSİ'de, denetimsiz öğrenme moduyla (unsupervised learning) yapılabilir. Ancak yapıdaki hasarın tipi ve büyüklüğünün tespiti, denetimli öğrenme (supervised learning) moduyla gerçekleştirilir.
4. Sensörler hasarı ölçmezler. Veri tabanlı YSİ'de sensör verilerinden hasar bilgisinin elde edilebilmesi için sinyal işleme teknikleri kullanılıp, istatistiksel sınıflandırma tekniklerine gereksinim duyulur.
5. Özellik çıkartmanın gereksinim duyulmadığı durumlarda, sensör ölçüm algılarının hasara göre hassas çıktılar verebilmesi gerekir. Ayrıca sensörler, operasyonel ve çevresel şartlarda hassas veriler verebilmeleri gerekir.
6. YSİ algılama sistemlerinde, hasar başlangıcında ve sonrasında alınan zaman serilerinin boyutları ve uzunlukluları tanılama işlemleri için yeterli olmalıdır.
7. Sensör verilerinden elde edilen karmaşık, gürültülü veya lineer olmayan sinyal verileri, gürültüden mi yoksa hasardan mı kaynaklandığını bazı durumlarda belirlemek zordur. Bu amaçla, hasar tanılmasında kullanılan algoritmanın, yapıya ilişkin elde edilen gürültülü ve lineer olmayan sinyallere hassas olması gerekir.
8. Hasarın büyüklüğü, sistem dinamiğinde oluşan değişikliklerden tespit edilebilir.
9. Hasar, yapıyı daha karmaşık hale getirir.



### 3. YAPI SAĞLIĞI İZLEME TEKNİKLERİ

Yapı sağlığı izleme tekniklerinde, sistem tepkilerinin analizleri yapılmasıyla yapıların sağlık durumları belirlenir. YSİ teknikleri, bazen kullanılan sensörlerin çalışma frekanslarıyla kategorize edilir. Bunun yanında, önceki başlıklarda verildiği üzere, bazen de aktif veya pasif YSİ şeklinde de kategorize edilmektedir. Yine, daha önce belirtildiği gibi yapının aktifleşmesi için harici bir kaynak kullanılmışsa aktif YSİ, aktifleşmesi için herhangi bir kaynak kullanılmamışsa pasif YSİ kategorisinde değerlendirilmektedir.

Hâlihazırda yapı sağlığı izleme sistemlerinde kullanılan bazı teknikler aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

#### 3.1 Titreşim Tabanlı Hasar Tespit Teknikleri

Titreşim tabanlı hasar tespit metodolojilerinde, sistem daha çok bütünlük açısından değerlendirilerek yapının herhangi bir bölgesinde hasar olup olmadığı araştırılır. Temel olarak, hasar, sistemde rijitlik düşüşlerinin oluşmasına, bu rijitlik düşüşleri de yapının doğal frekansının değişmesinde neden olur. Burada, yapının hasar durumu, sistemdeki tek bir sensörden alınan verilerden anlaşılabilir. Dolayısıyla, titreşim tabanlı hasar tespit teknikleri daha çok global araçlar olarak kabul edilir. Yapının özellikleri, aktif modal testle, çevresel yüklere kalan yapılarda ise operasyonel modal analiz tekniklerinin uygulanmasıyla belirlenebilir (Doebing et al., 1996). Bazı durumlarda yapıya ilişkin sadece doğal frekanslarının değerlendirilmesiyle yapıdaki yerel hasarlar belirlenemeyebilir. Bunun için, yapının mod şekillerinin incelenmesiyle lokal hasarlar tanınır. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi, deneysel olarak mod şekillerinin elde edilebilmesi için yapıya birçok sensör yerleştirilip alınan verilerle modal şekiller belirlenir. Bundan dolayı, özellikle düzgün yüzeye sahip yapılar için birçok sensörün kullanılması yerine taramalı lazer doppler vibrometresi kullanılıp, yapıya ait farklı yerlerden veri alınarak modal şekiller bulunur. Ancak taramalı lazer doppler vibrometresi, anlık YSİ uygulamalarında kullanılması olanaksızdır.

Metalik malzemelerinde olduğu gibi kompozit malzemelerde titreşim tabanlı hasar tespit teknikleriyle hasar tespit tekniği genellikle, modal şekillerinin değerlendirilmesiyle yapılır. Titreşim yükleri, aktif YSİ kategorisinde genellikle piezoelektrik aktüatör, elektromanyetik sarstırıcı, hidrolik sarsma tablası veya servo motorlu sarsma tablaları ile yapılır. Pasif YSİ kategorisinde ise, yani operasyonel koşullarına maruz kalan yapılardaki titreşim yükleri, zemin, rüzgâr, vs. gibi yükleri ile gerçekleştirilir. Sisteme ilişkin rezonans frekanslarının hesaplanmasında ivmeölçerler, potensiyometre, lazer yer değiştirme sensörü veya şekil değiştirme sensörleri kullanılır. Sistemin mod değerlerdeki değişiklikler ile rijitlik arasında, korelasyon kurulup yapı bilgisi hakkında fikir edinilebilir. Bu çeşit hasar tespit tekniğinin en büyük avantajı maliyeti az olup büyük yapılarda kolay bir şekilde uygulanabilirliğidir. Yalnız bazı durumlarda, alınan veriler karmaşık olup, alınan verilerle hasarı değerlendirmek zor olabilir. Bundan dolayı bu gibi durumlarda verilerin sinyal işleme, operasyonel değerlendirme ve normalizasyon proseslerinden geçirilmesi gerekir. Titreşim tabanlı hasar belirleme tekniklerinde, yaygın olarak kullanılan bir diğer metot ta akustik emisyonudur. Bu metot ta, malzemedeki enerji değişimlerinin belirlenmesiyle hasar teşhis edilir (Aberg and Gudmundson, 2000; Zheng et al., 2001). Bu metodolojide, genellikle sensör olarak ivmeölçerler, piezoelektrikler ve bazı durumlarda mikrofon kullanılır. Birçok sensörden alınan veriler, üçgenleştirme metodunda kullanılan uçuş süreleri değerlendirilerek hasar belirlenir (Marantidis et al., 1994). Son zamanlara MEMS teknolojisindeki gelişmeler, küçük boyutlu ve doğru ölçüm alınmasına imkân tanıyan akustik emisyon sensörlerinin geliştirilmesine olanak tanımıştır.

### 3.2 X-Radyografik Tekniği

Bu metot genel olarak, yapının yüzeyi boyunca, absorbe ettiği X ışınlarındaki değişimlerinin saptanmasıyla hasar tespiti yapılır. Verilerin anlık dijitize edilmesiyle veya radyograflar, statik olarak alınıp yüzeydeki x ışınlarının yoğunluğunun incelenmesi ile uygulanır. Bu çeşit yöntemlerin önemli avantajları, maliyetlerinin az olması ve kolay bir şekilde uygulanabilir olmalarıdır. Dezavantajları ise, büyük yapılara uygulanabilmeleri için maliyetli ekipmanlar gerektirmektedir. Servis şartlarında çalışan araçlar için, bakım aşamasında

parçaların sökülüp, yüzeyleri x ışınları altında taranmasıyla gerçekleştirilir. Bu nedenle, servis araçları ve operasyonel ortamlardaki yapılar için uygulanamazlar.

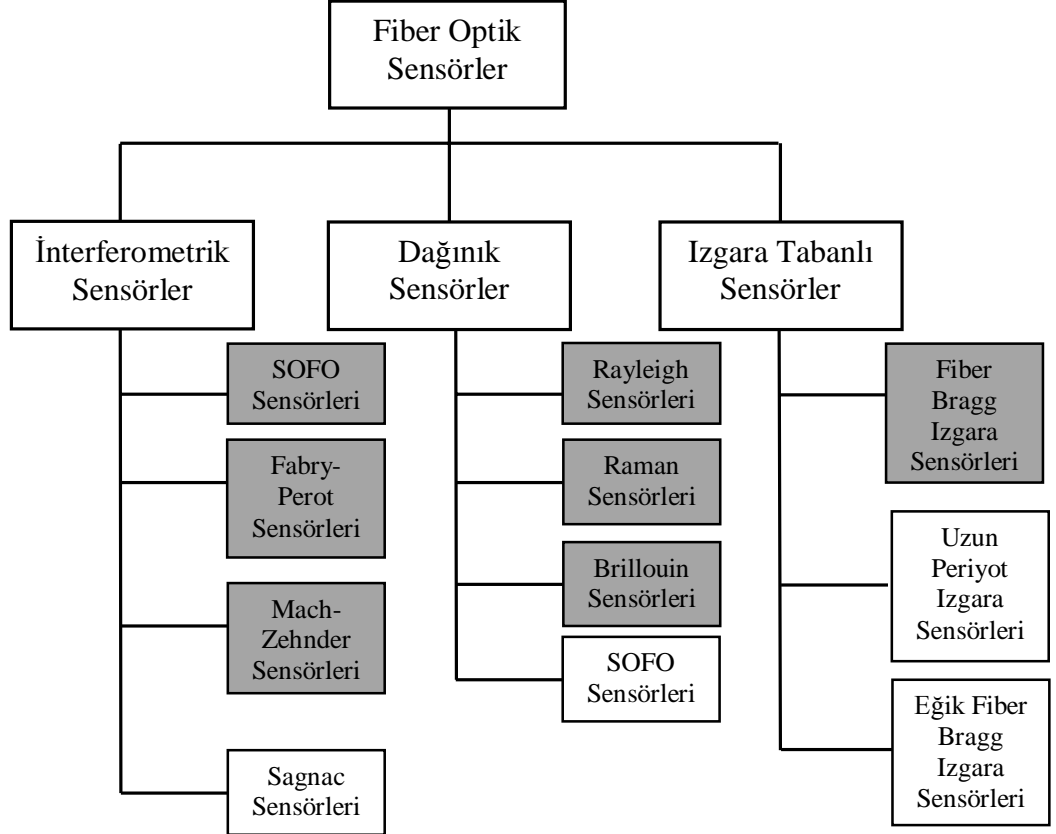
### **3.3 Birim Şekil Değişirme Metotları**

Büyük yüzeye sahip yapılardaki hasar tespitinin yapılmak istenildiği durumlarda bu yöntem kullanılır (Oka et al., 1999). Yapıdaki deformasyonların sensörün rezistansını değiştirme prensibine bağlı olarak çalışırlar. Bu tarz elemanların, küçük, hafif, ucuz, yapıya kolay monte edilebilmeleri ve alınan verilerin kolaylıkla yorumlanabilir olmaları gibi sahip oldukları avantajlardan dolayı tercih edilmektedir. Bu teknikten hassas sonuçların alınabilmesi için sensörler, yapıya sağlam bir şekilde yapıştırılması gerekir. Sensörlerden alınan veriler, yapının sadece bir bölgesine ait verileri içermesi ve her bir sensörün sadece bir kez kullanılabilir olması gibi dezavantajlara sahiptir. Daha büyük yapılarda birden fazla bölge için tanılama işlemlerinin yapılmak istenildiği durumlarda bunlara ilişkin sensör ağının kurulması gerekir. Yalnız, kurulan bu sensör ağı, yapı çevresinde komplike ve çok fazla kabloların oluşmasına neden olur.

### **3.4 Fiber Optik Teknikleri**

Fiber optik yöntemler, büyük yapıların yük altında oluşan şekil değişimlerinin izlenilmesi gerektiği durumlarda kullanılır (Oka et al., 1999; Rogers, 1999). Genel olarak ışığın dalga boyundaki değişiklikler ve uçuş sürelerinin analizi yapılarak hasar incelemesi yapılır. Son birkaç yıldır, değişik uygulamalar için birçok fiber optik algılama stratejileri geliştirilip, bunların bir kısmı da ticarileşerek gerçek mühendislik yapıları üzerinde uygulanmıştır (Connolly, 2006; Culshaw and Kersey,2008). Bunların içerisinde özellikle fiber Bragg ızgara tabanlı fiber optik sensörleri genellikle uçak yapılarında oluşan iç hasarların belirlenmesinde kullanılmışlardır (Chang, 2009-2013). Bunun yanında, bu sensörler, gerek düşük frekanslarda (200 Hz), özellikle yapıya etkiyen yüklerin izlenilmesinde, gerekse yüksek frekanslarda (500 kHz) hasarların tanınmasında kullanılabilirler.

Fiber optik sensörler; genel olarak interferometrik sensörler (Yoshino et al., 1982; Inaudi, 2005), dağınık sensörler (Bao, 1993) ve ızgara tabanlı fiber optik sensörler (Wild, 2008) olmak üzere üçe ayrılabilirler. Şekil 3.1’de, koyu olarak gösterilen sensörlerin özelliği endüstriyel uygulamalardaki yapılar için kullanıma hale geldiklerini, yani ticari olarak uygulanabildiklerini göstermektedir (Guo et al., 2011).



Şekil 3.1 Fiber optik sensör teknolojileri

Fiber optik teknolojilerinde, başlangıçta interferometrik sensörler geliştirilmiş olup, optik uzunluk boyunca algılama yapılabilme kapasitesine sahiptirler (Yoshino, 1982). Yapılardaki fiziksel değişimler, iki ışık arasındaki optik faz değişimleriyle belirlenir. Önemli avantajları, hassasiyet aralıkları yüksek olup, yapıya ilişkin uzama ve kısalmadaki değişimler, ( $\mu\epsilon$ ) mertebesinde algılayabilme özelliğine sahiptirler.

Fabry-Perot interferometrik sensörleri  $0.15 \mu\epsilon$  çözünürlüğünde,  $\pm 1.000 \mu\epsilon$  şekil değişim aralıklarındaki ölçümlerde ve maksimum  $\pm 5.000 \mu\epsilon$  aralıklarda ölçüm yapabilme kapasitelerine sahiptirler. Bunun yanında kompakt olup 1

mm'den 20 mm'ye kadar geometrik boyutuna sahip yapılar içerisinde gömülebilirler.

SOFO interferometrik sensörleri, özellikle operasyonel ortamlarda çalışan yapılara ait YSİ sistem uygulamalarında kullanıma elverişlidir (Guo et al., 2011). Bunlar, Fabry-Perot interferometrik sensörlerine nazaran daha uzun gage uzunluğuna sahiplerdir. Bunların avantajları, 0.25 mm'den 100 m'ye kadar ölçüm alabilme kapasitesine sahiplerdir. Dezavantajları ise, sadece düşük frekans (0.1 Hz-1 Hz) aralıklarındaki uzama ve kısalma verilerini algılayabildiklerinden uçak yapılarına ilişkin hasar teşhisinde kullanılmaya elverişli değildir.

Dağınık fiber optik sensörler üçe ayrılmaktadır. Bunlar; Rayleigh saçınım tabanlı optik zaman-bölge reflektrometresi [optical time-domain reflectometry (OTDR)], Raman saçınım tabanlı optik zaman-bölge reflektrometresi[Raman optical time-domain reflectometry (ROTDR)] ve Brillouin saçınım tabanlı optik zaman-bölge reflektrometresi [Brillouin optical time-domain reflectometry (BOTDR)] olmak üzere üçe ayrılır.

Optik zaman-bölge reflektrometri sensörleri, ilk geliştirilen sensör tipi olup, optik fiber ileleme profil yansımalarının belirlenmesinde Rayleigh saçınımları kullanılır. Burada, fotodedektör kullanılıp, Rayleigh yansımaları incelenerek fiber kırılmaları belirlenir.

ROTDR ve BOTDR sensörleri, son birkaç yıldır dağınık algılama uygulamalarında kullanılmaktadır. Genel çalışma prosedürleri, optik fiberlerdeki nonlineeriteye bağlı olarak oluşan spektral bileşenlerine dayanır. Burada sözü edilen bu spektral bileşenler, harici çevresel parametrelerinden dolayı oluşur. Bunların analizleri yapılmasıyla yapıdaki davranışlar ve harici ölçümler belirlenebilir.

ROTDR sensörleri, Raman saçınım tabanlı olup hem Stokes hem de anti-Stokes bileşenlerindeki değişimler incelenerek yapı özelliği hakkında bilgi edinilir. Örneğin bu bileşenlerdeki yoğunluk oranı, fiber linkindeki sıcaklık bilgisi hakkında bilgi verir. Bu sensörler, 0.2 °C'lik çözünürlüklerdeki sıcaklık parametresinin algılanmasında efektif bir şekilde kullanılabilir.

Izgara tabanlı Fiber-Bragg sensörleri, YSİ uygulamaları için fiber teknolojileri içerisinde en çok kullanılan sensörler olduğu belirtilmiştir (Majumder et al., 2008). Bu sensörler, Bragg dalga boyu olarak adlandırılan ışığın bir kısmının yansıtmasına bağlı olarak çalışmaktadırlar. Bir fiber Bragg ızgarada, kırılma indisinin değişiminden dolayı yayılan modların birbirine etkisi, zıt yönde ilerleyen modlar arasında meydana gelmektedir. Kırılma indisinde meydana gelen bu değişimden dolayı, optik fiberin çekirdek bölgesinde, ızgara oluşumu meydana gelir. Bragg olarak bilinen belirli şartlar altında, ızgarayı oluşturan saçaklardan yansıyan ışık birbirine eklenir ve büyük bir yansıma meydana gelir. Izgara saçak aralığı ızgara periyodu olarak isimlendirilir. Üniform ızgaralar için periyot, ızgara boyunca sabit kalırken, cıvıltılı ızgaralarda ise değişir. Kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı, üniform ızgaralarda ızgara uzunluğu boyunca sabit kalırken, diğer ızgaralarda farklılık gösterir. Bunlarda, ızgara periyodu 1  $\mu\text{m}$ 'den küçüktür. Bunun yanında Bragg dalga boyu, fiberin yansıyan indeksi ve ızgara eğimi değerlendirilerek yapılır. Sözü edilen bu dalga boyundaki değişimler, çevresel şartlardaki değişen parametreleri (sıcaklık, şekil değişimi, titreşim vb.) göstermektedir. Dolayısıyla, Bragg dalga boyundaki değişimlerin izlenilmesi yapıda değişen birkaç ölçüm parametresinin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Nitekim son 20 yıldır, çok katmanlı sensör teknolojisiyle yüzden fazla dalga boyları, tek fiber optikle araştırılmış ve bunların bir kısmı kablosuz veri iletim teknolojileriyle entegre edilmiştir.

Hâlihazırda, YSİ uygulamalarında kullanılan fiber optik tekniklere ilişkin araştırmalar, analitik ve deneysel olarak yapılmaktadır. Analitik modellemeler de, ışığın dalga boyundaki değişimler, deneysel olarak ta farklı fiber çapları kullanılması durumunda oluşacak dalga şekilleri incelenmektedir. Bunun yanında, küçük çaplı fiber üretimi ve bunların kompozit malzemelere gömülebilmesini sağlamak için ileri ve yeni üretim yöntemleri araştırılmaktadır (Bocherens et al., 2000; Todd et al., 1998; Soloman, 1998; Green et al., 2000). Sonuç olarak YSİ tekniğinde yaygın olarak kullanılan bu metot, büyük alanlı bölgeler için kolaylıkla uygulanabileceğinden büyük geometrili uçak ve köprü yapılarında elverişli bir şekilde kullanımları günden güne artmaktadır (Soloman, 1998).

### 3.5 Eddy Akım Metotları

Genel olarak bu metot, özellikle metalik malzemelerde oluşan şekil değişimlerinin izlenilmesinde kullanılır. Hâlihazırda, servis koşullarında çalışan metalik araçların yapısal durumlarının izlenilmesinde ultrasonik ve fiber optik tabanlı hasar tespit tekniklerinden sonra en çok kullanılan yöntemdir. Metodolojik olarak, malzemedeki şekil değişiminden kaynaklanan elektromanyetik empedansta oluşan değişimlerin izlenilmesiyle yapının sağlık kontrolü yapılır (Goldfine et al., 1998). Daha çok yapılarında çatlak içeren küçük geometriye sahip yapılardaki hasarın belirlenmesinde efektif olarak kullanılmaktadır. Eddy akım metodu, kompozit malzemelere ilişkin matris elemanın elektrik iletkenliğinin düşük olmasından dolayı, bu yapılarda efektif bir şekilde kullanılamamaktadır (Goldfine et al., 1999; Zahn, 1998; Dowell et al., 2000). Hâlihazırda, metalik malzemelerin sağlık kontrolü için kullanılan Eddy akım metodunun, tercih edilme nedenlerinden birisi, uygulanma prosedürlerinin kolay olması ayrıca uygulanmaları için birçok ekipmana gereksim duymamalarıdır. Bu tekniğin dezavantajları ise çalışmaları için yüksek voltaja ve elde edilen verileri yorumlanması oldukça güçtür. Bazı durumlarda, hasarın belirlenmesi aşamasında tersinir yöntemler kullanılması gerekebilir.

### 3.6 Görsel Muayene Yöntemleri

Yapılardaki hasarın değerlendirilmesinde görsel algıya dayalı hasar tespit metodu belki de kullanılan en doğal yöntemdir. Bazı durumlarda, görsel teşhiste çeşitli aygıtlardan faydalanılabilir. Bunlara örnek olarak, optik veya taramalı elektron mikroskobundan yararlanıp, gözle hasar muayenesinin yapılmasıdır. Özellikle, mikro çatlaklar içeren yapıların hasarları hakkında detaylı bilgilerin alınmasına olanak tanır. Bu metot, mikroskopla birlikte kullanılması durumunda, büyük bir yapının sadece küçük bir bölgesi incelenebilmesine olanak tanıdığından, çoğu durumda incelenecek olan kısmın yapıdan çıkartılması gerekir. En büyük dezavantajı ise sadece laboratuvar ortamında kullanılmaya elverişlidir.

Görsel algıya dayalı hasar tespit tekniği gözle görülebilir hasarların tetkikinde kullanılan, belki de en basit ve en ucuz yöntemdir. Ama özellikle içyapılarında fiber kırılması, çatlak veya delaminasyon içeren kompozit

yapılardaki hasarları bu yöntemle belirlemek oldukça zordur. Bu tekniğin kullanılmasıyla, bazı durumlarda hasar, gözle teşhisi yapılabildiği halde, hasarın tam olarak büyüklüğü ve hasar mekanizması hakkında çok az fikir edinilebilir. Sonuç olarak bu teknik, ekonomik, küçük, basit ve yüzey hasarların değerlendirilmesi aşamasında yeterli veri sağladığı halde, büyük yapılarda oluşan komplike hasarlar hakkında yeterli düzeyde veri sağlamaz.

### 3.7 Ultrasonik Dalgalar Tekniği

Son zamanlarda, özellikle uçak yapılarındaki kompozit aksamalarının hasar durumlarının değerlendirilmesinde YSI teknikleri içerisinde en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu tekniğin en çekici özelliği, ultrasonik dalgalar çok uzun mesafeye hızlı hareket ettiklerinden, levha ve kabuk gibi geniş ve düzgün yüzeylere sahip yapıların teşhisine olanak tanınmasıdır. Burada, hasar yorumlamasının efektif olarak yapılabilmesi için alınan sinyallere özgü güçlü matematiksel araçlar, özellikle etkili sinyal işleme stratejilerinin geliştirilmesi gerekir. Literatürde, ön işlemlerde, sensörlerden alınan veriler üzerinde sinyal işleme proseslerin uygulanması ile ilgili birçok çalışmanın yapıldığı görülmüştür (Rose, 2002; Raghavan et al., 2005; Staszewski et al., 2004). Bu teknikte, zaman frekans transformları, kısa zamanlı Fourier transformasyonları (Osseguda et al., 2003), Wigner Ville dağılımları (Prosser et al., 1999, Raghavan et al., 2007), Hilbert Huang transformları (Osseguda et al., 2003; Salvino, 2005) gibi sinyal işleme tekniklerinin kullanıldığı görülmüştür. Bunun yanında bu teknikte, sinyallerdeki gürültünün azaltılması için, Wavelet transformasyonundan ve bunun değişik formlarında özellik çıkartma algoritmasından yararlanıldığı görülmüştür (Staszewski, 2004). Bu teknikle, borulardaki hasarların değerlendirilmesinde, özellik çıkartma ve otomatik ayrık wavelet kullanılmıştır. Başka bir çalışmada, çatlak tip hasarına hassas olan  $S_0$  simetrik modunun belirlenmesinde, kısa zamanlı Fourier dönüşümleri kullanılmıştır (Ihn and Chang, 2003). Sensör ağlarıyla anizotropik davranış gösteren kompozit malzemelerin tomografilerinin çıkarılmasıyla yapısal durum değerlendirmeleri yapılmıştır. Aynı şekilde, yüksek boyutlu Fourier transformasyonları kullanılarak sinyal verilerinin frekans alanına dönüştürülüp, çatlak hasarından kaynaklanan dalga modları belirlenmiştir (Alleyne et al., 1991). Son zamanlarda, yansıyan dalgaların belirlenmesinde iki ve



üç boyutlu Fourier dönüşümleri kullanılmıştır (Ruzzene et al., 2007). Bazı çalışmalarda, tekniğin uygulanmasında taramalı lazer doppler vibrometresinden yararlanıldığı görülmüştür. Örneğin, levha yapılarında yüksek genlik ve düşük frekanslı lamb dalgalarının araştırılmasında lazer doppler vibrometresi kullanılmıştır (Staszewski et al., 2004). Defekt bölgesinin civarında, ölçülen genlikte oluşan ani düşüş ve yükselmeler hasar indikatörü olarak kabul edilmiştir. Son zamanlarda bu teknikte, örüntü tanıma yöntemlerinden yapay sinir ağları kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Sistemden alınan sinyaller üzerinde yapay sinir ağları uygulanıp kompozit tabakalardaki delaminasyonun olduğu bölgeler tespit edilmiştir (Su and Ye, 2004). Bunun yanında başka bir çalışmada, çok katlı perseptron ağları ile hasar tespiti yapılmıştır. Bu metotta, 8 farklı piezoelektrik yama hem sensör hem de aktüatör olarak kullanılıp ince izotropik levhalara uygulanmıştır (Mustapha et al., 2006).

#### **4. TABAKALI KOMPOZİT BİR KİRİŞ VE LEVHADA HASAR TESPİTİNİN MODEL TABANLI YSİ TEKNİKLERİYLE BELİRLENMESİ**

Mühendislik uygulamalarında yüksek dayanım ve rijitlik gerektirecek durumlarda yapısal eleman olarak kullanılan tabakalı kompozitler, darbe, sıcaklık, yük ve nem gibi çeşitli yüklerin etkisi altında kalabilmektedirler. Bunlardan dolayı bazen, tabakalar arasında normal ve kayma gerilmeler oluşur ve kompozit malzemenin bileşeni olan matris yapısının kırılmasına ve bazen de tabakalar arasında çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Hâlihazırda, mühendislik uygulamalarında sözü edilen olumsuzları tespit etmek ve engelleyici önlemler almak için çeşitli hasar tanılama sistemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan model dinamik titreşim tabanlı hasar tespit tekniği algoritmaları, iç bölgelerinde delaminasyon içeren tabakalı kompozit malzemelere uygulanmıştır. Delaminasyon içeren tabakalı kompozit kiriş, deneysel olarak modal testler uygulanarak doğal frekansları bulunmuştur. Daha sonra, sağlıklı ve hasarlı yapıya ilişkin ölçülen doğal frekanslar nümerik yöntem sonuçları ile doğrulanmıştır. Doğrulanma işlemleri tamamlandıktan sonra, sonlu elemanlar yöntemi, delaminasyon içeren tabakalı kompozit bir kiriş ve levha üzerinde uygulanıp mod şekilleri çıkartılmıştır. Mod şekillerinden eğrilik yüzeyleri çıkartılmış ve daha sonra düzgün aralıklı metot (DAM) ile birim şekil değiştirme enerjisi (BŞDE) ile hasarın olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Kompozit levhadaki hasar tespitleri için iki farklı durum değerlendirilmiştir. Birinci durum da, yapının başlangıçtaki sağlık durumunun biliniyor varsayımı ile tanılamalar yapılmıştır. Bazen, hasar tespiti yapılırken hasara uğramış yapının hasara uğramadan önceki verileri bulunmayabilir. Bu amaçla, ikinci durumun değerlendirilmesinde hasarlı yapıya ait eğrilik modları, yüzey uydurma algoritmasıyla, hasara uğramamış gibi kabul edilerek hasar tespitleri yapılabilir. Hasar teşhisi için her iki algoritma, her iki durum için değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, laboratuvar ortamında, kompozit malzemelerden imal edilen kompozit kiriş ve levhanın iç bölgelerinde oluşan delaminasyonlar deneysel veya nümerik yöntemlerden alınan verilerin, geleneksel model analiz tabanlı YSİ tekniklerinde kullanılmasıyla tahribatsız bir şekilde tahmin edilebileceği kanaatine varılmıştır.

## 4.1 Giriş

Kompozit yapılardaki hasarlar (delaminasyon, çatlak vs.) sıklıkla karşılaşıp zamanla malzemenin stabilitesini ve mukavemetini azaltıp uygulama esnasında çalışma verimliliğini düşürmektedirler. Kompozit malzemenin bütünlüğünü ve rijitliğini sağlamak açısından yani hasarın olduğu bölgeyi tespit etmek, yeni ve tahribatsız metotların geliştirilme ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. 3. bölümde verildiği üzere, hâlihazırda yapı kontrol izleme sisteminde birçok hasar tespit metodu önerilmiştir. Bunlardan bazıları X ray görüntülüne, ultrasonik tarama, kızılötesi tomografi gibi tekniklerle hasarın olduğu bölgeler tespit edilebilir.

Yapı sağlığı izleme sistemi, son zamanlarda özellikle inşaat ve makine mühendisliğinin çalışma alanlarından birisi olmuştur (Moyo et al., 2005). YSİ, yapı güvenirliliğinin sağlanmasında erken safhada deformasyonları saptayıp sistem hakkında gerçek zamanlı bilgi verir (Ko and Ni, 2005). YSİ sensörleri çok hassas algılama kapasitelerine sahip, küçük boyutlu, maliyetli az olmaları, kolay monte edilebilirlikleri gibi özelliklerinden dolayı uygulamaları ve gelişimleri yıldan yıla gittikçe artmaktadır (Li et al., 2004; Lee et al., 2002). Literatürde fiber optik bragg grating (FBG) sensörlerle yapı izleme kontrol sistemi örneklerine rastlamak mümkündür (Li et al., 2004; Measures et al., 2001). Kompozit malzemeler sıcaklık değişimleri, yük ve gerilme etkisi altında kaldıklarında oluşan hasarlar bu sensörlerle belirlenebilmektedir (Kalamkarov et al., 2000). Fiber optik sensörleri kullanılarak uçak ve inşaat mühendisliğinde gerçek zamanlı bir yapının izlenmesi araştırılmıştır (Li et al., 2004). Uçak panellerinde çatlak büyümesini saptamak için FBG sensörleri kullanılmıştır (Fifield et al., 2005). Karbon takviyeli plastik kompozitlerde yanal çatlakların da saptanmasında bu sensörler kullanılmıştır (Reddy, 2007). Deniz yapılarında kullanılan kompozit malzemelerin analizlerinde ve şekil değişimlerinin izlenmesinde FBG sensörleri kullanılmıştır (Silva, 2008). Aynı şekilde artık şekil değişimlerin saptanmasında bu sensörler kullanılmıştır (Reddy, 2007).

Akıllı malzemeler kullanılarak geliştirilmiş hasar tespit teknikleriyle deformasyonların olduğu bölgeler efektif bir şekilde belirlenebilir. Bilindiği

üzere, deformasyonlar yapının mekanik karakteristikliğini değiştirir. Bu değişiklik yapıdaki eğrilik parametrelerinin de değişmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, değişen bu parametreler hasar bilgisinin tespit edilmesine olanak tanır.

Literatür incelendiğinde dinamik tabanlı hasar tespit metotları kullanarak lineer malzemeler üzerinde birçok çalışma yapıldığı görülmüştür (Doebing et al., 1998; Carden and Funning, 2004). Bu tekniklerin kompozit malzemelerde uygulamaları ise sınırlı sayıda çalışma olduğu tespit edilmiştir. Hamey ve arkadaşları, kompozit yapılarda oluşturdukları çeşitli hasar konfigürasyonlarıyla deformasyon bölgesinin tespiti için birkaç algoritmayı değerlendirmişlerdir (Hamey et al., 2004). Hasardan dolayı kaynaklanan katılık değişimine bağlı olarak hasar bölgesinin araştırılması hakkında Pandey ve Biswabtan sonra birçok çalışma yapılmıştır (Pandey and Biswab, 1991). Sampaio ve arkadaşları, eğrilik şekli ve frekans tepki fonksiyonu kullanarak yapının hasar durumunu izlemişlerdir. Eğrilik ve hasar indeks tespit parametreleriyle yapının durumunu belirlemişlerdir. Yapıdaki hasar azalımı, hasara uğramayan kısmın yüzdeleri azalımı olarak modellenmiştir. Eğrilikleri kullanarak hasarın olduğu bölgeyi değerlendirip yapısı hakkında başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (Sampaio et al., 1999).

Doebing ve arkadaşları, köprü yapılarını sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişlerdir ve buldukları verileri hasar tespit algoritmalarında kullanıp hasar bölgesini araştırmışlardır (Doebing et al., 1998). Köprüyü başlangıçta hasarsız bir şekilde modellemişlerdir. Daha sonra köprüyü hasarlı bir şekilde modelleyip sonlu elemanlar yöntemiyle analizini yapmışlardır. Katılık, hasar indeksindeki değişim ve stabilitedeki değişim gibi parametrelerle hasar bölgesini tayin etmişlerdir. Kim vd., çalışmalarında çeşitli hasar tekniklerini kullanmışlar ve buldukları verilere göre hasar indeks metodu, kullandıkları tüm metotlar arasından en iyi ve güvenilir metot olduğunu bulmuşlardır. Doğal frekans ve şekline dayalı hasar tespit tekniklerini geliştirip hasar bölgesini ve boyutunu hesaplamışlardır. Bunun yanında sonlu elemanlar yöntemini uygulayarak eğrilik verilerini bulmuşlardır. Bu verileri, hasar tespit algoritmalarında kullanıp deforme olmuş bölgeyi araştırmışlardır. Eğrilik parametrelerine dayalı hasar tespit algoritmalarının hasar bölgesini tam olarak tayin ettiği frekans tabanlı hasar tespit tekniğinin ise çok az hata payıyla tespit ettiğini belirtmişlerdir (Kim et al., 2003).

Tracy ve Pardeon, kompozit yapılarıdaki doğal frekansın hasarın büyüklüğüne ve oluştuğu bölgeye bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir (Tracy and Pardeon, 1989). Cawley ve Adams, modal frekansları kullanarak kompozit yapılarıdaki hasarı tespit etmişlerdir. Levhaların birim şekil değiştirme enerjisinin hesaplanmasında gereksinim duyulan verileri deneysel olarak buldukları mod şekillerinden hesaplanmışlardır. Yapının hasara uğramamış ile hasara uğramış durumdaki mod şekilleri vasıtasıyla hasarı tespit etmişlerdir. Tüm çalışmalarda uygulanan metodun doğruluğu deneysel veya nümerik olarak hesaplanan verilere bağlı olduğu görülmüştür. Bunun yanında, deneysel veya nümerik olarak bulunan veriler artıça metotların hassasiyetinin de arttığını belirtmişlerdir (Cawley and Adams, 1997).

Zhang ve Akhtan, düzgün yük metodu (DYM) adında yeni bir deformasyon metodu geliştirmişlerdir (Zhang and Akhtan, 1998). Bu metoda göre yapı, düzgün bir yüke maruz bırakıldığı kabul edilir. Wu ve Law DYM metodunu iki boyutlu yapılara uygulamışlardır (Wu and Law, 2003). DYM'nin hesaplanmasında yapıların kenar bölgelerinde oluşan etkileri azaltmak için merkezi farklar yöntemi yerine Chebyshev polinomlarını kullanmışlardır. Bu metodun hassasiyeti belirtilmesi açısından değişik sınır koşullarında nümerik örnekler ele aldılar ve değerlendirmişlerdir. Sağlıklı yapıların modal parametreleri düzgün aralıklı metot (DAM) ile yaklaşık olarak çözmüşler ve nümerik yöntemlerden alınan sonuçlarla DYM eğrilikleri hassas bir şekilde değişip, hasar tespiti yapmışlardır. Bundan dolayı, DAM metodu DYM ile birlikte kullanılması durumunda yüksek ve başarılı bir şekilde hasarın oluştuğu bölgenin tayin edildiğini belirtmişlerdir. Esneklik yöntemi kullanarak hasarın olduğu bölgenin tayin edilmesi, Gao vd., tarafından önerilmiştir (Gao et al., 2004). Bu metot hasar tespit vektörü (HTV) olarak adlandırılmıştır. Metot HTV vektörünü belirleyip, sensörün yerleştirildiği bölgeler statik kuvvetler uygulanmış gibi kabul edilip hasara uğramış elemanlarda herhangi bir gerilme oluşmadığı kabul edilerek tespit yapılır. Lu ve arkadaşları, yapıdaki iki bölgenin elastik eğriliklerindeki değişimlerden buldukları sonuçlarla verimli bir şekilde hasar bölgesini bulmuşlardır (Lu et al., 2001).

Bu kısımda yapılan çalışmanın temel amacı, kompozit kiriş ve levhada delaminasyon bölgesini tahribatsız dinamik analiz teknikleriyle belirlemektir.

Başlangıçta deneysel ve nümerik yöntemlerle hasara uğramış ve hasara uğramamış kompozit yapı için modal analizler uygulanıp doğal frekans ve mod şekilleri bulunmuştur. Daha sonra bulunan mod şekillerinden modal eğrilik parametreleri bulunmuştur. Bulunan parametreler düzgün aralık metodu (DAM) ve birim şekil değiştirme enerjisi (BŞDE) algoritmalarında kullanılıp kompozit kiriş ve levhadaki delaminasyon bölgesi tespit edilmiştir.

## 4.2 Hasar Tespit Algoritmaları

Kompozit kirişlerdeki hasar tayini için iki algoritma değerlendirilmiştir. Bütün yaklaşımlarda hasar bölgesinin tayini için temel parametre olarak eğrilik mod şekli kullanılır. Birinci yaklaşım olarak DAM metodunda hasarın tüm yüzeyde düzgün dağıldığı kabul edilir (Pandey et al., 1991). BŞDE yaklaşımında, hasardan kaynaklanan eğilme rijitliği değişmesine bağlı olarak mod şeklinin değişmesiyle hasar belirlenir.

### 4.2.1 Düzgün aralıklı metot

Uzun süre yük altında kalmış yapıların, hasara uğramadan önceki ve sonrasına ait verileri belirlemek oldukça zordur. Bu veriler düzgün aralıklı metot (DAM) tekniğiyle düzgünleştirilir. Kısacası sağlıklı bir yapıya ait mod şekilleri düzgün bir yüzeye sahip oldukları kabul edilir. Bunun yanında hasara uğramış yapının mod şekillerini kullanarak interpolasyon yaklaşım tekniğiyle sağlıklı yapının mod şekilleri belirlenir.

Eğrilik modu

$$K = \frac{u(i+1) - 2u_i + u(i-1)}{\Delta x^2} \quad (4.1)$$

formülü ile hesaplanır. Burada  $K$ ,  $i$ . noktasında hesaplanan eğrilik mod şekli;  $u_i$ ,  $i$ . düğüm noktasındaki yer değiştirme;  $\Delta x$  ise  $i$  ile  $i+1$  düğüm noktaları arasında ölçülen mesafedir. Burada  $i$  kirişin uzunluğu boyunca dağılmış düğüm sayısıdır.

DAM metoduna ait hasar parametresi, deforme olmuş yapıya ait ölçülen verilerin deforme olmamış yapıdan çıkarılmasıyla elde edilir.

Bu çalışmada sağlıklı bir yapıya ait eğrilik, yüksek dereceden polinom olarak bir boyut için

$$K(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 \dots \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4$  katsayıları, nümerik veya deneysel veriler üzerinde regresyon tekniği uygulanmasıyla bulunur.

DAM metoduna ait hasar parametresi, deforme olmuş yapıya ait ölçülen verilerin deforme olmamış yapıdan çıkarılmasıyla elde edilir ve bir boyutlu durumlar için denklem aşağıdaki gibi olur.

$$D_{DAM}(x) = [K_{\text{Ölçülen}} - K(x)]^2 \quad (4.3)$$

yüksek dereceden polinom olarak iki boyutlu levha için

$$D_{DAM}(x, y) = [K_{\text{Ölçülen}}(x, y) - K(x, y)]^2 \quad (4.4)$$

$$R(x, y) = K_{\text{Ölçülen}}(x, y) - K(x, y) \quad (4.5)$$

Yukarıdaki denklemde  $R(x, y)$  artık polinomdur.

Denklem tekrar yazılırsa,

$$D_{DAM}(x, y) = R(x, y)^2 \quad (4.6)$$

eşitliği elde edilir.

Burada  $K_{\text{Ölçülen}}(x, y)$  hasarlı yapının iki boyutta eğrilik modlarını,  $K(x, y)$  ise yapıya ilişkin başlangıç sağlık koşullarını gösterir.

Bu çalışmada başlangıçta sağlıklı numune için  $K(x, y)$ 'ler hesaplanıp hasar tespitinde değerlendirilmiştir. YSI'de, hasar tespiti yapılırken her zaman hasara uğramış yapının hasara uğramadan önceki verileri bulunmayabilir. Bu amaçla, çalışmada ikinci durumun değerlendirilmesinde hasarlı yapıya ait eğrilik modları, yüzey uydurma algoritmasıyla, hasara uğramamış gibi kabul edilir. Yani hasarlı yapının,  $K_{fit}(x, y)$  değerleri kullanılıp tespitler yapılmıştır. Bir başka deyişle,  $K(x, y)$  fonksiyonu  $K_{fit}(x, y)$  olmuş olur.

Yüzey uydurma algoritmasında deforme olmuş yapı, dördüncü dereceden polinom olarak sağlıklı hale getirilmiş gibi kabul edilip,

$$K_{fit}(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3 + p_{40}x^4 + p_{31}x^3y + p_{22}x^2y^2 + p_{13}xy^3 + p_{04}y^4 \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $p$  katsayıları, nümerik veya deneysel veriler üzerinde regresyon tekniği uygulanmasıyla bulunur. Çözüm tekniği olarak, destek vektör makineleri, yapay sinir ağları veya yüzey uydurma algoritmaları kullanılabilir.

### 4.2.2 Birim şekil değiştirme enerjisi metodu

Bu metotta, yapıda oluşan deformatelerin tayini için birim şekil değiştirme enerjisi metodundan yararlanılır.

Kiriş için şekil değiştirme enerjisi,

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (4.8)$$

formüle ile hesaplanır. Burada  $\left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$  kirişteki eğriliği yani ( $K$ )'yı temsil etmektedir.

Denklem tekrar yazılırsa,

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EIK^2 dx \quad (4.9)$$

bağıntısı elde edilir.

Bir boyutlu problemler için sonlu farklar yardımıyla, Denklem (4.1) tekrar aşağıdaki formatta yazılabilir.

$$K = \frac{w_{(i+1)} - 2w_{(i)} + w_{(i-1)}}{\Delta x^2} \quad (4.10)$$

Burada  $w$ , yatay veya dikey yöndeki yer değiştirmeyi göstermektedir. Analitik, nümerik veya deneysel olarak belirlenebilir.  $\Delta x$ , seçilen iki nokta arasındaki uzaklıktır. Bir boyutlu durumlar için birim şekil değiştirme enerjisi yaklaşımıyla

$$D_{BSDE}(x) = \left| K_{olculen}^2 - K(x)^2 \right| \quad (4.11)$$

formülü ile hasar belirlenebilir. Burada  $K(x)$ , nümerik, analitik veya deneysel olarak denklem (4.10)'dan bulunabilir. Eğer yapının deformasyona uğramadan



önceki durumu için  $K$  değerleri bilinmiyorsa, eğri uydurma teknikleriyle, eğrideki lineer olmayan kısımlar düzgünleştirilerek hasara uğramamış gibi kabul edilebilir. Burada, bir boyutlu kiriş modeli için eğrilik, polinomal olarak eğri uydurma için denklem (4.2) kullanılabilir. İki boyutlu durum için plaka problemlerinde ise denklem (4.7) kullanılır.

Burada  $K$  hasar tespitinde kullanılabilir. İki boyutlu levha için birim şekil değiştirme enerjisi yaklaşımıyla hasar parametresi,

$$D_{BSDE}(x, y) = \left| K_{\text{ölçülen}}^2(x, y) - K_{\text{fit}}^2(x, y) \right| \quad (4.12)$$

formülü ile bulunur. Burada  $K_{\text{ölçülen}}$ , deneysel veya nümerik olarak bulunur. Denklem (4.5) ve (4.12)'den

$$D_{BSDE}(x, y) = \left| 2K_{\text{ölçülen}}(x, y)R(x, y) - R(x, y)^2 \right| \quad (4.13)$$

bağıntısı elde edilir.

### 4.3 Kompozit Kiriş İmalatı

Başlangıçta levhayı oluşturan kompozit tabakalar uygun bir şekilde kesilip 20 tabaka olacak şekilde  $[(0/90)_5]_s$  üst üste sıralanmıştır. Daha sonra içyapılarında delaminasyon oluşturmak için ikinci ile üçüncü tabaka arasında 0.1 mm kalınlığında teflon yerleştirilmiştir. Levha, 2 bar basınç altında 150 derece 10 dk boyunca prese tabi tutulmuştur (Şekil 4.1). Sıcaklık, iki adet termal propla izlenmiştir. Malzeme, sertleşme sıcaklığına ulaştıktan sonra doğal olarak soğutulmuştur.



a)



b)

Şekil 4.1 Kompozit malzemelerin üretilmesi. a) Kompozit malzemede oluşturulan delaminasyonlar, b) Sıcak pres ve sıcaklığın problarla izlenmesi

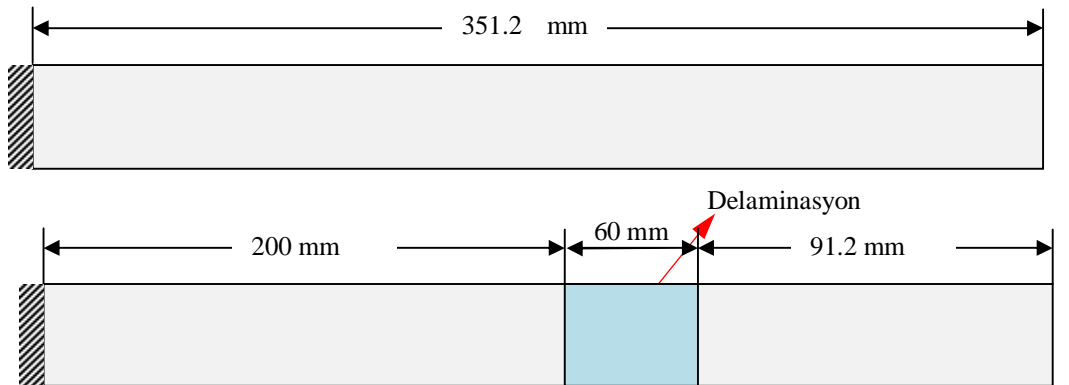
Daha sonra levhadan, delaminasyon hasarının tespiti için, testere ile bir kiriş kesiti çıkarılmıştır. Çıkarılan kompozit kiriş üzerinde, laboratuvar ortamında modal analizler yapılarak doğal frekansları bulunmuştur

#### 4.4 Nümerik Analiz

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile kompozitlerin titreşim yükleri altındaki davranışları incelenip alınan veriler, bahsedilen algoritmalarda kullanılarak hasarın olduğu bölge tespit edilmeye çalışılmıştır. Tek boyutlu kompozit kiriş ve levhanın modellenme ve analizi sürecinde ticari yazılım paketi olan ANSYS kullanılmıştır. Burada dikdörgen kesitli kirişin kesiti 351x43x6.525 mm boyutlarındadır. Tabakalar  $[(0/90)_5]_s$  olacak şekilde 20 tabaka olarak modellenmiştir. Ön işlem aşamasında, kiriş modelinde uzunluk boyunca 21 sayıda eleman, genişlik boyunca 6 sayıda eleman, kalınlık boyunca ise 3 eleman kullanılmıştır. Analiz, kompozit kirişin bir ucu ankastre diğer ucu serbest sınır koşuluyla yapılmıştır. Analizde, eleman tipi olarak SOLID 46 kullanılmıştır. Kompozit yapıya ait malzeme özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Delaminasyon içeren kompozit kirişe ait boyutlar Şekil 4.2’de verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile kirişe ait delaminasyon durumu için modal analiz gerçekleştirilmiştir. Analizde eleman tipi olarak tabakalı kompozitler için uygun olan SOLID 46, delaminasyon bölgesi için sadece basmaya karşı davranış gösteren üç boyutlu eleman olan LINK 10 kullanılmıştır.

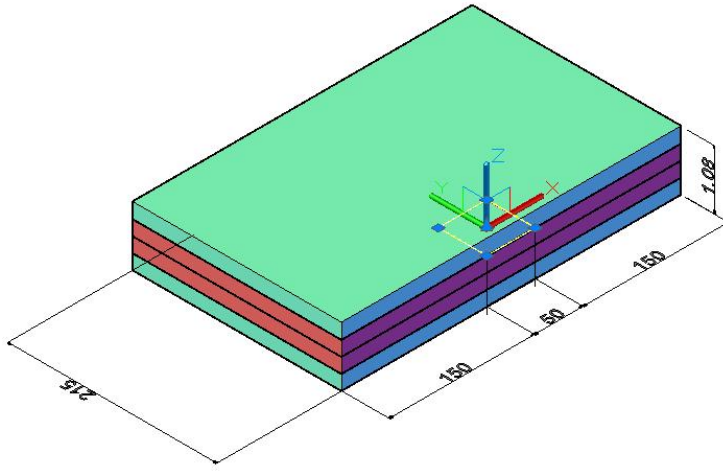
Tablo 4.1 Tabakalı kompozit malzemenin özellikleri

$E_x$ (MPa)	$E_y$ (MPa)	$E_z$ (MPa)	$\nu_{xy}$	$\nu_{xz}$	$\nu_{yz}$	$G_{xy}$ (MPa)	$G_{xz}$ (MPa)	$G_{yz}$ (MPa)
146700	7800	7800	0.29	0.29	0.3	4800	4800	2000



Şekil 4.2 Hasar belirleme prosesi için üretilen kompozit kirişler (üst: Sağlıklı kiriş, alt: Delaminasyon hasarı)

İki boyutlu analizde, dikdörtgen kesitli 350x215x1.08 mm boyutunda kompozit levha analiz edilmiştir (Şekil 4.3). Tabakalar simetrik olacak şekilde 4 tabakadan (0/90/90/0) oryantasyon açılarıyla modellenmiştir. Modelde, uzunluk boyunca 15 sayıda eleman, genişlik boyunca 15 sayıda eleman ve kalınlık boyunca ise 4 eleman kullanılmıştır. Analizde, eleman tipi olarak SOLID 46 kullanılmıştır. Çözüm sürecinde, kullanılan kompozit yapıya ait malzeme özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Burada, kullanılan kompozit malzemenin yoğunluğu  $1364 \text{ kg/m}^3$  tür. Sınır koşulu olarak, kompozit levhanın sadece bir kenarı ankastre diğer kenarlar ise serbest kabulü yapılarak çözdürülmüştür.



Şekil 4.3 Kompozit levhada, delaminasyonun modellenmesi (4 tabaka 0/90/90/0)

#### 4.5 Kiriş ve Levhadaki Hasar Tespiti için Elde Edilen Sonuçlar

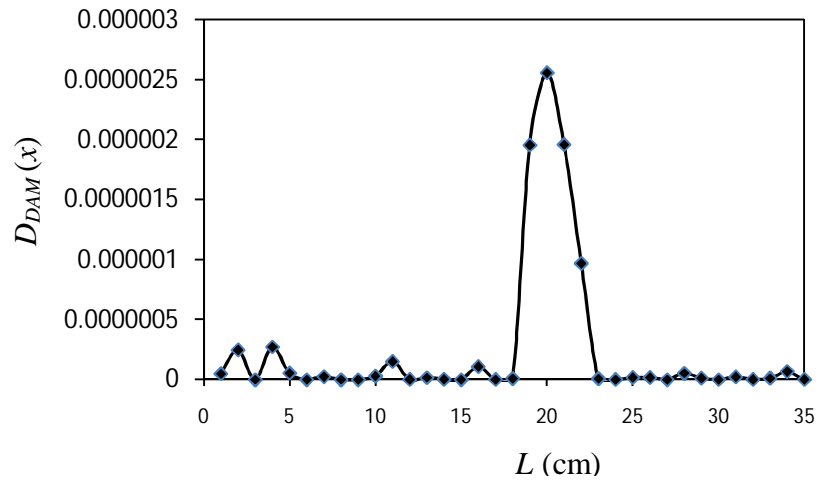
Deneyel test aşamasında, çekiç ile ani kuvvet oluşturulmuş ve kirişin mesnetlendiği noktadan, 280 mm uzaklığa yerleştirilen piezoelektrik tabanlı ivmeölçer ile kompozit kirişin salınımları alınmıştır. Daha sonra, deneysel olarak kompozit kiriş için elde edilen veriler üzerinde, hızlı Fourier dönüşüm tekniğinin uygulanmasıyla, kirişin sağlıklı durumu için (delaminasyon olmadığı durumda) elde edilen doğal frekanslar, 64.08, 329.84 ve 396.43 Hz gibidir. Kirişin hasarlı olması durumunda (delaminasyon içerdiği durumda) ise elde edilen doğal frekanslar 41.86, 111.21 ve 220.82 Hz olarak bulunmuştur. Daha sonra, kompozit kirişte, deneysel olarak uygulanan hasar tespitinin doğruluğunu araştırmak için, nümerik yöntemle kiriş üzerinde modal analizler yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin uygulanması sonucu, sağlıklı kompozit kiriş için elde

edilen ilk üç doğal frekans sırasıyla 63.01, 329.96 ve 397.23 Hz gibidir. Aynı şekilde, kirişin hasarlı olması durumunda ise elde edilen (delaminasyon içerdiği durumda) doğal frekanslar ise 42.12, 113.11 ve 222.18 Hz olarak bulunmuştur. Her iki yöntemde de elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yapıda hasarın bulunması durumunda, doğal frekansların da azaldığı söylenebilir.

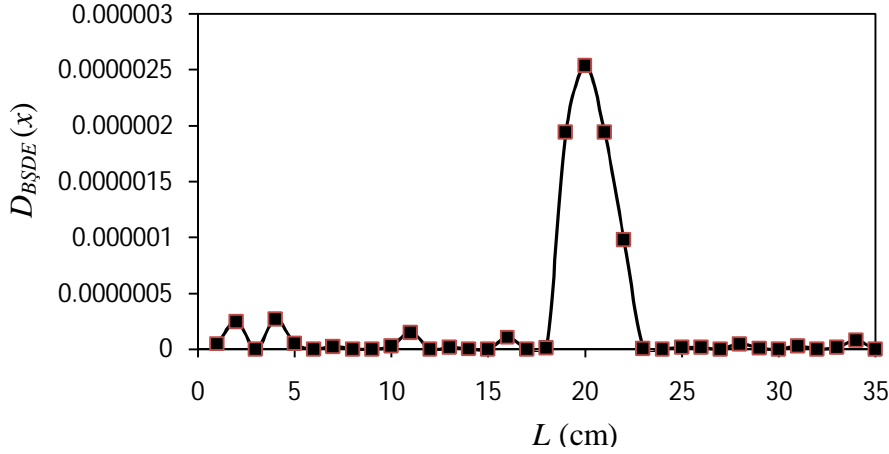
Deneysel olarak kompozit kiriş için elde edilen doğal frekanslar, nümerik yöntemin uygulanması ile elde edilen doğal frekanslarla karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyum içerisinde oldukları görüldükten sonra, analizler sadece nümerik yöntemle koşturularak, kiriş ve levha için DAM ve BŞDE ile hasar tespitleri yapılmıştır. Delaminasyon içeren kompozit kirişteki hasar tespitinde DAM VE BŞDE algoritmalarının uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 4.4 ve 4.5'te verilmiştir. Burada, kompozit kirişte mevcut hasar bölgesi 200 mm ile 260 mm aralığında iken, tespit edilen bölge ise 180 mm ile 230 mm aralığında bulunmuştur. Sonuçlara bakıldığında sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte hasar tespit algoritmaları uygulandığında hasar lokasyonlarının bulunduğu yer hakkında fikir edinilebildiği görülmüştür. Bunun yanında, kompozit kirişteki delaminasyon bölgesinin belirlenmesinde DAM ve BŞDE algoritmalarının hasar tespitinde eşit hassasiyete sahip oldukları görülmüştür (Tablo 4.2).

Tablo 4.2 Kompozit kirişte mevcut olan ve tahmin edilen delaminasyon bölgesinin yeri

Hasar	Mevcut	ABA	BŞDE
Delaminasyon (mm)	(200-260)	(180-230)	(180-230)



Şekil 4.4 Delaminasyon içeren kompozit kirişteki hasar tespitinin DAM ile yapılması



Şekil 4.5 Delaminasyon içeren kompozit kirişteki hasar tespitinin BŞDE ile yapılması

Delaminasyon içeren kompozit levhada, nümerik yöntem ile modal analizler yapılmış, mod şekillerinin bulunmasının akabinde, mod şekillerinden eğrilik yüzeyleri çıkartılmış ve daha sonra Düzgün Aralık Metodu (DAM) ile Birim Şekil Değiştirme Enerjisi (BŞDE) hasar tespit algoritmalarında kullanılmasıyla hasarın olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Kompozit levhadaki hasar tespitleri için iki farklı durum için değerlendirilmiştir. Birinci durum da, yapının başlangıçtaki sağlık durumunun biliniyor varsayımı ile tanılamalar yapılmıştır. Metodoloji kısmında belirtildiği üzere, bazen, hasar tespiti yapılırken hasara uğramış yapının hasara uğramadan önceki verileri bulunmayabilir. Bu kapsamda, ikinci durumun değerlendirilmesinde, yapının başlangıç koşullarının bulunmadığı varsayımı yapılarak hasar tespitleri yapılmıştır.

Tablo 4.3 Levha için elde edilen doğal frekanslar

No	Sağlam (Hz)	Delaminasyon (Hz)
1	3.47	3.45
2	5.57	5.55
3	21.77	21.54
4	24.81	24.43

Çözüm tekniği olarak, sonlu elemanlar yöntemi kullanılıp, kompozit levhadaki hasar tespitleri için modal analizler uygulanmış ve sağlam ve delaminasyon içeren kompozit levha için elde edilen ilk dört doğal frekans Tablo 4.3'te verilmiştir. Burada, sağlıklı levha için elde edilen ilk dört doğal frekans, 3.47, 5.57, 21.77 ve 24.84 Hz olurken, yapısında delaminasyon bulundurması durumunda ise, elde edilen ilk dört doğal frekans 3.45, 5.55, 21.54 ve 24.43 Hz olarak bulunmuştur. Kompozit kirişteki hasar tespit analizinde olduğu gibi

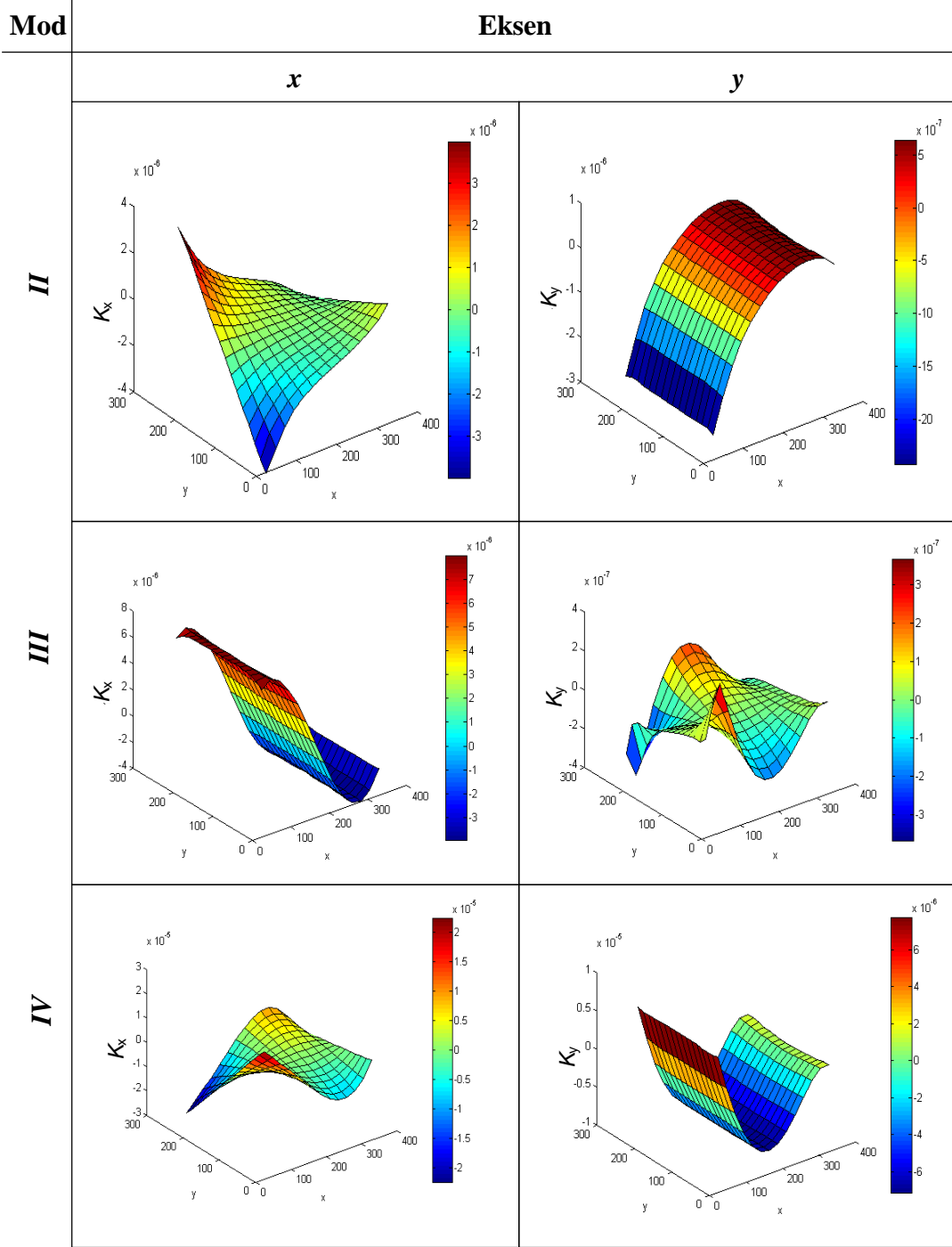
kompozit levhada da içyapısında hasar içermesi durumunda doğal frekansların düştüğü görülmüştür. (Tablo 4.3). Kompozit levha için titreşim tabanlı YSİ ile yapılan yapılan hasar teşhisinde elde edilen doğal frekanslar değişimleri bulunduktan sonra, sağlıklı ve hasarlı kompozit levha için mod şekilleri çıkartılmıştır. Daha sonra mod şekillerinden, eğrilik yüzeyleri çıkartılmıştır. Elde edilen eğrilik şekilleri, DAM ve BŞDE’de değerlendirilerek hasar tespitleri yapılmıştır. Hasar tespitinde iki durum değerlendirilmiştir. Birinci durumda, yapının başlangıç koşul verileri bilindiğinde, ikinci durumda ise, yapının başlangıç koşul verileri bilinmediği varsayımı yapılarak tanılamalar yapılmıştır. Modal analizler sonucu elde edilen mod eğrilik sonuçları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de, DAM ve BŞDE’den elde edilen sonuçlar Şekil 4.8-4.11’de verilmiştir. Burada, hasar tespit algoritmalarının değerlendirilmesinde ikinci, üçüncü ve dördüncü mod şekilleri göz önüne alınmıştır. Birinci modta, hem giriş hem de levha için her üç eksen için hasar tespit edilmemiştir.

Tablo 4.4 Yüzey uydurma algoritması uygulanmasıyla elde edilen polinom katsayıları (% 95 güvenilirlik aralığı)

	Eğrilik Modu II			Eğrilik Modu III			Eğrilik Modu IV		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
<b>P00</b>	-7.183e-006	-3.56e-006	0.0006077	-1.007e-005	-1.542e-007	-0.0009045	2.833e-005	9.242e-006	0.00255
<b>P10</b>	9.346e-008	6.783e-008	8.726e-006	3.66e-008	1.712e-008	8.719e-006	-1.422e-007	-1.758e-007	-5.337e-005
<b>P01</b>	9.019e-008	-2.407e-009	5.438e-006	3.203e-008	-1.522e-008	1.699e-006	-3.085e-007	6.179e-009	-2.002e-005
<b>P20</b>	-4.668e-010	-3.96e-010	-3.931e-008	2.004e-010	-2.712e-010	7.651e-008	-8.347e-010	3.749e-010	2.422e-007
<b>P11</b>	-8.953e-010	-1.072e-010	-8.615e-008	-1.066e-009	5.527e-011	1.043e-008	1.586e-009	1.737e-010	3.969e-007
<b>P02</b>	-3.97e-010	4.148e-011	7.582e-009	2.077e-010	3.502e-010	-3.152e-008	1.238e-009	1.482e-010	-8.383e-009
<b>P30</b>	9.772e-013	8.883e-013	7.077e-011	-6.897e-014	1.36e-012	-5.71e-010	4.908e-012	1.731e-012	-3.699e-010
<b>P21</b>	3.315e-012	7.846e-013	3.335e-010	4.441e-012	-4.135e-013	-9.869e-011	6.793e-013	-2.19e-012	-1.805e-009
<b>P12</b>	1.595e-012	-3.874e-013	3.335e-010	3.248e-012	-9.129e-013	1.313e-010	9.985e-015	-1.876e-012	4.893e-010
<b>P03</b>	1.581e-012	1.661e-013	-5.139e-011	-2.617e-012	-1.949e-012	1.071e-010	-7.4e-012	-1.243e-012	-1.033e-010
<b>P40</b>	-6.086e-016	-5.456e-016	-3.842e-014	-1.695e-015	-2.121e-015	8.649e-013	-5.906e-015	-4.341e-015	1.894e-013
<b>P31</b>	-4.687e-015	-1.669e-015	-4.219e-013	-4.659e-015	1.212e-015	1.846e-013	-9.363e-015	3.005e-015	2.126e-012
<b>P22</b>	-9.829e-016	6.432e-016	-1.147e-013	-9.339e-015	4.07e-016	-2.357e-013	-4.265e-016	7.684e-015	-4.907e-013
<b>P13</b>	-3.514e-015	1.104e-015	-6.011e-014	1.696e-015	2.613e-015	-1.119e-013	1.512e-015	1.381e-015	-9.011e-013
<b>P04</b>	-1.886e-015	-1.117e-015	8.152e-014	4.136e-015	3.387e-015	-1.419e-013	1.355e-014	3.576e-015	4.334e-013

Hasar tespit algoritmalarının değerlendirilmesinde sonlu elemanlar yönteminden elde edilen veriler kullanılmıştır. Burada, not edilmesi gereken önemli bir husus, 2., 3. ve 4. modlara ilişkin elde edilen yer değiştirmeler levhanın

en üst yüzeyine ait elemanların düğüm noktalarından okunmuştur. Bir başka şekilde, kirişin yüzeyi değerlendirilerek, derinlik boyunca hasar tanınması yapılır.



Şekil 4.6 Sağlam kompozit levha için elde edilen 2., 3. ve 4. eğrilik mod şekilleri

Çalışmada her iki algoritma, her iki durum için değerlendirilmiştir. Bu amaçla, birinci durumun değerlendirilmesinde, mod şekillerinden  $x$  ve  $y$  eksenleri için türetilen 2., 3. ve 4. moda ilişkin eğrilik yüzeyleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Burada,  $x$  ve  $y$  eksenleri, sırasıyla kirişin uzunluk ve genişliğini göstermektedir.  $z$

ekseni ise kiriş yüzeyindeki düğüm noktaları için hesap edilen eğrilik değerleridir. Aynı şekilde, renk çubuk ölçeği, eğrilik değerlerini tasvir etmektedir.  $K_x$  ve  $K_y$  ise  $x$  ve  $y$  eksenleri için denklem (4.10) kullanılarak hesap edilen eğrilik yüzeyleridir. İkinci durumun değerlendirilmesinde, hasar tespiti için yüzey uydurma algoritması kullanılarak elde edilen polinoma ilişkin katsayılar Tablo 4.4'te verilmiştir.

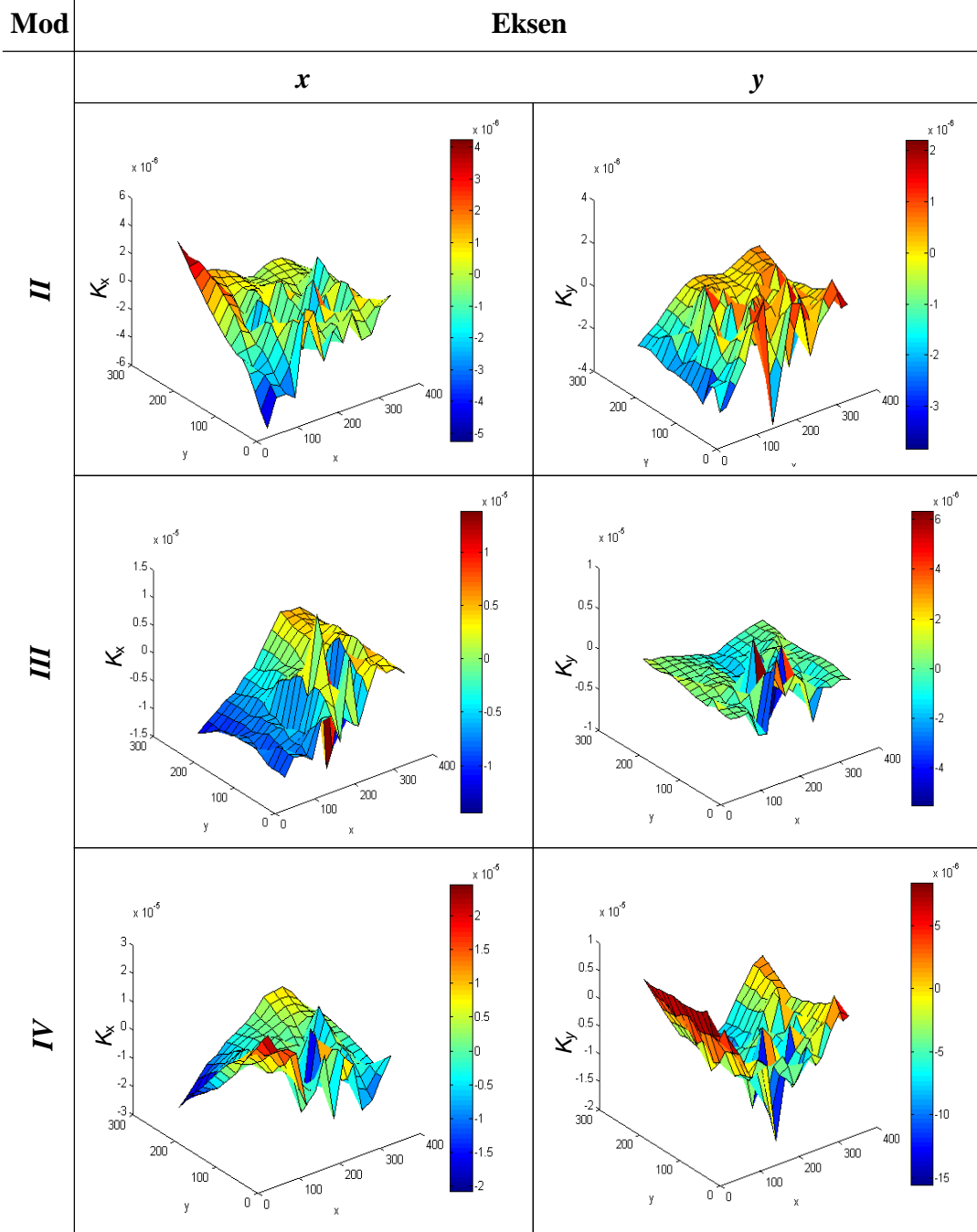
Sağlıklı kompozit levha için 2., 3. ve 4. mod şekilleri için elde edilen yer değiştirmelere ilişkin eğrilik yüzeyleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Burada,  $x$  ve  $y$  eksenleri için verilen eğrilik modlarının, düzgün bir yüzeye sahip oldukları görülmüştür. 3. moda ilişkin  $y$  ekseninde sol alt ve üst kenarlarda diğerlerine nazaran daha keskin değişimler görülmüştür, Aynı şekilde, kompozit levhadaki modun artmasına bağlı olarak yüzeylerdeki kıvrımlarında arttığı görülmektedir.

Hasar tipi olarak  $x$  ekseninde 150-200 mm aralığı ile  $y$  ekseninde de 0-50 aralığında delaminasyon içeren bir levhada 2., 3. ve 4. mod şekilleri için elde edilen eğrilik yüzeyleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Burada,  $x$  ve  $y$  eksenleri için verilen eğrilik modlarının, sağlıklı kirişe nazaran, nispeten düzgün olmayan yüzeyler elde edilmiştir.

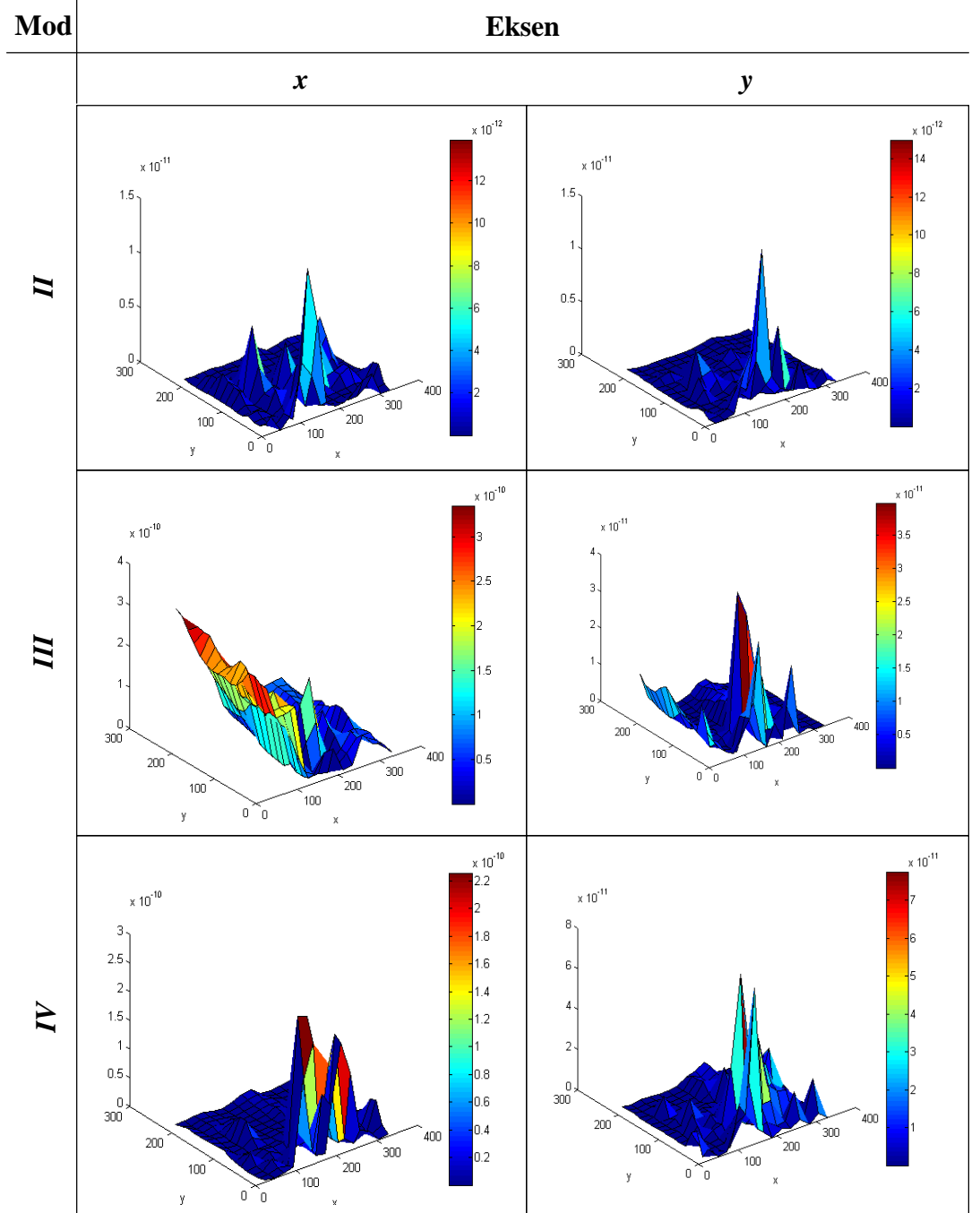
Referans olarak, sağlıklı levha alınıp delaminasyon içeren levha için elde edilen eğrilik yüzeylerini karşılaştırıldığında, delaminasyon içeren levhadaki düzgün olmayan şekillere dayanarak, levhada hasar olduğunu, ancak görsel olarak  $K_x$  ve  $K_y$  verilerinden tam olarak hasarın olduğu bölgeyi belirlemek zordur. Bu amaçla elde edilen veriler daha sonra, DAM ve BŞDE hasar tespit algoritmalarında değerlendirilerek hasar bölgesi araştırılmıştır. İç yapısında  $x = 150-200$  mm ve  $y = 0-50$  mm aralıklarında delaminasyon içeren kompozit bir levhadan, nümerik yöntem uygulanarak eğrilik yüzeyleri bulunmuş ve bunların üzerinde düzgün aralık algoritmasının uygulanması sonucu elde edilen hasar tespit indeks sonuçları Şekil 4.8'de verilmiştir. Analiz, hasarlı kompozit bir levhanın başlangıç koşulları biliniyor varsayımı yapılarak değerlendirilmiştir. Bir başka şekilde, denklem (4.4)'te verilen  $K(x,y)$  değişkeni, sağlıklı tabakalı kompozit levhaya ilişkin eğrilikleri göstermektedir. DAM ile yapılan hasar tespitinde, 3. moda ilişkin verilen  $x$  ekseninin haricinde, özellikle hasar lokasyonlarında, bazı



keskin olarak artan yüzeyler elde edilmiştir. Bunun yanında, 3. mod y eksen verileri incelendiğinde sınır kenarlarında düzgün olmayan yüzeyler tespit edilmiştir.



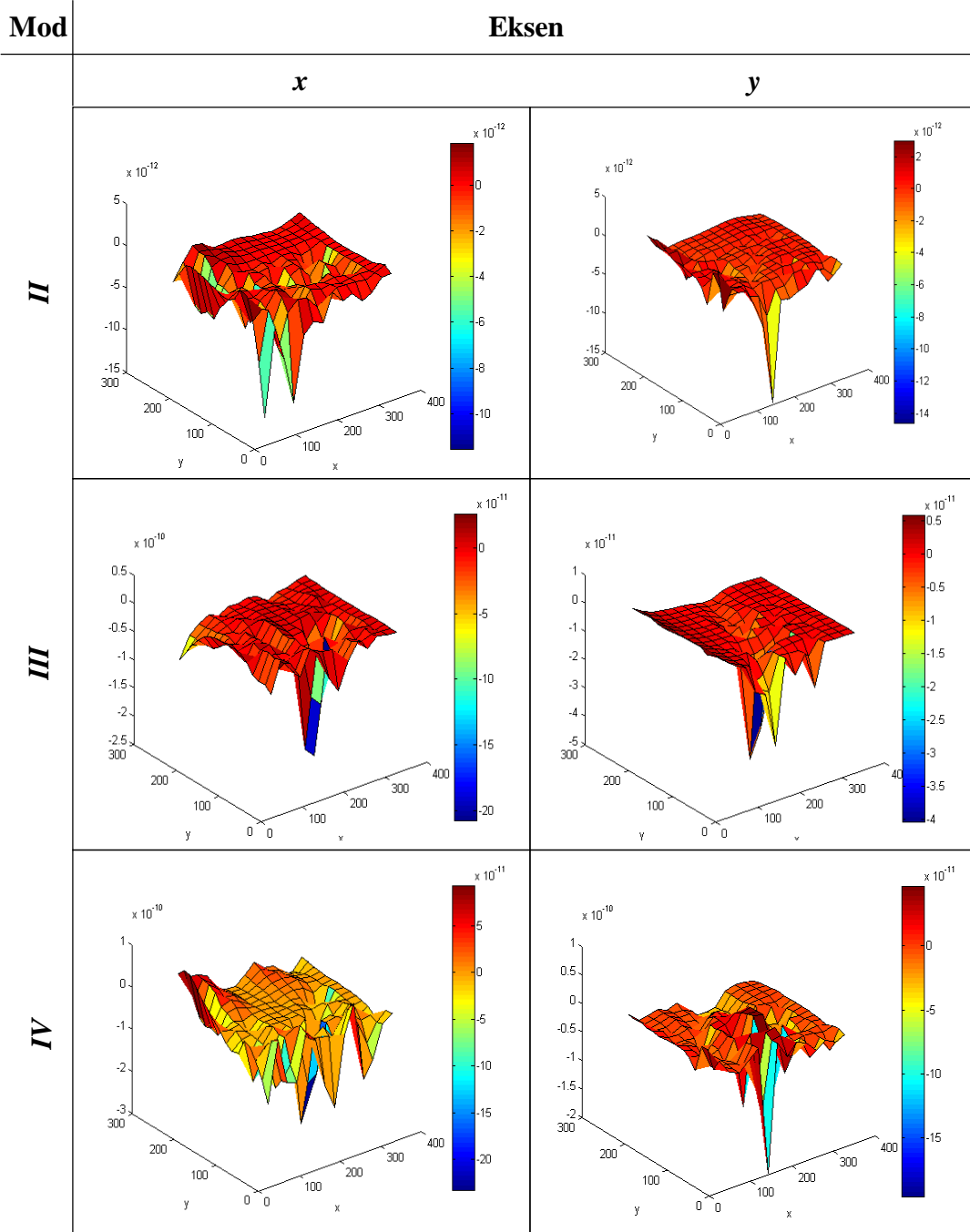
Şekil 4.7 Delaminasyon içeren levha için edilen 2., 3. ve 4. eğrilik mod şekilleri



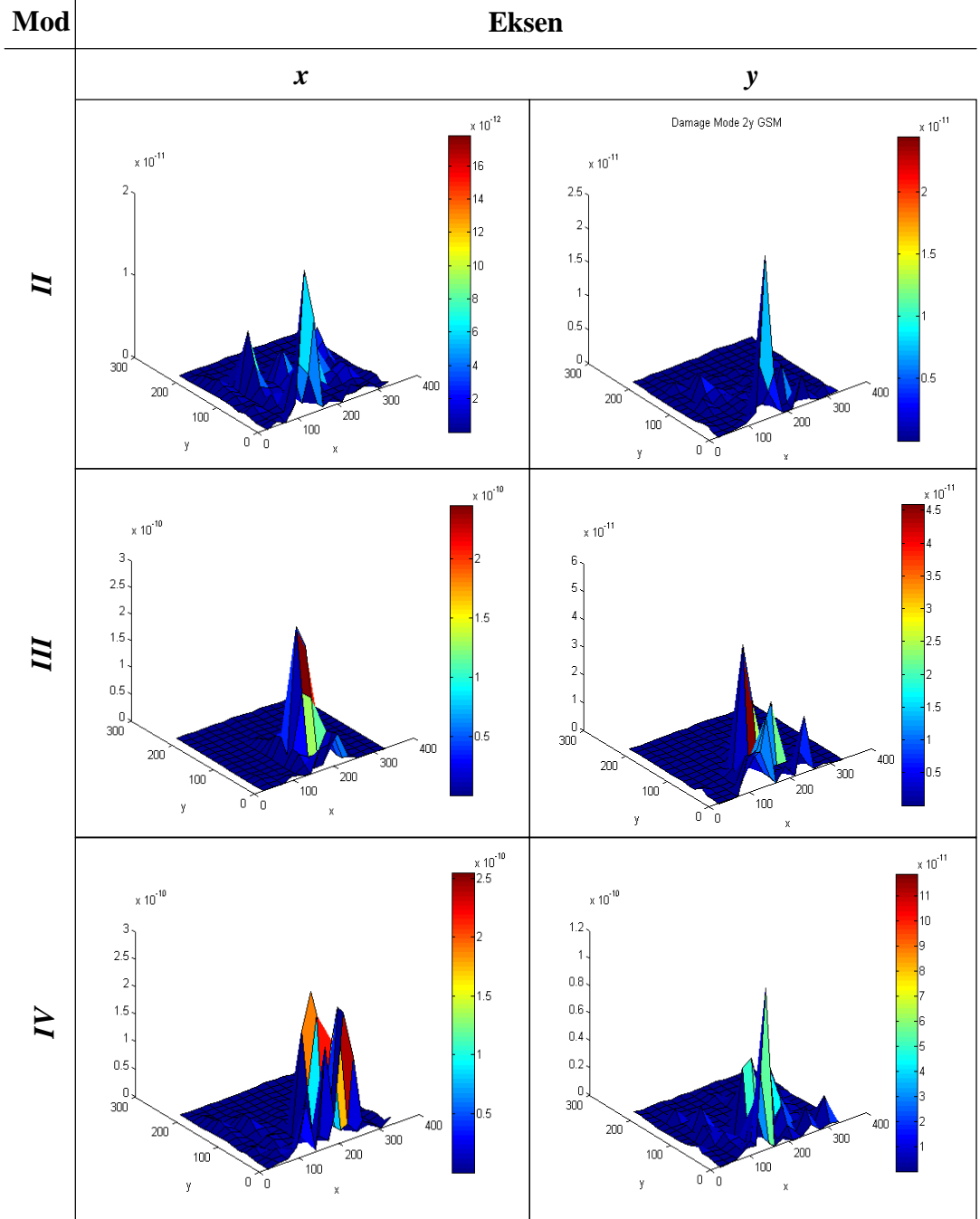
Şekil 4.8 Durum 1’de, 2., 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen DAM hasar tespit sonuçları

Aynı şekilde 1. durum için 2, 3 ve 4. modlara ilişkin, birim şekil değiştirme enerji algoritmasının uygulanmasıyla elde edilen hasar tespit indeks sonuçları Şekil 4.9’da verilmiştir. Burada da, başlangıçtaki yapının (sağlıklı durumda) verileri kullanılarak hasar tespitleri yapılmıştır. Şekil 4.9 incelendiğinde, özellikle hasar bölgelerinde, bazı modlarda birer, bazılarında ise birden çok keskin yüzey artış değerleri görülmüştür. Önceki kısımlarda belirtildiği üzere, yapıya ilişkin

başlangıç sağlık koşullarının bulunmadığı zamanlarda, regresyonlar analizleri yapılarak, yapının başlangıçtaki durumları tahmin edilir.



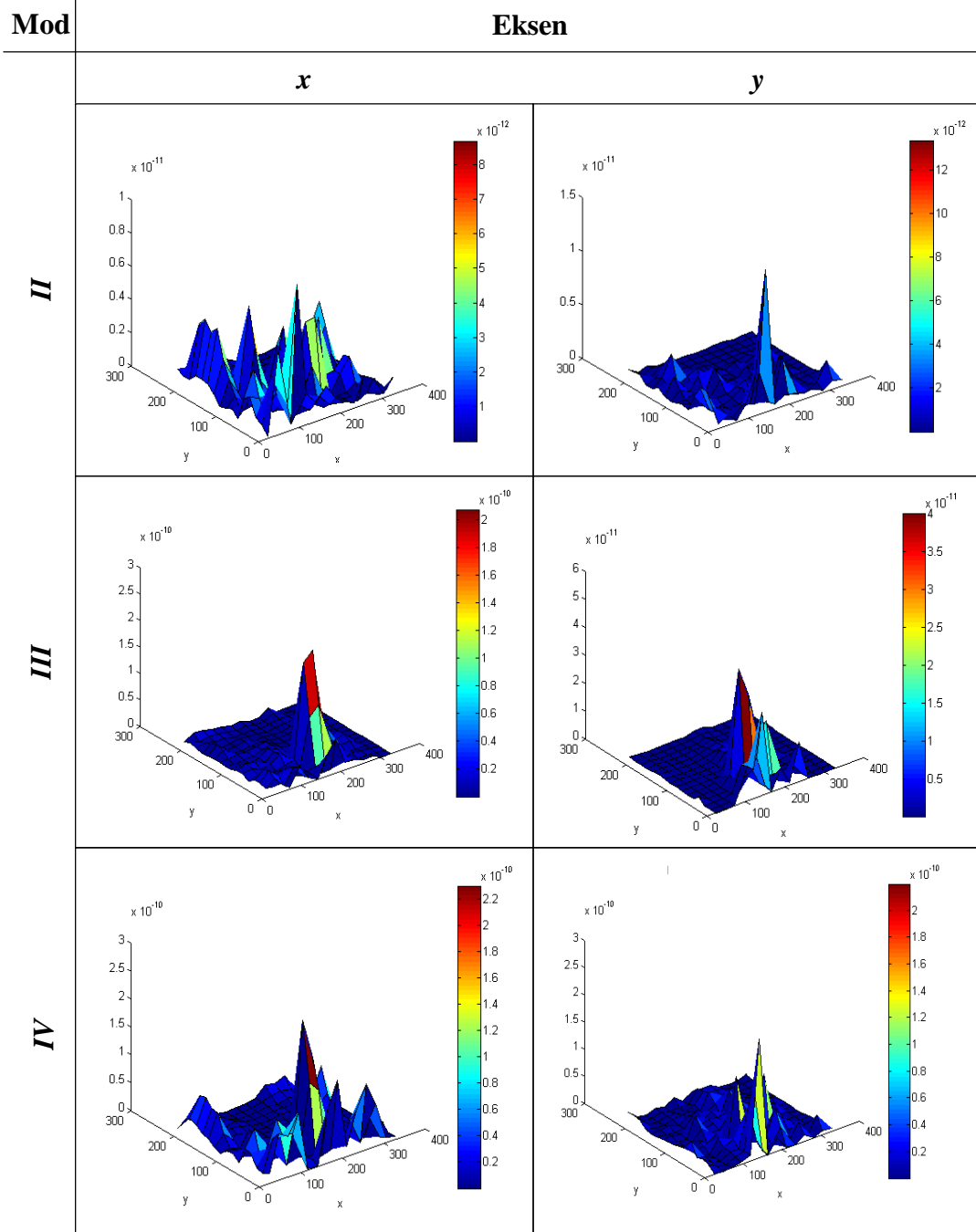
Şekil 4.9 Durum 1'de 2., 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen BŞDE hasar tespit sonuçları



Şekil 4.10 Durum 2’de, 2., 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen DAM hasar tespit sonuçları

Bir başka şekilde, deforme olmuş kompozit levha, yüzey uydurma algoritmasıyla değerlendirilip elde edilen polinom verileri, sağlıklı bir levhayı temsil etmektedir. Böylece, denklem (4.4)’te verilen sağlıklı yapıya ilişkin  $K(x,y)$  değişkende, denklem (4.7)’ de verilen  $K_{fit}(x,y)$  kullanılmasıyla hasar bölgesi belirlenir. 2. durum için, 2, 3 ve 4. modlara ilişkin, düzgün aralık algoritmasının uygulanmasıyla elde edilen hasar tespit indeks sonuçları Şekil 4.10’da verilmiştir.

Aynı şekilde burada da, hasar bölgelerinde, bazı modlarda birer bazılarında ise birden çok keskin yüzey artış değerleri görülmüştür. Bunun yanında, 3. mod y eksen verileri incelendiğinde sınır kenarlarında düzgün olmayan yüzeyler tespit edilmiştir.



Şekil 4.11 Durum 2’de 2., 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen BŞDE hasar tespit sonuçları

Son olarak, 2. durumda, hasar tespit değerlendirilmesi için 2, 3 ve 4. modlara ilişkin, birim şekil değiştirme enerjisi algoritmasının uygulanmasıyla yüzey boyunca elde edilen hasar tespit sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir. Bu

kısımda da, başlangıçtaki yapının verileri kullanılmadan, yani denklem (4.9)'da verilen  $K_{fit}(x,y)$  kullanılarak hasar belirlenmiştir. Durum 2'de, BŞDE ile yapılan hasar tespitinde, 2. ve 4. moda ilişkin olarak verilen  $x$  yönündeki eğrilikler dikkate alındığında, hasarın haricindeki bölgelerde de keskin artış gösteren yüzeyler elde edilmiştir. Bu sonuç ta, bu modlarla, hasar tanılamanın zor olduğunu göstermektedir.

#### 4.6 Tartışma ve Genel Değerlendirmeler

Bu bölümde literatürde, yaygın olarak model tabanlı titreşim tabanlı hasar tespit analiz teknikleri, yapısında hasar tipi olarak delaminasyon içeren bir kiriş ve levhaya uygulanarak hasarın olduğu bölgenin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Yapı sağlığı izleme tekniklerinde, hasar tanılması için tersinir yöntemler, fizik kuram modelleri ve veri tabanlı YSİ olmak üzere üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Tersinir yöntem ve model tabanlı YSİ'de, yapı için, fizik kuramlarına bağlı matematiksel modeller geliştirilerek yapılır. Burada, çözüm tekniği olarak, analitik formülasyonlar veya yaygın olarak, katı cisimler mekaniğinde uygulanan sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Sisteme ilişkin model kurulduktan sonra, deneysel ölçümlerden alınan veriler sürekli olarak modelde değerlendirilip yapıya ilişkin sağlık teşhisi yapılır. Ancak, lineer olmayan davranış gösteren, kompozit malzemelerde tabakalar arası kaymalar, mekanik sistemlerde oluşabilen cıvata gevşemesi veya rulmanlardaki bilyelerin kırılması sonucu oluşan hasar davranışları gibi, matematiksel olarak modellenmesi zor olan hasarların, model tabanlı YSİ yaklaşımlarıyla değerlendirmek, zor olabilir. Bunun için, YSİ'de fiziksel kuramlar kullanılmadan direkt olarak ölçüm verilerinin istatistiksel olarak işlenmesine dayalı bir yöntem olan, veri tabanlı YSİ tekniği, son zamanlarda model tabanlı tekniklere ek olarak, kullanılmaktadır. Veri tabanlı YSİ'de, incelenen sistemle ilgili, oluşabilecek tüm sağlıklı ve hasarlı durum kombinasyonları bir etiketle ilişkilendirip, istatistiksel bir model kurulmasına dayalıdır. Daha sonra da, bu model, örgü tanıma tekniklerinde değerlendirilerek hasar tanılması yapılır.

Bu bölümde, model tabanlı YSİ tekniği, iç bölgelerinde delaminasyon oluşturulmuş tabakalı kompozit malzemelere uygulanarak hasar bölgesinin yeri

tespit edilmesi amaçlanmıştır. Başlangıçta, delaminasyon oluşturulmuş tabakalı kompozit bir kiriş, deneysel olarak modal testler uygulanarak doğal frekansları bulunmuştur. Daha sonra, sağlıklı ve hasarlı kirişe ilişkin ölçülen doğal frekanslar, nümerik yöntem sonuçları ile karşılaştırılmış ve uyumlu birbirleriyle oldukları görülmüştür. Sonra, sonlu elemanlar yöntemi delaminasyon içeren tabakalı kompozit bir kiriş ve levha üzerinde uygulanıp mode şekilleri çıkartılmıştır. Mod şekillerinden eğrilik yüzeyleri çıkartılmış ve daha sonra düzgün aralıklı metodu (DAM) ile birim şekil değiştirme enerjisi (BŞDE) ile hasarın olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Düşük frekanslarda, yani birinci mod ile hem kiriş hem de levha için her iki ekseninde hasar tespit edilmemiştir. Nitekim önceki kısımlarda bahsedildiği üzere, titreşim tabanlı hasar tespit teknikleriyle, deneysel olarak ölçülen ilk birkaç doğal frekansa ilişkin analizlerin yapılmasıyla, hasarın belirlenmesinin güçlüğünden belirtilmişti. Böyle durumlarda, yapının davranışı yüksek frekanslarda izlenilmesinin daha yararlı olacağı aynı şekilde belirtilmişti. Ama çoğu zaman titreşim tabanlı hasar tespit teknikleriyle lokal hasarların belirlenmesi için yapıyı, yüksek frekanslarda değerlendirmek zordur. Ancak bu tekniklerde kullanılan sensörlerin ölçüm hassasiyet aralıkları sınırlı olduğundan dolayı yüksek frekanslara çıkılamıyor. Bunların üstesinde geçmek için bir başka deyişle yapıdaki küçük hasarların tespitinde dalga ilerlemelerinde dayalı ultrasonik YSİ sistemleri alternatif olarak kullanılabilir.

Kompozit levhadaki hasar teşhisi, iki farklı durum için değerlendirilmiştir. Birinci durum da, yapının başlangıçtaki sağlık durumunun biliniyor varsayımı ile ikinci durumda, ise başlangıç sağlık durumu bilinmeden tanılamalar yapılmıştır. Hasar tespit algoritmalarının değerlendirilmesinde, sonlu elemanlar yönteminden elde edilen veriler kullanılmıştır. Burada, not edilmesi gereken husus, 2., 3. ve 4. modlara ilişkin elde edilen yer değiştirmeler levhanın en üst yüzeyine ait elemanların düğüm noktalarından alınarak algoritmalarda değerlendirilmiştir. Bir başka şekilde, kirişin üst yüzeyi değerlendirilerek, derinlik boyunca hasar tanınması yapılmıştır. Burada, model tabanlı YSİ teknikleri, kontrollü laboratuvar ortamında ve nispeten düzgün mühendislik yapılarında kullanıma elverişlidir. Çevresel operasyonel yüklere maruz kalan mühendislik yapılarını, bu yöntem ile değerlendirmek zor olabilir. Bu çalışmada kullanılan her iki algoritma her iki durum için değerlendirilmiştir. Hasar tespit sonucu elde edilen sonuçlar detaylı

olarak Tablo 4.5'te verilmiş ve elde edilen genel sonuçlar, aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kompozit yapılarıdaki delaminasyon doğal frekansı azalttığı görülmüştür.
- En iyi sonuçlar mod 3 ve mod 4'te elde edilmiştir.
- Birim şekil değiştirme (DAM) algoritması ile BŞDE'den elde edilen sonuçlar yaklaşık olarak aynı hassasiyete sahip olduğu görülmüştür (Tablo 4.5).
- 3. ve 4. mod verilerinin DAM ve BŞDE'de uygulanmasıyla, yapının başlangıç durumuna ilişkin sağlık durumu bilinmeden hasarın tespit edilebileceği belirlenmiştir.

Tablo 4.5 Kompozit levhada tahmin edilen delaminasyon bölgesinin yeri

Durum	HTA	Mod II		Mod III		Mod IV	
		x	y	x	y	x	y
I	DAM	-	$l=140-186$ $w=0-28$	$l=140-210$ $w=0-57$	$l=116-233$ $w=28-57$	$l=100-210$ $w=0-57$	$l=140-210$ $w=28-57$
	BŞDE	-	$l=140-186$ $w=0-14$	$l=140-210$ $w=0-57$	$l=140-233$ $w=28-57$	-	$l=140-210$ $w=0-57$
II	DAM	-	$l=140-186$ $w=0-14$	$l=110-210$ $w=14-57$	$l=90-233$ $w=28-57$	$l=140-233$ $w=0-57$	$l=140-233$ $w=28-57$
	BŞDE	-	$l=116-163$ $w=0-29$	$l=150-200$ $w=0-57$	$l=140-233$ $w=28-57$	$l=140-210$ $w=0-57$	$l=140-210$ $w=0-57$

HTA: Hasar tespit algoritması, Mevcut delaminasyon bölgesi:  $l=150-200$ ,  $w=0-50$ ,

Taralı alanlar: Hasarın belirlendiğini göstermektedir.

- Bu yöntemle hasarın olduğu bölgenin tespitinin yapılabilmesi için yapıya ilişkin mod şekillerinin bilinmesi gerekir. Yapının mod şekillerinin doğru bir şekilde bulunması için, yapının birçok bölgesine ivmeölçer yerleştirilmesi gerekir. Bunun yanında, karmaşık geometri yapılarıdaki mod şekillerinin bulunmasının akabinde, eğrilik şekillerini belirlemek zor olabilir. Bu gibi durumlarda, her ne kadar laboratuvar ortamında test edilen küçük boyutlu yapılarıdaki hasarları model tabanlı analiz teknikleriyle belirlenebilirse de, büyük ve kompleks mühendislik yapılarında oluşabilecek küçük hasarları bu teknikle değerlendirmek elverişli olmayabilir. Böyle durumlarda, veri tabanlı (sensör verileri ile) tekniklerle yapının sağlık durumunu değerlendirmek daha avantajlı olabilir.



- Yapının sağlıklı durumuna ilişkin verilerin bulunmadığı zamanlarda, ilk durumunu tahmin etmek, bir başka şekilde veri uydurma prosedürlerinin uygulanması gerektiğı zamanlarda, radyal temel fonksiyonlar, destek vektör makineleri veya yapay sinir ağlarından yararlanılabilir.
- Sonuç olarak laboratuvar ortamında, kompozit malzemelerden imal edilen kompozit kiriş ve levhanın iç bölgelerinde oluşan delaminasyonlar deneysel veya nümerik yöntemlerden alınan verilerin, geleneksel model tabanlı analiz algoritmalarında kullanılmasıyla tahribatsız bir şekilde tahmin edilebileceğı kanaatine varılmıştır.

## **5. NON-İNVAZİF VİBRO-HAPTİK KOOPERATİF İNSAN MAKİNE ARAYÜZÜ İLE YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ**

Mühendislik yapılarındaki teknolojik gelişmelere bağlı olarak, bu yapılarda oluşabilecek hasarları tespit etmek çok önemlidir. Mühendislik yapıları canlıların dokularında yer alan sinir sistemler gibi sinir ağlarıyla donatılıp hasar tespiti yapılmaktadır. Günümüzde otomatik kontrol sistemlerinde yapılan ilerlemeler YSİ uygulama alanlarına da yansıyor, insanın yapıdaki sağlık teşhisi için gerekli olan bilişsel motor kabiliyetleri azaltılıp, yerine otomatik olarak hasarı anlık teşhis edebilen matematiksel proselere bırakmıştır. Son 20 yıldır, bu tekniğin kullanılmasıyla otomatik olarak hasarı belirleyebilen birçok algoritmanın gelişmesine olanak tanımıştır. Hâlihazırda, bu algoritmalarla yapıya iliştirilen birçok sensörden ölçüm verileri alınarak, daha sonra veriler üzerinde öz nitelik çıkartma ve farklı tiplerde istatistiksel, nümerik veya zaman modellerinin uygulanmasıyla yapının hasar değerlendirmesi yapılmaktadır. Bu yaklaşımların kullanılmasıyla YSİ uygulamalarında bir hayli derecede ilerlemeler kaydedilmiştir. Diğer taraftan, YSİ deki yapılan tüm ilerlemelere rağmen, insanın bilişsel motor kabiliyetini otomatik olarak hasar belirleyebilen araçlardan dışı bırakmak oldukça zordur. Dolayısıyla, YSİ tekniğinin çözüm performansını artırmak için bütünleşik olarak sayısal teknolojik araçlardan ve insanın bilişsel sisteminden yararlanılarak, geleneksel YSİ prosedürlerinden farklı olan yeni konseptlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümde yer alan araştırmanın temel amacı yapının sağlığını değerlendirmek için yeni ve inovatif kooperatif insan-makine ara yüz paradigması geliştirip insan katılımcıları üzerindeki etkinliğini belirlemektir. Burada, geliştirilen kooperatif YSİ paradigmasının en önemli özelliği tek başına hasar belirleme çözüm prosesine katkı sağlayan tek makineden ve tek başına hasar belirleme prosesine katkı sağlayan tek insandan daima ilerdedir. Bütünleşik insan-makine arayüz paradigmasının geliştirilmesinde; insanın sinir sisteminden, YSİ sensör ağlarından, sinyal işleme tekniklerinden, öz nitelik çıkartma metotlarından, çok değişkenli istatistiksel yöntemlerden, psikofizik prosedürlerinden, haptik teknolojilerinden, nöral plastisite teorilerinden ve duyu ikamesi kuramlarından yararlanılmıştır. Duyu ikamesi kuramı, bazı duyularını kaybeden insanlarda, başka duyular vasıtasıyla zamanla kaybedilen duyuların özelliklerini ikame edecek yeni

duyuları kazanabileceğini önermektedir. Bu bölümdeki çalışmanın temel amacı, duyu ikamede kullanılan tekniğe benzer olarak, yapının hasar durumunu belirten yeni bir duyunun insanlar tarafından kazanılabilme yeterliliğini araştırmaktır.

Araştırma, cıvatalı kafeslerle inşa edilen çelik bir kule yapısı üzerine uygulanmıştır. Kuledeki hasar simülasyonları, bir veya birden çok cıvatanın gevşetilmesiyle yapılmıştır. Sistemin dinamik tepkilerini ölçmek ve verileri başka prosesler de kullanmak amacıyla kuleyi oluşturan elemanların değişik bölgelerinde ivmeölçerler yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerden alınan veriler başlangıçta, ön işleme tekniklerine tabi tutularak haptik kodlar türetilip katılımcılar üzerinde fiziksel titreşim uyarısı oluşturacak şekilde üç farklı konfigürasyonda aktifleştirilmiştir. Kooperatif insan-makine arayüz paradigması sonuçları incelendiğinde; uyarımlar sırasıyla insanlara iletildiğinde, katılımcıların ortalama %  $88 \pm 20.21$  başarı değeri ve  $5.87 \pm 2.23$  s'de cevapladıkları, uyarıların hepsi aynı anda insanlara iletildiğinde ise, katılımcıların ortalama %  $68.98 \pm 30.91$  başarı değeri ve  $8.51 \pm 3.22$  s'de cevapladıkları görülmüştür. Daha sonra, makine öğreniminde yaygın olarak kullanılan destek vektör makineleri (DVM), YSİ ölçüm verileri üzerinde test edilip, DVM'nin çoklu karşılaştırma fonksiyonuyla, hasar kombinasyonlarını sınıflandırma kabiliyeti araştırılmıştır. DVM'de kernel olarak lineer, polinom, radyal ve sigmoid fonksiyonları kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak analizleri yapıp değerlendirilmiştir. Destek vektör makinelerinde, en yüksek doğruluk değerleri,  $6.043914$  s ortalama işlemci çözüm süresi ve %  $60.63 \pm 13.53$  başarı skoruyla, radyal tabanlı kernelin kullanılması durumunda üretildiği görülmüştür. Sonuç olarak, insan-makine YSİ paradigmasından elde edilen katılımcıların sonuçları incelendiğinde, geliştirilen tekniğin soyutsal kavramların algılanmasında ve özellikle, YSİ sensor ağ uygulamalarında kullanışlı olacağı yönündedir.

## 5.1 Giriş

Son yıllarda mühendislik yapılarında yapılan teknolojik ilerlemelere paralel olarak, bu yapılar çeşitli yüklere maruz kalıp, iç veya dış yapılarında oluşabilecek hasarları tespit edip daha büyük facialara neden olmadan, yapısal bütünlüklerini

korunup ve bu şekilde efektif bir şekilde çalışmalarını sağlamak, inovatif ve yeni teknik fikirlerin geliştirilip uygulanmasına bağlıdır. Geleneksel YSİ tekniklerinde, yapılar, çalışma şartlarındaki yapısal güvenirlilikleri ve emniyetlerini artırmak için donatıldıkları sensör ağları vasıtasıyla sürekli olarak izlenilebilip sağlık durumları değerlendirilmektedir. Daha önceki kısımlarda belirtildiği üzere, uçak, inşaat ve makine mühendisliği yapılarının izlenilip hasar durumlarının belirlenmesi için geliştirilen her türlü strateji, algoritma ve paradigmalara yapı sağlığı izleme olarak (YSİ) olarak adlandırılmıştı. Burada, hasar, yapıya ilişkin malzeme, geometri veya sınır koşullarının değişmesinden kaynaklanmakta olduğu, nitekim önceki kısımlarda belirtilmişti (Farrar, 2013). Son 20 yıldır YSİ alanlarında yapılan çalışmalar incelendiğinde, az veya çok biyolojik veya biyomimetik alanları ile yakın ilişki içerisinde olduğu görülmektedir. Nitekim YSİ çalışmaları canlıların sahip oldukları sinir sistemi ve merkezi işlemciden (beyin) ilham edilerek geliştirilmiştir. Bir başka deyişle, YSİ ile insanın uyarı sistemi arasında güçlü bir analogi (benzeme) bulunmaktadır. Hâlihazırda, YSİ topluluğu, insan yapımı mühendislik yapılarını, canlı organizmaların yapılarında bulunan sinir ağlarına benzer olarak, sensör sinir ağlarıyla donatıp sağlık durum değerlendirmesi yapmaktadır. Ancak insan yapımı mühendislik yapılarındaki sensör ağları, biyolojik sensörleriyle karşılaştırıldığında, insan yapımı mühendislik yapılarının sensör ağları, canlı organizmaların sensör ağları yanında çok ilkel kaldığı görülmektedir (Chang, 2009-2013). Mikro boyutta incelendiğinde, canlı dokulardaki sensör ağı sayısı, insan yapımı mühendislik yapılarında kullanılan sensör sayısına nazaran karşılaştırılmayacak derecede fazladır (Balageas et al., 2006). Canlı dokulardaki sensör ağı ile insan yapımı mühendislik yapıları arasında kullanılan bir diğer analogik benzeme de, sensörlerden elde edilen veriler, her iki sistemde de merkezi işlemci tarafından değerlendirilmesi için bir çözücüye sahip olmaları gerekmektedir (Beral and Speckmann, 2003). Burada, yani sayısal çözücü açısından değerlendirildiğinde ikisi (beyin ve merkezi işlemci) arasındaki farkın daha az olduğu görülmektedir. Mühendislik yapılarındaki sayısal işlemler merkezi işlemciyle, canlı dokularda ise beyin organı ile yapılmaktadır. Günümüzde YSİ’de kullanılan hasar tespit algoritmaları, merkezi işlemci’ye (CPU veya mikrokontrol) gömülüp otomatik olarak hasar teşhisleri yapılmaktadır. Ancak, YSİ deki yapılan tüm bu algoritma bazındaki ilerlemelere rağmen, insanın bilişsel motor kabiliyeti otomatik olarak hasar belirleyebilen tekniklerden devre

dışı bırakmak oldukça zordur. Çünkü tam olarak otomatik hasar tespiti yapabilen algoritmaların geliştirilmesi aşamasında birçok düzenlemenin yapılması gerekmektedir. Örneğin, veri tabanlı YSİ tekniklerinde yaygın olarak uygulanan filtreleme işleminin doğru bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Çünkü bazı durumlarda sensör verilerinden elde edilen karmaşık, gürültülü ve lineer olmayan sinyal verilerinin, gürültüden mi yoksa hasardan mı kaynaklandığını bazı durumlarda belirlemek zor olup ve bunu otomatik karar veren algoritmalara bırakmak yanlışlara neden olabilmektedir. Bazı durumlarda birden çok senaryo birarada düşünerek, birçok parametrenin oluşturacağı etkilerin aynı anda değerlendirmek gerekebilmektedir.

Hâlihazırda, bu ve bunun gibi problemlerin üstesinde geçmek için YSİ’de kullanılan analiz tekniklerinin yetersiz olduğu dikkati çekmektedir. Diğer taraftan insanın sinir sistemi, fiziksel olarak basınç, tekil kuvvet, sıcaklık, nem ve şekil değişimi gibi birçok uyarı değişkenine aynı anda, kısa sürede ve anlık olarak algılayabilme ve hızlı tepki verebilme kabiliyetine sahiptir. Bu kısımda yapılan çalışmanın amacı, literatürde yaygın olarak uygulanan geleneksel YSİ tekniklerinden farklı olarak, mühendislik yapılarına iliştirilen sensör verilerinden alınan ölçümlerin insan sinir sistemiyle birleştirilmesiyle, YSİ uygulamalarında kullanılmak üzere, invazif olmayan, güçlü ve yeni bir hasar belirleme sistemini geliştirip bunun verimliliğini insanlar üzerinde araştırmaktır.

Araştırma, sinir bilim çalışmalarında yaygın olarak uygulanan nöral plastisite kuramlarından esinlenerek yapılmıştır. Plastisite terimi şekil vermek anlamına gelir ve merkezi sinir sisteminin çevresel değişimlere uyum gösterebilme yeteneğidir. Beyindeki nöronlar ve oluşturdukları sinapsların vücudun içinden ve dışından gelen uyarılara bağlı olarak gösterdikleri yapısal ve işlevsel değişikliklerini kapsamaktadır. Nöroplastisite, yeni uyarılar karşısında beyin öğrenme, hatırlama ve unutma yeteneklerine de işaret etmektedir. Erişkin hipokampal nörogenezisi insanlar da dâhil olmak üzere birçok canlı türünde gösterilmiştir (Rakic, 1985). Nöral plastisitesi, beyin plastisitesi olarak ta adlandırılıp bunlara ilişkin teoriler birkaç yıl öncesine dayanmaktadır. Nöroplastisite, gelişimsel plastisite (öğrenme ve bellek), tepkisel plastisite (kısa süreli uygulama sonrası), uyumsal, dejeneratif plastisite (uzun süreli uygulama

sonrası) ve onarım plastisitesi (hasarlanmış nöronun iyileşmesi) olmak üzere değişik kategorilerde sınıflandırılabilir (Grosse-Wentrup et al., 2011). Özellikle güçlendirilmesi gereken sinir bağlantılarının yâda sinir hücreleri, dışındaki başka deneyimlere dayanılarak eklenmesidir. Dendritler, nöronların değişime en açık yapılarıdır. Bu nedenle onların yapısındaki değişikliklerin nöroplastisiteyi yansıttığı düşünülmektedir. Dendritlerin yapısındaki değişimler artan sinaptik iletişimle bağıntılı olmaktadır. Sinaptik alanların artışı ise çevresel uyaranlardaki artışlarla kendini gösterir. Çevresel uyaranlar nörotrofik faktörlerin salınımını tetikler (Ming and Song, 2011). İlk nörotrofik faktör olan nöron büyüme faktörü (NGF), nöronların morfolojik yapılarını korumaları ve büyümelerini araştıran çalışmalarının sonucunda bulunmuştur (Levi-Montalcini, 1985). Canlı dokularındaki nöronlar, yeni değişimler karşısında organize olurlar. Bu durum, sağlıklı nöronların sağlıklı olmayan nöronların görevlerini üstlenmesiyle gerçekleşmektedir. Bu alanda ilk olarak yapılan çalışmalardan biri, görme yeteneğini kaybetmiş genç dağ gelinciğinin beyindeki optik sensörlerin hayvanın işitsel sensörlerine bağlanmasıyla yeni duyu kazandığı görülmüştür (Melchner et al., 2000; Sharma et al., 2000). Daha sonra yaptıkları çalışmayı, görsel ve işitsel kabiliyetleri gelişmemiş dağ gelincikleri üzerine genişletmişlerdir. İşitsel nöronun talamusa girmesinin önlenmesiyle, optik sinirler görsel kortekse uğramadan, yörüngesini değiştirerek talamusun içinde yoğunlaşmasıyla yeni organizasyonlar kazandıklarını belirtmişlerdir. Test sonucunda, dağ gelinciğe ait beyin sol yarısı değişmediğini, diğer yarısında ise nöronların iki kat bağlantıyla optik nöronlara bağlandıklarını saptamışlardır. Olgunlaşma evresinden sonra, dağ gelinciklerine ait görme korteksinde ki hücreler sıra şeklinde oluşmuş olmaları yerine çark veya fırıldak şeklinde form oluştuklarını gözlemlemişlerdir. Gelinciklerin nöronları, görsel kortekse olan bağlantı sayıları arttıkça, hayvanların görsel işaret uyarılarına tepki verdikleri belirlemişlerdir. Elde edilen bu sonuç, beyindeki hücrelerin oluşumları önceden belirlenmiş standart konfigürasyonun aksine, beyine olan veri girdi fonksiyonuna bağlı olarak şekillendiklerini tespit etmişlerdir. Günümüzde kullanılan nöral plastisite kuramlarının tam olarak çalışma mekanizması aydınlatılmamış olup, halen belirsizlikler mevcuttur. Bunun yanında bağlantıları değişen nöronların tam plastik olabilmesi için gerekli olan süre tam olarak izahı yapılmamıştır. Nörobiyolojik öğrenmişlik çalışmalarının tam olarak daha iyi anlaşılabilmesi sinir ağ organizasyonlarının oluşum mekanizmalarının

anlaşılmasına bağlıdır. Sinirsel ağlardaki lokal değişimlerin etkileri, insan ve hayvan denekleri üzerinde testleri yapılmıştır. Nitekim bazı durumlarda, özellikle kompleks sinirsel ağlarda, öğrenmeler sonucu oluşan değişiklikleri saptamak çok zordur. Bundan dolayı, plastik nöral bazlı öğrenmişlik düzeyinin belirlenmesi için yaygın olarak birincil duyu ile motor korteks üzerinde çalışılarak belirlenmeye çalışılmıştır (Braun, 2008). Nöral plastisite de yaygın olarak kullanılan duysal ikame alanlarında yapılan ilerlemeler, kaybedilen duyuların yerine kullanılmak üzere tıbbi cihazların geliştirilmesine olanak tanımıştır (Bach-y-Rita and W. Kercel, 2003). Daha önce belirtildiği gibi duyu ikamesi, kaybedilen duyunun işlevi, başka bir duyu tarafında yapılabilmesi olayıdır. Bunlara misal olarak, görme duyusu kaybının, dokunma duyusuyla yapılabilmesi veya dokunma duyusu kaybının da, başka bir dokunma duyusuyla yapılabilmesidir (Bach-y-Rita and W. Kercel, 2003). Literatürde yapılan bazı çalışmalar, duysal ikame prosedürünün başarılı bir şekilde uygulanabilmesi, ancak kontrolü iyi sağlanmış laboratuvar ortamlarıyla mümkün olabileceğini belirtmiştir (Visell, 2009). Laboratuvar ortamlarında yapılan çalışmalara örnek olarak, görme duyusunu kaybeden insanlarda, görme işlevinin işitsel kanallarla yapıldığını ve bu şekilde insanların önlerindeki nesnelere ve engelleri tanıyıp birbirinden ayırt edebilme yeteneği kazandıkları belirtilmiştir (Weiskroniz, 1986). Nöral plastisite araştırmacılarından Paul-y Rita, geç beyin plastisite hakkında çalışmalar yapıp, daha sonra bu çalışmalar birçok duysal ikame araştırmalarının gelişmesine öncelik etmiştir (Bach-y-Rita and W. Kercel, 2003). Temel araştırma sorusu, daha önce görmeyen birisinin, yeni bir duyu sistemi geliştirerek zamanla bir yetişkin gibi görmeyi öğrenip öğrenmeyeceğiydi. Sorunun cevabını, Bach-y-Rita ilk kez açıkça 1969 yılında, görme duyusunu kaybeden bir bireyin, sırt bölgesinde yerleştirdiği taktik cihazı aracılığıyla kendilerine sunulan görüntüleri tanımalarını öğretti (Bach-y-Rita et al., 1969). Görme engelli insanların açık ve koyu alanlarda görmelerini sağlanması için, ışığa duyarlı selenyum hücreleri vasıtasıyla ortam ışığını, ses üreten devreye dönüştüren electrofalm olarak adlandırılan cihazı tasarlamıştır (Capp and Picton, 2000). Nörobilimde kullanılan duysal ikame cihazları vasıtasıyla, algısal plastisite ve sensörimotor kuramları hakkında temel bilimsel fikirlerin araştırılmasında da kullanılmışlardır (Visell, 2009). Görme engelli insanların dillerine elektro uyarıcının yerleştirilmesiyle buldukları ortam şeklini algılayıp öğrenmeleri sağlanmıştır (Bach-y-Rita et al., 1998). Ön çalışma olarak

kabul edilen bu protez cihazı vasıtasıyla, görme engelli kişilerin dilleri üzerindeki sensörleri kullanarak belki de bir gün görebilmelerini sağlayacaktır.

Yapı sağlığı izleme tekniklerindeki en son trendler, hasarı teşhis etmek için efektif istatistiksel sinyal işleme teknikleri alanlarında yapılmıştır. Bu tekniklerde, hasar teşhisi sensör verileri üzerinde istatistiksel yöntemlerin uygulanması sonucu elde edilen özellik verileriyle yapılır. Yapıdaki hasar, sözü edilen bu özellik verilerinin değişmesine neden olur. Daha sonra değişen bu özellik verileri, örüntü tanıma adı verilen sınıflandırma teknikleriyle birbirlerinden ayırt edilir. Önceki kısımlarda belirtildiği gibi istatistik örüntü tanıma algoritması 4 adımda yapılmaktadır. (1) Yapıyı operasyonel koşullarda değerlendirme, (2) Veri alımı, (3) veri azaltımı ve özellik çıkartma, (4) istatistiksel model geliştirme, gibi adımlarla hasar tanılamaları yapılır (Farrar, 1999). Bu çalışmada sözü edilen ilk üç adım burada da kullanılmış, son adım ise, insanın bilişsel yeteneği ile yapılmıştır. Bu işlem, insanların sinirsel ağ sistemine vibro-haptik elemanların entegre edilmesiyle, hasar tanılamadaki yetenekleri araştırılmıştır. Burada, insanın sinir sisteminin kullanılmasının nedeni, insan sinir sisteminin, sınıflandırma üzerinde yüksek kabiliyeti olduğunu gösteren mevcut literatürdeki bazı çalışmalardan gelmektedir. Bundan öte, bazı durumlarda, insana özgü sınıflandırma yeteneğinin güncel kullanılan makine öğrenimi gibi algoritmaları geçtiğini belirten çalışmalarda mevcuttur (Schwamb et al., 1210.3612). Örneğin, J. Stallkamp, insan ve makine öğrenimi algoritmalarının tanımadaki performansları karşılaştırarak sonuçları ayrıntılı bir şekilde vermiştir. Yaptığı çalışma sonucunda, insanların değişken koşullarda ve değişik tipteki trafik işaretlerini başarılı bir şekilde tanıdıklarını ve birbirlerinden ayırt edebildiklerinin belirtmiştir (Stallkamp J. et al., 2013). Örüntü tanıma tekniklerinden yaygın olarak kullanılan, yapay sinir ağları (YSA), yüksek performansa sahip insan beyninden ilham alınarak geliştirilmiştir. İnsan beyninin sahip olduğu kompleks topolojisi sayesinde, örüntü tanıma tekniklerinde sezgisel olarak yüksek bir özellik çıkartma performansına sahiptir (Dashti H.T et al., 1008.5387). Vapnik V.N, insana özgü "ampirik" sezgisel konseptinin yararlarından bahsederek geleneksel (YSA) tekniğinin geliştirilmesi aşamasında, insan faktörünün avantajlarından yararlanılması gerektiğini belirtip, yeni makine öğrenimi algoritmalarının geliştirilmesine olanak tanımıştır (Vapnik, 1998). H. Barlow, insana özgü "aralıklı kodlama" gibi bilgilerin, sayısal çözüm



üzerine katacağı yararlarından bahsetmiştir (Barlow, 1969). Sayısal ve sınıflandırma gibi işlemlerin daha hızlı yapılabilmesi açısından, insanın bilişsel kabiliyetlerinden de yararlanılması gerektiğini gösteren çalışmalardan bir kısmı yukarıda verilmiştir. Bu çalışmada, insanın bilişsel sisteminin, makinenin sayısal sistemiyle birleştirilmesiyle, oluşan daha yüksek çözücüye sahip işlemcinin, YSİ uygulamalarında, etkinliğini araştırmaktır. Bir başka şekilde, geliştirilen kooperatif insan-makine YSİ paradigmasında, "insan+makine" formülünün birbirinden bağımsız işleme katılan makine veya insandan daha performanslı işlemler gerçekleştirilebilecektir. Bu sayede, insanlar, makinelerin yardım etmesiyle yeni bir his kazanacaklar ve bu doğal olarak kazandıkları his vasıtasıyla hasarı teşhis edebilecekleri kanaati mevcuttur. Bu proseslerin gerçekleştirilebilmesi için, insan sinir sisteminin, sistem mühendisliği araçlarıyla uygun işlemlerle bağlanmasıyla yapılabilecektir. Bu şekilde kooperatif sistem, yapının sağlık performansını kontrol edebilecektir.

Kooperatif YSİ paradigması, duyu ikame kuramlarında yaygın olarak kullanılan bütünleşik ve yüksek performanslı insan ve makine etkileşimlerden ilham alınarak geliştirilmiştir. Gelecekte, belki de hasar tanılama aşamasında, yüksek hassasiyete sahip olan insanın sinir sistemi, YSİ ölçüm sistemleriyle birleştirilebilme fikrinin dikkate alınması gerekir. Daha önce belirtildiği gibi, bu işlem, sensör verilerinin insanın sinir sistemi üzerindeki ara yüzlerinin yapılmasıyla yapılır. Burada, ara yüzeyde kullanılacak haptik aktüatörler, insan ile yapı arasında köprü kurmalarını sağlar. Bir başka şekilde, vibrohaptik etkileşim aktüatörleri yapının sağlığını belirten soyutsal anlamların, insanlara kazandırılmasını sağlar. Önerilen yaklaşım, laboratuvar ortamında kafes elemanlarından inşa edilmiş bir kule yapısı üzerinde test edilmiştir. Çalışmanın akışı şu şekildedir. Öncelikle, kooperatif insan-makine arayüz konseptinden bahsedilir. Sonra, kuleye ilişkin deney tasarımının nasıl yapıldığı ve haptik cihaz geliştirilme prosedüründen bahsedilir. Sonra, literatürdeki çalışmalar temel alınarak insana ilişkin dokunma duyusuyla ilgili psikofizik çalışmalar irdelenir. Sonra, paradigmanın uygulanması aşamasında yazılım ve donanım tasarımlarından, katılımcılardan, asal bileşenler analizinden, haptik uyarıların geliştirilme prosedürlerinden ve testin uygulama tekniğinden bahsedilir. Tekniğin uygulanması sonucu, katılımcılardan elde edilen veriler değerlendirilir.

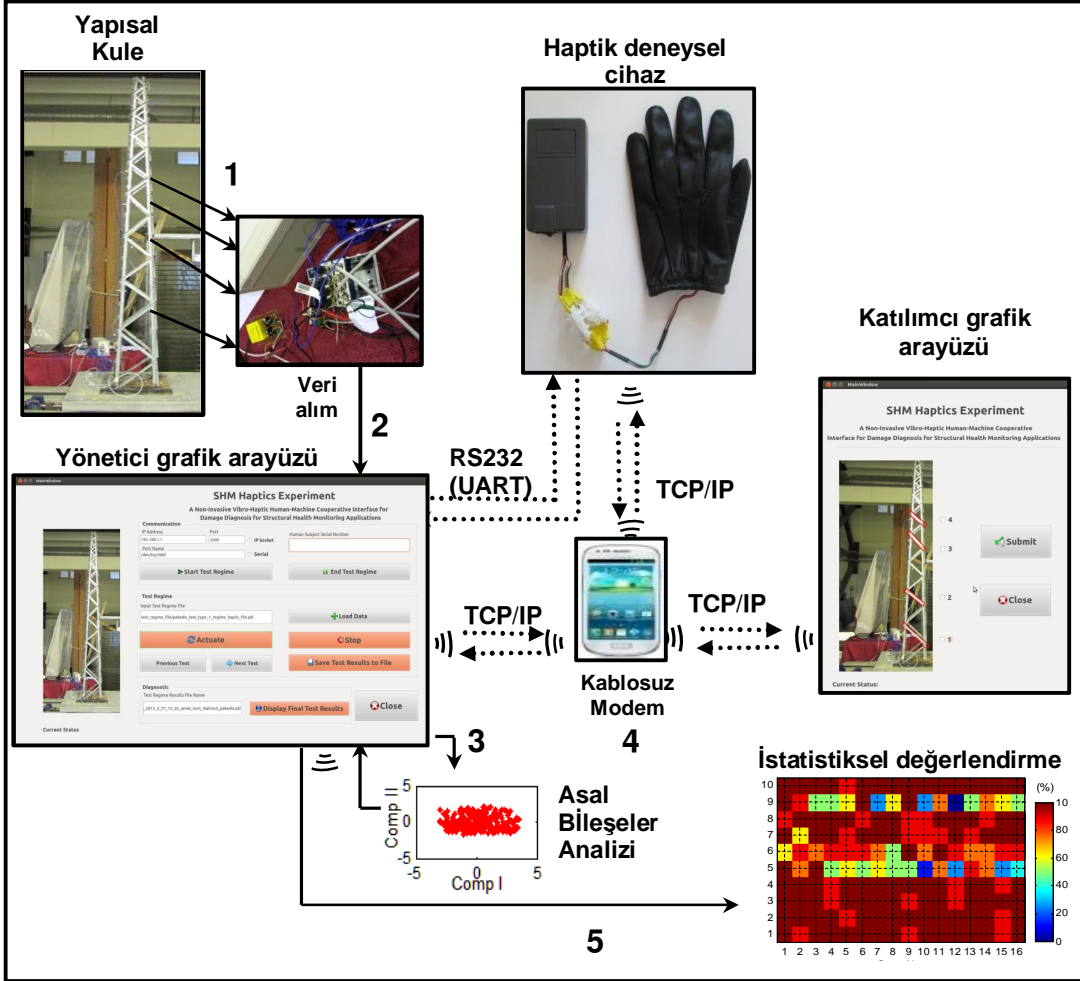
Geliştirilen insan-makine YSİ paradigması katılımcılar üzerinde test edilip, katılımcıların sonuçları araştırıldıktan sonra, destek vektör makineleri (DVM), YSİ ölçüm verileri üzerinde test edilip, DVM'nin ikili ve çoklu karşılaştırma modülüyle, hasar kombinasyonlarını sınıflandırma kabiliyeti araştırılır. En sonunda, DVM'de kernel olarak lineer, polinom, radyal ve sigmoid fonksiyonları kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak analizleri yapıp değerlendirilir.

## **5.2 Kooperatif İnsan-Makine YSİ Paradigmasının Metodolojik Konsepti**

Mühendislik yapılarında yapılan gelişmelere bağlı olarak, iç ve dış yapılarının anlık olarak YSİ ile izlenip bütünlüklerinin korunması ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. YSİ çözüm sürecinde insanın motor-bilişsel rolü gittikçe azalmaktadır. Ancak, kaydedilen tüm bu gelişmelerine rağmen, YSİ teknikleri hala arzu edilen kabiliyette değildir. Bu çalışmada insan faktörünü tamamen kaldırmak yerine, insanın bilişsel performansını YSİ çözüm sürecine ekleyip merkezi işlemci tarafından harcanan gücün bir kısmı insana aktarılmasıyla YSİ çözüm süresinin azaltılabileceği kanaati doğmuştur. Nitekim insan-makine etkileşimleri uzun zamandan beri mekatronik alanlarında uygulanıp kullanılmaktadır.

Makineler, sayısal işlemler gerektiren durumlarda yüksek performans gösterirken, insanlar ise beklenmeyen ve bilinmeyen koşullarda bilişsel olarak çok iyi değerlendirmeler yapıp tepki verebilme performanslarının yüksek olduğu bilinmektedir (Bainbridge L., 1987). İkinin birleşimiyle oluşacak çözücünün performansı (makine + insan), her birisinin bağımsız olarak (makine veya insan) çözüme katkı sağlayacakları performanstan daha yüksektir. Burada, ortaklaşa yapılacak işlemlerin gerçekleştirilmesi aşamasında, birkaç konseptin kendi aralarında entegrasyonun sağlanması gerekir. Son zamanlarda, makinelerin otomatik olarak karar verebilme kapasiteleri artırıldığı halde bazı uygulamalarda insan faktörünü tamamen devre dışı bırakmak çeşitli olumsuzların oluşabileceği hakkında kanılar mevcuttur (Hoc, 2000). Vanderhagen, trafik hava kontrollerinin otomatik moda alınmamasının ihtimal sebeplerinden birisi, insan ile makine

arasında oluşabilecek çakışmaların engellenmesi amacıyla yapıldığını belirtmiştir (Vonderhaegen et al., 1994).



Şekil 5.1 Geliştirilen insan-makine YSİ sistemine ilişkin akış şeması

Önerilen yaklaşım, birçok YSİ problemlerinin yanında diğer uygulamalarda da (optimizasyon problemlerinde, veri sınıflandırma tekniklerinde, teleoperatik sistemlerde vb.) kullanılabilirliği umulmaktadır. Genel olarak kooperatif YSİ paradigmasının uygulanma adımları Şekil 5.1'de verilmiştir. Geliştirilen yönetici arayüzü ile haptik deneysel cihaz arasındaki veri transferi RS-232 veya TCP/IP ile yapılabilmektedir. Bu çalışmada X-Bee mesh kullanılarak veriler RS-232 üzerinden transfer edilmiştir.

Başlangıçta, sağlık izleme değerlendirilmesinin yapılacağı yapı, dağıtık sensör ağlarıyla donatılır. Dağıtık ölçüm sistemlerindeki ham veriler, veri alım

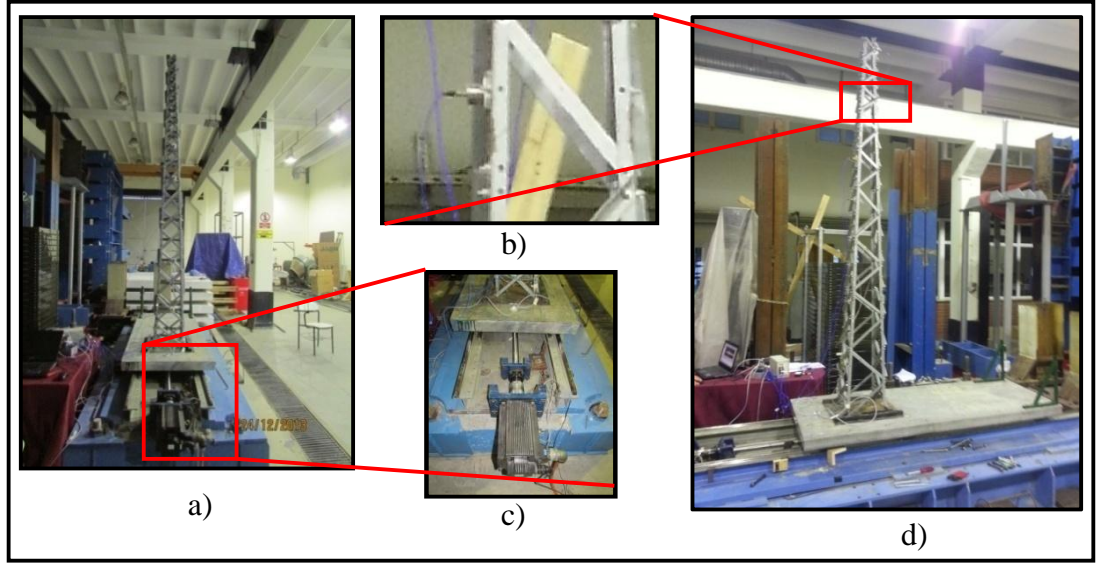
ünitesiyle toplatılır. Alınan veriler, filtreleme ve normalizasyon işlemlerine tabi tutulur. Normalize edilen veriler üzerinde çok değişkenli istatistiksel yöntem prosedürleri ile veri analizleri yapılır. Çok değişkenli istatistiksel yöntemlerin uygulanması sonucu elde edilen skor verileri, giyilebilir deneysel cihaza gönderilebilecek formda *haptik kod* adıyla kodlamaları yapılır. Kodlamaların oluşturacakları uyarımlar; uygulanacak haptik aktivasyonunun dinamik karakteristik şekline, haptik aktüatörlerin uygulanacağı vücut bölgesine, kullanılacak haptik aktüatör sayısına, kodlamada kullanılacak ön verilerin karakteristiklerine, haptik aktivasyon genliğine ve frekansına gibi birçok parametreye bağlı olmaktadır. Nihai olarak elde edilen *haptik kodlar*, daha sonra insanların etkileşim içinde buldukları cihaza gönderilip mikro işlemcinin yukarıdaki verilen parametrelere bağlı olarak programlanmasıyla insanlar üzerlerinde haptik uyarı modülasyonları gerçekleştirilir. Geliştirilen paradigmadaki temel hipotez, insanlar duyu ikamesindeki teoriye benzer olarak, zamanla yapının sağlık durumunu belirten yeni bir duyu kazanacakları beklenmektedir. Bir başka ifadeyle belirtilecek olunursa, insanlar haptik uyarılar sayesinde yapıdaki değişiklikleri çok hızlı ve reflektif olarak fark edebilecekleri beklenmektedir. Böylece insanlar tıpkı kendi dokularındaki ağrıyı nohisöptörler aracılığıyla hissettikleri gibi, deri dokularındaki mekanoreseptörler aracılığıyla da yapının sağlık durumunu algılayıp, yapıya müdahale edip etmeme öngörüsünü yapabileceklerdir.

### 5.2.1 Deney tasarımı

Şekil 5.2’de verildiği gibi cıvata bağlantılı kafes yapılarından inşa edilen kule, test platformu olarak kullanılmıştır. Kule, yatay iki ray üzerinde hareket eden alüminyum tabla üzerinde cıvatalı bağlantı ekipmanlarıyla sabitlenip, sabit sinüs frekansıyla servo-motor tabanlı sarsma tablasıyla titreşime maruz bırakılmıştır. Burada, raylar üzerinde yerleştirilen alüminyum tabla ve levhaya monte edilmiş kule sadece yatay olarak hareket etmektedir. Kule kafes yapısının tabanı, dört ayak üzerinde monte edilmiştir. Yapıda kullanılan bağlantı elemanları, aksenal yüklerin transferinde etkin rol oynayıp, uygulanan titreşim yüklerine karşı yeterli mukavemet sağlamaktadır. Yapının uzunluğu 2.95 m olup düşük karbon çeliğinden imal edilmiştir. Kulede kullanılan elemanların boyutları L20x20x1

olup, tabandaki levhanın uzunluğu 300 mm'dir. Daha önce belirtildiği üzere, yapıdaki herhangi bir cıvata veya birden çok cıvatanın gevşetilmesi, yapıda lineer olmayan davranışların oluşmasına neden olmaktadır. Bir başka şekilde ifade edilirse, yapının cıvata bağlantılarından herhangi birisi gevşetildiğinde, sisteme yerleştirilen sensörlerden lineer olmayan davranış gösteren ölçümler elde edilirken, yapının sağlıklı olması durumunda ise sistemden lineer davranış gösteren veriler elde edilir. Sözü edilen bu lineer olmayan davranışlar, YSİ'de hasarı simüle etmektedir. Gevşetilen cıvata delik içinde çarpışma etkisi oluşturabilecek şekilde ayarlanabilmektedir. Bu çalışmada, test başlangıcında gevşetilen cıvataların uç bölgeleri, kule elemanından 2 mm uzaklıkta olacak şekilde ayarlanmışlardır.

Kule yapısı, çok sayıda cıvata bağlantısını içerdiğinden türlü kombinasyonlarda hasar senaryoları üretmek mümkündür. Sarsma tablası üzerine yerleştirilen alüminyum tabla ve kule yapısı Omron tipi servo motorla aktifleştirilmiştir. Tabla, iki ray üzerine yerleştirilerek ayarlanan limitlerde kaymasına müsaade edilmektedir. Arzu edilen tablanın yatay hareket hızı, servo motorunun oluşturacağı rotasyonel hareket hızının sonsuz vidalı mile aktarılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bazı durumlarda, istenilen hareket limitlerinin üstüne çıkması durumunda, emniyet butonlarıyla tablanın hareketi sonlandırılır. Bir başka deyişle, tabla rayların kritik uçlarına geldiğinde, yan yüzeyinin, bu uçlara monte edilmiş dikey butonlara değmesiyle, duraklar. Bu işlem, emniyet butonlarının servo motora irtibatlandırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Kule, alüminyumdan üretilen sarsma tablası, sonsuz vidalı ve sistemi oluşturan diğer tüm parçaların tümü, rijitliği yüksek olan beton zemin üzerinde monte edilmiştir. Buradaki sistemin altında bu şekilde beton kullanılmasının nedeni haricî kaynaklardan kaynaklanan gürültüleri azaltmak içindir. Sistemin dinamik tepkisini ölçmek için, kulenin ön kısmında yer alan elemanların üzerinde, nominal hassasiyeti 1000 mV/g olan 4 ivmeölçer (PCB, Piezoelectronics) yerleştirilmiştir. Bu ivmeölçerlerin yerden yükseklikleri sırasıyla 85, 166, 198 ve 295 cm şeklindedir.



Şekil 5.2 Deneysel kule yapısı (a-Ön görünüm, b-İvmeölçer, c-Servo motor, c-Yan görünüm)

Servo motor, sarsma tablasının yan kenarının merkezine monte edilmiştir. Sistemin aktifleştirilmesi aşamasında, oluşan burulma etkilerini azaltmak için kule ve ivmeölçerler, lateral ekseninde sarsma tablasıyla aynı hat üzerinde olacak şekilde irtibatlandırılmışlardır.

Tablo 5.1 Yapıya ilişkin olarak oluşturulan hasar senaryoları (1, civatanın gevşetildiğini, 0 ise civatanın gevşetilmediği göstermektedir.)

Durum No	Test Adeti	Civata Gevseme Durumu			
		Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4
1	8	0	0	0	0
2	8	1	0	0	0
3	8	0	1	0	0
4	8	0	0	1	0
5	8	0	0	0	1
6	8	0	0	1	1
7	8	0	1	0	1
8	8	1	0	0	1
9	8	1	1	0	0
10	8	1	0	1	0
11	8	0	1	1	0
12	8	1	0	1	1
13	8	0	1	1	1
14	8	1	1	1	0
15	8	1	1	0	1
16	8	1	1	1	1

Verilerin alınmasında NI 9234 tipinde veri alım cihazı kullanılmış ve verilerin işlenmesinde Labview yazılımı kullanılmıştır. 1706.06 Hz'de 4206 örnekleme veri noktası ve 2.5002 s'de veri alınmıştır. Öncelikle sistemin doğal

frekansları bulunmuştur. Hızlı Fourier dönüşüm tekniğinin uygulanmasıyla sistemin sağlıklı durumunda (cıvata esnetilmesinin yapılmadığı durumda) elde edilen doğal frekanslar 13.33 Hz, 13.74 Hz ve 14 Hz olarak bulunmuştur.

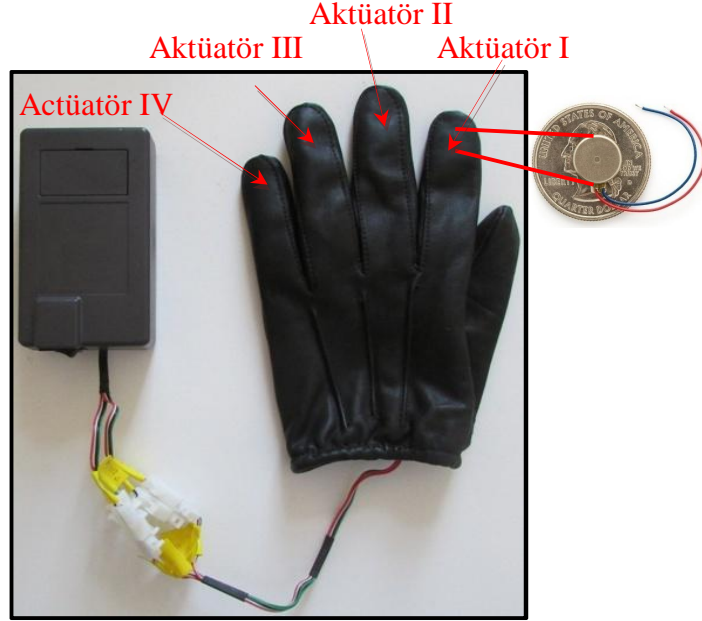
Doğal frekansların bulunmasının akabinde kule, 3. mod olan 14 Hz sinüzoidal dalga formuyla uyarılmıştır. Burada bu modun seçilmesinin nedeni, rijidik cisim modlarını engellemek içindir. Sensörlerden alınan veriler, 4 farklı cıvatanın gevşetilip gevşetilmemesi durumuna göre kategorize edilmişlerdir. Toplam 16 farklı ( $2^4 = 16$ ) hasar kombinasyonu simule edilmiştir. Test, her bir hasar durumu için, 8 kez tekrarlanmıştır. İvme zaman değerleri, Tablo 5.1’de verilen sıralamalara göre toplatılmıştır.

### 5.2.2 Donanım tasarımı

Vibro haptik elemanlarının aktifleştirilmesinin kontrolünde elektronik kart tabanlı mikroişlemci kullanılmıştır. Burada, mikroişlemcinin görevi içerisine gömülen kodlarla kablosuz olarak aldığı dijital haptik kodları analog sinyallere çevirerek vibro haptik motorları aktifleştirmektir. İnsan-makine deneysel arayüz giyilebilir prototipin yapısında, Atmel, ATmega2560 tabanlı Arduino Mega 2560 mikroişlemcisi kullanılmıştır. Geliştirilen deneysel arayüz prototipi Şekil 5.3’te verilmiştir. Deneysel haptik prototipin yapısında her birisi bağımsız aktifleştirildiğinde kuvvet genliği oluşturabilen dört farklı minyatür motor (Precision Microdrives, London,UK) kullanılmıştır. Minyatür haptik motor elemanının çapı, yüksekliği sırasıyla 10 mm, 3.4 mm ağırlığı ise 1.2 gr şeklindedir. Her bir haptik minyatür, mikro kontrol yardımıyla puls modülasyonu (PM) oluşturabilen TIP 120 Darlington transistor ile kontrol edilebilmektedir. Bunların çalışma voltajları 2.2 V ile 3.8 V aralığında olup çalışmaları için düşük voltaja ihtiyaç duymaktadırlar. Puls modülasyonu kullanılarak, vibro elemanlara iletilen voltaj kontrolüyle farklı genliklerde kuvvet üretilebilmektedir. Vibro haptik elemanlar emniyet ve ergonomik açıdan eldivenin iç yüzeyinde yer alan iki tabaka arasında yerleştirilmiştir.

X-Bee dongle kullanılarak laptop bilgisayarının RS232 çıkış kanalı vasıtasıyla X-Bee radyoya haptik kodların kablosuz olarak transferleri yapılır. X-

Bee radyoya iletilen bu kodlar anlık olarak mikro kontrole transfer edilir ve uygulanan programlamaya göre dört aktüatörün her birisinin bağımsız olarak aktifleşmesi sağlanır. Haptik aktifleşme örüntüsü, frekans ve zaman uyarıma etki eden başlıca parametreler. Bir başka ifade ile, farklı örüntü ve konfigürasyonlarda vibro haptik elemanların aktifleştirilmesiyle değişik varyasyonlarda haptik uyarımlar üretilebilmektedir. Bu çalışmada üretilen aktifleşme türleri, 5.2.8’de verilen haptik uyarısının gösterilmesi, bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.



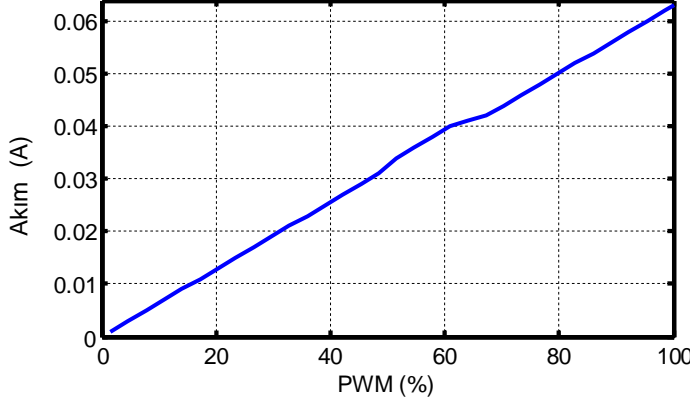
Şekil 5.3 Giyilebilir haptik deneysel cihaz prototipi

Geliştirilen insan-makine arayüz paradigmasının verimliliğini belirlemek için gerek deneyi yöneten kişi, gerekse insan katılımcıları için PYTHON ile nesne tabanlı programlama tekniğini kullanarak grafik tabanlı arayüzler geliştirilmiştir. Geliştirilen arayüzler, ayrıntılı olarak yazılım dizaynı kısmında verilmiştir. Vibro-haptik elemanlar eldiven içerisine gömülmeden önce karakteristik özelliklerin belirlenmesi için PM’ye bağlı olarak ürettikleri akımlar ölçülmüştür ve farklı modülasyonlarda ölçülen akım grafiği Şekil 5.4’te verilmiştir. Şekil incelendiğinde giriş puls modülasyonu ile akım arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir.

Yapının değişik konfigürasyonlardaki durumlarına ilişkin toplanan sensör verileri, birkaç önişlemden geçirilip haptik kodlar şeklinde kodlandıktan sonra kablosuz olarak mikrokontrol tabanlı deneysel haptik cihaza gönderilir ve nihaî



durumda elde edilen haptik kodlar mikrokontrolün programlanma şekline göre vibro-haptik elemanların aktifleşmesine olanak tanır. Haptik deneysel cihazı oluşturan tüm parçalar (mikrokontrol, koruma kutusu, kart, vibrohaptik akifleyiciler, güç bataryası, kutu, eldiven, resistörler, transistörler, dirençler, regülâtör) kablosuz, hafif, ergonomik ve elle taşınabilecek şekilde dizayn edilmiştir.



Şekil 5.4 Mikrokontroldeki puls modülasyonuna bağlı olarak vibro-haptik elemanda üretilen akım

### 5.2.3 İnsanın dokunma duyusu

İnsan derisi, nem, sıcaklık, kuvvet gibi uyarıların dermal ve alt dermal bölgelerlerine iletilmesiyle, buradan da sinirsel sinyallere dönüşmesini sağlayan bir doku sistemi tabakasıdır (Visell, 2009). Ortalama yetişkin bir insan derisinin yüzey alanı  $1.8 \text{ m}^2$  olup, içyapısında birçok mekanoreseptörü barındırmaktadır. Tüylü, tüysüz (alın, avuç içi, ayak taban derisi gibi) ve muskoz olmak üzere (nemli ağız içi derisi) üç farklı şekilde kategorize edilebilir (Cholewiak and Collins, 1991). İnsan derisi, ağrı (nosiseptörler), sıcaklık (termoreseptörler), ve farklı 6 dokunma basıncının algılanmasını sağlayan birçok reseptörden oluşmaktadır (Kandel et al., 2000). Burada ruffini corpuscle reseptörleri, ligaman ve gerdirme duyusunun algılanmasını sağlarlar. Meissner corpuscles, 50 Hz frekansındaki örgülü yüzeyin algılanmasını sağlar. Pacinian corpuscles, 200 Hz ve  $0.1 \mu\text{m}$  titreşim genliği altındaki yüklerin algılanmasını sağlar (Halata, 1993). Merkel ve Meissner corpuscles, derideki basınç değişimlerinin yüksek hassasiyette izlenip algılanmasını sağlayan mekanoreseptörlerdir. Poupyrev I. vd., yaptıkları çalışmada, dokunma duyusu görme duyusundan 5 kat hızlı olduğu belirtilmişlerdir (Poupyrev et al., 2002). Bunun yanında insanın dokunma duyusu

ile ilgili birçok psikofizik özellikler (uygun olan frekans hassasiyet aralığı, reseptör yoğunluğu, reseptör alan boyu gibi) olduğu bilinmektedir. Bunların içerisinde en çok kullanılan iki pint eşiğiyle, derinin duyu hassasiyeti belirlenir. Limit metodu, eşik altındaki duyuların ölçülmesinde kullanılan yöntemdir. Sabit uyarı metottan daha az hassasiyete sahip olduğu halde, kısa sürede uyarıların daha kısa sürede algılanmasına olanak tanıdığından efektif bir duyu belirleme yöntemi olarak kabul edilir (Gesheider, 1997). 10-300 Hz frekans aralılarındaki titreşimler iki psikofizik kanalıyla (pacinian ve non pacinian) algılanır (Verrillo, 1983). Uyarı algılama hassasiyeti açısından bakıldığında, non-pacinian II kanalı, non-pacinian I'e göre daha azdır.

Literatür incelendiğinde, insan vücuduna ait farklı bölgelerdeki derinin, uygulanan değişik frekans ve genlikteki titreşim sinyallerinin algılama hassasiyeti üzerine birçok çalışma mevcuttur (Verrillo, 1983). Burada, vibro-haptik verilerin algılanmasında en çok etki eden iki parametre, titreşim sinyalinin frekansı ve genliği olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında tüylü derinin algılama performansı tüysüz deriye göre daha yüksektir (Merzenich and Harrington, 1969). Ayrıca, tüylü deri, tüysüz deriye göre, iki farklı titreşim frekansını birbirinden daha iyi ayırt edebilme kabiliyetine sahiptir. Titreşim frekansları arttıkça tüylü derinin algılama seviyesi azalır. 200 Hz'in altındaki titreşim sinyalleri birbirinden daha iyi ayırt edilebilir (Mahns, 2006).

İnsan derisindeki mekanoreseptörlerin uyarılmasında piezoelektrik aktüatörler, vibrohaptik minyatür motorlar, phantom omni robotik kol cihazı, termal uyarıcılar ve bobin motoru gibi birçok aygıt kullanılmaktadır. Bunların içerisinde en çok vibro-haptik minyatür motorları kullanılmaktadır. Vibro-haptik minyatür motorların en önemli özellikleri, düşük voltajda (1V-5V) çalışabilmeleridir. Boyut ve ağırlıklarının az olması ayrıca düşük maliyette olduklarından, protez (Cipriani et al., 2012; Dhillon et al., 2005), siber (Dhillon et al., 2005) ve yapay insan kolu tasarımında (Christian et al., 2006) yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bunun yanında sinir kas sisteminin direk olarak uyarılması ile bazı haptik çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Burada kas ve sinir sistemi içerisine elektrotların gömülmesiyle uyarılar gerçekleştirilir. Ancak sinir-kas

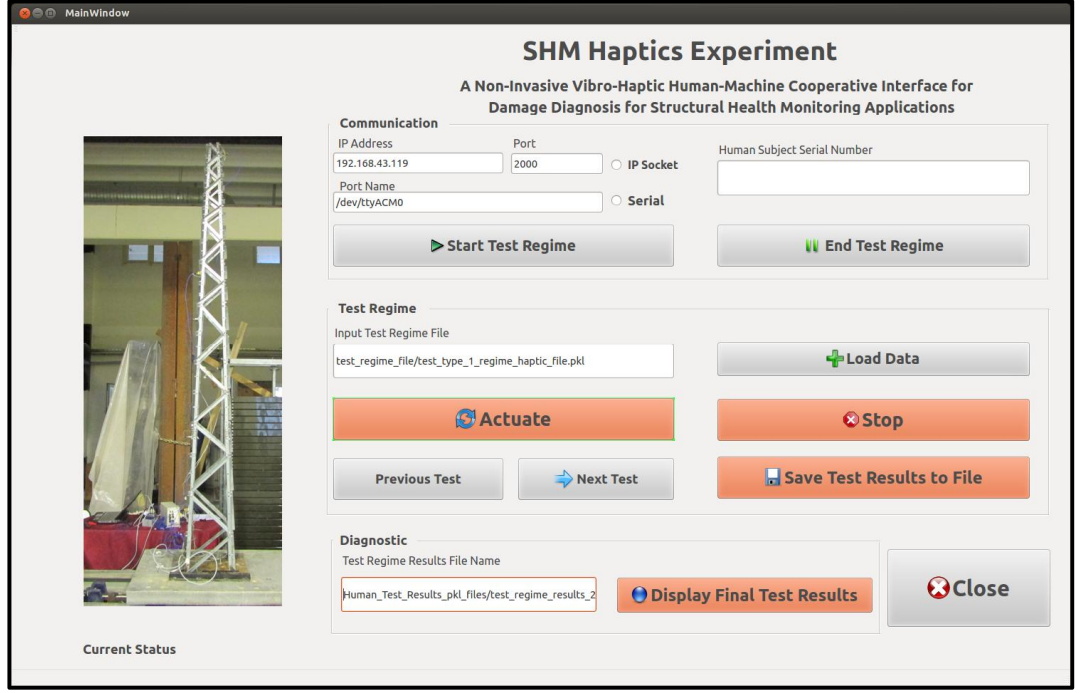
sisteminin uyarılması, invazif ve ağrıların oluşmasına neden olduğundan haptik çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmemektedir.

Bu araştırmada, insan elindeki pacinian corpuscles reseptörlerin uyarılmasında vibro-haptik minyatür motorlar kullanılmıştır. Geliştirilen haptik deney cihazı, insanın sol eliyle kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır. Cihazdaki titreşim aktüatörleri insan parmaklarının arka kısımlardaki eklemlerde (Art. interphalangealis proximalis ligament) bulunan pacinian corpuscles reseptörlerini direk olarak uyaracak şekilde, eldivenin iki tabakası arasında monte edilmiştir. Haptik uyarılar, tüylü ve eklem bölgelerinde daha iyi algılanabileceğinden dolayı, insan parmaklarının arka uç eklemleri landmark olarak seçilmiştir (Bear et al., 2007; Myle and Binseel, 2007). Cholewiak, vücudun değişik bölgelerinde 25 mm aralıkla yerleştirilen iki haptik aktüatör arasındaki titreşim algısının belirlemek için yaptığı çalışmada, dirsekte algılama skorunu % 72-82, kolun ortasında % 45, hassasiyetinde haptik uyarıların algılandığını belirtmiştir (Cholewiak and Collins, 1991).

#### **5.2.4 Yazılım tasarımı**

İnsan-makine YSİ paradigmasının verimliliğinin test edilmesi için PYTHON nesne tabanlı programlama tekniğiyle, yönetici ve katılımcılar için kullanıcı kolaylığı sağlayan arayüzler geliştirilmiştir. Burada PYTHON programlama tekniğinin kullanılmasının nedeni, ücretsiz olması, yüksek kapasitedeki verilerin kısa süre içerisinde işlenebilmesine, veriler nesnelere yardımıyla değişik formatlarda indirgenip kaydedilmesine olanak tanımasındandır.

Geliştirilen insan-makine arayüzü; *i*) yapının hasar durumuna bağlı olarak sensörlerden elde edilen verilerin işlenmesi, *ii*) işlenen verilerden haptik kodlar türetilip insan katılımcılara transfer edilmesi, *iii*) katılımcılara ait yanıtların, yöneticiye gönderilmesi, *iv*) katılımcıların verdikleri yanıtların yönetici panelinde otomatik olarak farklı dosya formatlarında (.txt ve .pkl), kaydedilmesi, *v*) istatistiksel olarak katılımcıların verdikleri yanıtların değerlendirilmesi, gibi kabiliyetlere sahiptir.



Şekil 5.5 Yönetici için geliştirilen grafik arayüzü

Yönetici, kullanıcı ve cihaz arasındaki veri iletim ağı Şekil 5.1'de verilmiştir. Burada, admin, kullanıcı ve haptik cihaz arasındaki haberleşmede Samsung SIII cep telefonuna ait WiFi Hotspot kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yönetici panelinden, kullanıcıya soruların gönderilmesinde (publisher), ve kullanıcı panelinden yönetici paneline yanıtların iletilmesinde (subscriber), robot işletim sistemiyle (Robotic operating system, ROS) yapılmıştır. Ayrıca, yönetici penceresindeki haptik kodlar hem kullanıcı paneline hem de deneysel cihaza aynı anda transfer edilir. Yönetici ara yüzünün çalışma prosedürleri şu şekildedir. Başlangıçta, sensörlerden alınan veriler değişik algoritmalar vasıtasıyla haptik kodlar üretilir. Sonra, haptik verilerin deneysel cihaza iletilmesinde kullanılacak haberleşme tipi seçilir. Eğer haptik veriler, IP soket üzerinden gönderilecekse haptik cihazda XBee WiFi tipi kablosuz aygıt kullanılmalıdır ve XBee aygıtına ilişkin "IP adres" ve "port" kısımları doldurulur. Sonra "Ip Socket" radyo tuşuna işaretlenir. Eğer ki haptik kodlar, RS232 seri haberleşme portu üzerinden gönderilecekse, haptik cihazda XBee zigbee-mesh tipi aygıt kullanılır ve bilgisayarın seri portuna bağlanan X-Bee aygıtının port adı ("port name") girilir. Sonra "Serial" butonu işaretlenir. Bu araştırmada RF tabanlı RS232 haberleşme protokolünde kullanılan ile XBee mesh kullanılmıştır. "Stop" tuşu, anlık olarak transfer edilmekte olan dijital verileri durdurur. "Load Data" butonu, yönetici

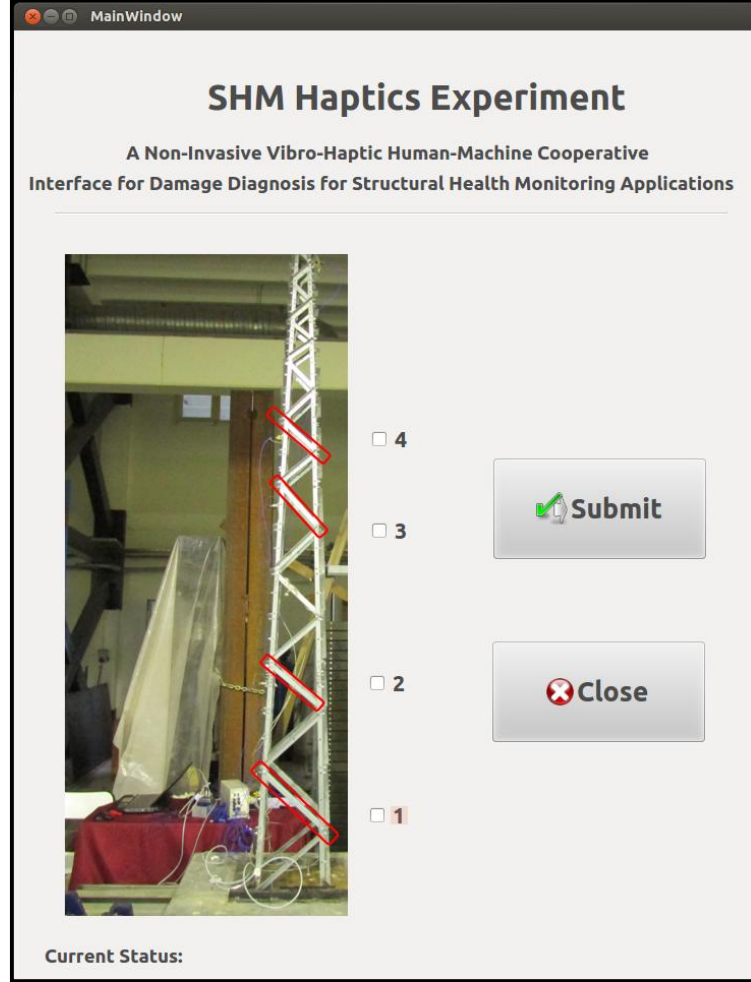
paneline, test rejimi dosyasının indirilmesini sağlar. "Actuate" butonu, test rejimi dosyasındaki haptik kodların deneysel cihaz ve kullanıcı paneline iletilmesini başlatır. "Previous test" butonu, bir önceki testle ilgili haptik kodların çağrılmasını sağlarken, "Next test" butonu ise bir sonraki testte kullanılacak haptik kodları çağırır.

"Save test results to file" butonu, katılımcılardan alınan yanıtların hem "pkl" hem de "txt" formatında kaydedilmesini sağlar. Bu işlem, her bir katılımcı üzerinde tüm testler uygulandıktan sonra, "Human Subject Serial Number" satırına, katılımcıya atanan seri numarası girilerek yapılır. Daha sonra "Save Test Results to File" butonunun tıklanmasıyla, katılımcıların sonuçları kaydedilir. Katılımcılardan elde edilen sonuçlar, terminalde liste şeklinde görüntülenmek istenildiği durumlarda, "Test Regime Results File Name" giriş satırına ilgili katılımcının, daha önce atanan seri numarası girilir. En sonunda da "Display Final Test Results" butonunun tıklanmasıyla sonuçlar görüntülenir (Şekil 5.5).

Katılımcıya ait grafik arayüzünde; kontrol kutuları, kullanıcıya, sistemin hangi lokasyonunda hasar olup olmadığını (civata/civataların gevşemesinin söz konusu olup olmadığı), seçmesini sağlar. Kullanıcıya kolaylık sağlamak açısından, kullanıcı her bir test sonucunda sonuçlarını yöneticiye gönderdikten sonra, seçili durumda kalan kontrol butonları otomatik kalkar. Kullanıcı, kontrol kutularını seçtikten sonra "Submit" butonu ile yanıtlarını yönetici penceresine gönderir (Şekil 5.6).

Hem yönetici hem de katılımcı, test durumu ile bilgiyi "Current Status" satırını izleyerek takip eder. Örneğin, yönetici, haptik kodları kullanıcıya ilettiğinde, bu satırda, "test\_index = *test\_no* of 128 is actuated" görülür, katılımcılar mesajı aldıklarında katılımcı panelinde "Message received for shuffled test index = *shuffled\_test\_number*" ibaresi görünür. Aynı şekilde, katılımcı yapı sağlığı ile ilgili yanıtlarını gönderdiğinde, bu satırda "Message is sent" ibaresi görüldüğü gibi, yönetici de yanıtlarını aldığıda "RESPONSE RECEIVED! test\_index = *test\_no* of 128" ibaresi yönetici arayüzünde görülür. Burada verilen *test\_no* ve *shuffled\_test\_number* ifadeleri, sayısal değerler olup, sırasıyla hâlihazırda uygulanan test numarasını ve karıştırılmış test numarasını

belirtir. Bunun yanında yönetici arayüzünden gönderilen haptik kodların düzgün bir şekilde deneysel cihaza gönderildiğinden emin olunması için, haptik deneysel cihaza gönderilen tüm kodlar, geri transfer edilip terminalde okunur. Bu işlem mikroişlemcinin programlanmasıyla yapılmıştır.



Şekil 5.6 Katılımcılar için geliştirilen grafik arayüzü

### 5.2.5 Uygulama prosedürü

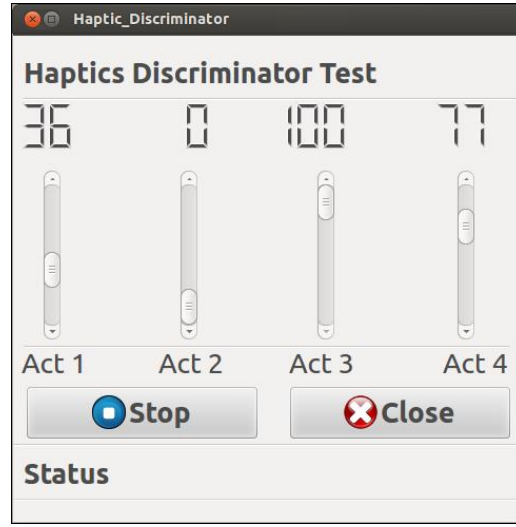
Test prosedürü, yapıya iliştirilen sensörlerden veri alma, saklama ve kategorize etme işlemiyle başlatılır. Elde edilen bütün sensör verileri, yapının hangi senaryodaki sağlık durumunu belirtecek şekilde sınıflandırılıp uygun dosya formatıyla kaydedilir. Burada veriler, Tablo 5.1’de verildiği üzere hangi cıvata veya cıvataların gevşetilip gevşetilmesi durumuna göre kategorize edilmiştir. Simüle edilen 16 farklı hasar durumunu gösteren ham veriler yazılıma yüklenir.

Yazılım içerisine gömülen çok değişkenli asal değişkenli analiz yöntemiyle, özellik verileri çıkartılıp normalizasyon ve ölçeklendirme ön işlemlerine tabi tutulduktan sonra haptik uyarım kodlarıyla test dosyaları oluşturulur. Burada, her bir senaryodaki bir test örneği, bir testle ilişkilendirildi. Her bir senaryoda tekrarlı olarak 8 test ölçüm verisi alınmıştır. 16 farklı senaryoyla, elde edilen toplam test 128 dir. Bütün test dosyaları entegre edilip bir test rejim nesnesini oluşturur. Bu araştırma katılımcılar üzerinde test edilmek üzere üç farklı haptik uyarım kodları türetildiğinden, her bir uyarım dosyası bir test rejim dosyasıyla ilişkilendirilir. Burada, test rejimi dosyası ".pkl" formatıyla oluşturulmuştur. Başka uygulamalar için birden çok test rejim dosyası oluşturabilmek mümkündür. Test rejim dosyasının oluşturulmasının akabinde, katılımcılar üzerinde haptik testlerin uygulanma aşamasına geçilir. Deney başlangıcında tüm katılımcılara sistemin nasıl çalıştığı hakkında bilgilendirmeler yapılır. Ayrıca insan-makine arayüz konseptini içeren poster her bir katılımcıya tanıtıldı. Test başlangıcında tüm katılımcıların, haptik eldivenin rahatça giymeleri sağlandı. Katılımcılar kendilerini rahat hissetleri anda, uygulanacak haptik uyarım dosyasını içeren test rejim dosyası yönetici paneline yüklenir. Katılımcılar üzerinde uygulanan testler üç ayrı oturumda yapılmıştır. Birinci oturumda, katılımcıların farklı genlikteki haptik titreşim uyarımlarına karşı aşına olmalarına sağlamaya yöneliktir. İkinci oturum, yapının hasar senaryolarını haptik uyarılar sayesinde katılımcılara öğretmeye yöneliktir. Tüm katılımcılara, öğrenme testi aşamasında, hangi hasar senaryosuna ait olduğu sözlü olarak söylendi. Bu şekilde, bütün hasar senaryoları bütün katılımcılara öğretildi. Öğrenme aşamasından bir sonraki sıra, yani üçüncü oturumda, katılımcıların öğrenme düzeylerini ölçmeye yöneliktir. Test aşamasında tüm kullanıcılar yapıya ilişkin olarak hasar durumlarını içeren yanıtlarını kullanıcı panelinden iletirler. Tüm katılımcıların her bir testteki yanıtları ve buna ilişkin olarak ta her bir test için yanıtlama süreleri alınır. Burada, yanıtlama süresi, aktivasyon başlangıç ile yanıtlama arasında geçen süreyi gösterir. Bir başka şekilde, katılımcının düşünme ve karar verme süresini de belirtir. Bu işlemdeki prosesler, zaman sayma fonksiyon kodlarının kullanıcı arayüzüne gömülmesiyle yapılmıştır. Deney bittikten sonra, uygulanan her bir uyarı biçimi için, her bir katılımcının yanıtları ve yanıtlama süreleri, "save test results to file " butonunun basılmasıyla, ".pkl" ve ".txt" formatında kaydedilir ve tüm sonuçlar "human\_subject\_results" klasörü altında saklanır. En sonunda da, katılımcılardan

elde edilen veriler üzerinde istatistiksel yöntemler uygulanıp, katılımcıların hasarı karakterize edebilme performansları ölçülür.

### 5.2.6 Katılımcılar

İnsanlar üzerinde deneyler uygulanmadan önce, Ege Üniversitesi, Tıp Fakültesi, etik kurulundan 13-11/104 sayılı kararla araştırma etik izni alınmıştır. Araştırma, Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesinde çalışan gönüllü araştırma görevlileri, yüksek lisans ve doktora öğrencilerinin katılımı ile gerçekleştirilmiştir. Katılımcıların yaş aralıkları, 25 ile 34 arasında, yaş ortalamaları ve yaşlarının standart sapmaları ise sırasıyla 29.6 ve 4.61 tür.



Şekil 5.7 Haptik uyarıların algılanıp birbirinden ayırt edilebilme performansının ölçülmesi için geliştirilen grafik arayüzü

Tüm katılımcılar, haptik cihazı sol ellerinde giyip, haptik uyarıları daha iyi algılamaları için (haptik aktüatörlerle katılımcıların parmaklarının arka uç kısımlardaki eklem bölgelerinde gelecek şekilde) rahat bir şekilde giymeleri sağlanmıştır. Tüm katılımcılar, yapının sağlık durumu ile ilgili yanıtlarını, sağ elleriyle (fareyi sağ elle kullanılarak) yapmışlardır.

Deney testlerine başlamadan önce, katılımcılar üzerinde dört farklı haptik uyarının algılanıp birbirinden ayırt edilebilme kabiliyetlerin ölçülmesi için, haptik ayrıklaştırma testi uygulanmıştır. Burada, tüm katılımcılar 4 farklı aktüatöre ait haptik titreşim uyarı genliklerini algılayıp büyükten küçüğe doğru sıralanmaları



istenmiştir. Katılımcılar yanıtlarını sözlü olarak bildirmişlerdir. Haptik ayırıklaştırma testi için geliştirilen arayüz Şekil 5.7’de verilmiştir. Kayan tuş, 0-100 puls modülasyonuna karşılık gelecek şekilde ölçeklendirilmiştir. Ayırıklaştırma testi sonucunda, katılımcılar dört farklı vibrotaktıl arasındaki farklılıkları rahat bir şekilde yapabildiklerini bildirmişlerdir. Daha sonra, tüm katılımcılar öğrenme ve test periyotlarına tabi tutularak, geliştirilen üç uyarı tipinden her birisi sırayla kullanıcılar üzerinde test edilmiştir. Yapıya ilişkin 16 hasar senaryosundan her birisi, randomize bir şekilde 8 kez tekrarlanmıştır. Her bir uyarı tipinde, katılımcı başına uygulanan test sayısı 128 dir.

### 5.2.7 Asal bileşenler analizi

Asal bileşenler analizi (ABA), çok değişkenli analiz tekniğine dayanan istatistiksel bir yöntem olup Pearson tarafından geliştirilmiştir (Pearson, 1901). Hâlihazırda, fen, mühendislik ve sağlık uygulamalarındaki birden çok değişkenli verilerin analizinde en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Ortogonal ayırıklaştırma yöntemiyle benzer olup, Karhunen-Loove transformasyonu olarak ta bilinmektedir (Jlooffe, 1986). Bu yöntemle, düşük verili korelasyon içerisinde bulunan veriler için iyi sonuçlar vermektedir. ABA, azaltma prosedürlerinin uygulanmasıyla, çok büyük veriler, daha düşük verilere indirgenerek değişkenlerin dağılımı ve sınıflandırılması hakkında fikir edinilmesinde efektif bir rol oynar. Bir başka deyişle ABA, yüksek verilerden sadece önemli kısımlarının ortaya çıkarılmasına elverişlidir. Bu işlem, ABA’da asal bileşenler olarak adlandırılan yeni değişkenlerin analiz edilmesiyle yapılır. Elde edilen asal bileşenler, ham orijinal değişkenlere bağlı olup, aralarındaki kombinasyon lineerdir. Birinci asal bileşen, tüm bileşenler içerisinde, en büyük varyansa sahiptir. İkinci bileşen, birinci bileşene ortogonal olma koşuluyla hesaplanır. Diğer bileşenlerde bu şekilde hesaplanarak elde edilir. Asal bileşenler (AB) analizinden türetilen değişkenler, faktör skorları olarak adlandırılır. Bu faktörler, değişkenlerin asal bileşenler üzerindeki izdüşümlerinin alınmasıyla belirlenir. YSİ uygulamalarında kullanılacak ABA modelinin geliştirilmesi aşağıdaki gibi verilmiştir.

Başlangıçta, YSİ ölçüm sensörlerinden elde edilen veriler  $\mathbf{X}$  matrisinde düzenlenir. Burada kullanılan denklemlerden, matrisler, koyu büyük harfle, vektörler ise koyu küçük harfle belirtilmiştir. Analizi yapılacak parametrelerden  $I$ , sensör âdetini,  $J$  ise sensör verisini göstermektedir. Ayrıca,  $\mathbf{X}$  matrisi  $L$  rankına sahip olup  $L \leq \min\{I, J\}$  koşulu mevcuttur.

Dört ölçüm kanalından elde edilen zaman sinyal verilerinin her birisi, birbirinden farklı büyüklüğe ve ölçüğe sahip olduklarından, sensör verilerinin her birisi aşağıdaki gibi standartlaştırılır. Bu çalışmada, yapıya ilişkin 1. hasar senaryo (2. testinde) örneği için ön veri işleme örneği Şekil 5.8’de verilmiştir.

$$\bar{x} = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (5.1)$$

Burada  $\bar{x}$ , standartlaştırılmış sinyali  $\mu_x$  ve  $\sigma_x$  ise sırasıyla  $x$  verilerine ait ortalama ve standart sapmayı gösterir.

Denklem 5.1’de ölçeklendirilmiş  $\mathbf{X}$  verisinin matrisi, aşağıdaki gibi tekil değer ayrıklaştırmaya sahiptir (Abdi and Williams, 2010).

$$\mathbf{X} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}\mathbf{Q}^T \quad (5.2)$$

Burada  $\mathbf{P}$ , soldaki tekil vektörlerine ilişkin  $I \times L$  matrisini,  $\mathbf{Q}$  ise sağdaki vektörlere ait  $J \times L$  matrisini ve  $\mathbf{\Lambda}$  ise tekil değerlerin diyagonal matrisini temsil etmektedir. Burada,  $\mathbf{\Lambda}$  değeri  $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$  ve  $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$  öz değerlerin diyagonal matrislerini oluşturur.

AB analizinde,  $\mathbf{X}$  matrisi üzerinde tekil değer ayrıklaştırma yönteminin uygulanmasıyla bileşenler bulunur.

Denklem (5.2)’de, faktör skorlarına ilişkin  $I \times L$  matrisi  $\mathbf{F}$  şeklinde gösterilip aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\mathbf{F} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda} \quad (5.3)$$

Denklem (5.2)’deki  $\mathbf{Q}$  matrisi, faktör skorlarını hesaplamak için kullanılan lineer kombinasyonlarının katsayılarıdır ve izdüşümü matrisi gibi hesap edilebilir. Asal bileşenler üzerindeki gözlenilecek değerlerin izdüşümleri,  $\mathbf{X}$ ’in  $\mathbf{Q}$ ’ya çarpılmasıyla bulunur.

Denklem (5.1) ve denklem (5.3)'ün birleştirilmesiyle aşağıdaki bağıntılar elde edilebilir.

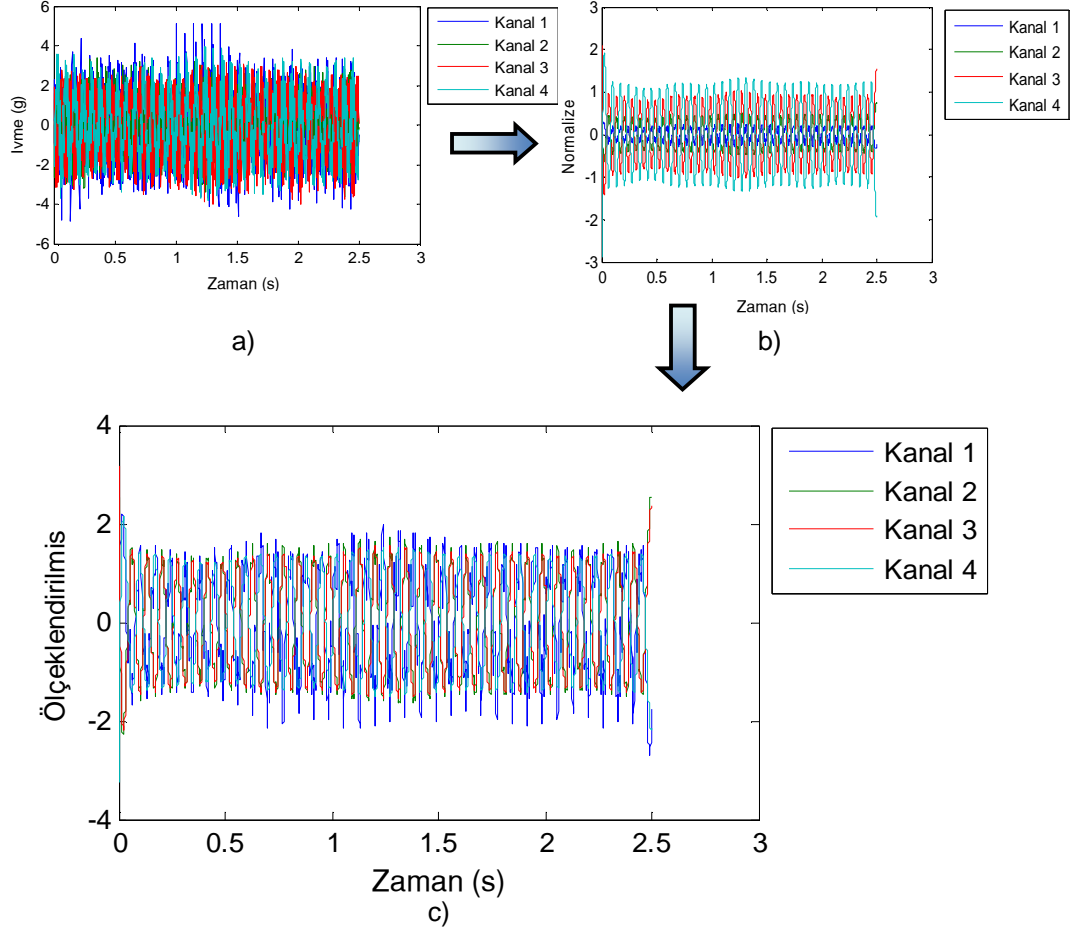
$$\mathbf{F} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda} = \mathbf{X} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}\mathbf{Q}\mathbf{Q}^T = \mathbf{X}\mathbf{Q} \quad (5.4)$$

Burada, bileşenler orijinal eksenlerin döndürülmesiyle geometrik bir şekilde de gösterilebilir. Örneğin, dört değişken verisi mevcutsa, bunlar dört ortogonal faktör olacak şekilde gösterilebilir.  $\mathbf{Q}$  matrisi ortonormal özelliğe sahip olduğundan, kosinüs yönünün matrisi olarak ta yorumlanabilir.  $\mathbf{Q}$  matrisi, yükleme matrisi olarak ta adlandırılır.  $\mathbf{X}$  matrisi, faktörlere ait skor matrisinin, yüklenme matrisine çarpılmasıyla yorumlanabilir.

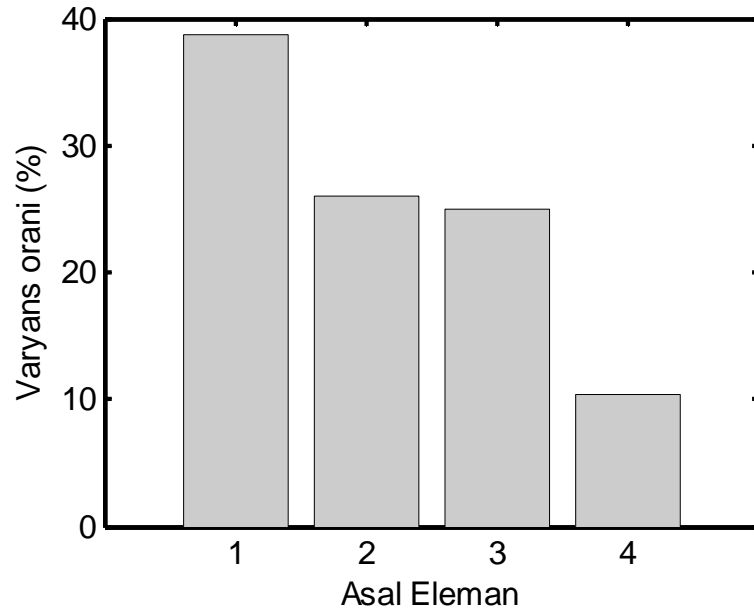
$$\mathbf{X} = \mathbf{F}\mathbf{Q}^T, \mathbf{F}^T\mathbf{F} = \mathbf{\Lambda}^2 \text{ ve } \mathbf{Q}^T\mathbf{Q} = \mathbf{I} \quad (5.5)$$

Denklem 5.4'teki  $\mathbf{Q}$  matrisi, orijinal veri matrisini faktör skorlara transforme eden izdüşüm matrisidir. Bu matris aynı zamanda, ABA'da yer almayan gözlem değerlerine ilişkin faktör skorlarının hesaplanmasında da kullanılabilir. Bazen bunlara ek gözlemler olarak ta adlandırılmaktadır. Ek gözlemlere ilişkin faktör skorları, bu gözlemlerin ABA uzayında konumlandırılıp, daha sonra ABA uzayında izdüşümlerinin alınmasıyla hesap edilirler.

Bir bileşen ile bir değişken arasında korelasyon kurulup, birlikte paylaştıkları bilgiler yorumlanarak veriler yorumlanabilir. AB analizinde bu korelasyona *yüklenme* adı verilir. Yüklenme değerlerinin sahip oldukları önemli özelliklerden birisi ortonormal olmalarıdır. Tüm bileşenlerde yer alan tüm korelasyon katsayılarının kareleri alınıp toplandığında 1 elde edilir. Bu çalışmada, birinci ve ikinci bileşenler daha yüksek varyansa sahip olduklarından bunlara ait yüklenme değerleri esas alındı.



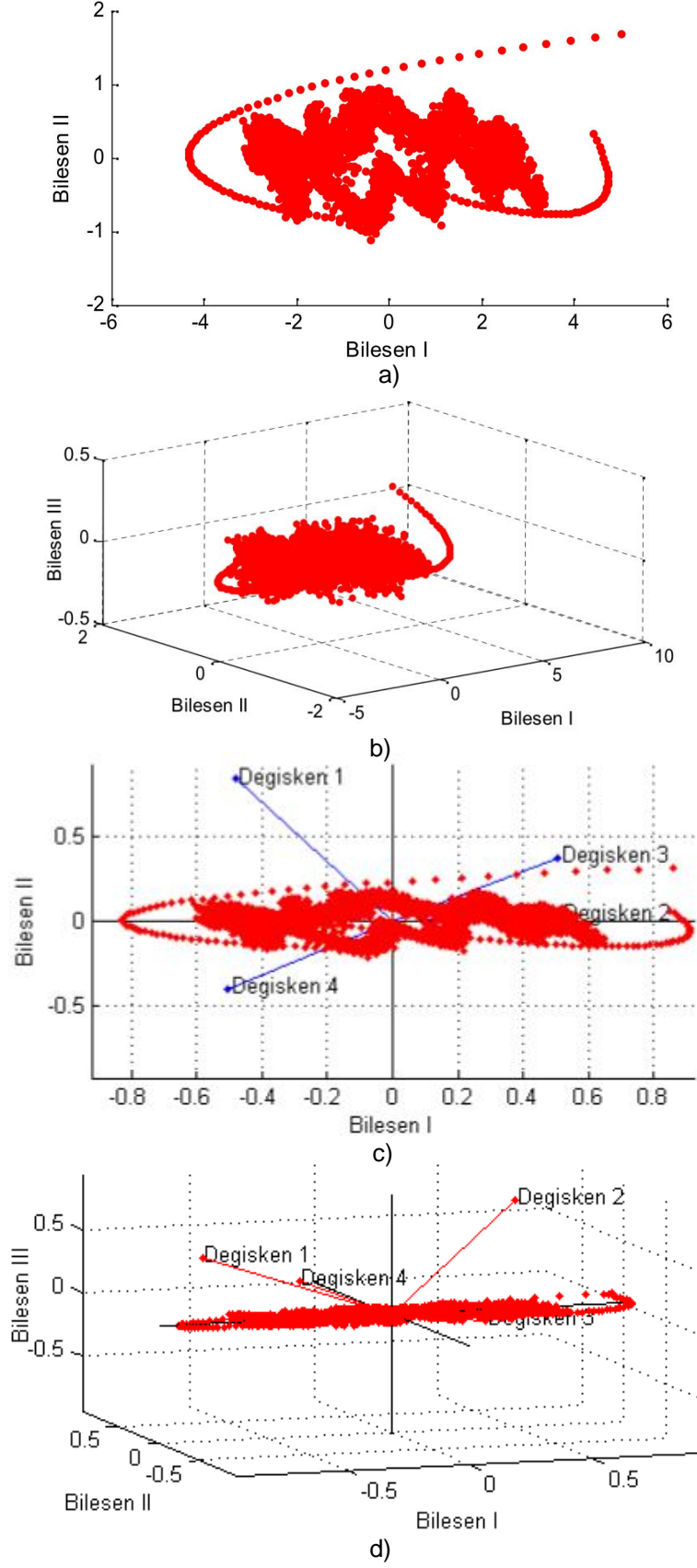
Şekil 5.8 Yapıya ilişkin 1. hasar senaryo (2. test) örneği için ön veri işleme örneği. a) Ham veri alımı, b) Filtreleme işlemi, c) Ölçeklendirme



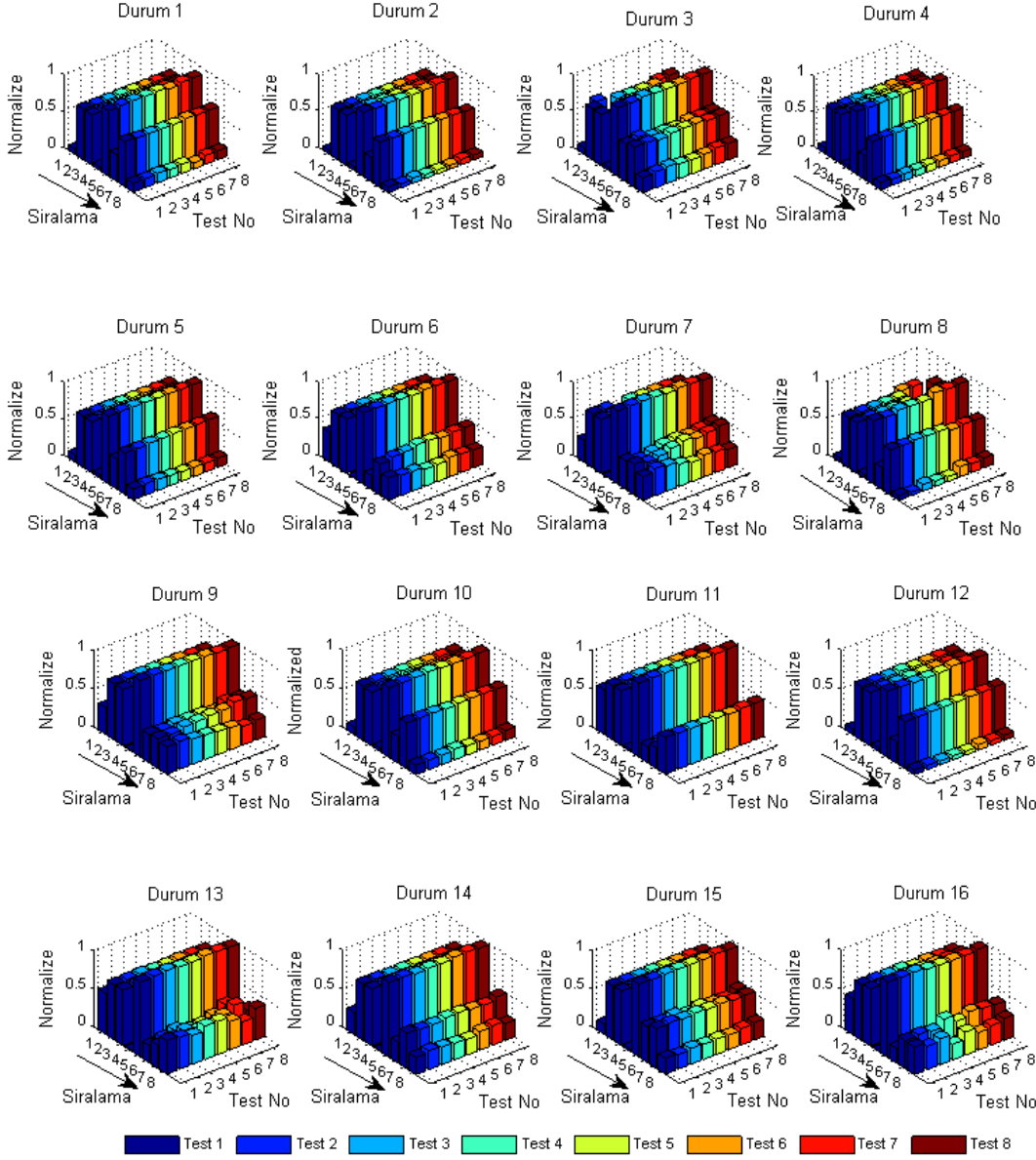
Şekil 5.9 2. durum 5. test için ABA analizinden elde edilen asal bileşenlerin varyanslarına ilişkin örnek

Sonuç olarak YSI'de asal bileşen analizinin uygulama basamakları aşağıdaki gibi verilmiştir. Başlangıçta deneysel yöntemden elde edilen ölçüm verileri  $I \times J$  matrisi olacak şekilde organize edilirler.  $I$ , ölçülen değişkeni,  $J$  ise ölçüm verisini gösterir (Şekil 5.8).

- a. Veri standartlaştırılır.
- b. Öz vektörleri ve öz değerler hesaplanır.
- c. Birinci ve ikinci öz değerler asal bileşenler olarak seçilir.
- d. Veriler, birinci ve ikinci bileşenlere üzerinde transformasyonları alınır.
- e. Birinci ve ikinci bileşenlere ait yüklenme değerleri hesaplanır. Asal bileşenlere bağlı olarak elde edilen varyans oran örneği (2. durum 5. testi için) Şekil 5.9'da verilmiştir. Burada, ilk iki bileşene ait varyans, toplam varyansın yaklaşık olarak % 66'ını, ilk üç bileşene ait varyans ise toplam varyansın yaklaşık olarak % 89.58'ini oluşturmaktadır. Bir başka deyişle, ABA azaltma prosesleri kullanılarak elde edilen ile baştaki birkaç asal bileşenle istatistikî veri dağılımları hakkında fikir edinilebilir. Burada, ilk iki asal elemana ait veriler dikkate alınmıştır (Şekil 5.10.d).
- f. Yüklenme değerleri, 0 ile 1 arasında normalize edilir. Şekil 5.11'de verilen 1'den 8'e kadar sıralanmış numaralar, değişkenlere ait ilk iki bileşeni göstermektedir. Bir başka deyişle, 1 ve 2, birinci sensör kanalına ilişkin yüklenme değerlerini, 3 ve 4, ikinci kanala ait birinci ve ikinci yüklenme değerlerini, 5 ve 6, üçüncü kanala ait birinci ve ikinci yüklenme değerlerini, son iki numarada, dördüncü kanala ait yüklenme değerlerini temsil etmektedir. Daha sonra puls modülasyonunda kullanılmak üzere 0-100 arasında ölçeklendirilir,
- g. Elde edilen veriler, *haptik kod* adlandırılır. Daha sonra bu kodlar haptik uyarılarda kullanılır.



Şekil 5.10 Yapıya ilişkin birinci durum (2. test) örneği için asal bileşen analiz uygulama prosedürü  
a) İki eksende ABA skorları, b) Üç eksende ABA skorları, c) İki eksende ABA yükleme skorları  
d) Üç eksende ABA yükleme skorları



Şekil 5.11 Birinci ve ikinci asal bileşenlere ilişkin normalize edilmiş yüklenme değerleri.

### 5.2.8 Haptik uyarısının gösterilmesi

Doku algısı, birçok duyuşal sensörün kombinasyonu ile hissedilir. İnsan eline etki eden duyuşal sinyaller, sıcaklık, tekstür, basınç, kuvvet, gerdirme ve bazı durumlarda ağrı olarak algılanıp yorumlanır. Tüysüz derideki (avuç içi veya alın gibi) taktik uyarımlar, deriye gömülmüş reseptörlerin hareket hızlarına ve psikofizik kanallara bağlı olarak değişir. Hâlihazırda, her bir kanaldaki hassasiyet frekans aralığı tam olarak belirlenmemiştir. Bunun başlıca nedenleri ise, kanalın izole edilip uyarılmasında karşılaşılan zorluklar ve en önemlisi bireyler arasındaki

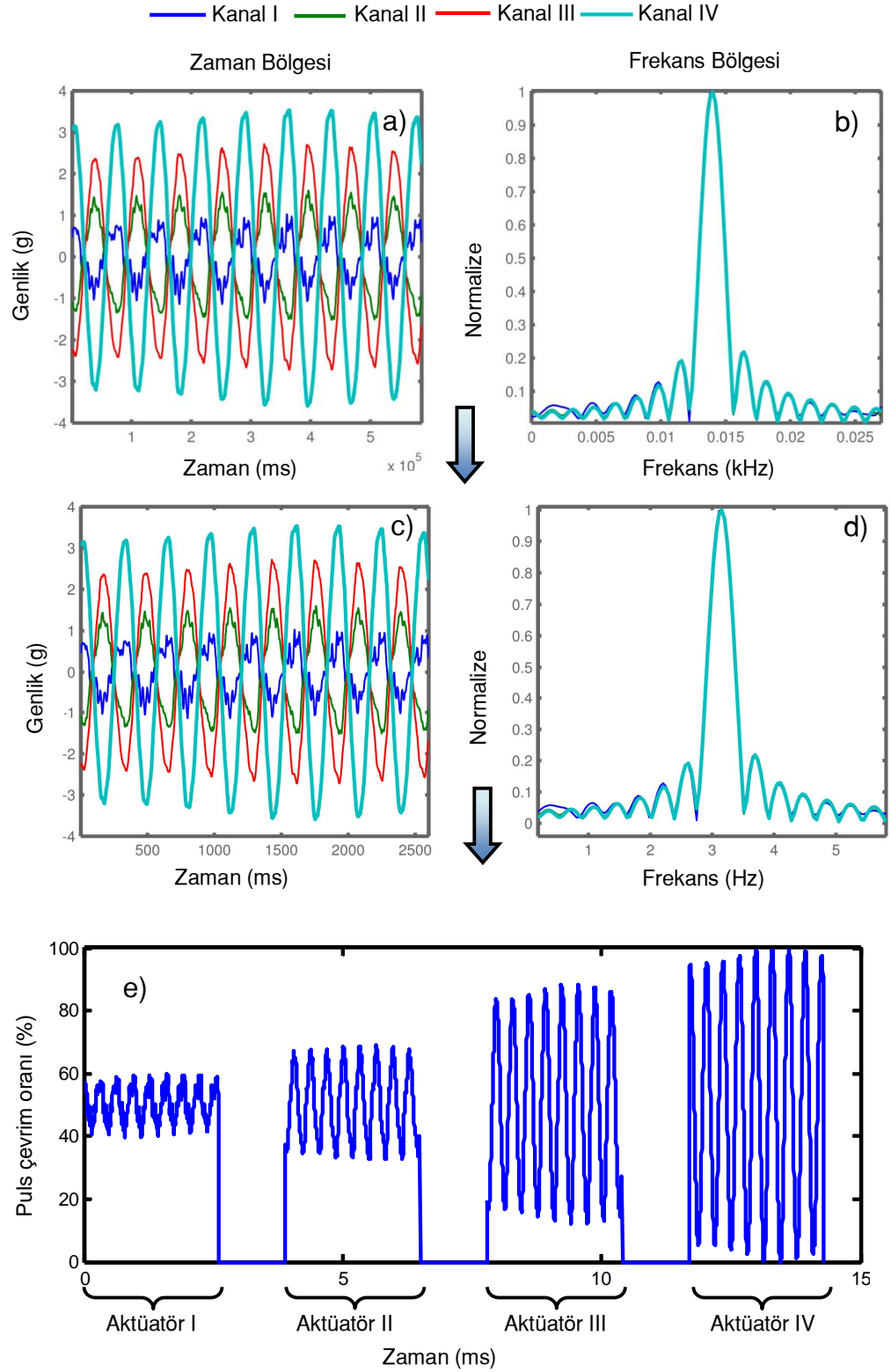
farklılıklardır (Mansfield, 2005). Bu çalışmada amaçlanan hususlardan birisi de, öğrenme aşamasında katılımcıların haptik uyarıları başarılı bir şekilde tanımlamaları sağlamak ve onları ayırt edebilmelerini etkileyen parametreler araştırmaktır. Bu şekilde bireysel olarak insanın haptik uyarımları ve onların ilişkili oldukları soyutsal anlamları öğrenmesi YSİ uygulamaları için elverişli olacaktır. Daha önceki kısımlarda belirtildiği üzere, türetilen haptik kodlar mikroişlemci (Mİ) ile kontrolleri (uygulanacak haptik örüntü uyarım modeli) yapılmıştır. Yani haptik kod dizisi, Mİ'de tasarlanan uyarıya göre, voltaja dönüştürülüp dört farklı minyatür motorun (aktifleşme ve duraklama süreleri) aktivasyonları yapılmıştır. Literatürde, bireylerin dokunma hissiyle, periyodik olarak uygulanan titreşim sinyalleri ve onların ilişkili oldukları anlamları zamanla tanıyıp onları ayırt edebilme yeteneğini belirten çalışmalar mevcuttur. Örneğin Chan vd., insanlar üzerinde yaptığı çalışmada, insanların 3 dk'lık kısa bir süre içerisinde, 7 farklı periyodik haptik sinyali ve bu sinyallerin ilişkili olduğu soyutsal anlamları % 95 başarıyla tanıdığını belirtmiştir (Chan et al., 2005). Bunun yanında Enriquez vd., yaptığı araştırmada, 25 dk'lık bir sürede içerisinde, insanların 9 farklı dalga şekli ve frekanstaki sinyallerin ve onların ilişkili oldukları anlamları % 73 ile % 81 arasındaki bir skorla öğrenip tanıdıklarını belirtmişlerdir (Enriquez et al., 2006). Nitekim 45 dk geçtikten sonra katılımcılar üzerinde test tekrarlamış ve katılımcıların hala sinyalleri hatırladıklarını bildirmişlerdir. Enriquez vd., bir başka çalışmalarında 10 farklı periyodik haptik uyarıyı ve bu uyarıların ilişkilendirildikleri anlamları insanlar üzerinde test etmişlerdir. İki hafta geçtikten sonra testler tekrarlandığında, % 86 başarı skoruyla katılımcıların, bu uyarıları hala hatırlayabildikleri bildirilmiştir (Enriquez and MacLean, 2008). Literatürde periyodik haptik uyarılar üzerinde yapılan çalışmalardan bir kısmı yukarıda verildiği gibi, insanların haptik uyarı ve bu uyarıların ilişkili oldukları anlamların öğrenebileceğini gösteren potansiyel çalışmalardan bir kısmıdır. Yukarıda verilen potansiyel çalışmalara dayanarak bu çalışmada da, acaba insanlar, YSİ sensör verilerini ve bunların ilişkilendirildikleri anlamları (YSİ'de, anlamlar yapının sağlık durumunu gösterir) haptik uyarımlarla öğrenerek yapıdaki hasarın belirlenip belirlenemeyeceği sorusu sorulmuştur. Bunun testi, yapının değişik hasar senaryolarına (Tablo 5.1) ilişkin ham sensör verilerininin haptik uyarıya çevrilmesiyle katılımcılar üzerine uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Burada, bu uyarı tipi, birinci tip uyarı tipi olarak tanımlanmıştır. Birinci tip uyarının üretilme prosedürü aşağıda verilmiştir.

Birinci tip uyarının temel amacı, insanların haptik uyarılarda gösterilen, periyodik sinyallerdeki anomileri belirleyip belirleyemeceğini tespit etmektir. Daha önce belirtildiği gibi, sinüs dalgasıyla aktifleştirilmiş bir yapının herhangi bir bölgesinde hasar yoksa sensörlerden lineer sinüs dalgaları elde edilirken, hasar olması durumunda ise lineer olmayan sinyaller oluşmaktadır. Temel fikir, YSİ için, insanların lineer olmayan sinyalleri ayırt edebilme kabiliyetlerinin ölçülmesidir. Bu amaçla kule yapısına iliştirilen dört farklı ivmeölçer verileri alınmış ve ham veriler üzerinde herhangi bir sinyal işleme, veri sınıflandırma, istatistiksel yöntem ve nümerik modelleme prosesleri uygulanmamıştır. Bir başka deyişle, makinenin (bilgisayarın) sayısal çözüm avantajlarından yararlanılmamıştır. Hasar belirleme işleminde, sadece insanın bilişsel becerisinden yararlanılmıştır.

Başlangıçta, 0-585.84 ms aralığında her bir sinyalin zaman noktaları alınmıştır. Alınan bu zaman sinyallerinin ortalama frekansı  $14 \pm 0.03$  Hz'dir. Zaman nokta periyotları çok kısa olup, insanların bu kısa zaman diliminde bunları öğrenmesi zor olduğunda, tüm sinyaller 4.4373 ile çarpılıp sinyallerin frekansları azaltılmıştır. Bu şekilde orijinal zaman noktalarının örnekleme oranları azaltılmış olur. Nihai durumdaki sinyaller, 0-585.94 ms aralığından 0-2600 ms aralığına yükseltilmiş olur. Daha sonra modifiye edilmiş bu zaman seri noktaları, puls modülasyonunda gösterilmek üzere 0-100 aralığında ölçeklendirilmiştir. En sonunda da, bütün sinyaller tanzim edilen aktifleştirme sıralarını oluşturacak şekilde (Sensör kanalı olan 1, 2, 3 ve 4 sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 haptik minyatür motorlar üzerinde eşleştirilmiştir), insan eldiveni üzerinde eşleştirilmiştir (Şekil 5.12).

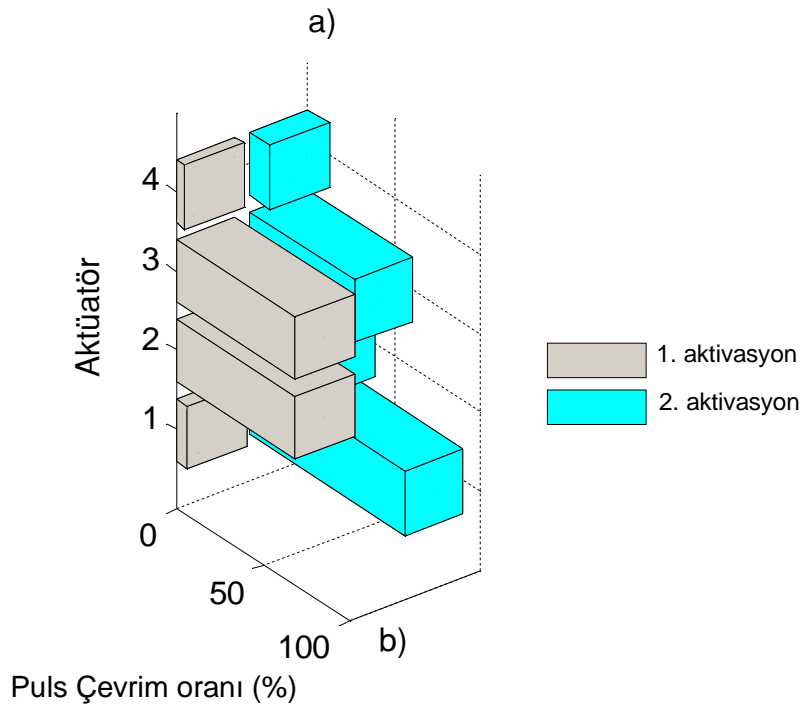
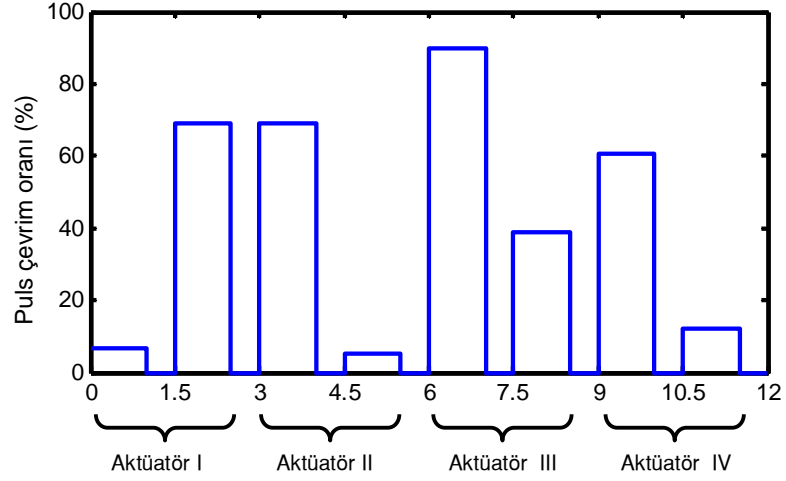


Şekil 5.12 Yapıya ilişkin birinci durum (1. testinde) ve 1. haptik uyarısının uygulanma prosedürüne ilişkin örnek. a) 0-585.94 ms aralığında her sinyalin zaman noktalarının alınması, b) Alınan zaman noktalarının frekans bölgesindeki gösterimi, c) Zaman sinyallerinin 4.4373 faktörü ile düzeltilip modifiye edilmesi, d) Modifiye edilen sinyallerin frekans bölgesinde gösterimi, e) Modifiye edilen zaman noktalarının puls modülasyonunda kullanılmak üzere ölçeklendirilmesi.

Her bir sinyalin uyarılma süresi ve sinyaller arasındaki duraklama süresi sırasıyla 2.6 s ve 1.3 s şeklindedir (Cipriani et al., 2012; Morley and Rowe, 1990, gibi araştırmacıların yaptıkları çalışmalara benzer olarak). En son, 4. minyatür motorun aktifleşme uyarımı tamamlandıktan sonra otomatik olarak tekrar 1, 2, 3 ve 4. motor tekrar aktifleşir. Yeni haptik kodlar, mikroişlemceye gönderilinceye kadar otomatik olarak düzenlenen şekilde aktifleşmeye devam eder. Sözü edilen bu prosesler Mİ'nin programlanmasıyla yapılmıştır.

İkinci ve üçüncü tip uyarımın amacı, hem makinenin sayısal çözümünden hem de insanların bilişsel sistemlerinden yararlanılarak, geliştirilen kooperatif insan-makine arayüz paradigmasının etkinliğini belirlemektir. Kooperatif insan-makine arayüzü, konsept kısmında verildiği gibi, "insan + makine" formülü ile çözümlenmeler yapıp daha iyi sonuçlar alınacağına yöneliktir. Bu amaçla, sensörlerden elde edilen veriler ön işlemlerden (makine ile) geçirilip haptik kodlara dönüştürülmüşlerdir. İkinci ve üçüncü tip uyarımına ilişkin uygulama tekniği aşağıda belirtilmiştir.

İkinci tip uyarı tipinde, AB analizinden elde edilen yüklenme değerleri, haptik uyarılarda kullanılmıştır. Yüklenme değerlerine ilişkin izlenen prosedür, asal bileşenler analizi kısmında belirtilmiştir. Şekil 5.11'de verildiği gibi AB analizinde, 8 farklı yüklenme değeri çıkartılıp haptik uyarılarda kullanılmıştır. Burada, birinci ve ikinci değer, 1. haptik motor üzerinde, üçüncü ve dördüncü değer, 2. haptik motor üzerinde, beşinci ve altıncı değer, 3. haptik motor üzerinde, son iki değerde, 4. haptik motor üzerinde eşleştirilmiştir. Haptik kodlar katılımcılara uyarıldığında, katılımcılar da bu ölçeklendirilmiş yüklenme değerlerini zamanla öğrenip birbirinden ayırt edebilme kabiliyetleri kazanırlar. Burada, her bir değer için aktifleşme süresi ve değerler arasındaki duraklama süresi sırasıyla 1 s ve 0.5 s şeklindedir. En son 4. haptik motorun, aktifleşmesi tamamlandıktan sonra, 1.3 s'lik duraklamadan sonra, otomatik olarak tüm motorlar tekrar aktifleşirler. Yeni haptik değerler Mİ'e gönderilinceye kadar, tüm haptik motorlar 1-2-3-4 sırasına göre aktifleşmeye tekrar başlarlar.



Şekil 5.13 AB analizinde elde edilen yüklenme değerlerinin 1. ve 2. haptik uyarım tipinde uygulama örneği [Durum 1, test 1]. a) İkinci uyarımda haptik değerlerin aktifleşme sırası 1-2-3-4 şeklindedir. b) Üçüncü uyarımda tüm motorlar aynı anda aktifleştirilmiştir.

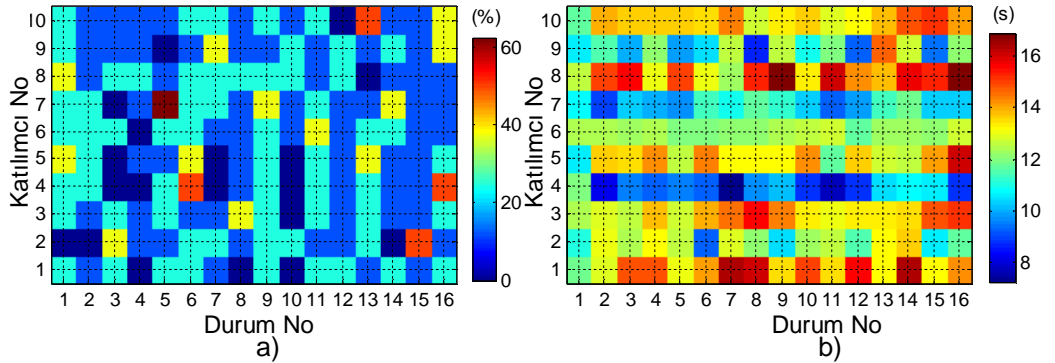
Üçüncü uyarı tipinde, tüm vibro-haptik motorlar aynı anda aktifleştirilmesiyle testler yapılmıştır. Şekil 5.13'te verilen 1. ve 2. çubuk, asal bileşen analizinin uygulanması sonucu elde edilen sırasıyla birinci ve ikinci bileşene ait yüklenme skorlarını temsil etmektedir. Aktifleşme süresi 1 s olup, gri ile yeşil çubuklar arasındaki duraklama süresi 0.5 s'dir. Üçüncü uyarım tipinin ikinci uyarım tipinden ayıran farkı, üçüncü tip uyarıda tüm motorlar, iki kısımda aynı anda (4 gri çubuk aynı anda aktifleşir, 0.5 s duraklamadan sonra 4 yeşil

çubuk anda aktifleşir.) olacak şekilde aynı anda aktifleştirilmiştir. Tüm motorların aktivasyonları tamamlandıktan sonra 1.3 s'lik duraklamadan sonra tekrar otomatik olarak aktifleşirler. Burada da, sözü edilen tüm farklı uyarımlar, Mİ tabanlı haptik deneysel cihazla yapılmıştır.

### 5.2.9 Katılımcıların sonuçları

Bu araştırmada, insanın bilişsel yeteneğini YSİ ölçüm sistemine bağlayan invazif olmayan yeni bütünleşik insan-makine paradigması önerilmiştir. Metodolojide belirtilen bütün prosesler, yaşları 25 ile 34 arasında değişen 8'i erkek, 2'si bayan olmak üzere toplam 10 katılımcı üzerinde test edilmiştir. Bu çalışmaya dâhil olan tüm katılımcılar sağ ellerini, sol ellerine göre daha aktif bir şekilde kullanabildiklerini belirtmişlerdir. Tüm hasar senaryoları, her bir katılımcıya öğretilmiştir. Haptik deney testleri, üç oturumda gerçekleştirilmiştir. Her bir oturumda, ilgili olan haptik uyarım tipi uygulanmıştır. Her bir uyarım tipinde 128 test uygulanmıştır. Her bir katılımcıya, test aşamasında, kendisini iyi hissetmediği durumlarda dinlenebileceği şeklinde talimatlar verilmiştir. Bunun yanında, tüm katılımcılara, deneyin herhangi bir aşamasında, sağlık ve olası diğer nedenlerden dolayı, deneyi bırakabilme haklarına sahip olduğu belirtilmiştir. Test aşamasında tüm katılımcılar deneyi yarıda bırakmamıştır. Bazıları, birinci oturumdaki testleri tamamladıktan sonra, ikinci ve üçüncü oturumu başka günlerde yapmayı tercih etmişlerdir. Deney, yaklaşık olarak 120 dk sürmüştür. Değerlendirme, katılımcıların verdikleri doğru cevapların yüzdeliği ve yanıtlama süreleri bazında yapılmıştır. Burada değerlendirme, her bir doğru cevap, 1 puanla, her bir yanlış cevap ise 0 puana karşılık gelecek şekilde yapılmıştır. Tüm hasar konfigürasyonların doğru bulunması durumunda başarı skoru % 100 olur. Başarı performansı  $\frac{\text{Doğru\_Yanıt}}{\text{Toplam\_Test}} \times 100$  kriteriyle değerlendirilmiştir. Tüm katılımcıların haptik uyarıları daha iyi algılayabilmeleri için eldiveni rahat bir şekilde giymeleri sağlanmıştır. Bunun yanında, sandalyeye ergonomik bir şekilde oturmalarında ve rahat bir şekilde kollarını hareket ettirmeleri konusunda katılımcılara önerilerde bulunulmuştur. Deney prosedürü, grafik ara yüzleri ve haptik cihaz her bir katılımcıya tanıtılmıştır. Her bir katılımcı, kendisini rahat hissettiği anda testler uygulanmıştır. Öğrenme aşamasında, tüm katılımcılar haptik uyarılarını ve ilişkili oldukları hasar konfigürasyonları zamanla daha iyi

tanıdıklarını belirtmişlerdir. Bazı katılımcılar, haptik uyarıları daha iyi öğrenmek için testlerin tekrar edilmesini istemiştir. Bazı katılımcılar, haptik uyarılma süresinin daha uzun olması gerektiğini dile getirmişlerdir. Bazıları iki eldiven kullanılması durumunda (Bir eldiven, her zaman sağlıklı yapının haptik uyarılarını gösterecek, diğeri ise test edilecek yapının haptik uyarılarını gösterecek) hasarı daha iyi öğrenebilecekleri şeklinde faydalı geri dönüşümler yapmışlardır. Katılımcıların sözlü olarak belirttikleri bütün geri dönüşümler not alınıp, YSİ insan-makine paradigmasının geliştirilmesine ve ilerleyen çalışmalara ışık tutacağı kanaati mevcuttur. Daha önceki kısımlarda belirtildiği gibi birinci ve ikinci uyarım tipinin aktivasyon süresi sırasıyla 14.3 s ve 11.5 s şeklinde dizayn edilmiştir. Her bir katılımcı, her bir testteki uygulanan uyarıları hissettikten sonra yanıtlarını vermişlerdir. Katılımcıların yanıtları ile yanıtlama süreleri gibi parametreler, istatistiksel olarak ANOVA ile değerlendirilerek hasar durumları ve uygulanan uyarım tipleri açısından kendi aralarında anlamlı olup olmadığı araştırılmıştır.

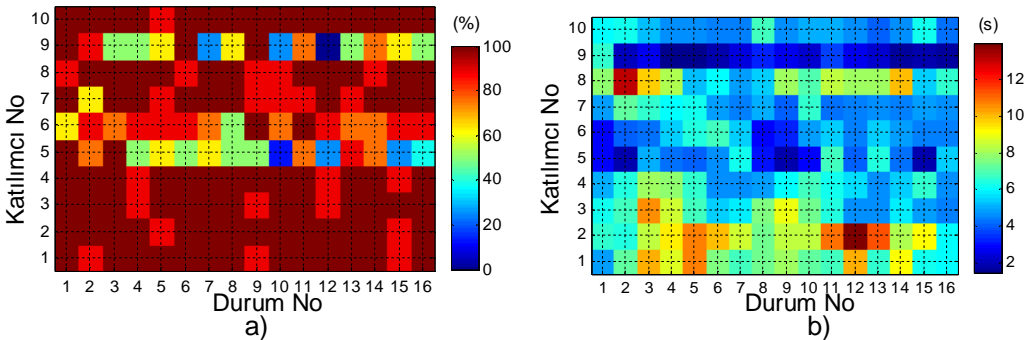


Şekil 5.14 Birinci uyarı tipi için katılımcılardan elde edilen performans skorları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi)

Birinci, ikinci ve üçüncü uyarı tipi için katılımcılardan elde edilen skor sonuçları Şekil 5.14, 5.15 ve 5.16'de verilmiştir. Burada  $x$  ekseni, hasar durum numarasını,  $y$  ekseni ise katılımcı numarasını belirtmektedir. Renk yoğunluğu ölçeği, doğruluk yüzdesini (Şekil 5.14.a-5.16.a) ve yanıtlama süresini (Şekil 5.14.b-15.16.b) göstermektedir. Her üç uyarı tipinde katılımcılar arasında anlamlı bir fark saptanmamıştır. Ancak, Şekil 5.14-5.16'da verildiği üzere, bireysel farklılıklar görülmüştür. Bunların oluşmalarının muhtemel nedenleri; bireylerin sahip oldukları mekanoreseptörler arasındaki farklılıklar ve katılımcıların haptik uyarımlara olan tepkilerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bunların

yanında, bireylerin haptik sinyaller ve bunların ilişkili oldukları hasarları öğrenmek için harcadıkları efor da önemli bir etkidir. Bunların ötesinde, her bir katılımcının testteki konsantrasyonu, sinirsel ve rahatlık durumları gibi parametreler de, yanıtlar üzerine etki edebilmektedir.

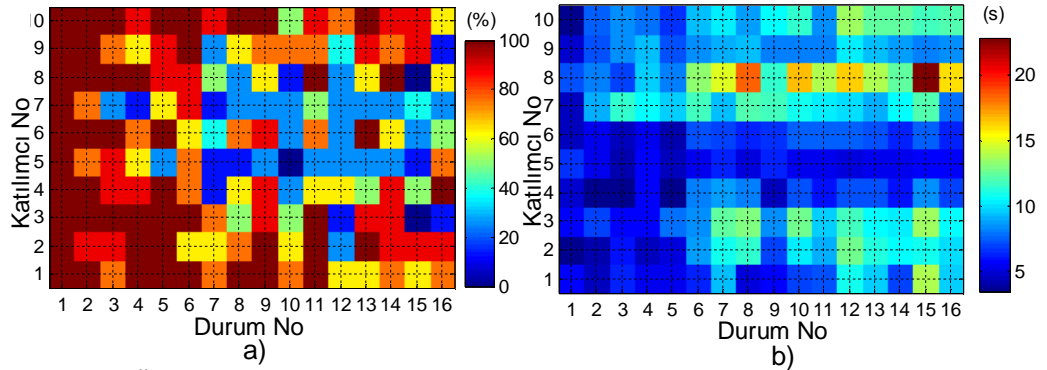
Birinci uyarım tipinde, her bir katılımcıdan elde edilen doğruluk yüzdeleri ile yanıtlama sürelerine ilişkin veriler Şekil 5.14'te verilmiştir. Tüm hasar senaryoları için ortalama doğruluk yüzdesi, %  $18.91 \pm 11.61$  ve ortalama yanıtlama süresi ise  $12.52 \pm 1.98$  s olarak bulunmuştur. Daha önceki kısımlarda belirtildiği gibi, 1. uyarım tipinin temel amacı, insanın farklı periyodik (hasar, mikro veya makro boyutta, sinyalin periyodik dalga şeklini değiştirir) haptik verileri algılayıp birbirlerinden ayırt edip bunları sınıflandırarak, hasarı teşhis edebilme yeteneklerini ölçmektir. ( $p > 0.05$ ). En yüksek ve en düşük doğruluk yüzdesi sırasıyla durum 6 (%  $26.25 \pm 10.94$ ) ve durum 4'te (%  $10 \pm 7.91$ ) elde edilirken, en uzun ve en kısa yanıtlama süreleri sırasıyla durum 14 ( $13.41 \pm 1.785$  s) ve durum 1'de ( $11.61 \pm 0.765$  s) gözlemlenmiştir. Birinci uyarı tipinde, 10 katılımcının doğru yanıtlama sonuçları ve yanıtlama süreleri açısından ANOVA ile değerlendirildiğinde, yapının değişik hasar durumları arasında anlamlı bir korelasyon bulunmamıştır. Şekil 5.14'de verildiği gibi, tüm katılımcılar düşük bir doğruluk yüzdesiyle hasarı teşhis edebilmişlerdir. Nitekim tüm katılımcılar, gerek öğrenme, gerekse test periyodunda, hasar varyasyonunu bu şekilde gösterilen uyarılarla belirlemenin zor olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 5.15 İkinci tip uyarının uygulanması sonucu, katılımcılardan elde edilen performans skorları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi)

İkinci uyarı tipi, geliştirilen insan-makine YSİ paradigmasının etkinliğini belirlemeye yöneliktir. Tüm katılımcılardan her bir hasar durumu için verdikleri

doğru yanıtların yüzdeliği ile yanıtlama sürelerine ilişkin dağılımlar Şekil 5.15'te verilmiştir. Sonuçlar, 9 katılımcının % 90'dan fazla bir skorla hasarı teşhis edebildiğini göstermiştir. 10 katılımcının sonuçlarına dayanarak, en yüksek ve düşük doğruluk yüzdeleri sırasıyla durum 1 (%  $95\pm 12.08$ ) ve durum 10'da (%  $78.75\pm 32.83$ ) ve buna bağlı olarak en uzun ve kısa yanıtlama süreleri ise sırasıyla durum 3 ( $7.08\pm 2.7$  s) ve durum 16'da ( $4.87\pm 1.34$  s) elde edilmiştir. Tüm katılımcıların tüm hasar senaryoları için, ortalama doğru cevaplama yüzdeleri %  $88.13\pm 20.21$  ve buna bağlı olarak yanıtlama süreleri ise  $5.87\pm 2.33$  s olarak bulunmuştur (Tablo 5.2). Bu uyarım tipinde elde edilen ilginç sonuç, en fazla hasar durum 16 olduğu halde (tüm cıvatalar gevşetildi), katılımcıların bu uyarıyı en kısa sürede yanıtlamış olmalarıdır. 1. uyarı tipinde olduğu gibi 2. uyarıda da, 10 katılımcının doğru yanıtlama sonuçları ( $p = 0.916 > 0.05$ ) ve yanıtlama süreleri açısından ( $p = 0.891 > 0.05$ ) ANOVA ile değerlendirildiğinde, yapının değişik hasar durumları arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bunun yanında bütün katılımcılar sözlü olarak, 2. uyarıyı, 1. uyarıya göre daha rahat öğrenip ayırt edebildiklerini söylemişlerdir. Bunun yanında, haptik örüntüler ve bunların trendlerini daha rahat takip edebildiklerini söylemişlerdir.



Şekil 5.16 Üçüncü tip uyarının uygulanması sonucu, katılımcılardan elde edilen performans skorları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi)

Üçüncü uyarı tipinde de, ABA'dan elde edilen yükleme değerleri haptik uyarıda kullanılıp, tüm aktüatörlerin aynı anda aktifleştirilmesiyle, katılımcıların bu haptik uyarılardan, yapıdaki hasarı tespit edebilme yetenekleri ölçülmüştür. 3. uyarı tipinde katılımcılardan elde edilen sonuçlar Şekil 5.16'da verilmiştir. 10 katılımcının sonuçlarına dayanarak, en yüksek ve düşük doğruluk yüzdeleri sırasıyla durum 1 (% 100) ve durum 12'de (%  $37.5\pm 21.25$ ) ve buna bağlı olarak en uzun ve kısa yanıtlama süreleri ise sırasıyla durum 12 ( $11.54\pm 4.83$  s) ve durum

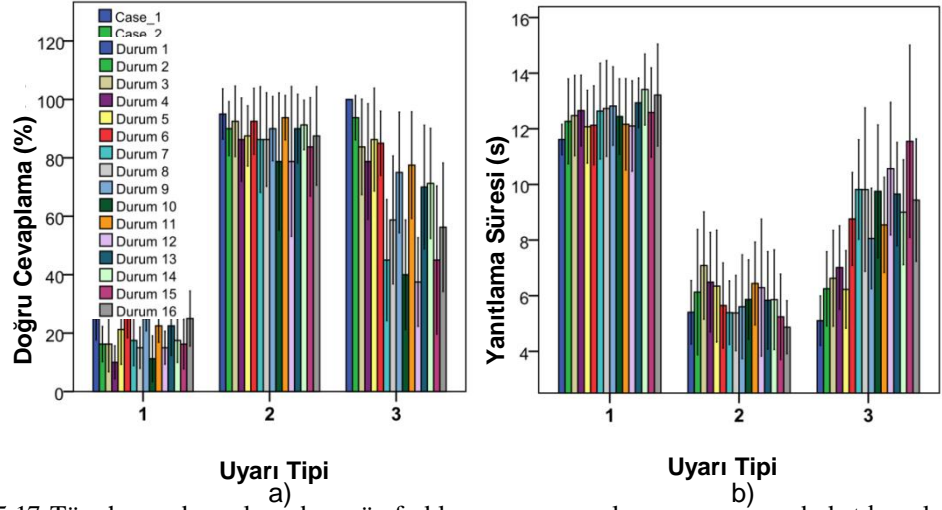


1’de ( $5.1\pm 1.24$  s) elde edilmiştir. Tüm katılımcıların tüm hasar senaryoları için, ortalama doğru cevaplama yüzdeleri %  $68.98\pm 30.91$  ve buna bağlı olarak yanıtlama süreleri ise  $8.51\pm 3.22$  s şeklinde bulunmuştur (Tablo 5.2). Katılımcılardan elde edilen doğruluk yüzdeleri ( $p<0.001$ ) ile yanıtlanma süreleri ( $p<0.001$ ) açısından sonuçlar incelendiğinde, 1. ve 2. tip uyarının tersine, üçüncü tipte, yapının değişik hasar durumları arasında anlamlı bir fark tespit edilmiştir.

Tablo 5.2 Farklı hasar konfügrasyonları ve farklı uyarı tiplerinde katılımcılardan elde edilen istatistiksel sonuçlar

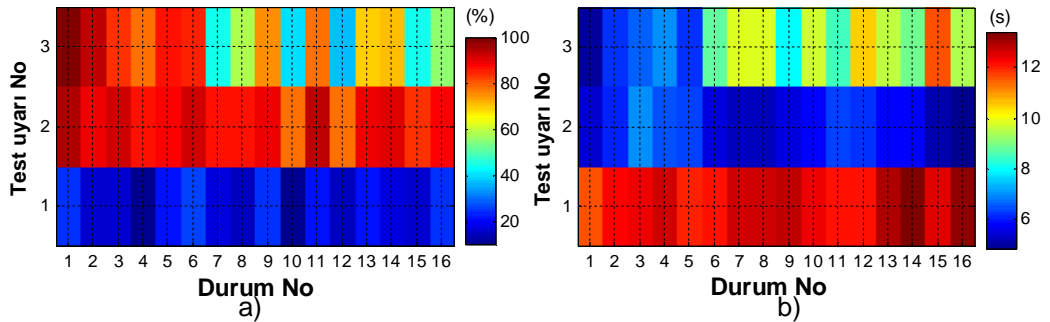
Durum No	Doğru Yanıtlama (%)				Yanıtlanma Süresi (s)			
	Test Uyarı I (n=10)	Test Uyarı II (n=10)	Test Uyarı III (n=10)	p	Test Uyarı I (n=10)	Test Uyarı I (n=10)	Test Uyarı I (n=10)	p
1	25.00±10.21	95.00±12.08	100.00±0.00	3.2967E-17	11.61±0.76	5.40±1.60	5.10±1.24	1.8073E-12
2	16.25±8.44	90.00±12.91	93.75±10.62	8.2377E-16	12.27±2.14	6.13±3.15	6.25±1.86	0.000004
3	16.25±13.24	92.50±16.87	83.75±22.86	4.3408E-10	12.48±2.02	7.08±2.70	6.62±2.40	0.000009
4	10.00±7.91	86.25±19.94	78.75±27.67	3.8303E-9	12.66±1.78	6.49±2.50	7.01±2.10	6.2356E-7
5	21.25±16.72	87.50±14.43	86.25±24.62	9.8727E-9	12.07±1.83	6.34±2.81	6.23±1.95	0.000002
6	26.25±10.94	92.50±15.81	85.00±15.37	4.6384E-11	12.13±1.98	5.65±2.14	8.76±2.33	0.000002
7	17.50±12.08	86.25±25.31	45.00±28.99	0.000002	12.64±2.41	5.39±1.60	9.82±2.50	3.2201E-7
8	15.00±9.86	86.25±22.40	58.75±30.65	6.7325E-7	12.73±2.41	5.38±1.89	9.82±4.11	0.000031
9	25.00±5.89	90.00±15.37	75.00±28.87	8.8069E-8	12.82±1.97	5.60±2.61	8.06±2.53	0.000001
10	11.25±10.94	78.75±32.83	40.00±26.22	0.000010	12.44±1.90	5.86±2.00	9.75±3.34	0.000013
11	22.50±7.91	93.75±10.62	77.50±25.55	7.5026E-10	12.16±2.30	6.44±2.08	8.55±2.39	0.000022
12	15.00±7.91	78.75±35.87	37.50±21.25	0.000014	12.10±2.27	6.29±3.44	10.57±3.33	0.000680
13	22.50±14.19	90.00±16.46	70.00±29.58	3.9133E-7	12.93±1.25	5.83±2.45	9.65±2.60	4.2772E-7
14	17.50±10.54	91.25±11.86	71.25±26.39	1.9941E-9	13.41±1.78	5.86±2.51	9.00±2.64	4.5636E-7
15	16.25±11.86	83.75±23.61	45.00±35.45	0.000013	12.59±2.25	5.24±2.15	11.55±4.83	0.000057
16	25.00±13.18	87.50±23.57	56.25±30.76	0.000013	13.21±2.56	4.87±1.34	9.44±3.08	1.6573E-7
Toplam (n=160)	18.91±11.64	88.13±20.21	68.98±30.91	3.47E-104	12.52±1.98	5.87±2.33	8.51±3.22	7.377E-80

10 katılımcıda, üç farklı uyarı tipinde ve 16 farklı hasar durumunda üstteki şekillerde verilen sonuçlar, toplu olarak Şekil 5.17’de çubuk grafiği şeklinde verilmiştir. Üstteki paragraflarda belirtildiği edildiği gibi, çubukla gösterilen katılımcıların üst alt sonuçlarına dayanarak; 1. ve 2. uyarı tipinde, yapının hasar durumları arasında anlamlı farklılıklar saptanmazken, 3. uyarı tipinde ise anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Buna dayanarak, katılımcıların belki de, durum 3’te, farklı hasar durumlarının teşhisinde zorlanmadıkları sonucu çıkarılabilir.



Şekil 5.17 Tüm hasar durumlarında ve üç farklı uyarının uygulanması sonucunda katılımcılardan elde edilen sonuçlar (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi) -Hata çubukları: % 95 güvenirlilik aralığı

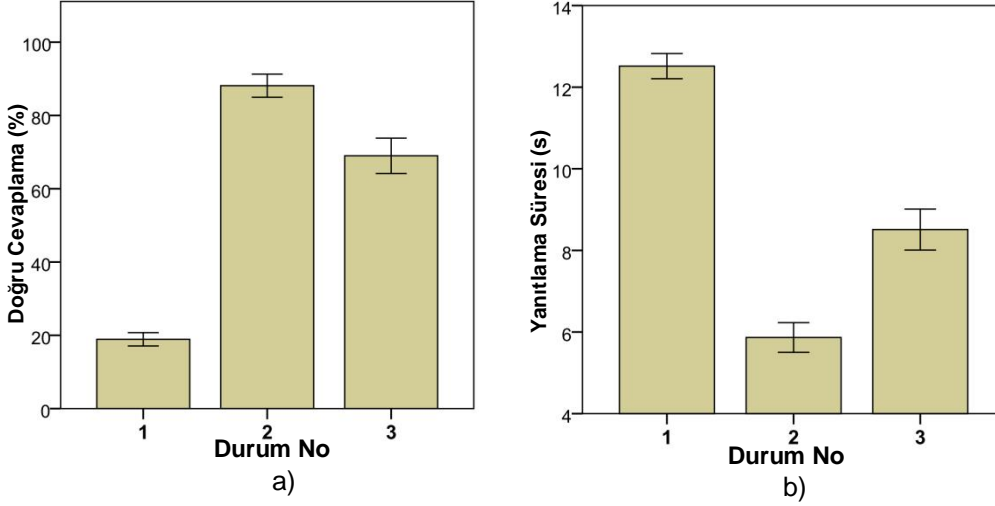
Tüm hasar varyasyonlarında ve üç farklı uyarı tipinin tüm katılımcılar üzerinde uygulanması sonucunda elde edilen sonuçlar kontür dağılımları Şekil 5.18'te verilmiştir. Burada  $x$ , Tablo 5.1'de verildiği gibi hasar durum numarasını,  $y$  ise uygulanan uyarı tipini göstermektedir. İnsan-makine konsept paradigmasının uygulandığı uyarı II ve uyarı III'ün ortalama değerleri dikkate alındığında; katılımcıların en çok, durum 10 (% 43.33) ve durum 12'deki (% 43.75) hasarların teşhisinde zorlandıkları görülmüştür. Ayrıca birim zamanda en hızlı yanıtlar durum I'de görülürken ( $19.81 \pm 5.33$  %/s), en yavaş doğru yanıtlamalar ise durum 10'da ( $8.69 \pm 5.33$  %/s) saptanmıştır.



Şekil 5.18 Tüm hasar senaryolarında ve farklı haptik uyarım tiplerinin uygulanması sonucunda elde edilen katılımcıların sonuçları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi) Hata çubukları : % 95 güvenirlilik aralığı

YSİ uygulamalarında kullanılmak üzere, uygulanan her üç uyarı tipi içerisinde en efektif olanı belirlemek için, katılımcılardan elde edilen doğru cevaplama yüzdeleri ile yanıtlama süreleri dikkate alınarak her üç uyarı tipi, kendi

aralarında karşılaştırılmıştır. 1., 2. ve 3. uyarı tipinde katılımcıların ortalama doğru cevaplama yüzdeleri sırasıyla % 18.98±11, % 88.13±20.21 ve % 68.98±30.91 bulunurken, ortalama yanıtlama süreleri ise 12.52±1.98 s, 5.87±2.33 s ve 8.51±3.22 s şeklinde bulunmuştur (Şekil 5.19).



Şekil 5.19 Tüm hasar senaryolarında ve farklı haptik uyarı tiplerinin uygulanması sonucunda elde edilen katılımcıların sonuçları (a- Doğruluk yüzdesi, b-Yanıtlama süresi) Hata çubukları : % 95 güvenirlilik aralığı

Tablo 5.3 Tüm hasar konfügrasyonlarında katılımcılardan elde edilen doğru cevaplama yüzdelik değerlerinin çoklu Tukey testi ile karşılaştırılması

(I) Test_Uyarısı	(J) Test_Uyarısı	Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p*	% 95 Güvenirlilik Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
1	2	-69.21875	2.49928	5.1E-9	-75.0947	-63.3428
	3	-50.07813	2.49928	5.1E-9	-55.9541	-44.2022
2	1	69.21875	2.49928	5.1E-9	63.3428	75.0947
	3	19.14063	2.49928	5.1E-9	13.2647	25.0166
3	1	50.07813	2.49928	5.1E-9	44.2022	55.9541
	2	-19.14063	2.49928	5.1E-9	-25.0166	-13.2647

\* 0.05 düzeyinde anlamlı

Üç uyarı tipi içerisinde, güçlü ve etkili olanını belirlemek için, katılımcıların her bir tipteki yanıtları üzerinde istatistiksel olarak Tukey testiyle yapılan karşılaştırmada, uyarı tipleri arasında anlamlı farklılıklar saptanmıştır. I. uyarı tipinden elde edilen sonuçlar, doğruluk yüzdesi açısından, anlamlı olarak II. ( $p < 0.01$ ) ve III. ( $p < 0.01$ ) uyarı tipinden daha düşük, yanıtlama süreleri açısından bakıldığında ise II. ( $p < 0.01$ ) ve III. ( $p < 0.01$ ) uyarı tipinden daha uzun olduğu görülmüştür. II. uyarı tipinden elde edilen katılımcıların sonuçları, I. ( $p < 0.01$ ) ve III. uyarıdan büyük olurken ( $p < 0.01$ ), yanıtlama süreleri açısından I. ( $p < 0.01$ ) ve

III. ( $p<0.01$ ) uyarı tipinden anlamlı olarak daha kısa oldukları saptanmıştır. Son olarak, tip III uyarı için elde edilen katılımcıların doğru yanıtlama yüzdeleri anlamlı olarak tip I'den büyük ( $p<0.01$ ), fakat tip II'den düşük olduğu ( $p<0.01$ ), yanıtlama süreleri açısından da tip I'den anlamlı olarak daha kısa ( $p<0.01$ ) fakat tip II'den uzun olduğu belirlenmiştir (Tablo 5.3-5.4).

Tablo 5.4 Tüm hasar konfigürasyonlarında katılımcılardan elde edilen yanıtlama sürelerinin çoklu Tukey testi ile karşılaştırılması

(I) Test_Uyarısı	(J) Test_Uyarısı	Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p*	% 95 Güvenirlik Aralığı	
					Alt Sınır	Alt Sınır
1	2	6.64991	.28630	5.1002E-9	5.9768	7.3230
	3	4.00499	.28630	5.1002E-9	3.3319	4.6781
2	1	-6.64991	.28630	5.1002E-9	-7.3230	-5.9768
	3	-2.64492	.28630	5.1002E-9	-3.3180	-1.9718
3	1	-4.00499	.28630	5.1002E-9	-4.6781	-3.3319
	2	2.64492	.28630	5.1002E-9	1.9718	3.3180

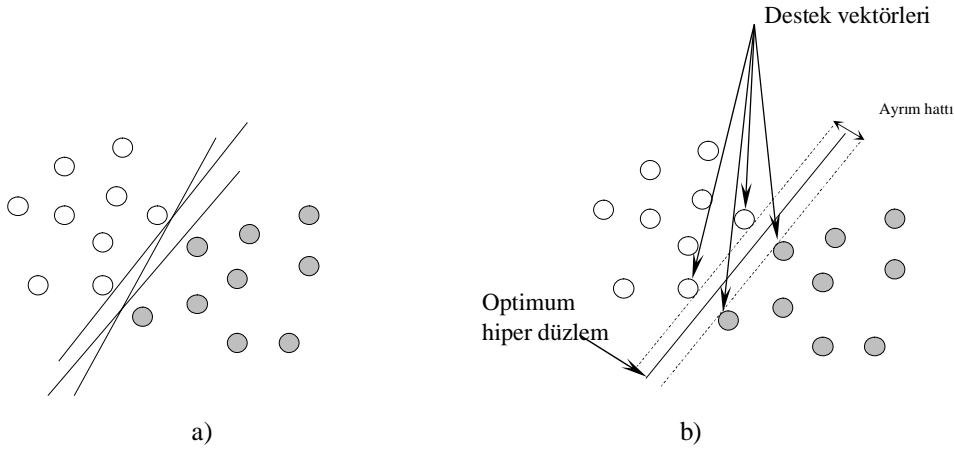
\* 0.05 düzeyinde anlamlı

### 5.3 Destek Vektör Makineleri ile Hasarın Belirlenmesi

Önceki kısımlarda insan-makine YSİ paradigmasının kuramları ve katılımcılar üzerinde test edilmesi sonucu, elde edilen veriler odaklanılmıştı. Bu kısımda, örüntü tanıma ve makine öğreniminde yaygın olarak kullanılan istatistiksel sınıflandırma tekniklerinden biri olan destek vektör makineleri (DVM), YSİ ölçüm verileri üzerinde test edilip hasar konfigürasyonlarını sınıflandırılabilme performansı ölçülmüştür. Destek vektör makineleri, istatistiksel öğrenme kuramına dayanarak geliştirilmiş kontrollü bir sınıflandırma algoritmasıdır. Algoritma, öncelikle iki sınıflı doğrusal öz nitelik vektörlerin sınıflandırılmasında kullanılmıştır (Vapnik, 1998). Daha sonra, doğrusal olmayan çok sınıflı verilerin sınıflandırılması için geliştirilmiştir. Belirli bir öğrenme işlemi için sınırlı sayıda veri verildiğinde en iyi hassas sonuçlar, sınıflandırma işlevi kapasitesinin eğitim kümesinin verileriyle uyumlu olduğu zamanlarda elde edilir. Destek vektör makineleri (DVM), ilk uygulamalarda en büyük aralık sınıflandırıcısı olarak adlandırılıp, eğitim örnekleri ile sınıf ayırıcı sınırın arasındaki uzaklığı büyük olmasını sağlayacak değerlerin bulunmasıyla sınıflandırmalar yapılır. Destek vektör makinelerinin (DVM) çözüm prosedürü, iki farklı sınıfı birbirinden ayrılabilen en uygun karar fonksiyonunun tahmin edilmesi, bir başka deyişle iki sınıfı birbirinden ayrılabilen hiper düzlemin

belirlenmesi esasına dayanmaktadır (Cherkassy and Mulier, 1984). DVM genellikle  $(-1, +1)$  şeklinde sınıf etiketleri ile verilen iki sınıfa ait verilerin, eğitim verisi ile elde edilen bir karar prosesi yardımıyla birbirlerinden ayrılması amaçlanmaktadır. Bunun gerçekleştirilmesinde uygun olan hiper düzlemin belirlenmesi gerekir.

Şekil 5.20.a'da verildiği üzere, iki sınıf verilerini lineer olarak ayırma işleminde, birbirlerinden ayrılabilen birçok hiper düzlem (2 boyutlu düzlemde çizgiyle sınıfların birbirinden ayrılması) çizilebilir. Burada, destek vektör makinelerinin lineer ayırma işlemdeki amacı, kendisine en yakın noktalar arasındaki uzaklığı maksimuma çıkararak en uygun hiper düzlemi bulabilmektedir. Şekil 5.20.b'de verildiği gibi, sınırı maksimuma çıkararak en uygun ayırımı yapan hiper düzleme optimum hiper düzlem ve sınır genişliğini sınırlandıran noktalara ise destek vektörleri adı verilmektedir.



Şekil 5.20 Destek vektör makinelerinde doğrusal sınıflandırma. a) İki sınıflı veri seti için oluşturulan keyfi hiper düzlemler, b) Optimum hiper düzlem ve destek vektörleri

Lineer ayrılabilen iki sınıflı sınıflandırma işleminde, destek vektör makinelerinin eğitimi için  $k$  sayıdaki verilerden oluşan eğitim verisinin  $\{x_i, y_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  ise, Şekil 5.20'de verilen optimum hiper düzleme ait ayrıştırma koşulları aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\begin{aligned} x_k \in C_1 &\Rightarrow D(x_k) = wx_k + b \geq 1 \\ x_k \in C_2 &\Rightarrow D(x_k) = wx_k + b \leq -1 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Denklem (5.6)'daki ifadelerde,  $C_1$  ve  $C_2$  sınıf etiketlerini göstermektedir.  $w$  ağırlık vektörünü (hiper düzlem normali) ve  $b$  eğilim değerinin göstermektedir (Osuna et al., 1997). Optimum hiper düzlemin belirlenebilmesi için bu düzleme paralel ve sınırlarını oluşturacak iki hiper düzlemin belirlenmesi gerekir. İki düzlemin sınırlarını da oluşturan veriler destek vektörleri olarak isimlendirilir.

Denklem (5.6)'da verilen ifadeler Öklid uzayında aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$D(\underline{x}_k) = y_k \langle \underline{w}, \underline{x}_k \rangle \geq 1 \quad (5.7)$$

Öğrenme sürecinde her bir  $x_k$  noktasının hiperdüzlemden olan uzaklığı  $|D(x_k)|/\|w\|$  olur. Şekil 5.20'de verilen iki düzlem arası uzaklık  $\tau$  ise,

$$y_k \frac{D(\underline{x}_k)}{\|w\|} \geq \tau \quad \forall_k \quad (5.8)$$

eşitliği bulunur. Burada, hiper düzlemler için parametrikleştirme işlemleri

$$\|w\| \tau = 1 \quad (5.9)$$

ile yapılabilir. Optimum hiper düzlem sınırını maksimuma çıkarılması için  $\|w\|$  değişkeninin minimizasyonu yapılır. Bu durumda en uygun hiper düzlemin belirlenmesi aşamasında aşağıda verilen sınırlara bağlı olarak değişen optimizasyon problemin çözülmesi gerekir.  $\min \left[ \frac{1}{2} \|w\|^2 \right]$  ve denklem (5.7)'de verilen koşullara bağlı olarak çözüldüğünde elde edilen karar fonksiyonu;

$$Q(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i (\langle w, x_i \rangle - 1) \quad (5.10)$$

şeklindedir. Burada  $\alpha_i$ , Lagrange çarpanlarını gösterir.  $w$  parametreleri, Kuhn-Tucker (KT) şartları kullanılıp  $\alpha_i$  cinsinden gösterilirse,

$$\frac{\partial Q}{\partial \underline{w}} = 0 \Rightarrow \underline{w} = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \underline{x}_i \quad (5.11)$$

eşitliği elde edilir. KT şartlarına göre, aşağıdaki eşitlikteki  $\alpha_i$  değerlerinin 0'a eşit olmaması gerekir.

$$\alpha_i y_i (\langle \underline{w}, \underline{x}_i \rangle - 1) = 0 \quad (5.12)$$

Burada  $x_i$ , sınır ayırım hatlarında yer alan destek vektörleridir. Denklem (5.11) ifadesi karar fonksiyonu olan (5.10) uygulanıp,  $\alpha_i$ 'e göre maksimize edildiğinde,

$$Q(\underline{w}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle \underline{x}_i, \underline{x}_j \rangle \quad (5.13)$$

ve buna bağlı sınırlamalar ise

$$\sum_{i=1}^N y_i \alpha_i = 0 \quad \alpha_i \geq 0, i=1,2,3,\dots,N \quad (5.14)$$

şeklinde. Gradyan düşüş veya kuadratik programla tekniği kullanılarak denklem (5.13)'te optimum değerleri bulunduktan sonra, en uygun ayırma düzlemide aşağıdaki eşitlikle bulunur.

$$D(\underline{x}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \langle \underline{x}_i, \underline{x} \rangle \quad (5.15)$$

Yukarıdaki ifade, sınıflandırmanın tam lineer olarak ayrılabilceği durumlarda geçerli olup, lineer olmayan durumlarda ise  $\xi_i$  yapay değişken eklenip, çözülmesiyle sınıflandırma yapılır.

Doğrusal olmayan ayrışmanın olduğu durumlarda,

$$D(\underline{x}_i) = y_i \langle \underline{w}, \underline{x}_i \rangle \geq 1 - \xi_i \quad (5.16)$$

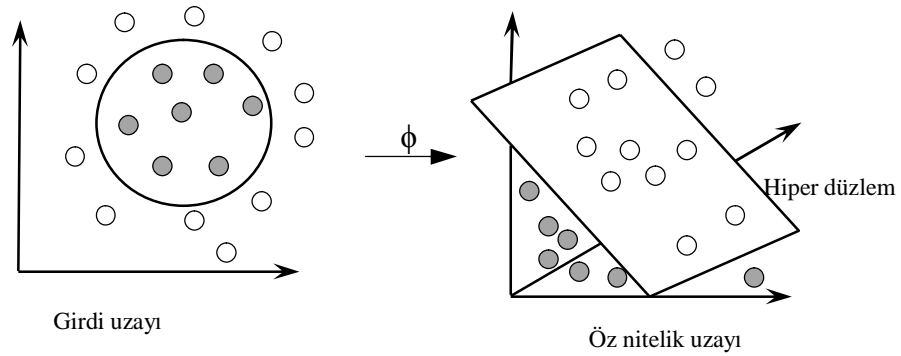
ifadesiyle bulunur. Burada  $\xi_i$  yapay değişkeni ayrışmasızlığı gösterip,  $\sum_{i=1}^N \xi_i^p$  terimi karar fonksiyonuna eklenip çözülür. Burada  $p = 1$  ve  $p = 2$  olması durumunda optimizasyon problemi kuadratik programlama tekniğiyle çözülebilir. Buna göre amaç fonksiyonu,

$$Q(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i - \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i (\langle w, x_i \rangle - 1 + \xi_i) - \sum_{i=1}^N \mu_i \xi_i \quad (5.17)$$

şeklinde olup ve buna bağlı sınırlamalar ise,

$$\sum_{i=1}^N y_i \alpha_i = 0 \quad C \geq \alpha_i \geq 0, \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (5.18)$$

gibidir. Doğrusal olarak birbirinden ayıramayan veriler, yüksek boyutlu uzayda görüntülenip, doğrusal olarak ayrımları yapılabilen ve sınıflar arasında hiperdüzlemler oluşturulabilmektedir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21 Kernel fonksiyonlarıyla, verilerin yüksek boyuta dönüştürülmesi

Destek vektör makineleri,  $z_k = \Phi(x_k)$  şeklinde ifade edilen bir kernel fonksiyonu ile lineer olmayan dönüşümler yapılabilen ve bu şekilde lineer olarak dağılmayan verilerin ayrımlarının yapılmasına imkân sağlamaktadırlar.

Yüksek boyutlu bir uzayda, optimizasyon problemi (5.19) denkleminde verildiği gibi bir amaç fonksiyonuna sahiptir.



$$Q(\underline{w}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle \langle \phi(\underline{x}_i), \phi(\underline{x}_j) \rangle \rangle \quad (5.19)$$

Burada  $\langle \langle \cdot, \cdot \rangle \rangle$ , öz nitelik uzayında iç çarpımı göstermektedir. Öz nitelik uzayı arttıkça çözüm sürecide artmaktadır. Çözüm süresini azaltmak için, lineer olmayan  $\phi$ 'nin çözülmesinde doğrusal, polinomal ve radyal tabanlı fonksiyonlar kullanılabilir. Yaygın olarak kullanılan kernel fonksiyonları Tablo 5.5'te verilmiştir. Girdi uzayında, lineer olmayan  $\phi$  verilerinin, kernel fonksiyonlarıyla  $H(\underline{x}_i, \underline{x}_j)$  aşağıdaki bağıntı gibi gösterilebilir.

$$H(\underline{x}_i, \underline{x}_j) = \langle \langle \phi(\underline{x}_i), \phi(\underline{x}_j) \rangle \rangle \quad (5.20)$$

Doğrusal olarak ayrılamayan iki sınıfın çözümü için, ayırım fonksiyonu,

$$D(\underline{x}_i) = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i H(\underline{x}_i, \underline{x}) \quad (5.21)$$

gibi olup burada, iki sınıflı veri setinin ayırımında  $x$ 'e bağlı olarak  $D(\underline{x}_i) \geq 0$ , birinci sınıf etiketini,  $D(\underline{x}_i) \leq 0$  ise ikinci sınıf etiketini gösterir.

Tablo 5.5 Destek vektör makine sınıflandırıcılarında kullanılan temel kernel fonksiyonları ve parametreleri

Kernel tipi	Kernel Fonksiyonu	Parametre
Polinom	$\phi(\underline{x}_i, \underline{x}_j) = ((\underline{x}_i \underline{x}_j) + 1)^d$	Polinom derecesi ( $d$ )
Normalleştirilmiş polinom	$\phi(\underline{x}_i, \underline{x}_j) = \frac{((\underline{x}_i \underline{x}_j) + 1)^d}{\sqrt{((\underline{x}_i \underline{x}_j) + 1)^d ((\underline{x}_j \underline{x}_j) + 1)^d}}$	Polinom derecesi ( $d$ )
Radyal tabanlı	$\phi(\underline{x}_i, \underline{x}_j) = e^{-\gamma \ \underline{x}_i - \underline{x}_j\ ^2}$	Kernel boyutu ( $\gamma$ )
Sigmoid	$\phi(\underline{x}_i, \underline{x}_j) = \tanh(s(\underline{x}_i - \underline{x}_j))$	Kernel boyutu ( $s$ )

Literatürde, kernel fonksiyonları olarak en çok polinom, radyal tabanlı fonksiyon ve normalleştirilmiş kernel fonksiyonları kullanılmaktadır (Chang and Lin, 2011) (Tablo 5.5). Burada, polinom derecesinin artışına bağlı olarak çözüm

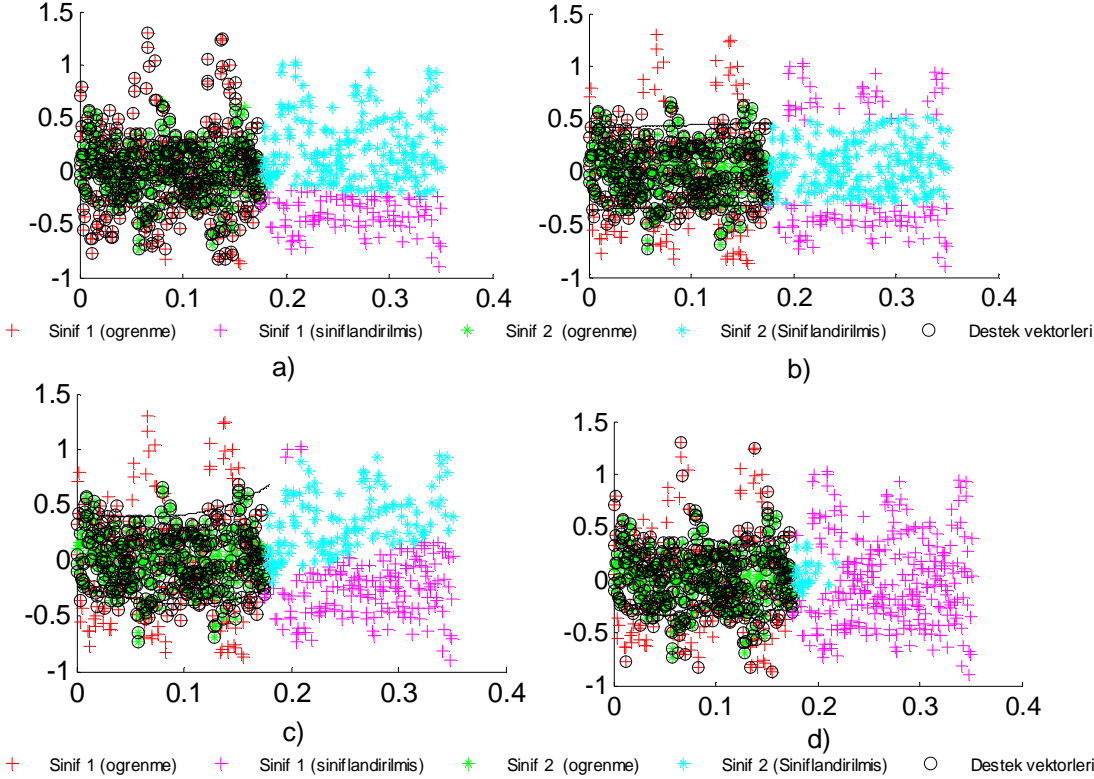
süresi de artar. Radyal temelli kernel tipinde,  $\gamma$  boyut parametresinin etkilerinin belirlenebilmesi için verilerin doğrulama sürecinde test edilmesi gerekir. Doğrusal olmayan sınıflandırma da kullanılan kernel fonksiyonlarındaki değişken parametrelerin yanında, (5.17) ifadesindeki  $C$  düzenleme parametresi de ön işlemler (doğrulama) aşamasında keyfi değerler arasında girilerek uygun olan değeri bulunur ve test aşamasında girdi olarak tanımlanır. Bu parametre olması gereken değerden büyük ve küçük seçilmesi durumunda, sınıfları ayıran hiperdüzlemler doğru belirlenemeyeceğinden sınıflandırma performansından da yeterli hassasiyet alınmayabilir. Doğrulama aşamasında deneme-yanılma ve stratejik hata yöntemleri kullanılarak bu parametrelerin optimum değerleri belirlenir. Bu amaçla ölçüm verileri iki kısma ayrılır. Birinci kısım, sınıflandırma da kullanılacak modelin oluşturulmasında, ikinci kısım ise eğitim veri seti olarak belirlenen modelin performansının belirlemeye yöneliktir.

Önceki başlıklarda geliştirilen insan-makine YSİ paradigmasından elde edilen katılımcıların sonuçları üzerinde durulmuştur. Burada, örüntü tanıma ve makine öğreniminde yaygın olarak kullanılan istatistiksel sınıflandırma tekniği olan DVM, YSİ ölçüm verileri üzerinde test edilip hasar konfigürasyonlarını sınıflandırılabilme performansı ölçülmüştür. Böylece makinenin (bilgisayar) çözüm performansı araştırılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi, çözücü olarak, destek vektör makinelerinin yanında yapay sinir ağlarında yaygın olarak kullanılan çok katmanlı perseptronlar, kümeleme algoritmaları (k-ortalamları) veya Gauss karışım modelleri vb. gibi algoritmalarda kullanılabilir.

### 5.3.1 Destek vektör makineleri sonuçları

Önceki kısımlarda belirtildiği gibi, deneysel kule yapısı için 16 farklı hasar konfigürasyonu ve her birisinden 8 tekrarlı ölçüm alınmıştır. Toplatılan ölçümler, DVM sınıflandırıcısı öğrenme prosesine tabi tutulmadan önce üç kısma bölünmüştür. Toplamda ölçülen 128 (16durum  $\times$  8test) veri setinden, 64'ü (16 durum  $\times$  4 test) öğrenme aşamasında (modelin oluşturulmasında), 32'si (16 durum  $\times$  2 test) parametrelerin belirlenmesi için doğrulanma aşamasında, geri kalan 32'i de (16 durum  $\times$  2 test) test aşamasında kullanılmıştır. Burada, her bir veri seti 4 öz nitelik vektöründen oluşmaktadır. Burada, her bir öz nitelik vektörü, bir sensör

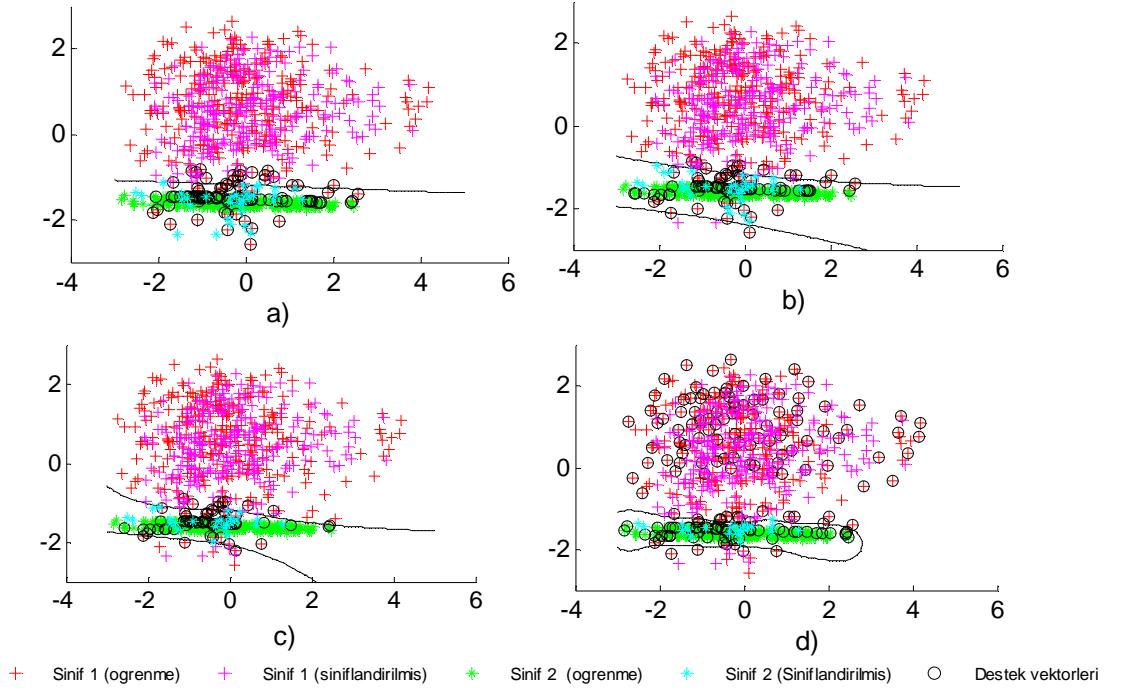
değişkenini göstermektedir. Bunun yanında, her bir öz nitelik vektörü, 300 veri noktasından oluşmaktadır.



Şekil 5.22 Ham verilerin destek vektör makineleriyle ikili sınıflandırılma örneği (Durum I ve Durum II) a- Lineer kernel [Sınıf I Skoru: % 34], b- 2. dereceden polinomial kernel [Sınıf I Skoru: % 36], c- 3. dereceden polinomial kernel [Sınıf I Skoru: % 57], d- Radyal tabanlı kernel,  $C = 1$ ,  $\gamma = 0.7$  [Sınıf I Skoru: % 91]

Başlangıçta deneysel olarak yapıya iliştilen sensörlerden elde edilen veriler ön işlemlere tabi tutulmadan direkt olarak destek vektör makinelerinde ikili sınıflar halinde değerlendirilmiştir. DVM'lerde kernel işlevleri olarak lineer, 2. dereceden polinom, 3. dereceden polinom ve radyal tabanlı fonksiyon kernelleri kullanılmıştır. Destek vektör makinelerinin sınıflandırılmasında LIBSVM kullanılmıştır (Chang and Lin, 2011). İkili sınıflandırmada, tüm hasar konfigürasyon sınıfları eğitim aşamasında öğretilmiştir. Başarı kriteri DVM'lerden elde edilen doğru sınıflandırma yüzdeliği, baz alınarak yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen ilk iki ham öz nitelik vektörünün ikili sınıflar halinde sınıflandırılışı Şekil 5.22'de verilmiştir. Burada  $x$  ekseni, birinci öz nitelik vektörünü,  $y$  ekseni ise ikinci öz nitelik vektörüne ilişkin verileri göstermektedir.

Burada önemli hususlardan birisi deneysel kule deneyinden toplamda 4 sensörün verileri toplatılmıştır. Ancak 4 âdet öz nitelik vektörünün görselleştirme işlevinin zor olmasından dolayı, ilk adımda, birinci ve ikinci sensörün öz nitelik verileri iki boyutlu grafiklerle ayrıklaştırılması amaçlanmıştır. Buna ilişkin olarak görselleştirme, aşağıdaki şekillerde verilmiştir. İkili sınıflandırmada, her aşamada ikili grup sınıfları halinde 1-2, 1-3,.....1-16'a kadar DVM'lerin eğitimleri gerçekleştirilmiş ve sınıf I etiketi test edilmiştir.



Şekil 5.23 Ham verilerin normalize, filtreleme ve ABA prosesinden sonra elde edilen verilerin, destek vektör makineleriyle ikili sınıflandırılma örneği (Durum I ve Durum II), a- Lineer kernel [Sınıf I Skoru: % 89.3], b- 2. dereceden polinomal kernel [Sınıf I Skoru: % 89.6], c- 4. dereceden polinomial kernel [Sınıf I Skoru: % 91.66], d- Radyal tabanlı kernel,  $C = 1$ ,  $\gamma = 0.7$  [Sınıf I Skoru: % 93.77]

İkili sınıflandırma ve iki ham öz nitelik verisinin kullanılması durumunda lineer, 2. dereceden polinom, 3. dereceden polinom ve radyal tabanlı kernel kullanılması durumunda elde edilen sınıflandırma skorları sırasıyla % 34, % 36, % 57 ve % 91 olarak elde edilmiştir (Şekil 5.22). Aynı veriler filtreleme, ölçeklendirme ve asal değişkenler analizi gibi süreçlerden geçirilip tekrar DVM ile ikili grup etiketleri ile sınıflandırma analizleri yapıp elde edilen sonuçlar Şekil 5.23'de verilmiştir. Öz nitelik olarak ABA verileri kullanılmıştır. Bir başka deyişle,  $x$  ve  $y$  asal eksenleri sırasıyla ABA'dan elde edilen skorları

göstermektedir. Aynı şekilde, DVM’lerde, 2. dereceden polinom, 3. dereceden polinom ve radyal tabanlı kernel kullanılması elde edilen sınıflandırma skorları sırasıyla % 89.3, % 89.6, % 91.6 ve % 93.7 olarak bulunmuştur.

Şekil 5.23’te görüldüğü üzere sensör verileri ön işlemlere (filtreleme, ölçeklendirme, çok değişkenli istatistiksel yöntemlerle boyut azalma yöntemi) tabi tutulduğunda, DVM’lerden daha kısmi’de olsa daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir. Ancak burada dikkate alınması gereken önemli hususlardan birisi, özellikle büyük boyutlu veri setlerinin, ön proseslerden geçirilmesi, işlemcinin çözüm süresinin artmasına neden olacağıdır. İkili sınıflandırma örneğinde, 4 farklı kernelin kullanılması durumunda en iyi sonuçlar radyal tipteki kernelden (% 93.77) alınmıştır. Şekillerde görüldüğü üzere, örneğin radyal bazlı kernel dikkate alındığında, öz nitelik vektörleri ön işlemlere tabi tutulup tekrar DVM ile sınıflandırıldığında performans % 91’den % 93.877’e yükselir. Ön işlemlerde yaklaşık olarak işlemci çözüm süresi 9-15 s aralığındadır. Geçen bu süreye karşılık elde edilen başarı oranı yaklaşık olarak % 3 civarlarındadır. Daha sonra yapılan analizler işlemcinin çözüm süresinin azaltmak için öz nitelik vektörleri filtreleme ve ABA proseslerinden geçirilmemiştir. Yalnız bazı durumlarda verilerin sadece ölçeklendirilmesi yapılmıştır. Nitekim ölçeklendirme işlemi işlemci çözüm sürecinde kale değer süre tutmaz. Buradaki yapılan analizlerde Intel (R) Core™ i7-2600 CPU@3.7 GHz 8 çekirdekli işlemci, 1500 frekansta çalışan 4 adet, 4 GB değerinde ve toplamda 16 GB Kingston tipte RAM, 1 GB GDDR5 ASUS EAH6850 serili ekran kartı ve toplamda 4 GB görselleştirmeye ayrılan hafıza ile 1TB kapasiteli hard disk kullanılmıştır. Ayrıca daha yüksek kapasiteli bir makinenin kullanılması durumunda çözüm sürelerinin de azalacağı aşikârdır.

16 farklı hasar konfigürasyonu, ikili gruplar halinde ve farklı kernel tipleri kullanılması durumunda elde edilen veriler Tablo 5.6’da verilmiştir. Burada DVM’de kullanılan öz nitelik vektörleri 4 ve veri sayısı da 300 olup, tüm veriler başlangıçta ölçeklendirilmişlerdir. Ölçeklendirme  $x/\sigma_x$  formülü ile yapılmıştır. Burada  $x$ , deneysel olarak elde edilen veriyi,  $\sigma_x$  ise veri setine ilişkin standart sapmayı göstermektedir. DVM’de lineer kernel kullanılması durumunda en yüksek ve en düşük sınıflandırma performansı sırasıyla sınıf 10 (% 98) ve sınıf

14'te (% 24) görülmüştür. Burada, her bir sınıf ilgili hasar durumunu göstermektedir. Örneğin, sınıf 10 etiketi, 10. hasar konfügrasyonunu belirtir. İkinci dereceden polinom kullanılması durumunda ise en yüksek 9 ve 10'da (%98) en düşük sınıflandırma performansı ise 7'de (% 50) elde edilmiştir. 4 farklı kernel tipi için (lineer, 2. dereceden polinom, 3. dereceden polinom ve radyal tabanlı fonksiyon kernelleri) elde edilen DVM ortalama sınıflandırma tahminleri sırasıyla % 50.65±23.05, % 73.02± 15.48, % 70.16±10.14 ve % 77.42±12.4'tür.

Tablo 5.6 İkili sınıflandırmada, farklı kernel tipi kullanıldığında DVM'den elde edilen sonuçlar

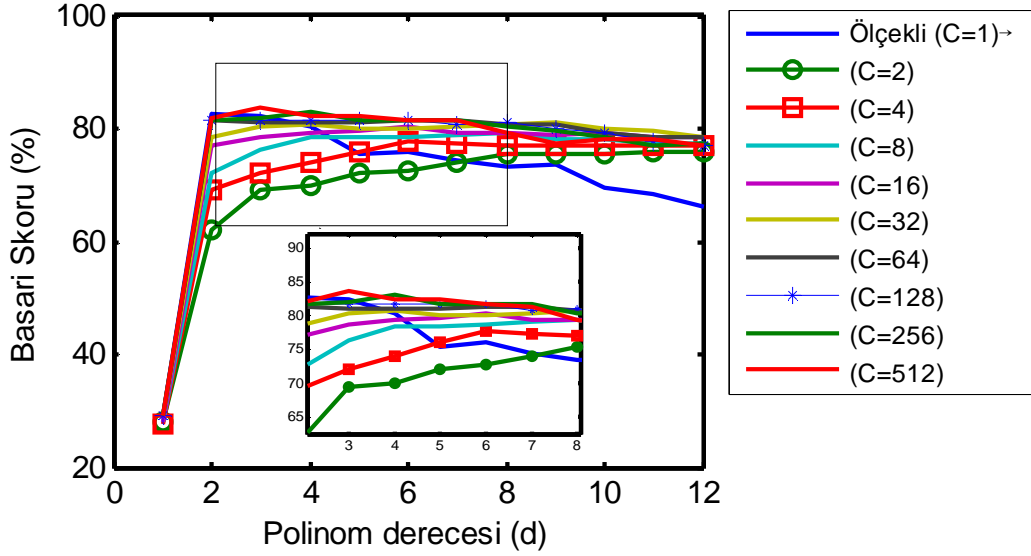
Sınıf	I. sınıf testi için elde edilen Tahminler (%)			
	Lineer	Polinom (derece=2)	Polinom (derece=3)	Radyal Tabanlı
1	46.0	65.0	80.0	91.6
2	34.6	68.33	76.3	91.3
3	58.0	62.0	66.0	71.0
4	40.0	83.0	72.0	76.2
5	43.0	69.0	71.0	74.0
6	79.0	93.0	91.0	87.0
7	56.6	50.0	57.0	63.0
8	32.0	71.0	71.0	72.0
9	91.6	98.0	85.0	96.3
10	98.0	98.0	63.3	98.0
11	68.0	92.0	74.0	86.0
12	35.6	54.0	57.0	60.0
13	50.0	56.0	58.0	60.0
14	24.0	66.0	58.0	71.0
15	26.0	75.0	75.0	76.0
16	28.1	68.0	68.0	70.0
<b>Ort.</b>	<b>50.65±23.05</b>	<b>73.02±15.48</b>	<b>70.16±10.14</b>	<b>77.72±12.48</b>

Eğitilen durumlar: ikili sınıflar halinde 1-2, 1-3, 1-4 vb., şeklinde,  
Test edilen: Durum I

Radyal tabanlı kernel için en düşük doğruluktaki sınıflandırmalar 12 (% 60) ve 13 (% 60) etiketli hasar durumlarında gözlemlenmiştir. Bu sonuç, radyal kernel için, muhtemelen durum 1, 12 ve 13'e ait öz nitelik vektörlerinin, birbirine daha çok benzediklerinden dolayı daha düşük doğrulukta sınıflandırma performansı oluşmuştur.

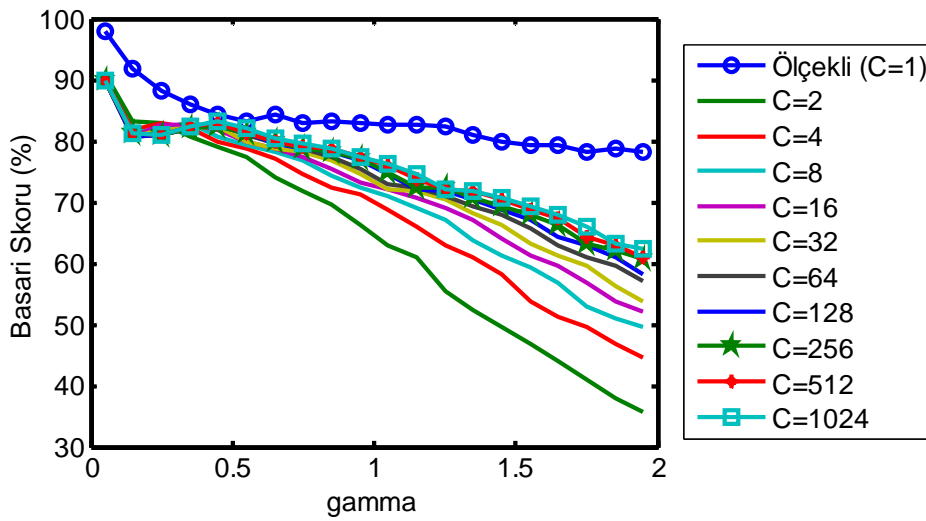
Önceki paragraflarda, DVM'de özellikle lineer dağılmayan verilerin sınıflandırılmaları için kernellerde kullanılan parametrelerin seçimi, sonuçların doğruluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmişti. Bu amaçla  $C$  düzenleme parametresinin ve  $\gamma$  kernel boyut parametresi ve polinom tipteki

kernellerde kullanılan polinom derecesinin doğrulama aşamasında bu parametrelere ilişkin optimum değerleri belirlenmesi esastır.



Şekil 5.24 İkili sınıflandırmada, kernel tipi olarak, polinom kullanıldığında, polinom derecesine bağlı DVM'den elde edilen sınıflandırma performansı (Öğretilen durumlar: 1-2, Test edilen durum: 1)

İkili sınıflandırma sürecinde en iyi başarımlar polinom derecesi olarak 2 ile 3 seçilmesi durumunda elde edilmiştir. Ancak polinom derecesi 3'ten sonra arttırıldığında Şekil 5.24'te verilen veriler ışığında, başarımın kale değer şekilde artmadığı gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak C'nin 3 seçilmesi durumunda daha iyi sınıflandırmalar yapılabilmektedir (Şekil 5.24).



Şekil 5.25 İkili sınıflandırma aşamasında, kernel tipi olarak, radyal tabanlı kullanıldığında,  $\gamma$  parametresine bağlı DVM'den elde edilen sınıflandırma performansı (Öğretilen durumlar: 1-2, Test edilen durum: 1)

Yine, önceki kısımlarda, ham verilerin ön işlemlerde, ölçeklendirilip ölçeklendirilmemesi, sınıflandırma doğrulukları üzerinde önemli bir katkı sağladığı belirtilmişti. Bu amaçla, kernel olarak radyal tabanlı fonksiyon kerneli kullanılması durumunda  $C$  ve  $\gamma$  parametresine bağlı DVM'den elde edilen başarı skor sonuçları Şekil 5.25'te verilmiştir. Burada, belirli bir  $C$  değerlerindeki artışlar sınıflandırmanın hassasiyetini artırdığı, ancak  $\gamma$  parametrelerdeki artış başarı skor trendini azaltmaktadır. Ölçekli olmayan veriler için aynı gamma değeri dikkate alındığında, daha yüksek  $C$  değerleri daha yüksek başarıya sahiptir. Ancak bu artış ancak belirli bir optimum noktaya kadar olduğu da dikkate alınması gerekir. Bunun yanında, veriler ölçeklendirildiğinde elde edilen sonuçlar, ölçeklendirilmeyen verilere nazaran daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bir başka deyişle DVM'de,  $C = 1$  seçilip ve  $\gamma$  artışının yapıldığı durumda, ölçekli öz nitelik vektörlerinden elde edilen sınıflandırma düşüş trendi, ölçeksiz öz nitelik vektörlerine nazaran daha düşük olduğu sonucu çıkartılabilir. Örneğin, destek vektör makinelerinde, lineer kernel kullanılıp veriler ölçeklendirildiğinde 1. sınıf etiketli 1. hasar senaryosu için sınıflandırma başarımları % 28 iken, ölçeklendirme işlemleri yapıldığında bu oranın % 29.3'e yükselmiştir. Aynı şekilde 2. dereceden polinom kerneli ölçeklendirilmemiş veriden sınıflandırma oranı % 62 iken, ölçeklendirme yapıldığında bu oran % 82'e yükselmiştir. Diğer kerneller için bulunan değerler Tablo 5.7'de verilmiştir.

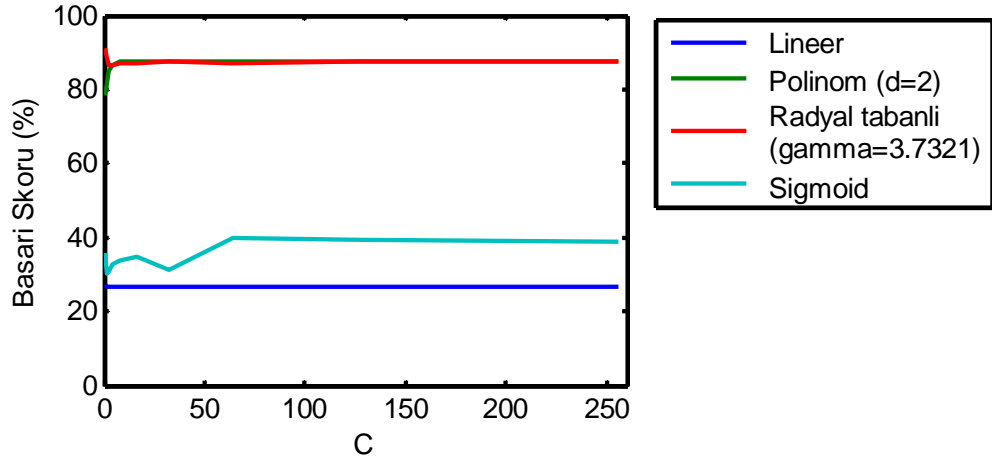
Tablo 5.7 Veriler ölçeklendirilme durumuna göre, ikili sınıflandırmada DVM'den elde edilen performanslar (Öğretilen durumlar 1-2, Test edilen: Durum I)

Kernel	Ölçeklendirilmemiş Data (C=1)	Ölçeklendirilmiş Data (C=1)
Lineer	28	29.3
Polinom (d=2)	62	82
Polinom (d=3)	69.3	82.3
Polinom (d=4)	70	80.3
Radyal Tabanlı ( $\gamma = 0.7$ )	72.33	83.66

Deneysel olarak sensör verileri, ilişkili oldukları hasar durumuna göre DVM'de ikili sınıflar şeklinde sınıflandırılma kabiliyetleri araştırıldıktan bir sonraki süreç, veriler çoklu sınıflandırma da ki başarımları incelemektir. Burada kernel tipleri olarak, lineer, 2. dereceden polinom, radyal tabanlı ve sigmoid

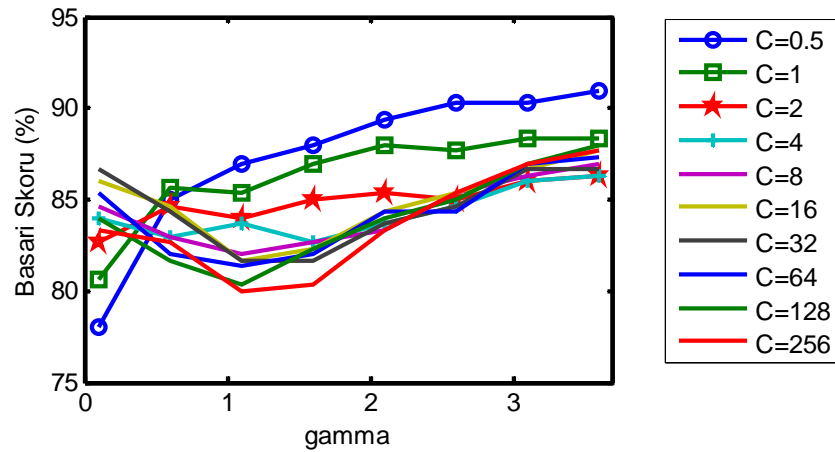


kullanılmıştır. İkili sınıflandırmada olduğu gibi burada da, öz nitelik vektörleri ilk etapta, DVM eğitim sürecinden geçirilmesi gerekir. Daha önce ikili sınıflandırmanın eğitim aşamasında 4 öz nitelik vektörü ve 600 veri noktası kullanılmıştır. Doğrulama ve test aşamasında da, 4 nitelik vektörü ve 300 veri noktası kullanılmıştır. Çoklu sınıflandırma sürecinde ise her bir hasar durumuna ilişkin 4 öz nitelik vektöründen 300 veri noktası alınmıştır. Toplam da 16 hasar durumu bulunduğundan dolayı öğrenme aşamasında  $16 \times 300 = 4800$  veri noktası kullanılmıştır. Nihai eğitim veri setine ilişkin matris boyutu da  $4800 \times 4$  olur. Daha önce belirtildiği üzere toplam olarak elde edilen ölçüm verilerinin ilk % 50'si, eğitim de, ikinci % 25'i, doğrulamada ve son % 25'i de test aşamasında kullanıldığının belirtilmesinde fayda vardır. Tüm çoklu sınıflandırmada veriler bu şekilde kategorize edilmiştir. İlk aşama, verilerin eğitim ve doğrulama aşamasında geçirilip modele ilişkin uygun parametrelerinin belirlemeye yöneliktir. Bu noktadan hareketle, tüm kerneller için en uygun parametre değerlerinin tespiti çapraz doğrulama prosesiyle yapılmıştır. Lineer, polinom, radyal tabanlı fonksiyon ve sigmoid kernellerinde kullanılan  $C$  düzenleme parametresine bağlı olarak, durum 5'e ilişkin elde edilen sınıflandırma performans düzeyleri Şekil 5.26'da verilmiştir. Daha önceki kısımlarda belirtildiği üzere, lineer sınıflandırmalardaki  $C$  değerindeki değişimler sınıflandırma skorlarını değiştirmemektedir.  $C$  parametresi daha çok lineer olmayan dağılım sınıflandırmalarında önemli derecede etki yapmaktadır. Polinom, radyal tabanlı ve sigmoid kernelleri için  $C$  için en iyi sonuçlar 1 ile 8 arasındadır. Belirli bir değerden sonra  $C$ 'deki artışlar sınıflandırma kabiliyetlerine etki etmez (Şekil5.26).



Şekil 5.26 Çoklu sınıflandırmalarda ve değişik kerneller kullanıldığı durumlarda  $C$  değişkenine bağlı olarak DVM'nin sınıflandırma performansı (Öğretilen durumlar 1-16, Test edilen durum: 5)

Destek vektör makinelerinde, radyal tabanlı fonksiyon kernel tipi için  $C$  ve  $\gamma$  parametresine bağlı elde edilen başarı skor değişimleri Şekil 5.27'de verilmiştir. Burada  $\gamma$  değerlerinin 0 ile 3.7 arasındaki değerleri dikkate alınmıştır. Burada,  $C$  ve  $\gamma$  artışına bağlı olarak sınıflandırma seviyesi de değişmektedir.



Şekil 5.27 Çoklu sınıflandırmalarda radyal tabanlı kernel kullanıldığında  $\gamma$  ve  $C$  parametrelerinin değişimine bağlı olarak DVM'nin sınıflandırma performansı (Öğretilen durumlar: 1-16, Test edilen: Durum 5)

Şekil 5.26'da  $C$ 'nin 0-5 civarlarında seçilmesi durumunda hassas sonuçlar vereceğini gösterse de, incelenecek olan sınıf değiştikçe seçilmesi gereken en uygun  $C$  değerinin değiştirilmesi gerekir. Bu durum, aynı şekilde  $\gamma$  parametresi için de söz konusudur. Örneğin durum 5 için her ne kadar en iyi  $C$  değerleri 3

civarlarında olsa bile, test aşamasında bu değeri diğer sınıf etiketli sınıflamalar için kullanmak doğru olmayabilir. Bu amaçla en uygun değerler ancak, tüm durumlar için birebir dikkate alınıp çapraz doğrulamalar işlemleriyle belirlenmesi gerekir. Çapraz doğrulamalar sonucunda test veri seti için en yüksek doğruluğu verecek düzenleme parametresi ( $C$ ), polinom (derece = 2, 3 ve 4) kerneli için 7.4643, radyal tabanlı fonksiyon kerneli için 1.8661, sigmoid için 0.46652 olarak seçilmesi durumunda en yüksek doğruluk seviyesinde sınıflandırmalar alınacağı görülmüştür. Aynı şekilde radyal tabanlı fonksiyon kernelinde  $\gamma$ 'nın seçilmesi gereken optimal değeri 3.7321 olarak görülmüştür (Tablo 5.8).

Tablo 5.8 Çoklu sınıflandırmanın çapraz doğrulama aşamasında DVM kernel parametreleri için bulunan en iyi değerler

Kernel	$C$	$\gamma$
Polinom (d=2,3 ve 4)	7.4643	-
Radyal Tabanlı	1.8661	3.7321
Sigmoid	0.46652	-

Tespit edilen düzenleme parametre değerleriyle kernel parametreleri kullanılarak DVM'nin eğitim ve doğrulama sürecinden sonraki aşama, DVM'nin sınıflandırma performansını test veri setleri üzerinde değerlendirmektir. Destek vektör makinelerinde 4 farklı kernele ilişkin sınıflandırma doğruluk analizleri, hata matrisleri üzerinde yapılmıştır (Tablo 5.9-12). Daha sonra farklı kernellerden bulunan sonuçlar arasında anlamlı farklılıkların tespiti ANOVA ile değerlendirilmiştir.

Çoklu sınıflandırma sürecinde destek vektör makinelerinde lineer kernel kullanılarak elde edilen sınıflandırma oranları Tablo 5.9'da verilmiştir. Burada, test aşamasında 300 veri noktası kullanılmıştır. En yüksek sınıflandırmalar durum 1 ve 7'de (70 veri), en düşük sınıflandırma oranı ise durum 12'de görülmüştür. Tüm hasar senaryoları için DVM'de lineer kernel kullanılması durumunda tahmin edilen genel ortalama başarı oranı % 12.25 ve ortalama işlemcinin çözüm süresi 5.8973 s olarak görülmüştür (Tablo 5.9).

Tablo 5.9 Çoklu sınıflandırmada DVM’de lineer tabanlı kernel kullanıldığında elde edilen sınıflandırma sonuçları (Öznitelik vektörü = 4, Veri Sayısı = 300,  $C = 0.46652$ )

HD	Sınıflandırıldığı hasar senaryosu															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	70	12	7	10	78	32	6	2	30	31	3	2	6	1	4	6
2	0	35	12	0	0	11	40	102	0	0	11	2	46	17	7	17
3	0	14	4	0	0	33	102	12	14	73	17	0	16	5	4	6
4	0	30	15	9	0	40	41	51	2	27	28	0	35	2	9	11
5	96	8	5	6	63	31	4	11	21	43	3	0	6	0	2	1
6	0	13	23	1	0	27	63	52	0	23	40	0	31	3	10	14
7	0	17	39	0	0	22	70	53	1	5	51	0	27	5	6	4
8	0	28	22	0	0	27	99	66	0	0	14	0	22	8	2	12
9	2	25	10	8	3	31	21	17	39	109	10	0	10	3	6	6
10	3	25	11	16	3	50	38	15	36	56	14	0	16	0	10	7
11	0	16	11	4	0	47	60	23	17	56	21	2	17	2	11	13
12	0	28	23	0	0	18	35	70	0	3	14	0	47	8	18	36
13	0	53	2	0	0	19	38	65	0	0	1	1	53	18	15	35
14	0	32	0	0	0	9	35	68	0	0	0	0	62	17	22	55
15	0	33	8	0	0	26	34	52	0	0	1	0	74	18	16	38
16	0	32	3	0	0	22	36	70	0	0	0	0	61	16	18	42

HD: Hasar durumu, Öğretilen hasar durumları: 1-16, İşlemci çözüm süresi (s): 5.89735 s  
Genel Başarı Skoru:% 12.25

2. dereceden polinom kernelinin 16 farklı hasar durumları için elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 5.10’da verilmiştir. Sonuç dağılımları incelendiğinde, polinom tipteki kernelden elde edilen sonuçlar tüm hasar durumları için, lineer tipteki kernellere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 5.10 Çoklu sınıflandırmada DVM’de 2. dereceden polinom kerneli kullanıldığında elde edilen sınıflandırma sonuçları (Öznitelik vektörü = 4, Veri Sayısı = 300,  $C = 1.8661$ )

HD	Sınıflandırıldığı hasar senaryosu															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	95	0	0	3	148	2	0	0	22	29	0	1	0	0	0	0
2	0	21	2	1	0	0	2	9	0	0	0	4	8	250	0	3
3	0	4	170	5	0	7	7	11	0	1	21	4	2	65	0	3
4	0	19	31	75	0	12	9	5	0	27	12	8	16	75	6	5
5	67	0	2	7	180	0	0	0	17	24	1	1	0	0	0	1
6	0	10	36	12	0	35	16	28	0	1	3	6	6	145	1	1
7	0	9	19	8	0	24	22	31	0	0	0	1	2	174	6	4
8	0	4	3	2	0	2	8	14	0	0	0	1	0	262	0	4
9	0	2	17	23	6	3	0	2	89	107	20	9	2	17	3	0
10	3	2	15	27	24	4	1	0	40	134	16	16	2	14	1	1
11	0	12	66	17	0	13	9	6	5	19	57	13	4	72	6	1
12	0	18	9	8	0	3	11	15	0	0	0	21	7	198	5	5
13	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	8	282	2	4
14	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	295	0	1
15	0	3	2	0	0	6	1	1	0	0	0	2	6	274	4	1
16	0	3	2	0	0	1	3	1	0	0	0	0	4	279	0	7

HD: Hasar durumu, Öğretilen hasar durumları: 1-16, İşlemci çözüm süresi (s): 5.9125  
Genel Başarı Skoru:% 25.6

DVM’de 2. dereceden polinom kernelleri kullanılıp sınıflandırma sonuçları esas olarak değerlendirildiğinde, en düşük doğruluk 15. hasar durumu için (4 veri noktası), en yüksek doğruluk ise 14. hasar durumunda (295 veri noktası) görülmüştür. Genel olarak ortalama başarı skoru % 25.6 ve ortalama işlemci çözüm süresi 5.9125 s olarak elde edilmiştir (Tablo 5.10).

Aynı şekilde, çoklu sınıflandırmada destek vektör makinelerinde radyal tabanlı kernel için 16 hasar senaryosu için elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 5.11’de verilmiştir. Burada, doğrulama aşamasında Tablo 5.8’de verildiği üzere optimal olarak bulunan değerleri girdi verisi olarak tanımlanmıştır. Radyal tabanlı fonksiyon kernelinde  $C = 1.8661$  ve  $\gamma = 3.7321$  optimal değerleri için elde edilen ortalama başarı oranları % 60.67 ve 6.043914 s’lik ortalama çözüm süresinde gerçekleştirilmiştir. En yüksek doğru sınıflandırma skoru durum 1’de (282 veri), en düşük ise durum 16’da gözlemlenmiştir. DVM’de radyal tabanlı fonksiyon kerneli için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yapıdaki hasar komplikasyonu arttıkça sınıflandırmanın azaldığı tespit edilmiştir (Tablo 5.11).

Tablo 5.11 Çoklu sınıflandırmada DVM’de radyal tabanlı kernel kullanıldığında elde edilen sınıflandırma sonuçları (Öznitelik vektörü = 4, Veri Sayısı = 300,  $C = 1.8661$ ,  $\gamma = 3.7321$ )

HD	Sınıflandırıldığı hasar senaryosu															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	282	0	0	1	4	0	0	0	5	3	4	0	0	0	0	0
2	0	220	3	6	0	7	7	12	0	0	0	5	11	9	10	11
3	0	1	218	14	0	4	6	11	1	1	6	11	2	8	7	9
4	0	5	10	192	1	15	22	7	8	4	5	5	2	5	9	10
5	43	0	4	4	201	0	0	12	5	22	7	1	0	0	0	0
6	0	14	6	14	0	196	15	12	3	1	6	7	6	2	5	12
7	0	8	9	14	0	21	168	32	0	0	10	7	3	9	11	8
8	0	5	3	1	0	10	35	181	0	0	3	4	12	12	12	21
9	12	1	12	18	21	7	1	0	171	23	18	11	0	3	0	1
10	2	3	2	6	11	1	4	0	68	178	16	2	4	1	1	0
11	0	4	5	12	0	10	9	8	1	32	184	6	12	8	5	4
12	0	12	11	25	0	4	2	9	3	3	6	180	15	6	13	12
13	0	8	0	3	0	8	18	16	0	0	0	28	165	24	10	21
14	0	10	1	1	0	6	11	37	0	0	0	8	32	152	26	16
15	0	25	3	11	0	18	25	15	1	0	0	10	14	27	122	29
16	0	17	3	0	0	15	25	15	0	0	0	23	2	71	26	102

HD: Hasar durumu, Öğretilen hasar durumları: 1-16, İşlemci çözüm süresi (s): 6.043914 s  
Genel Başarı Skoru:% 60.67

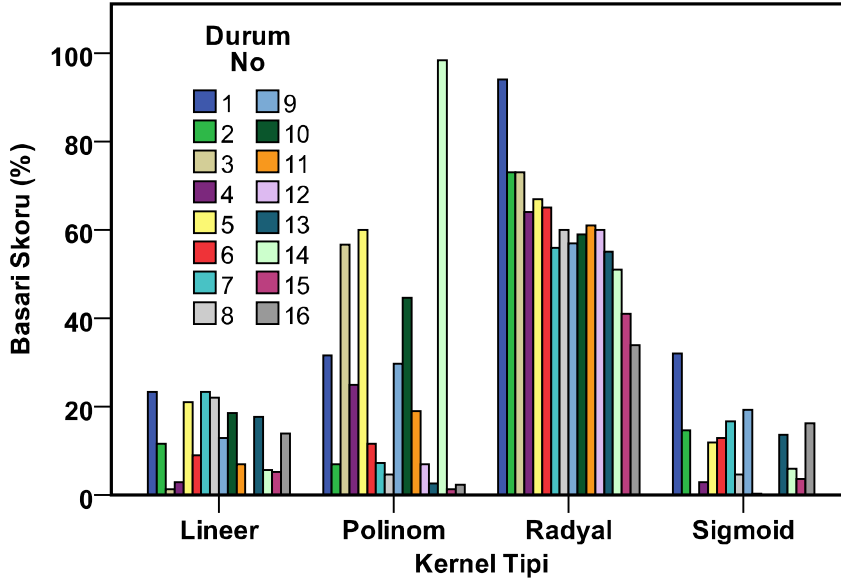
Tablo 5.12 Çoklu sınıflandırmada DVM’de sigmoid kerneli kullanıldığında elde edilen sınıflandırma sonuçları (Öznitelik vektörü = 4, Veri Sayısı = 300,  $C = 0.46652$ )

HD	Sınıflandırıldığı hasar senaryosu															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	96	8	0	2	34	29	15	0	52	52	0	0	6	0	4	2
2	89	44	0	1	0	10	31	28	0	0	0	0	46	15	7	29
3	103	15	0	4	0	35	31	3	77	0	0	0	16	6	3	7
4	118	33	0	9	7	37	27	9	11	0	0	0	28	2	6	13
5	119	5	0	6	36	26	13	0	37	53	0	0	4	0	1	0
6	133	12	0	1	0	39	50	7	1	0	0	0	26	4	9	18
7	142	28	0	0	1	29	50	6	2	0	0	0	23	9	5	5
8	82	23	0	0	0	27	100	14	0	0	0	0	22	11	3	18
9	149	22	0	7	15	21	8	1	58	1	0	0	7	2	4	5
10	103	31	0	12	13	47	14	1	55	1	0	0	9	1	7	6
11	109	22	0	5	2	38	30	3	52	0	0	0	11	4	9	15
12	92	30	0	0	1	27	25	19	1	0	0	0	41	12	13	39
13	48	51	0	0	0	18	36	20	0	0	0	0	41	31	12	43
14	22	38	0	0	0	9	35	36	0	0	0	0	58	18	18	66
15	36	36	0	0	0	25	32	19	0	0	0	0	67	28	11	46
16	39	31	0	0	0	22	34	27	0	0	0	0	61	20	17	49

HD: Hasar durumu, Öğretilen hasar durumları: 1-16, İşlemci çözüm süresi (s): 6.3264 s  
Genel Başarı Skoru:% 9.8

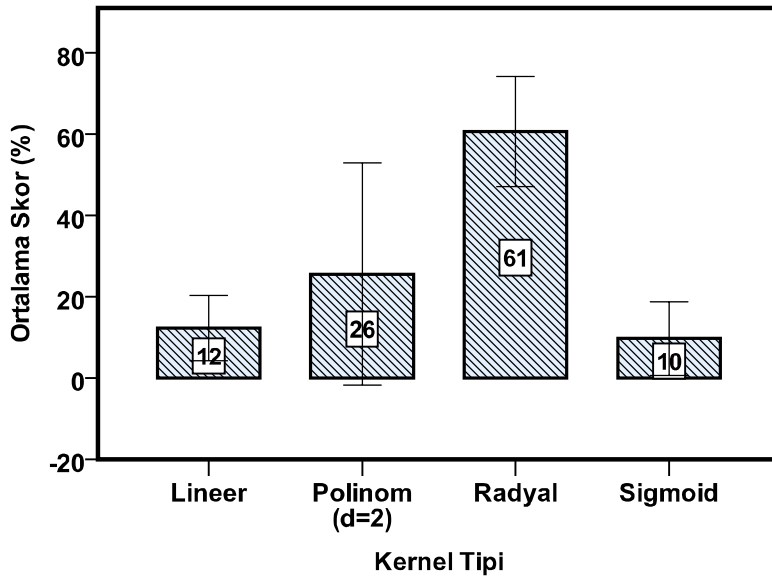
Son olarak, sigmoid tipteki kernelin doğru hasarı belirleme başarısı test edilmiştir. Bu kernelin kullanılması durumunda, başarı skoru % 9.8’lik bir oranla doğru hasar tespiti yapılmıştır. Hasarın sınıflandırılması için geçen süre de 6.3264 s olarak görülmüştür. Burada elde edilen ilginç noktalardan birisi, çözüm sürecinde diğer tipteki kernellere nazaran işlemcinin çözüm süresi daha uzun olduğu halde, daha düşük sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Maksimum doğru sınıflandırma başarısı, diğerlerinde olduğu gibi burada da, yapının sağlıklı durumunu gösteren 1. senaryoda (96 veri), minimum sınıflandırma performansı ise durum 3,11 ve 12’de görülmüştür (Tablo 5.12).

Dört farklı kernel tipi, 16 hasar senaryosunda elde edilen ve Tablo 5.9-12’de verilen tüm doğru sınıflandırma verilerinin yüzdeleri Şekil 5.28’de verilmiştir. Üstteki kısımlarda belirtildiği gibi, çubuk verileriyle gösterilen farklı kernellerin (lineer, polinom ve sigmoid kernelleri) sonuçlarına dayanarak için yapının değişik hasar konfigürasyonları arasındaki bariz farklılıklar görülmemiştir. Ancak, destek vektör makinelerinde radyal tabanlı kernelin kullanılması durumunda, yapıdaki hasar kombinasyonları arttıkça, sınıflandırma performansının yaklaşık olarak lineer bir şekilde düştüğü dikkati çekmektedir.



Şekil 5.28 Çoklu karşılaştırmadaki tüm hasar senaryoları ve farklı kernel tiplerinin uygulanması sonucu elde edilen başarı skorları

Bu sonuca dayanarak, yapıda birden fazla hasarın oluşması durumunda sensör verilerinden elde edilen sinyallerin doğrusallıkları artış gösterir. Bu sonuç, sınıflandırmanın başarısı, belli bir hasar kombinasyonundan sonra belirlemenin daha da zorlaştıracağını göstermektedir. Çünkü kulenin alt bölgelerindeki bir hasar, üstteki elemanları da etkilemekte, dolayısıyla tüm sensörlere ilişkin sinyal şekillerinin değişmesine neden olur.



Şekil 5.29 Çoklu karşılaştırma aşamasında, farklı kernel tiplerinin uygulanması sonucunda elde edilen ortalama başarı skorları (Hata çubukları: Standart sapma)

Birden çok hasar kombinasyonunun olması durumunda (hem altta hem de üstte) ise bunların hasar etkileri sinyallerdeki doğrusalsızlığı daha da artırmakta

belki de üst üste bindirerek daha da kaos hale getirerek aralarındaki farklılıkları tespit edip belirlemek zorlaşacaktır. 4 farklı kernel içerisinde en yüksek sınıflama başarımları radyal tabanlı kernelden alınmıştır (Şekil 5.28-5.29).

Destek vektör makinelerinde hasar sınıflandırma aşamasında uygulanan her 4 kernel tipi için en efektif olanını belirlemek için DVM algoritmasından kullanılan 4 kernel için elde edilen sonuçlara dayanarak her dördü, kendi aralarında ANOVA istatistiksel tekniğiyle değerlendirilmiştir. Lineer, polinom, radyal ve sigmoid kerneli için elde edilen doğru sınıflandırma başarımları sırasıyla %  $12.25 \pm 8.06$ , %  $25.56 \pm 27.34$ , %  $60.63 \pm 13.53$  ve %  $27.04 \pm 25.99$  şeklinde bulunmuştur (Şekil 5.28 ve Tablo 5.13).

Tablo 5.13 DVM’de farklı kernel tipleri için bulunan istatistiksel sonuçlar

Kernel	N	Ort.	Std. Sapma	Std. Hata	95% Güvenirlilik Aralığı		P
					Alt Sınır	Üst Sınır	
1	16	12.25	8.066	2.016	7.95	16.55	
2	16	25.56	27.342	6.835	10.99	40.13	
3	16	60.63	13.535	3.384	53.41	67.84	p<0.01
4	16	9.71	9.054	2.263	4.88	14.53	
Total	64	27.04	25.990	3.249	20.54	33.53	

\* 0.05 düzeyinde anlamlı

4 farklı kernel içerisinde güçlü ve etkili olanı belirlemek için, Tukey testiyle yapılan karşılaştırmada kernel tipleri arasında anlamlı farklılıklar saptanmıştır (Tablo 5.13)( $p < 0.01$ ). Tablo 5.14’te verilen 1, 2, 3 ve 4 şeklinde verilen numaralar, sırasıyla lineer, 2. dereceden polinomu, radyal tabanlı fonksiyon ve sigmoid kernelini göstermektedir. Burada I’den elde edilen sonuçlar, anlamlı olarak III’ten düşük ( $p < 0.01$ ) olduğu görülmüştür. Ancak I’den elde edilen sonuçlar ile II ( $p > 0.05$ ) veya IV’ten alınan sonuçlar ( $p > 0.05$ ) arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmemiştir.



Tablo 5.14 DVM’de farklı kernel tiplerinin uygulanması sonucu elde edilen doğru sınıflandırma skorlarınınin çoklu Tukey testi ile karşılaştırılması

(I) Kernel	(J) Kernel	Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p*	95% Güvenirlilik Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
1	2	-13.313	5.803	.111	-28.65	2.02
	3	-48.375*	5.803	.000	-63.71	-33.04
	4	2.542	5.803	.972	-12.79	17.88
2	1	13.313	5.803	.111	-2.02	28.65
	3	-35.062*	5.803	.000	-50.40	-19.73
	4	15.854*	5.803	.040	.52	31.19
3	1	48.375*	5.803	.000	33.04	63.71
	2	35.062*	5.803	.000	19.73	50.40
	4	50.917*	5.803	.000	35.58	66.25
4	1	-2.542	5.803	.972	-17.88	12.79
	2	-15.854*	5.803	.040	-31.19	-.52
	3	-50.917*	5.803	.000	-66.25	-35.58

\* 0.05 düzeyinde anlamlı

II’den elde edilen ortalama sonuçlar anlamlı olarak III’ten düşük ( $p < 0.01$ ) ve IV’ten ( $p < 0.05$ ) yüksek olduğu ancak bu durum I için ( $p > 0.05$ ) söz konusu olmadığı görülmüştür. III numaralı kernelden elde edilen sonuçlar anlamlı olarak I, II ve IV ( $p < 0.01$ ) no lu kernellere göre anlamlı olarak yüksek olduğu saptanmıştır. Son olarak IV numaralı kernel için elde edilen doğru sınıflandırma yüzdeleri anlamlı olarak II ( $p < 0.05$ ) ve III numaralı kernelden ( $p < 0.01$ ) düşük, ancak aynı durum I için söz konusu olmadığı bir başka deyişle anlamlı farklılıklar tespit edilmemiştir (Tablo 5.14).

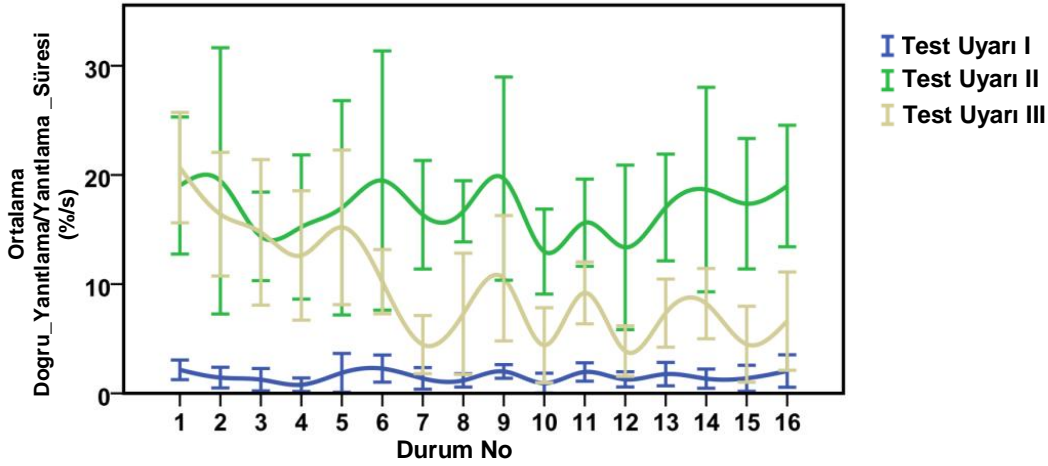
#### 5.4 Tartışma ve Genel Değerlendirmeler

Bu araştırmada, YSİ uygulamalarında kullanılmak üzere, basit ve invazif olmayan kooperatif insan-makine paradigmasına ilişkin temel konseptler belirtilmiştir. Sinir bilimcileri, duyu ikame kurumlarının haptik teknolojilere entegre etmeleriyle, kaybedilen duyuların yerini alabilecek yeni bir duyuyu insanlara kazandırıp, bu şekilde kaybedilen duyuyu onarabilmişlerdir. Bu çalışmada, sinir bilim çalışmalarından esinlenerek, yapının sağlık durumunu belirten yeni bir duyunun insanlara kazandırılabilme olasılığı üzerinde durulmuştur. Burada, tekniğin geliştirilmesi aşamasında, hem makinenin sayısal çözüm gücünden hem de insanın bilişsel kabiliyetlerinden istifade edilmiştir. Çalışmanın amacı, geliştirilen basit ve invazif olmayan tekniğin bir mühendislik yapısı üzerinde uygulayarak bunun hassasiyetini değerlendirmektir.

Başlangıçta, cıvatalı kafes elemanlarından inşa edilen kule yapısı test ekipmanı olarak seçilmiştir. Burada, değişik bölgelerdeki cıvata/cıvataların gevşetilmesiyle kulede hasarlar simüle edilmiştir. Daha sonra, 4 ivmeölçerler kanalından elde edilen veriler sinyal işleme algoritmalarından geçirilip, elde edilen nihai veriler üzerinde asal bileşenler analizleri uygulanmıştır. Her ne kadar hasar tanılama, yaygın olarak kullanılan istatistiksel modellerdeki özellik indikatörlerindeki yapılan gelişmelere rağmen, bu indikatörleri kullanarak, hasarın olduğu sensörü belirlemede yetersizlikler görülmektedir. Bir başka şekilde, bu tekniklerle hasardan etkilenen sensörü belirlemek zordur. Bu durumda, yani hasardan etkilenen sensörü bulmak için, başlangıçta, tüm yapıdaki sensör verileri ön işlemlerden geçirilip, sonra, ABA prosesine tabi tutulur ve en sonunda elde edilen veriler (özellikler) yapay sinir ağları (YSA) teknikleriyle, yapıya ilişkin hasar öğretilip, hasar tanılanır (Figueiredo et al., 2011). Bu araştırmada, YSA yerine, vibro minyatür motorlar sayesinde insan sinir ağları kullanılmıştır. Bu amaçla, hasar teşhis aşamasında, üç farklı uyarı tipi geliştirilip her biri, bağımsız olarak 10 katılımcı üzerinde test edilmiştir. Birinci uyarı, sensörlerden elde edilen tüm ham sinyal verileri haptik kodlarla kodlanıp, insanlara uyarılarak, insanların sinyal farklılıklarını ayırt etmedeki kabiliyetleri araştırılmıştır. Birinci uyarı tipinde, katılımcılar çok düşük bir değerle (Skor < %19) hasarı tespit edebildikleri görülmüştür. 16 farklı hasar durumları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığından, katılımcıların da bu farklı hasar durumlarının tespitinde harcayacakların eforun değişmediği sonucu çıkartılabilir. Bunun yanında, insanların direk olarak sensörlerden elde edilen verilerle hasarı belirlemek için, yüksek kabiliyetlerinin olmadığı sonucuna varılabilir. Test II uyarı tipi, geliştirilen konseptten yararlanılarak dizayn edilmiştir. Bir başka şekilde geliştirilen paradigmanın verimliliğinin testinde kullanılmıştır. En çok kayda değer sonuçlar, bu uyarı tipinde belirlenmiştir. İkinci tip uyarı tipinde, katılımcılar, yüksek bir başarı skoruyla hasarı tanıyabilmişlerdir (Skor < %88). Geliştirilen paradigmanın, değişik varyasyonlardaki hasar tanılanmasında etkili olduğu söylenebilir.

Test II'de elde edilen sonuçlar, her ne kadar birim zamandaki doğru yanıtlama yüzdeliği, durum I'de düşük gibi görünürken, bazı diğer durumlardan yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 5.30). İnsan-makine arayüz konsepti test II'de

olduğu gibi test III uyarı tipinde de kullanılmıştır. Buradaki tek fark test III'te, uyarılar hepsi aynı anda katılımcılar üzerinde gösterilmiştir. Test III'te katılımcılar, ortalama % 69 başarıyla hasarı belirleyebilmişlerdir. Burada en yüksek ve en düşük *DoğruYanıtma/YanıtlamaSüresi* değerleri sırasıyla, katılımcı 2 ( $12.98 \pm 5.55$  %/s) ve 5'de ( $7.61 \pm 5.94$  %/s) görülmüştür. *DoğruYanıtma/YanıtlamaSüresi* kriteri farklı hasar kombinasyonları açısından değerlendirdiğinde en yüksek ve en düşük sırasıyla, durum I ( $19.81 \pm 5.33$  %/s) ve durum II'de ( $17.93 \pm 9.14$  %/s) görülmüştür. III. tip uyarının katılımcılar üzerinde uygulanması sonucu elde edilen veriler incelendiğinde, yapıdaki hasar komplike oldukça, katılımcıların bu hasarı belirme aşamasında muhtemel olarak zorlandıkları kanaatine varılmıştır. Bulunan bu sonuç, Cipriani et al., yaptığı psikofizik çalışmasıyla uyum içinde olduğu söylenebilir (Cipriani C et al., 2012). Ancak bu trend, 5, 9, 11 ve 14 hasar konfigürasyonu için ters yönde olduğu söylenebilir. Katılımcıların her bir uyardaki yanıtları, birim zamandaki doğru cevaplama, oran kriteriyle karşılaştırıldığında yüksekten aşağıya doğru sırasıyla Test uyarısı II, I ve III şeklinde bulunmuştur.



Şekil 5.30 Tüm hasar durumları ve uyarı tiplerinde katılımcılardan elde edilen doğruluk yüzdelerinin, yanıtlama sürelerine oranları

Bu çalışmada yer alan kısıtlamaların bir kısmı şu şekildedir. Bu çalışmada, kule sinüzoidal yüklemelere maruz bırakılıp tam kontrollü laboratuvar ortamında test edilerek elde edilen veriler insan-makine YSİ konseptinden de kullanılmıştır. Ancak, gerçek dünyadaki mühendislik yapıları, hem operasyonel hemde çevre değişkenlere maruzdurlar. Bunun yanında, bazı durumlarda, operasyonel ve çevresel varyasyonlar, hasarı belirleyen özellik indikatörlerinin hassasiyetini

maskeleyip, hasar tanılması zorlanabilir. Her ne kadar paradigma sonucunda, kale değer veriler alınsa dahi, tekniğin pratik uygulamalarda kullanılmadan önce, operasyonel ve çevresel koşullarda çalışan mühendislik yapıları üzerinde doğrulanması gerekir.

Önceki kısımlarda belirtildiği gibi bu çalışmada üç farklı vibrotaktil uyarısı kullanılmıştır. Ancak, insanlara nasıl ve ne kadar bir uyarı uygulanması gerektiği hala (literatürdeki psikofizik çalışmaları baz alınarak) açık bir sorudur ve öle görünüyor ki pratik olarak bu kriterler göz önüne alınıp katılımcılar üzerinde test edilmeden belirlenemeyecektir. Bunun yanında, bazı durumlarda geliştirilen ve uzun süre gerektiren binlerce uyarı tipinin teker teker insanlar üzerinde denemek elverişli bir yol olmadığı da bilinmesi gerekir. Bu gibi durumlarda, belki de literatürde yapılan psikofizik çalışmalara dayanarak, uygun olan uyarı tiplerinin uygulanması elverişli olabilir. Ancak bu çalışmadaki edilen tecrübelerle dayanarak, ilerleyen çalışmalardaki haptik uyarılarla hasar tanılması daha iyi yapılabilmesi için temel üç bilginin dikkate alınmasında fayda vardır. Bunlar, *i*) YSİ ölçüm verilerinin vibrotaktille kodlama tipi, *ii*) vibrotaktil örüntü dağılım haritası (Aktifleştiriciler nereye yerleştirilecek, insan vücudunun hangi kısımları uyarılması gerekmektedir) ve *iii*) vibrotaktil frekansı ve genliğidir.

Çalışmada, geliştirilen insan-makine YSİ paradigması katılımcılar üzerinde test edilip, katılımcıların sonuçları araştırıldıktan sonra, örüntü tanıma ve makine öğreniminde yaygın olarak kullanılan istatistiksel sınıflandırma tekniği olan DVM, YSİ ölçüm verileri üzerinde test edilip hasar konfigürasyonlarını sınıflandırılabilme performansı araştırılmıştır. Bilindiği üzere, son zamanlarda YSİ uygulamalarında, makine öğrenimi ve örüntü tanıma gibi algoritmalar önem arz edip hasar belirleme işlemlerinde kullanımları günden güne artmaktadır. Burada, sensör sinyallerini oluşturan öz nitelik vektörlerinin hassasiyet aralıklarının kalitesi ile birlikte kullanılacak sınıflandırma yönteminin gücü ve bunların parametreleri, sonuçlar üzerindeki etkileri büyük etkiye sahiptir. Hâlihazırda, literatürde makine öğrenimi ve örüntü tanıma çalışmaları için birçok yöntem bulunup, yeni teknik arayışlarda devam etmektedir. Sınıflandırma çalışmalarında yaygın olarak, çok katmanlı perseptronlar, kümeleme algoritmaları (k-ortalamları), gauss karışım modelleri, karar ağaçları ve bulanık mantık gibi

algoritmalar kullanılmaktadır. Bunların yanında, destek vektör makineleri de (DVM) özellikle çok sınıflı problemlerde, başarılı bir sınıflandırıcı olarak yaygın olarak kullanılan makine öğrenimi algoritmalarındandır. Destek vektör makinelerinde, önemli hususlardan birisi, DVM'nin kullanımlarında kritik öneme sahip kernel fonksiyonlarının sınıflandırma sonuçlarına olan performansları, doğrulama aşamasında belirlenmesi gerekir. Burada, DVM'de 4 farklı kernel tipi kullanılması durumunda elde edilen sonuçları ayrıntılı olarak analizleri yapılmıştır. Kullanılan kernel fonksiyonları değerlendirildiğinde, DVM ile en yüksek doğruluğu radyal tabanlı fonksiyon kernelinin kullanılması sonucunda üretildiği tespit edilmiştir. En düşük sınıflandırma sonuçları lineer ve sigmoid kernellerinden elde edilmiştir. Polinom kernellerinde kullanılan derecenin artırılmasında, bir noktadan sonra DVM'den elde edilen başarımların değişmediği hatta az miktarda azaldığı görülmüştür. Bu durum, DVM modelinin aşırı kompleks ve doğrusalsızlığın fazla olduğundan dolayı oluştuğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak, literatürde kullanılan diğer makine öğrenimi ve istatistiksel örüntü tanıma tabanlı YSİ tekniklerine alternatif olarak, bu çalışmada kooperatif-insan makine ara yüz paradigmasının temel konseptleri tanımlanmış ve hasar senaryoları içeren yapısal bir kule üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, geliştirilen tekniğin YSİ uygulamalarında kullanılabileceği yönündedir. Yalnız dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri, tekniğin verimliliğinin daha iyi doğrulanması için, ilerleyen çalışmalarda yüksek boyutta sensör ağlarıyla donatılmış fiziksel dünyadaki gerçek yapılar üzerinde odaklanması gerekir.

## 6. TABAKALI KOMPOZİT BİR KİRİŞTE HASAR TESPİTİ VE PİEZOELEKTRİK AKTÜATÖRLERLE BAKIMININ YAPILMASI

Kompozit malzemelerin yaygın kullanılan bir çeşidi olan polimerik kompozitler günümüzde, mühendislik uygulamalarında ve diğer teknolojik yapılarda başarıyla kullanılmaktadır. Örneğin, uçak ve otomobil gövdeleri, tekne vb. uygulamalarında yüksek dayanım ve rijitlik gerektirecek durumlarda yapısal eleman olarak kullanılan fiber takviyeli polimerik kompozitler darbe, sıcaklık gibi çeşitli yüklerine maruz kalabilmektedirler. Bu yüklerin tesiriyle tabakalar arasında normal ve kayma gerilmeleri kompozit malzemenin bileşeni olan matris yapısının kırılmasına ve bazı durumlarda, zamanla çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Hâlihazırda, mühendislik uygulamalarında sözü edilen olumsuzları tespit etmek ve engelleyici önlemler almak için çeşitli deneysel ve nümerik yöntemler ile birlikte model veya veri tabanlı hasar tespit algoritmaları kullanılmaktadır. Buna ek olarak yapıda oluşabilecek hasar bölgesini saptamak ve yapının sağlıklı ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için etkili bir YSİ ve bakım kontrol sistemlerine gereksinim duyulmaktadır.

Bu çalışmada, çatlak içeren ve düzlem dışı kuvvete maruz tabakalı kompozit bir kirişte, çatlağın bulunduğu bölgenin tespit edilmesi ve piezoelektrik aktüatörlerin elektromekanik özelliğinden yararlanılarak kirişteki çatlağın iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Başlangıçta, laboratuvar ortamında deneysel olarak üretilen kompozit kirişin hasar içermesi durumunda ve piezoelektrik aktüatörlerin farklı voltajlarda aktifleştirmelerine bağlı olarak oluşan çökme değerleri alınmıştır. Deneysel olarak elde edilen çökme-kuvvet ilişkileri daha sonra analitik formülasyonların uygulanması ile elde edilen çökme-kuvvet sonuçları karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyum içerisinde uyum içerisinde oldukları görülerek, teorik olarak uygulanan denklemlerin doğrulamaları yapılmıştır. Analitik çözümler, Euler Bernoulli kirişi için değerlendirilip klasik tabaka teorilerinde yararlanılmıştır. Hasar teşhisi, birim şekil değiştirme enerjisi ile yapılmıştır. Kompozit kirişin, sağlam, çatlak, çatlak+iyileştirme gibi üç durum için değerlendirilip, aktüatörlerin iyileştirme kabiliyetinin araştırılması aşamasında piezoelektrik aktüatörün kirişe tamamen yapışık vaziyette olduğu kabul edilmiştir. Hasar bölgesi belirlendikten sonra eş zamanlı olarak

piezoelektrik, ortalama hata karelerinin toplam kökünden (OHKTK) elde edilen optimum değere göre, aktüatör aktifleştirilip kompozit kirişin emniyetli ve kontrollü bir şekilde çalışması amaçlanmıştır. Başka bir anlamda, yapıdaki hasarın kısmı de olsa kontrol edilebilme seviyesi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, eğilmeye maruz basit mesnetli bir kompozit kirişteki çatlakların tespitinde, kırılma mekaniği denklemleri ile birlikte birim şekil değiştirme enerjisi (BŞDE) algoritmasının başarılı bir şekilde kullanılabileceği ve kiriş için optimum bakım voltajının belirlenmesinde OHKTK uygulanarak, piezoelektrik aktüatörün kirişteki çatlakları iyileştirebileceği kanısına varılmıştır.

## 6.1 Giriş

Kompozit yapılardaki hasarlar, makro boyutta incelendiğinde genellikle delaminasyon, çatlak şeklinde oluşup, bu hasarların etkileri zamanla yapının bütünlüğünü ve mukavemetini azaltarak uygulama esnasında bu yapıların çalışma verimliliğini düşürmektedirler. Bu gibi durumlarda, kompozit malzemenin bütünlüğünü ve rijitliğini sağlamak açısından yani hasarın olduğu bölgeyi tespit etmek önemlidir. Hâlihazırda, servis dışı yapılarda oluşan hasarlar tahribatsız metotlarla, çalışma koşullarındaki hasarlar ise yapı sağlığı izleme teknikleri ile yapılmaktadır. Son 20 yıldır, hasarları belirlemek için YSİ tekniğinde birçok tanılama prosedürü önerilip geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları X ray görüntülüne, ultrasonik tarama, kızılötesi tomografi, titreşim tabanlı, akustik emisyon gibi yöntemlerle hasarın olduğu bölgeler tespit edilebilmektedir.

1990'lı yıllardan itibaren gerek laboratuvar gerekse servis koşullarında kompozit yapıların davranışı için çok hassas ve anlık bilgi veren birim şekil değişim ölçüm sensörleri geliştirilip kullanılmaktadır. Bu sensörlerle yapının davranışı izlenmektedir. Malzemede herhangi bir hasarın ortaya çıkması ve bakımın yapılması gerektiği durumlarda sistem durdurulur ve yapının bakımı yapılmaktadır. Sözü edilen proses, sistemin çalışmasını durdurduğundan, maliyetleri de artırmaktadır. Hasar görmüş veya görmek üzere olan bir sistemi durdurmadan, sensörleri tek başına kullanarak bakımı gerçekleştirmek mümkün olmadığından yeni fikir arayışını da beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda, bu bölümde yapılan araştırmada, gerek laboratuvar gerekse servis şartlarındaki yapılar için sensör ve aktüatörler kullanarak malzemenin davranışı hem izlenebilecek hem

de malzeme hasara uğramadan önlem alınabilecektir. Hasara uğrasa bile piezoelektrik aktüatörlerin elektromekanik özelliğinden yararlanılarak hasarın oluşturacağı zararlar kısmi de olsa azaltılabileceği umulmaktadır. Başka bir deyişle, hasarın önlenmesi veya oluşan hasar etkilerinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu işlem çeşitli yükler etkisi altında olan kompozit yapılarda oluşacak maksimum şekil değişimleri izlenebilecek ve kritik şekil değişimlerini azaltacak bir YSİ+Bakım sistemi araştırılmıştır. Burada, bir boyutlu yapılardaki hem hasar bölgesinin tespit edildiği hem de piezoelektrik aktüatörlerle bakımı içim temel analitik formülasyonlar verilmiştir.

Literatürde, kompozit yapıların tamirinde genellikle yüksek mukavemet ve hafif olan kompozit yamaların kullanıldığı görülmüştür (Baker et al.,1984; Baker and Jones, 1988; Baker, 1984). Çatlak içeren kompozit yapıların tamirinde kompozit yamalar etkin olarak kullanılabilmesine rağmen uygulama aşamasında sorunlarla karşılaşmaktadır. Özellikle, gerilme analizlerinin yapılacağı durumlarda, kompozit yama dizaynı, belirli aralıklar arasında dış yüklerle bağlı olarak yapılmaktadır. Ancak, dış yükler, bu limitlerin haricinde olduğu zamanlarda, başlangıç tasarımının, değişen bu yükleri karşılayıp karşılamayacağı gibi belirsizlikler söz konusudur. Hâlihazırda, yamalarla yapılan tamir uygulamalarında karşılaşılan bu çeşit problemler tam olarak çözülmüş değildir. Kompozit yapılardaki yamalarla yapılan tamir proseslerinin yanında, son zamanlarda laboratuvar ortamında hafif, kontrol edilebilir voltaj ve rahatça malzemelere yapışabilme gibi özelliklere sahip piezoelektrik yamaların da kompozitlerdeki hasarı cüz-i'de olsa tamir edilebildiğini belirten çalışmalar mevcuttur (Wang et al., 2002; Liu, 2008; Wu and Wang, 2011; Alaimo et al., 2011). Bu çalışmalarda, yapıdaki hasarların piezoelektrikle tamir edilebilme etkilerinin araştırılmasında genellikle analitik ve nümerik metotlar uygulanmıştır. Wang vd., uyguladıkları analitik çalışmalarında, dış yüklemelere maruz, lineer elastik bir kirişteki çatlağın tamirini piezoelektriklerle kontrol edilebileceğini göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmada, piezoelektrik aktüatörlere uygulanması gereken voltajı, yapıya iliştirilen piezoelektrik yamanın geometrisine, piezoelektrik yamanın malzeme ve piezoelektrik özelliklerine, giriş malzemesine ve geometrisine gibi parametrelere bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanında, kirişteki çatlak gibi hasar, yapılarda süreksizlik oluşturduğunu belirtmişlerdir.



Piezoelektrik yamaların kullanılmasıyla sözü edilen bu süreksizlikleri azaltabildiklerini göstermişlerdir (Wang et al., 2002). Liu TJ., çalışmasında, sonlu elemanlar çözüm prosedürüne dayanan ticari paket programı kullanarak çatlak içeren kirişteki hasarın azaltılabileceğini belirtmiştir. Aktif tamir işlemlerinin değerlendirilmesinde, eğim süreklilik kriteri ve kırılma mekaniği kriterlerinden yararlanmıştır (Liu, 2008). Bunlardan öte Wu ve arkadaşı yaptıkları çalışmada, dinamik yüklenmeye maruz bırakılmış ve çatlak çentiği içeren basit mesnetli bir kirişteki çentik hasarının piezoelektrik malzemelerin elektromekanik özellikleri sayesinde tamir edebileceğini göstermişlerdir. Burada, piezoelektrik yamalara uygulanması gereken voltajı analitik olarak bulmuşlardır (Wu and Wang, 2011). Alaimo vd., nümerik yöntemler içerisinde yaygın olarak kullanılan sınır elemanlar yöntemiyle, lineer elastik bir kirişteki hasar tamirini, kırılma mekaniği kriteriyle araştırmışlardır (Alaimo et al., 2011). Platz vd., çatlak içeren alüminyum levhadaki, çatlak hasar ilerlemesini piezoelektrik aktüatörler sayesinde kontrol edilebileceğinin belirtmişlerdir (Platz et al., 2011). Öncelikle çatlak hasarını azaltılması için, yamanın yerleştirilmesi gereken bölge ve yamaya uygulanması gereken voltaj nümerik olarak belirlemişlerdir. Daha sonra istatistiksel yöntemleri kullanarak, piezoelektriklerin hasarın önleyebilme kabiliyetini araştırmışlardır. Yukarıda verilen çalışmalar, yapılarıdaki hasarları kısmi de olsa piezoelektrik aktüatörlerle tamirlerinin yapılabileceğini gösteren potansiyel çalışmalardan bir kısmıdır.

Bu çalışmada hasarlı yapı ile ilgili elde edilen verilerin hasar algoritmalarında değerlendirilmesinin akabinde hasar bölgesinin yeri ve büyüklüğü tespit edilmiştir. Daha sonra hasar belirlendikten sonra, hasarı önleyici veya hasarı sınırlayıcı şekilde uygun voltaj uygulanarak piezo aktüatörler aktifleştirilerek kısmi de hasarın bakımı yapılması amaçlanmıştır. Başlangıçta, piezoelektrik aktüatörlere uygulanması gereken voltaj miktarı sistem emniyette çalışacak şekilde hasar tanılama algoritmasında (BŞDE, OHKTK) tespit edilen hasar miktarına göre elde edilmiştir. Araştırma, basit Euler Bernoulli kirişi için değerlendirilmiş, çözüm aşamasında klasik tabaka teorilerinden yararlanılmıştır. Kompozit kiriş, sağlam, çatlak, çatlak+iyileştirme gibi üç durum için değerlendirilerek piezoelektrik malzemelerin bakım proseslerinde kullanılabilirlik olasılıkları araştırılmıştır.

## 6.2 Enine Çatlak İçeren Kompozit Bir Kirişin Modellenmesi

Herhangi bir yapısal elemanda, çatlak bulunduğu çatlaktan dolayı oluşan ek deformasyon enerjisi (Nikpour and Dimarogonas, 1988)

$$U_c = \int_{Af} \left[ H_1 \left( \sum_{i=1}^N K_{I_i} \right)^2 + H_2 \left( \sum_{i=1}^N K_{II_i} \right)^2 + H_{12} \sum_{i=1}^N K_{I_i} \sum_{i=1}^N K_{II_i} \right] dA \quad (6.1)$$

gibi olup  $H_1$ ,  $H_2$  ve  $H_{12}$  katsayıları,

$$H_1 = 0.5 \bar{A}_{22} \operatorname{Im} \left( \frac{s_1 + s_1}{s_1 s_2} \right)$$

$$H_2 = 0.5 \bar{A}_{11} \operatorname{Im}(s_1 + s_2) \quad (6.2)$$

$$H_{12} = A_{11} \operatorname{Im}(s_1 s_2)$$

bağıntıları ile bulunur. Burada  $K_{I_i}$ ,  $K_{II_i}$  gerilme şiddet faktörünü,  $s_1$  ve  $s_2$  ise karakteristik denklemin köklerini gösterir. Karakteristik denklem (Wang et al., 1992; Sih et al., 1965) aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\bar{A}_{11} s^4 - 2 \bar{A}_{16} s^3 + (2 \bar{A}_{12} + \bar{A}_{66}) s^2 - 2 \bar{A}_{26} s + \bar{A}_{22} = 0 \quad (6.3)$$

Burada  $A_{ij}$  ifadeleri (Sih and Chen, 1981)

$$\bar{A}_{11} = A_{11} m^4 + (2A_{12} + A_{66}) m^2 n^2 + A_{66} n^4$$

$$\bar{A}_{22} = A_{11} n^4 + (2A_{12} L + A_{66}) m^2 b^2 + A_{22} m^4$$

$$\bar{A}_{12} = (A_{11} + A_{22} - A_{66}) m^2 n^2 + A_{12} (m^4 + n^4) \quad (6.4)$$

$$\bar{A}_{16} = (-2A_{11} + 2A_{12} + A_{66}) m^3 n + (2A_{22} - 2A_{12} - A_{66}) mn^3$$

$$\bar{A}_{26} = (-2A_{11} + 2A_{12} + A_{66}) n^3 m + (A_{22} - 2A_{12} - A_{66}) nm^3$$

$$\bar{A}_{66} = 2(A_{11} - 4A_{12} + 2A_{22} - A_{66}) m^2 n^2 + A_{66} (m^4 + n^4)$$

gibidir. Burada  $m = \cos \alpha$  ve  $n = \sin \alpha$  dir. ( $\alpha$  oryantasyon açısını gösterir).  $\bar{A}_{ij}$  katsayıları malzeme özellikleri ile ilgili olup,

$$\begin{aligned}
A_{11} &= \frac{1}{E_{11}}(1 - \nu_{12}^2 \frac{E_{22}}{E_{11}}); & A_{22} &= \frac{1}{E_{22}}(1 - \nu_{23}^2) \\
A_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_{11}}(1 + \nu_{23}); & A_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \\
A_{44} &= \frac{1}{G_{23}}; & A_{55} &= \frac{1}{G_{23}}
\end{aligned} \tag{6.5}$$

eşitliklerine sahiptir.

Şekil 6.1’de verilen çatlak içeren kompozit bir kiriş için gerilme şiddet çarpanları olan  $K_I$  ve  $K_{II}$  aşağıdaki gibidir.

$$K_j = \sigma_j \sqrt{\pi a} F_j(a/h) Y_j(\xi) \quad (j=I,II) \tag{6.6}$$

Yukarıdaki denklemde  $\sigma_j$ , kırılan her bir modta ki gerilmeye,  $F_j(a/h)$ , düzeltme faktörünü,  $Y_j(\xi)$  ise anizotropik malzemeler için düzeltme faktörünü temsil eder (Nikpour and Dimarogonas, 1988; Bao et al., 1992).

Çatlak hasarından dolayı kirişteki lokal esneklik artışı (Papadopouloand Dimarogonas, 1987)

$$C_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial P_j} = \frac{\partial^2 u}{\partial P_i \partial P_j} \int_A J dA_f \tag{6.7}$$

bağıntısı ile bulunur. (6.1-6-4) denklemleri (6.7)’e uygulanırsa

$$C'_{mm} = \frac{\partial^2 u_c}{\partial P^2} = \frac{72\pi H_1}{hb^2} T_1 + \frac{2\pi H_2}{hl^2(1-\eta_i)^2} T_2 + \frac{12\pi H_{12}}{hbl(1-\eta_i)} T_3 \tag{6.8}$$

ifadesi elde edilir. Burada  $\eta_i$ , belirlenen koordinat ekseninde çatlağın bulunduğu yeri gösterir.  $T_1$ ,  $T_2$  ve  $T_3$ ;

$$T_1 = \int_0^{\bar{a}_i} [\bar{a}_i Y_I^2(\zeta) F_I^2(\bar{a}_i)] d\bar{a}_i,$$

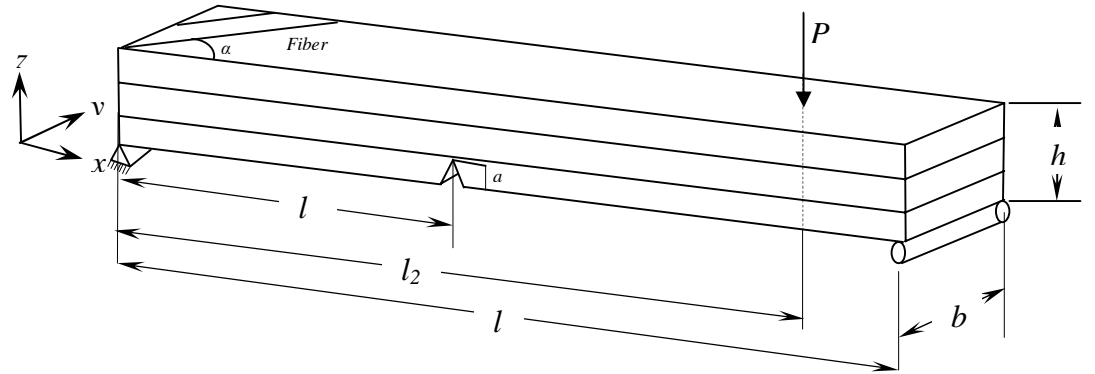
$$T_2 = \int_0^{\bar{a}_i} [\bar{a}_i Y_{II}^2(\zeta) F_{II}^2(\bar{a}_i)] d\bar{a}_i \quad (6.9)$$

$$T_3 = \int_0^{\bar{a}_i} [\bar{a}_i Y_I(\zeta) Y_{II}(\zeta) F_I(\bar{a}_i) F_{II}(\bar{a}_i)] d\bar{a}_i$$

gibi olur. Burada kirişin rijitliğini zayıflatan yanal ve açık çatlak parametresi,  $\bar{a} = a/h$  gibidir. Herhangi bir A kesitinde çatlak içeren kompozit bir kirişteki şekil değiştirme enerjisi,

$$U_c = \int_A J dA = \int_A H_I K_{IM}^2 dA \quad (6.10)$$

bağıntısıyla bulunur. Burada  $K_{IM}$  açılma modu için gerilme şiddet çarpanı olup  $H_I$  eşitliği denklem (6.2)'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Enine çatlak içeren fiber takviyeli basit mesnetli kompozit bir kirişin geometrisi

Düz yüzeyler için  $l/h \geq 4$  olduğunda  $K_{IM}$  ifadesi (Papadopoulos and Dimarogonas, 1987; Krawchuk and Ostachowicz, 1995)

$$K_{IM} = (6M/bh^2) \sqrt{\pi a} Y_I(\xi) F_{IM}(a/h) \quad (6.11)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada  $Y_I(\xi)$  ve  $F_{IM}$  düzeltme fonksiyonları olup aşağıdaki gibidir (Sih et al., 1965; Sih and Chen, 1981)

$$Y_I(\xi) = 1 + 0.1(\xi - 1) - 0.015(\xi - 1)^2 + 0.002(\xi - 1)^3 \quad (6.12)$$

$$F_{IM}(a/h) = \frac{\sqrt{\tan \gamma / \gamma}}{\cos \gamma} [0.923 + 0.199(1 - \sin \gamma)^3] \quad (6.13)$$

Yukarıdaki denklemde  $\gamma = \pi a / 2h$ ,  $\xi = \frac{\sqrt{E_1 E_2}}{2G_{12}} - \sqrt{\nu_{12} \nu_{21}}$  formüllerine sahiptir.  $a$ , çatlak derinliğini gösterir. Yanal bir çatlaktan dolayı kirişteki esneklik artışı

$$C_{MM}^I = \frac{72H_1 \pi}{hb^2} \int_0^{\bar{a}} \bar{a} Y_I^2(\xi) F_{IM}^2(\bar{a}) d\bar{a} \quad (6.14)$$

Çatlak hasarından dolayı giriş buyunca lokal zayıflama aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\theta = I_{yy} E_{xx} C_{MM}^I \quad (6.15)$$

Burada  $E_{xx}$  ortotropik malzemeler için elastisite modülüdür. Denklem (6.14)'teki  $C_{MM}^I$  ifadesi (6.15) ifadesine uygulanırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\theta = 6H_1 E_{xx} \pi h \int_0^{\bar{a}} \bar{a} Y_I^2(\xi) F_{IM}^2(\bar{a}) d\bar{a} \quad (6.16)$$

Denklem (6.13)'teki  $F_{IM}$ , denklem (6.16)'a konulursa

$$\theta = 6H_1 E_{xx} \pi h \int_0^{\frac{a}{h}} \frac{a}{h} Y_I^2(\xi) \left[ \frac{\sqrt{\frac{\tan(\pi a / 2h)}{(\pi a / 2h)}}}{\cos(\pi a / 2h)} \left[ 0.923 + 0.199(1 - \sin(\frac{\pi a}{2h}))^3 \right] \right]^2 d\bar{a} \quad (6.17)$$

eşitliği bulunur. Çatlak birden fazla tabakada olduğunda (6.17) denklemi;

$$\theta = \sum_{i=1}^N 6H_{1,i} E_{xx} \pi h Y_I^2(\xi) \int_0^{\frac{a_i}{h}} \frac{a_i}{h} \left[ \frac{\sqrt{\frac{\tan(\pi a_i / 2h)}{(\pi a_i / 2h)}}}{\cos(\pi a_i / 2h)} \left[ 0.923 + 0.199(1 - \sin(\frac{\pi a_i}{2h}))^3 \right] \right]^2 d\bar{a} \quad (6.18)$$

gibi yazılabilir. Burada  $N$ , tabaka sayısını gösterir. Yukarıdaki denklemde  $\theta$  parametresi artıkça giriş, rijitlik açısından zayıflar. Denklem, Taylor serisinin ilk üç

terimi alınarak çözülmüştür. Bütünlük açısından bu parametrenin oluşturacağı etkiler altta bahsedildiği gibi piezoelektrik aktüatörle kontrol edilecektir. Hasar tanınması 4.2.2’de verildiği gibi BŞDE algoritmasıyla yapılmıştır.

### 6.3 Kompozit Kirişlere ait Temel Bağlıntılar

Eğilmeye maruz kompozit bir kiriş üzerinde oluşan momentler yer değiştirmelere bağlı olarak;

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{26} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial v_0}{\partial y} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{26} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (6.19)$$

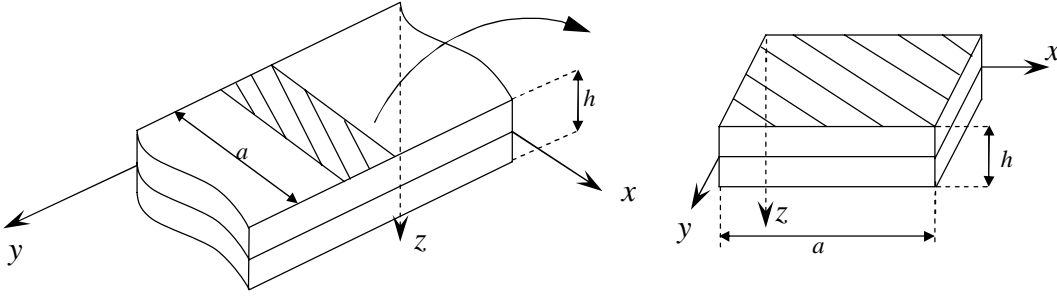
şeklinde dir. Kiriş sadece düzlem dışı kuvvetlere maruz olduğunda (6.19) denkle mi

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{26} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (6.20)$$

formda yazılabilir. D matrisinin tersi alınıp moment değerleriyle çarpılırsa,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* \\ D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* \\ D_{16}^* & D_{26}^* & D_{26}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6.21)$$

şeklinde de gösterilebilir. Burada  $D_{ij}^*$ ,  $D_{ij}$  matrisinin ters elemanlarını gösterir.



Şekil 6.2 Eğilmede tabakalı şeritin geometrisi

Tabakalı levha teorisine klasik tabakalı levha teorisine göre kiriş sadece düzlem dışı kuvvet uygulandığında (Şekil 6.2)

$$M_{xx} = M_{xy} = 0 \quad (6.22)$$

olur.

Denklem (6.22)'e göre (6.21) yeniden düzenlenirse

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = -D_{11}^* M_{xx} \quad (6.23)$$

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} = D_{12}^* M_{xx} \quad (6.24)$$

$$2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} = -D_{16}^* M_{xx} \quad (6.25)$$

Euler Bernoulli kiriş teorisine göre

$$M = bM_{xx}$$

$$E_{xx}^b = \frac{12}{h^3 D_{11}^*} = \frac{b}{I_{yy} D_{11}^*} \quad (6.26)$$

$$E_{xx}^b = \frac{12}{h^3 D_{11}^*} = \frac{b}{I_{yy} D_{11}^*}, \quad I_{yy} = \frac{bh^3}{12}$$

eşitliği yazılabilir. Yukarıda verilen (6.26) denklemini, (6.23)'e uygulanırsa

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = -\frac{M}{E_{xx} I_{yy}} \text{ veya } M(x) = -E_{xx}^b I_{yy} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (6.27)$$

şeklinde de yazılabilir. Denklem (6.23)- (6.26) deki verilen  $D_{ij}^*$ 'ler

$$D_{11}^* = \frac{(D_{22}D_{66} - D_{26}D_{26})}{D^*}$$

$$D_{12}^* = \frac{(D_{16}D_{26} - D_{12}D_{66})}{D^*} \quad (6.28)$$

$$D_{16}^* = \frac{(D_{12}D_{26} - D_{22}D_{16})}{D^*}$$

$$D^* = D_{11}D_1 + D_{12}D_2 + D_{16}D_3, \quad D_1 = D_{22}D_{66} - D_{26}D_{26}, \quad D_2 = D_{16}D_{26} - D_{12}D_{66}$$

ve  $D_3 = D_{12}D_{26} - D_{22}D_{16}$

gibidir.

Eğilme rijitlikleri olan  $D_{ij}$  değerleri  $\bar{Q}_{ij}^k$  cinsinden

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_1^N \bar{Q}_{ij}^k (z_{k+1}^3 - z_k^3) \quad (6.29)$$

şeklinde dir.

$\bar{Q}_{ij}^k$  parametreleri  $k$ . tabakadaki fiberlerin yöne bağlı olarak değişimini gösteren malzeme sabitleri olup;



$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} \sin^4 \theta \\
\bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta \cos^4 \theta) \\
\bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\
\bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\
\bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\
\bar{Q}_{66} &= Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66} \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)
\end{aligned} \tag{6.30}$$

bağıntıları ile hesaplanabilir. Burada  $Q_{ij}^k$  ifadeleri  $k$ . tabakadaki mühendislik sabitleridir.

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\
Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}
\end{aligned} \tag{6.31}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

#### 6.4 Kompozit Kirişin Piezoelektrik Aktüatörle Modellenmesi

$\delta$  kalınlığında bir piezoelektrik tabakanın,  $h$  yüksekliğinde ve  $l$  uzunluğunda bir kirişe uzunluk boyunca birleştirildiği kabul edilsin (Şekil 6.3). Piezoelektrik tabakadaki şarj (Lee and Moon, 1990)

$$Q = -e_{31} \int_0^l b \left( \frac{h+\delta}{2} \right) \frac{d^2 y}{dx^2} dx \tag{6.32}$$

formülü ile bulunur. Burada  $e_{31}$ , piezoelektrik katsayıdır.

Sensördeki çıkış voltajı (Lin and Hsu, 1999)

$$V_s = \frac{Q}{C_v} = -\frac{e_{31} b (h+\delta)}{2C_v} \int_0^l \frac{d^2 y}{dx^2} dx \tag{6.33}$$

ile bulunur. Burada  $C_v$ , elektrik kapasitansını gösterir. Piezoelektrik tabaka, hem aktüatör hem de sensör olarak kullanıldığında, aktüatör tarafından uygulanan voltaj miktarı aşağıdaki gibidir.

$$V_a = gV_s = -s \frac{e_{31} b (h + \delta)}{2} \int_0^l \frac{d^2 y}{dx^2} dx \quad (6.34)$$

Yukarıdaki denklemde  $g$ , kontrol kazanç faktörünü gösterir.  $s$  ise  $s = g/C_v$  bağıntısına sahiptir. Piezoelektrik tabaka tarafından üretilen voltajın, kiriş üzerinde oluşturacağı aksenal gerilme (Sun et al., 1999);

$$\sigma_x = e_{31} \frac{V_a}{\delta} = -s \frac{e_{31}^2}{2\delta} b (h + \delta) \int_0^l \frac{d^2 y}{dx^2} dx \quad (6.35)$$

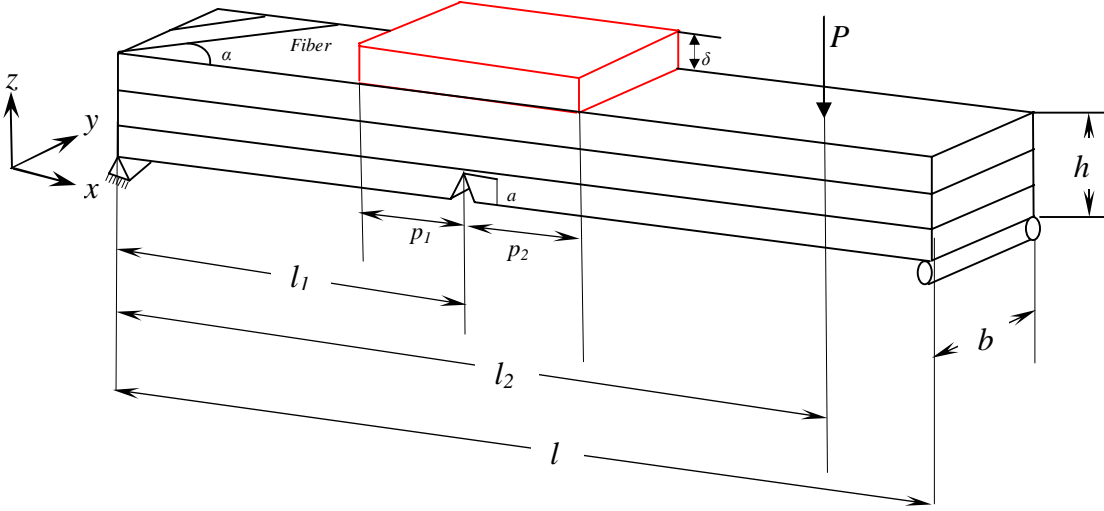
bağıntısı ile hesaplanabilir. Piezoelektrik tabaka üzerinde oluşan bu normal gerilme, kompozit kiriş üzerinde eğilme momenti oluşturup kirişin bakım ve kontrolünde kullanılır. Kiriş üzerinde oluşan bu eğilme momenti,

$$M_a = \sigma_x \delta b \left( \frac{h + \delta}{2} \right) = -s \frac{e_{31}^2}{4} (h + \delta)^2 b \int_0^l \frac{d^2 y}{dx^2} dx = -G \frac{dy}{dx} \Big|_{x=0}^{x=l} \quad (6.36)$$

şeklinde. Burada  $G = se_{31}^2 b (h + \delta)^2 / 4$  olup birimi V.C/mm dir..

## 6.5 Piezoelektrik Aktüatörle Kompozit Kirişin Bakımı

Eğilme yüküne maruz çatlak içeren kompozit bir kirişin eğrilik şekillerinde denklem (6.18)'de verildiği gibi rijitlik düşüşünden dolayı yapısında süreksizlikler oluşmaktadır. Piezoelektrik aktüatörlerin kiriş üzerinde oluşturacakları momentle bu süreksizliklerin azaltılması amaçlanmıştır.



Şekil 6.3 Enine çatlak içeren fiber takviyeli basit mesnetli kompozit kirişin piezoelektrik aktüatörlerle modellenmesi

Şekil 6.3'te görüldüğü gibi basit mesnetli kompozit bir kirişin  $l_1$  mesafesinde  $a$  derinliğinde bir çatlakın olduğu,  $l_2$  mesafesinde de  $P$  kuvvetine maruz kaldığı kabul edilsin. Piezoelektrik aktüatörün boyu  $(p_1+p_2)$  olduğu farz edilsin.

Euler Bernoulli kirişi için (6.22)- (6.27) denklemleri uygulandığında aşağıda verilen sınır (6.37)-(6.46) verilen bağıntılar elde edilir.

$$0 \leq x \leq l_1 - p_1 \text{ için} \quad E_{xx} I_{yy} y_1'' = \frac{l-l_2}{l} Px \quad (6.37)$$

$$l_1 - p_1 \leq x \leq l_1 \text{ için} \quad E_{xx} I_{yy} y_2'' = \frac{l-l_2}{l} Px + G(y_4'|_{l_1+p_2} - y_1'|_{l_1-p_1}) \quad (6.38)$$

$$l_1 \leq x \leq l_1 + p_2 \text{ için} \quad E_{xx} I_{yy} y_3'' = \frac{l-l_2}{l} Px + G(y_4'|_{l_1+p_2} - y_1'|_{l_1-p_1}) \quad (6.39)$$

$$l_1 + p_2 \leq x \leq l_2 \text{ için} \quad E_{xx} I_{yy} y_4'' = \frac{l-l_2}{l} Px \quad (6.40)$$

$$l_2 \leq x \leq l \text{ için} \quad E_{xx} I_{yy} y_5'' = \frac{l_2}{l} P(l-x) \quad (6.41)$$

Kompozit kirişe ait sınır koşulları (6.42) - (6.42)'de verilmiştir.

$$x=0 \text{ için } y_1 = 0 \quad (6.42)$$

$$x=l_1-p_1 \text{ için } y_1 = y_2, y_1' = y_2' \quad (6.43)$$

$$x = l_1 + p_2 \text{ için } y_3 = y_4, y_3' = y_4' \quad (6.44)$$

$$x = l_2 \text{ için } y_4 = y_5, y_4' = y_5' \quad (6.45)$$

$$x = l_1 \text{ için } y_2 = y_3, y_3' - y_2' = \theta y_2'' \quad (6.46)$$

$$x = l \text{ için } y_5 = 0 \quad (6.47)$$

(6.42)- (6.47)'de verilen sınır koşulları, (6.37)-(6.45)'e uygulandığında aşağıdaki bağıntılar bulunur.

$$y_1 = \frac{l-l_2}{6IE_{xx}I_{yy}} Px^3 + c_1x \quad 0 \leq x \leq l_1 - p_1 \quad (6.48)$$

$$y_2 = \frac{l-l_2}{6IE_{xx}I_{yy}} Px^3 + \frac{G}{2E_{xx}I_{yy}} \left[ \frac{l-l_2}{2IE_{xx}I_{yy}} P(l_1 + p_2)^2 + c_2 - \frac{l-l_2}{2IE_{xx}I_{yy}} P(l_1 - p_1)^2 - c_1 \right] x^2 + c_5x + c_6 \quad l_1 - p_1 \leq x \leq l_1 \quad (6.49)$$

$$y_3 = \frac{l-l_2}{6IE_{xx}I_{yy}} Px^3 + \frac{G}{2E_{xx}I_{yy}} \left[ \frac{l-l_2}{2IE_{xx}I_{yy}} P(l_1 + p_2)^2 + c_2 - \frac{l-l_2}{2IE_{xx}I_{yy}} P(l_1 - p_1)^2 - c_1 \right] x^2 + c_7x + c_8 \quad l_1 \leq x \leq l_1 + p_2 \quad (6.50)$$

$$y_4 = \frac{l-l_2}{6IE_{xx}I_{yy}} Px^3 + c_2x + c_3 \quad l_1 + p_2 \leq x \leq l_2 \quad (6.51)$$

$$y_5 = \frac{l_2}{6IE_{xx}I_{yy}} P(l-x)^3 + c_4(x-l) \quad l_2 \leq x \leq l \quad (6.52)$$

(6.48)-(6.52) bağıntıları lineer denklem formunda yazılarak bilinmeyen katsayılar ( $c_1, c_2, \dots, c_8$ ) çözülür. Ayrıca, yukarıda verilen denklemlerde  $\theta$  çatlak bölgesindeki süreksizlik fonksiyonu olan rijitliği gösterir. Bu parametre denklem (6.18)'den hesaplanır. Burada, G, birim şekil değiştirme enerjisi hasar tespit algoritması uygulanıp hasar bölgesi tespit edilmesine eş zamanlı olarak OHKTK ile değişken aralıklarda arama yapılarak, optimum değeri bulunur. Elde edilen optimal G, denklem (6.36)'a konularak kazanç kazanç faktörü olan  $s$  parametresi bulunur. Bulunan  $s$  (6.34) denkleminde uygulanmasıyla, kompozit kirişteki hasar bakımı için piezoelektrik yamaya uygulanması gereken voltaj belirlenir.

Kompozit malzemelerdeki hasar teşhis ve bakım sistemi detaylı olarak aşağıda maddeler halinde ve buna ilişkin akış şeması Şekil 6.4'te verilmiştir.

- i. 4. bölümde verildiği üzere hasara uğramamış bir yapıdan sensörler vasıtası ile alınan eğrilikler, düzgün olurken hasarlı bir yapı ise özellikle hasarın olduğu bölgelerde düzgün olmayan eğrilikler oluşur. Bunlar, referans olarak yapının sağlıklı durumdaki haliyle karşılaştırma yapılarak tanılama yapılır. Eğer, yapının sağlıklı verileri mevcut değilse, interpolasyon teknikleri veya diğer kullanılan regresyon analiz teknikleriyle, değerlendirildikten sonra hasar bölgesinin yeri ve büyüklüğü için kullanılabilir. Bu şekilde zamana bağlı olarak yüklenme arttıkça alınan veriler (şekil değişimi, yer değiştirme) interpolasyon teknikleri veya destek vektör makine algoritmalarında değerlendirilip hasar tespiti ve hasar miktarı belirlenip, iteratif olarak yapının bakımı için piezoelektriklere uygulanması gereken voltaj belirlenir. Bu şekilde başlangıç özellikleri bilinmeyen bir yapıda oluşan hasarın tespiti ve bakımı yapılabilir. Bu çalışmada, model tabanlı YSİ sistemi kullanılarak sistemin başlangıç durumu bilinir varsayımı kabul edilmiştir. Hasar tespitinde 4.2.2'de verilen birim şekil değiştirme enerjisi kullanılarak yapılmıştır. Optimum voltaj gereksinimi, ortalama hata kareleri toplamı kökü (OHKTK) kullanılmıştır.

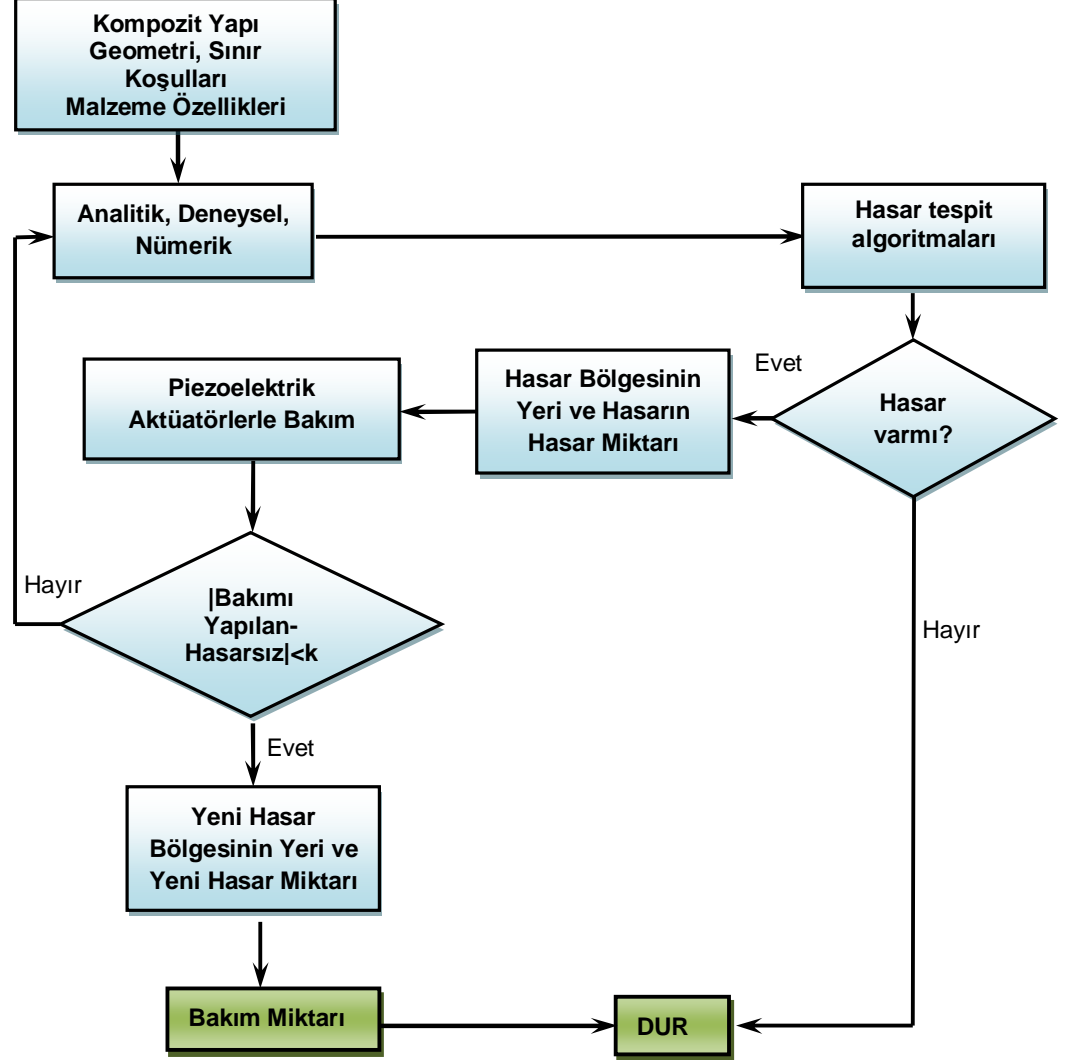
$$OHKTK = \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - s_i)^2 / n}, \text{ eşitliğine sahiptir. Burada, } b_i \text{ ve } s_i \text{ sırasıyla}$$

bakım uygulanan kompozit kiriş ve sağlıklı kirişe ait  $l$  uzunluğu boyunca elde edilen çökme değerlerini,  $n$  ise kullanılan nokta sayısını belirtir. (OHKTK)

normalize edilmiş formatta,  $NOHKTK = \frac{NOHKTK}{|(b_{\max} - b_{\min})|}$  gibidir.

- ii. Bütünlük açısından kompozit malzemedeki hasarın kontrolü için piezoelektrik aktüatörlerle bakımının yapılması. Hasar bölgesi ve büyüklüğü algoritmalarla belirlendikten sonra piezoelektrik aktüatörlere voltaj uygulanıp aktifleştirilerek, yapının kontrolü sağlanır. Aktüatörlere uygulanması gerektirecek voltaj miktarı sistemin emniyetli ve kontrollü çalışacak şekilde algoritmalar sonucunda elde edilen hasar büyüklüğüne göre belirlenir. Şekil 6.4'te verilen  $k$  parametresi düşük seçildiği müddetçe yapının kontrolü de o derece artırılmış olur. Ancak, işlemcinin çözüm gücü ve süresi açısından

oluşan anormalliklerin önlenmesi için başlangıçta denemeler yapılarak uygun bir değerde seçilmesi gerekir. Dolayısıyla, hasarın iyi bir şekilde kontrol altına alınabilmesi için mümkün olduğunca bu parametre optimum değerlerde seçilmesi önerilir.



Şekil 6.4 Kompozit yapılara ilişkin, yapı sağlığı izleme ve bakım prosesi için uygulanan akış şeması

- iii. Hasarlı yapının bakım öncesi ve bakım sonrası karşılaştırılarak elde edilen bakım miktarının belirlenmesi.

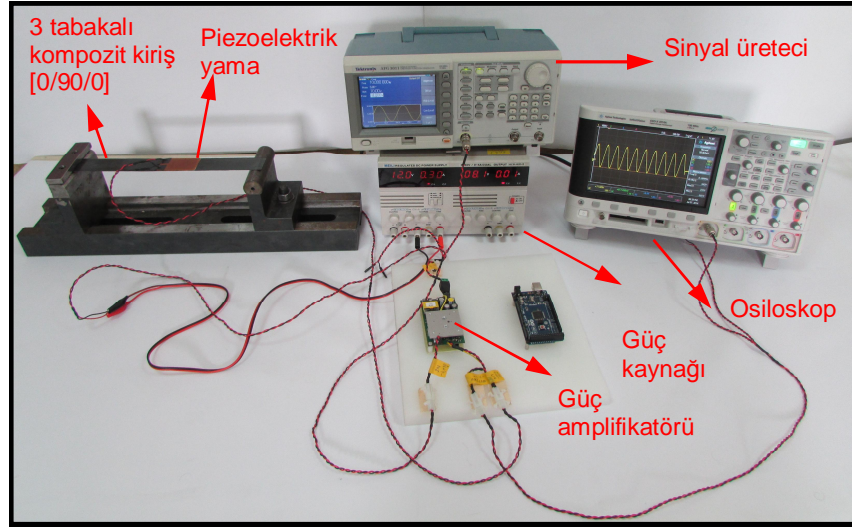
## 6.6 Deneysel Tasarım

Buradaki deneysel kısmın temel amacı, bir takım parametreler değerlendirilerek analitik yöntemde uygulanan tekniğe ışık tutmaktır. Bir başka şekilde, analitik yöntemde uygulanan prosedürün etkinliğini deneysel yöntemle

doğrulamak amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, başlangıçta levha şeklindeki prepregler [0/90/0] oryantasyon açılarıyla üst üste sıralanmıştır. En alt tabakadaki 0 derecelik oryantasyon açısına sahip prepreg, oryantasyon açısına dik vaziyette kesilerek, yapısında çatlak hasarı oluşturulmuştur. Daha sonra bu levha, 2 bar basınç altında ve 150 derece sıcaklık, sıcak preste, 10 dk boyunca basınç uygulanmıştır. Basınç altındaki kompozit levhadaki sıcaklık iki adet termal propla izlenmiştir. Burada seçilen basınç ve sıcaklık değerleri, tedarik firmasından temin edilmiştir.

Kompozit levha, sıcak preste sertleşme sıcaklığına ulaştıktan sonra doğal olarak soğutulmuştur. Daha sonra, bu levha, testere ile kesilerek, uzunluğu 280 mm, genişliği de üzerinde yapıştırılacak piezoelektrik yamayla aynı olacak şekilde 35 mm eninde, bir kiriş çıkartılmıştır. Burada, üç tabakanın toplam kalınlığı 1.25 mm'dir. Bir sonraki aşama, laboratuvar ortamında test edilmeye hazır hale getirilen kompozit kirişin dış yüzeyine piezoelektrik yama yapıştırılarak, eş zamanlı olarak değişik piezoelektriğe voltaj ve aksenal statik kuvvetler uygulanıp çökme davranışları incelenmiştir. Dış yüzeyinde piezoelektrik aktüatör yerleştirilen ve çatlak hasarı içeren tabakalı kompozit kiriş Şekil 6.5'te verildiği üzere sabitleyici bir düzenek üzerinde yerleştirilerek, sol ucu ankastre, sağ ucudu (ön görünümünden bakıldığında) basit mesnet olacak şekilde montajı yapılmıştır. Düzenek üzerinde yer alan sol ve sağ bölgesinde yer alan destekleyiciler bir ray üzerinde tek eksenle kayabilmektedir.

Destekleyiciler, alt zeminde yer alan ray üzerinde hareket edebilmelerinden, kirişin istenilen bölgesi test edilebilir. Test edilecek kirişin uzunluğu, ray üzerinde hareket edebilen destekler arasındaki mesafeye göre ayarlandıktan sonra, sözü edilen bu desteklerin alt yüzeyleri, test aşamasında olası hareketlerini önlemek amacıyla, bunların alt yüzeyleri zemin üstünde yer alan kayar tablaya civata bağlantı elemanlarıyla sabitlenmiştir.



Şekil 6.5 Deneysel olarak enine çatlak içeren fiber takviyeli basit mesnetli kompozit bir kirişin piezoelektrik aktüatörle bakımının yapılması

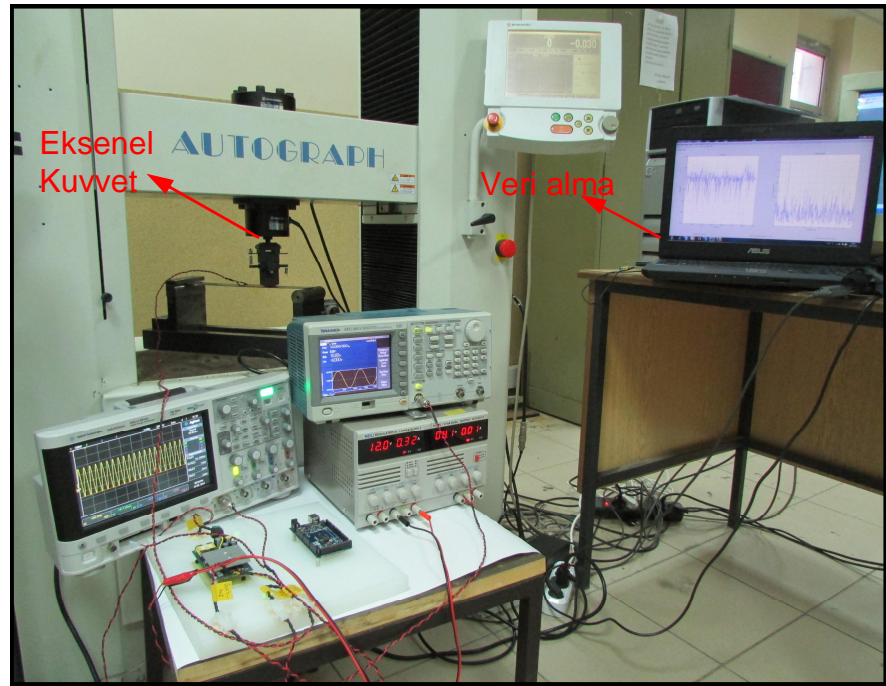
Destekleyici platform, basma kuvvetleri altında direnç gösterebilecek, paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Kirişin sol ucu, yani ankastre bölgesi, iki demir plaka arasında sıkıştırılmıştır. Burada, iki levha arasında sıkıştırılan kompozit kirişin alt ve üst uç bölgelerine, sıkıştırma yüklerinden dolayı, oluşacak hasarları önlemek için, esnek bant yapıştırılmıştır. Böylece kirişin, doğrudan olarak metal levhaya teması engellenip, kontak gerilmeleri de azaltılmıştır. Kirişin sağ uç bölgesi, düzlem dışı yük uygulandığında pürüzsüz silindirik parça üzerinde kayabilmektedir. Kompozit kiriş, destekleyici platform üzerine monte edildikten sonra, çatlak hasarının arka yüzeyinde P-876 DuraAct Pi menşeli piezoelektrik aktüatör iliştilmiştir. Bu çeşit, aktüatörlerin çalışma voltaj aralıkları -100 V ile 400 V aralığındadır. Buna bağlı olarak bloke edebilecekleri maksimum kuvvet miktarı 265 N'dur. Aynı şekilde, lateral yöndeki maksimum büzülme oranları da,  $1.3 \mu\text{m}/\text{m}$ 'dir. Kirişin sol ucu ankastre, sağ ucu serbest, çatlak derinliği 0.416 mm olup, piezoelektrik yama,  $x$  ekseninde boyunca 135 mm'de yerleştirilip, piezoelektriğe -100 V ile 250 V aralığında sinüzoidal olarak sinyal uygulandığında, kirişin 210 mm'de oluşan maksimum yer maksimum değişirme genliği 2.6 dir. Bu çalışmada, piezoelektrik aktüatör, tabaka kalınlığı 0.42 mm ve [0/90/0] oryantasyon açısı ile üç tabakadan üretilen kirişi, hareket ettirmek için yeterli elektromekanik kabiliyete sahip olduğu söylenebilir. Piezoelektrik yamanın, yüksek genlikte alternatif ve doğru akım sinyalleri ile aktifleştirilmesinde tek kanallı PI E-835 DuraAct piezo, sürücü modülü kullanılmıştır. Piezoelektrikler, yapı sağlığı izleme çalışmalarında, özellikle



ultrasonik tabanlı hasar tespitlerinde, yaygın olarak sensör ve aktüatör görevlerinde kullanılmışlardır (Su and Ye, 2009). Bazı çalışmalarda aktüatör olarak, şekil kontrolünde kullanılmışlardır (Agrawal and Treanor, 1999; Balamurugan and Narayanan, 2008). Bu çalışmada, aktüatör olarak hasar kontrolünde kullanılmaları amaçlanmıştır. Burada, amplifikatör 25 kat ölçekle, voltajı artırabilme özelliğine sahiptir. Şekil 6.5'te verildiği gibi, açık devre olarak, polietilen levha yerleştirilen amplifikatörün yapısında 4 adet pin mevcuttur. Amplifikatörün çalışmasını sağlayan, besleme pini, 12 V ile çalışmaktadır. Voltaj besleme pinine gerekli olan güç, Meili MCH-305D-II tipi güç kaynağına bağlanarak yapılmıştır. Amplifikatörün giriş pini -4 V ile +10 V aralığında çalışmaktadır. Bu pin, alternatif, doğru ve keyfi fonksiyonlarıyla sinyal üretebilen Tektronix AFG 3011 tipli üreticiye bağlanmıştır. Amplifikatördeki diğer iki pin ise çıkış pinidir. Birinci pin, girdi voltajının 25 kat ölçekle amplifike edilerek direk olarak piezoelektrik yamaya bağlanır. Diğer çıkış pini ise, okuma veya izleme pinidir. Bu pin amplifike edilen voltajın 0.01 ölçeğiyle standartlaştırılmış halidir ve bu pin veri alma ünitesine veya osiloskoba direk olarak bağlanır. Giriş pini ile amplifikatöre iletilen voltajın amplifike edilip edilmemesinin araştırılmasında bu pin kullanılır. Bilindiği üzere, amplifikatör yüksek çıkış voltajlarını, direk olarak veri alım ünitesine veya osiloskoplara bağlamak, ölçüm cihazlarının bozulmasına neden olabilir. Bu amaçla, amplifikatörün çıkış voltajının 0.01 ölçeğiyle indirgenerek bu voltaj, rahatlıkla veri alım ünitesine veya osiloskopa bağlanıp, çıkış voltajının hassasiyeti belirlenebilir. Şekil 6.5'te görüldüğü üzere, amplifikatöre bağlanan dört pininin kablosunda, yüksek akımlara dayanaklı açılıp kapanabilen, konektörler yerleştirilmiştir. Bu şekilde, amplifikatörün kullanımı sadece bu test uygulamaları için sınırlı kalmayıp, farklı uygulamalarda da kullanılabilir. PI E-835 DuraAct tip amplifikatörün devre ayakları, dikdörtgen kesitli eni, boyu ve kalınlığı sırasıyla 370 mm, 387 mm ve 76 mm boyutlarında polietilen bir levha üzerinde cıvatalı bağlantı ekipmanlarıyla sabitlenmiştir. Burada, polietilen levha kullanılmasının nedeni, olası arızalarda, amplifikatördeki yüksek voltajları zemine olan transferini azaltmak içindir. İlerleyen çalışmalarda, test düzeneğini oluşturan tüm bileşenler için kompakt kuruma kutusu yapılabilir.

## 6.7 Deneysel Ölçüm Sonuçları

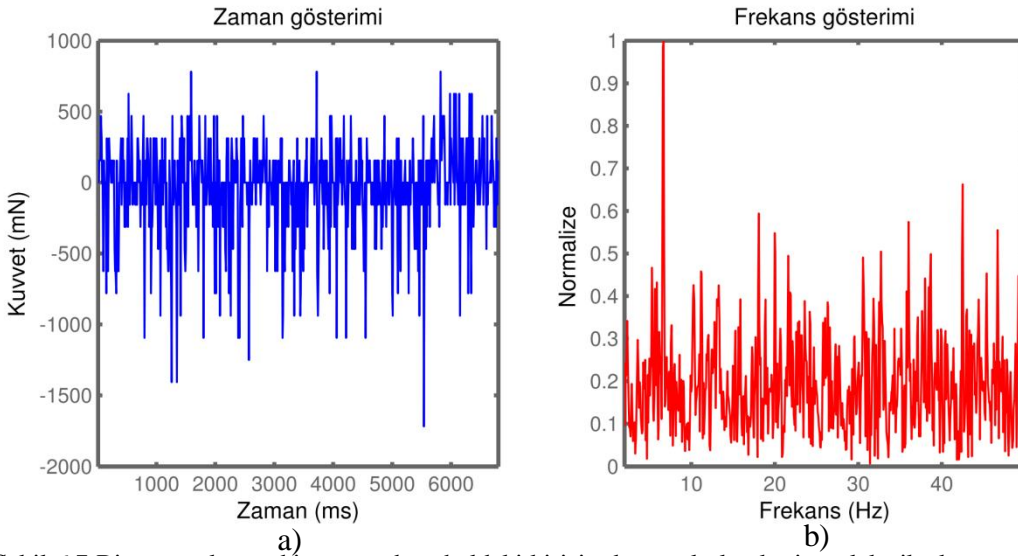
Deney dizaynı tamamlandıktan sonraki aşama, piezoelektrik yamaların kompozit kirişlerdeki etkilerini incelemek için düzeneğin, test ortamına getirilip bir takım testler uygulanmasıdır. Bu amaçla, Şekil 6.6'da verildiği üzere, destekleyiciler üzerinde monte edilen ve dış yüzeyine piezoelektrik iliştirilen kompozit kirişteki bütünlük olarak, çatlak hasarından dolayı oluşan süreksizliklerin piezoelektrik aktüatörle azaltılabile performansları araştırılmıştır.



Şekil 6.6 Deneysel test ortamı

Şekil 6.3 ve Şekil 6.6'da, sol ucu mesnetli, sağ ucu kayar mesnet, uzunluğu  $l = 280$  mm, genişliği  $b = 35$  mm, kalınlığı  $h = 1.25$  mm,  $x$  eksenindeki çatlak bölgesi ve piezoelektrik yama bölgesi,  $l_1 = 135$  mm ve yükün uygulandığı yer  $l_2 = 210$  mm olan  $[0/90/0]$  oryantasyon açıları ile bir kompozit kiriş verilmiştir. Öncelikle kirişin, sol ucu ankastre sağ ucu ise serbest mesnetli sınır koşulları dikkate alınarak, sinyal üreticisiyle üretilen voltajın, mekanik salınımlara düzgün olarak yansıtılıp yansıtılmadığı durumu araştırılmıştır. Bu amaçla sinyal üreticisiyle sinüzoidal (-4 V, +10 V) aralıklarında ve frekansı 7 Hz olan sinyaller oluşturulmuştur. Sinyal üreticiden gönderilen sinyaller amplifikatörde 25 kat artırıldıktan sonra (-100 V, 250 V) piezoelektrik aktüatörler aktifleştirilir.

Aktifleştirme sürecine bağlı olarak, kirişin  $l_2 = 230$  mm bölgesinde, 5 kN hassasiyetinde Shimadzu SLBL 5 kN, tipli yük sensörü, kirişe 1.5 mm mesafe uzaklıkta ayarlanarak 6.8 s boyunca kuvvet değerleri kaydedilmiştir. Burada veri alma ünitesinin örnekleme noktası 100 nokta olarak ayarlanmıştır. Toplam alınan veri noktası sayısı 680 dir (Şekil 6.7.a). Burada, sinyallerin yüksek düzeyde gürültü içermesinin nedeni, deneyde kullanılan yük sensörünün hassasiyeti, test edilen kuvvete karşın düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu gibi durumlarda, nispeten düşük yükler, hassasiyeti yüksek yük sensörleriyle ölçmek daha avantajlıdır. Elde edilen sinyaller gürültü içermesine rağmen, bu sinyaller üzerinde, hızlı Fourier dönüşümleri yapıldığında, Şekil 6.7.b'de görüldüğü gibi piezoelektrik aktüatöre uygulanan sinüzoidal frekans yakalanır. Hızlı Fourier dönüşüm uygulanması sonucu, piezoelektrik yamanın iliştiirildiği kirişin salınım frekansı da 7 Hz civarlarında olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuç, piezoelektriğe uygulanan elektriksel voltajın düzgün bir şekilde mekanik enerji olarak kirişin hareketine yansıdığı söylenebilir.



Şekil 6.7 Bir ucu ankastre bir ucu serbest haldeki kirişin deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre (-50 ile 250 V) aralığında dinamik voltaj uygulanması sonucu,  $x = 230$  bölgesinde elde edilen veriler. (a- Zaman gölgesi, b- Frekans bölgesi)

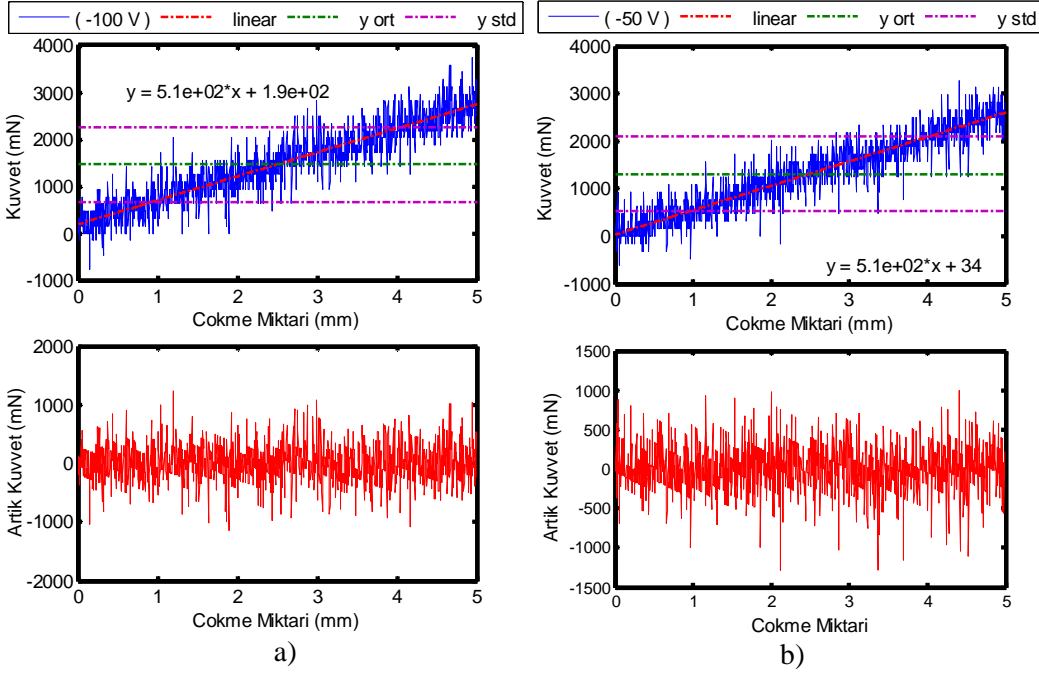
Kompozit kirişin sinüzoidal sinyaller altındaki dinamik salınımları incelendikten sonra, doğru akımla uygulanan statik voltajlar ile eksenel yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, aynı kompozit kiriş, bu sefer değişken piezoelektrik voltajlarda,  $l_2 = 210$  mm'de yük sensörü ile oluşan

çökmelere bağlı olarak kuvvet değişimleri ölçülmüştür. Burada, dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi, eksenel yüklerin üretilmesinde kullanılan cihaz yer değiştirme kontrollü olup, yer değiştirmeye bağlı olarak yük sensörü üzerinde oluşan kuvvetler izlenip kaydedilir.

Test aşamasında, eksenel basma kuvvetinin oluşturacağı dinamik rijitlik hareketlerinin minimize edilmesi amacıyla test hızı, statik olarak kabul edilebilen 5 mm/dk'lık gibi düşük bir değerle ayarlanmıştır. Cihazın stoplama seviyesi 5 mm olarak ayarlanmıştır. Bir başka deyişle, kirişin  $l_2 = 210$  mm'de çökme değeri 5 mm'ye ulaştığında sistem otomatik olarak durup veriler kaydedilir. Burada, bu değerde stoplama seviyesinin seçilmesinin nedeni, kirişin sadece lineer elastik bölgedeki davranışları incelenip, bir başka şekilde kirişin yapısında plastik deformasyonlar oluşumlarına izin vermemektedir. Aksi takdirde, hem kompozit kiriş, hem de piezoelektrik aktüatör kayma gerilmelerinden dolayı hasara uğrayabilir. Dolayısıyla alınan veri noktası, 20 nokta/s x 60 s/dk x 1dk = 1200'dür.  $l_1 = 135$  mm'de çatlak derinliği  $a = 0.4166$  mm içeren kompozit kirişe iliştirilen piezoelektrik yamaya, farklı voltajlarda uygulanıp  $l_2 = 210$  mm'de ölçülen çökme-kuvvet ilişkileri Şekil 6.8- 6.11'de verilmiştir. Daha önceki kısımlarda belirtildiği üzere, Şekil 6.8-6.11'da verilen ölçüm verilerinin yüksek oranda gürültü içermesinin nedeni, test edilecek kuvvete ilişkin hassasiyet aralığının, deneyde kullanılan yük sensörünün hassasiyetinin ölçüm aralığının düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Piezoelektrik aktüatöre statik olarak -100 V ile -50 V uygulanması sonucu  $l_2 = 210$  mm noktasında elde edilen çökme-kuvvet eğrileri sırasıyla Şekil 6.8.a ve 6.8.b'de verilmiştir. Burada, grafiklerin üst kısımlarında yer alanlar deneysel ölçüm verilerini, alttakiler ise ölçümler üzerine lineer eğri uydurma sonucu elde edilen polinoma ilişkin artık değerlerdir. Şekil 6.8.a'da gösterilen ölçüm verileri,  $V_{aktüatör} = -100$  V için, genel olarak (0-5) s aralığında, (0 - 3000 $\mu$ N) aralığında değiştiği görülmektedir.  $V_{aktüatör} = -100$  V için elde edilen çökme-kuvvet değerleri için uygulanan lineer eğri uydurma sonucu elde edilen denklem  $y = mx+n$  olarak değerlendirildiğinde elde edilen  $m$  ve  $n$  katsayıları, sırasıyla 510.89 ve 189.84 şeklindedir. Dolayısıyla elde edilen denklem Şekil 6.8.a üzerinde verildiği gibi  $y = 189.84x+189.84$  gibi olur. Buna bağlı olarak elde edilen

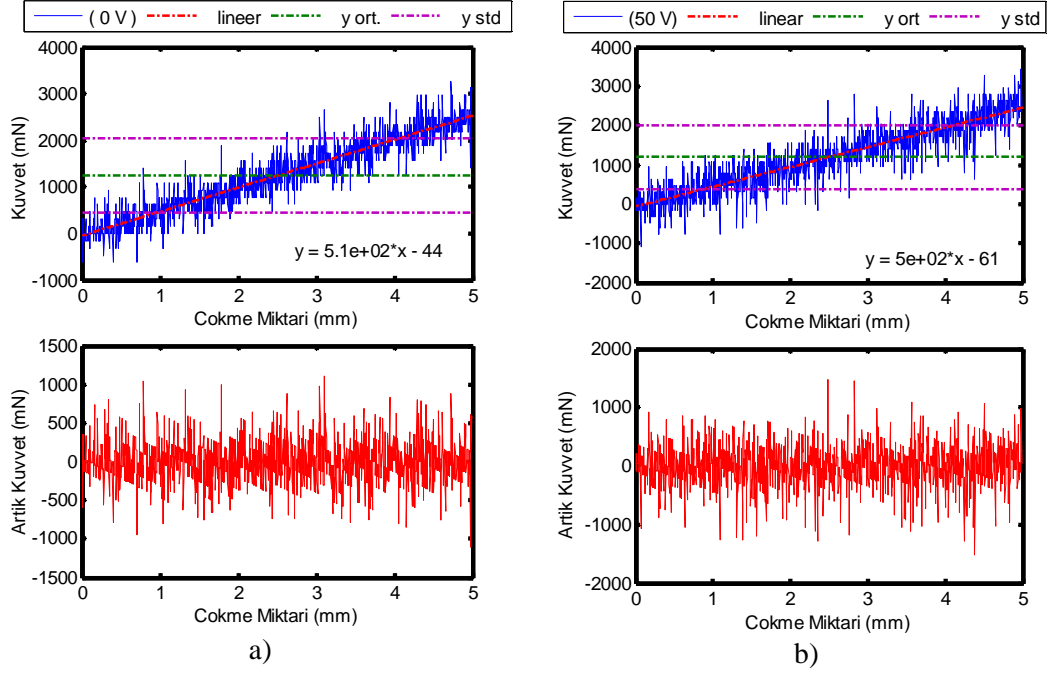
artık kuvvet değerleri Şekil 6.8.a'nın alt grafiğinde verilmiştir. Sinyal gürültüleri, -1000  $\mu\text{N}$  ile +1000  $\mu\text{N}$  aralığında olduğu görülmektedir.



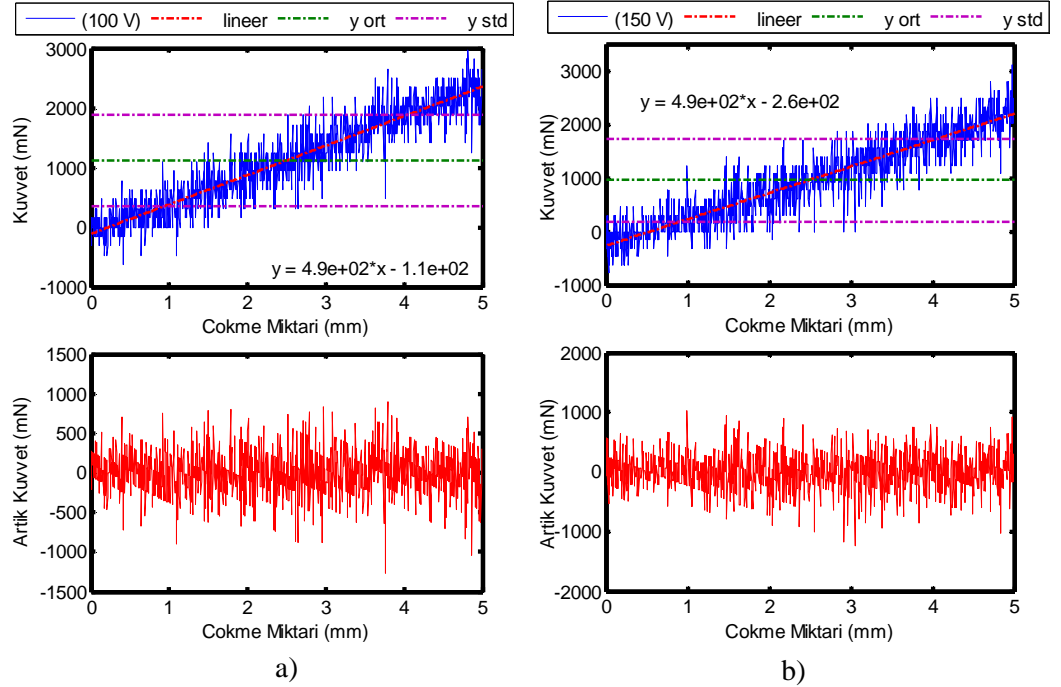
Şekil 6.8 Deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanması sonucu  $x = 210$  mm noktasında elde edilen çökme-kuvvet ilişkisi [a- üst) -100 V için ölçülen veriler, a- alt) -100 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler, b- üst) -50 V için ölçülen veriler, b- alt) -50 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler]

Piezoelektrik aktüatöre,  $V_{\text{aktüatör}} = -50$  V uygulanarak elde edilen çökme-kuvvet ilişkisi Şekil 6.8.b'de (üst) ve buna bağlı olarak lineer eğri uydurma uygulanması sonucu elde edilen artık kuvvet değerleri Şekil 6.8.b'de (alt) verilmiştir. Elde edilen polinom,  $y = 512.89x + 34.307$  şeklindedir. Aynı şekilde,  $V_{\text{aktüatör}} = 0, 50$  V, 100 V, 150 V, 200 V ve 250 V için,  $l_2 = 210$  noktasında elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 6.9-6.11'de (üst) ve buna bağlı olarak lineer eğri uydurma sonucu elde edilen artık değerler de Şekil 6.9-6.11'de (alt) verilmiştir.

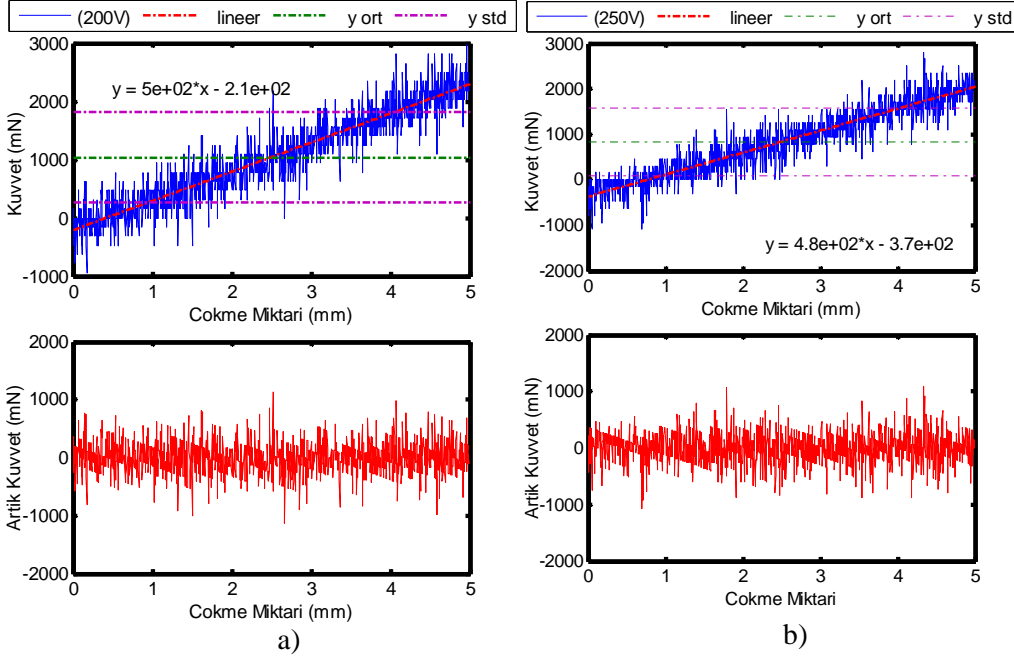
Burada, farklı voltajlar için, her ne kadar birbirine çok değerler alınsa da, şekillerde görüldüğü üzere, eğri uydurma sonucu farklı denklemler elde edilmiştir.



Şekil 6.9 Deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanması sonucu  $x = 210$  mm noktasında elde edilen çökme-kuvvet ilişkisi [a- üst) Voltajın uygulanmadığı durum için ölçülen veriler, a- alt) Voltajın uygulanmadığı durumda lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler, b- üst) 50 V için ölçülen veriler, b-alt) 50 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler]



Şekil 6.10 Deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanması sonucu  $x = 210$  mm noktasında elde edilen çökme-kuvvet ilişkisi [a- üst) 100 V için ölçülen veriler, a- alt) 100 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler, b- üst) 150 V için ölçülen veriler, b- alt) 150 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler]



Şekil 6.11 Deneysel olarak piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanması sonucu  $x = 210$  mm noktasında elde edilen çökme-kuvvet ilişkisi [a- üst) 200 V için ölçülen veriler, a- alt) 200 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler, b- üst) 250 V için ölçülen veriler, b- alt) 250 V için lineer eğri uydurma sonucu elde edilen veriler

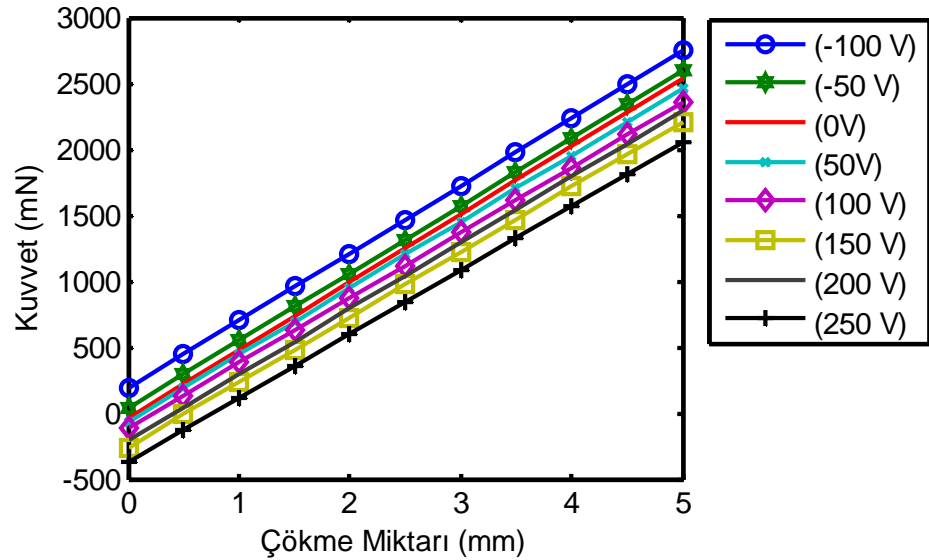
Piezoelektrik aktüatörlere farklı voltaj değerlerinde ve  $5 \text{ mm/dk}$  hızında aksenal kuvvet uygulanması sonucu,  $x = 210$  mm'de elde edilen çökme-kuvvet verileri üzerinde lineer eğri uydurma sonucu elde edilen polinom katsayıları Tablo 6.1'de verilmiştir. Elde polinom eğim trendi birbirine benzemekte, ancak başlama noktalarında farklılıklar görülmektedir (Şekil 6.12). Burada, belirtilmesi gereken önemli hususlardan birisi, test başlangıcında piezoelektrik yamaya voltaj uygulanmadan yük sensörünün kalibrasyonu sağlanmıştır. Yük sensörünün kalibrasyonu yapıp "0" olarak kabul edilen başlangıç noktasına getirildikten sonra, piezoelektrik aktüatör aktifleştirilip teste başlanmıştır. Dolayısıyla, başlangıç noktalarındaki kuvvet değerlerinin farklı olmasının nedeni, piezoelektrik yamaya uygulanan voltajın farklı olduğundan kaynaklanmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi, kiriş sadece lineer elastik bölgede, yani yapısında plastik deformasyonlar oluşmadan sadece 0-5 mm aralığında test edilmiştir.

Tablo 6.1 Ölçüm veriler üzerinde lineer eğri uydurma sonucu elde edilen polinoma ilişkin katsayılar

Volt (V)	m	n
-100	510.89	189.84
-50	512.89	34.307
0	514.94	-43.949
50	503.64	-61.343
100	492.82	-111.62
150	494.84	-262.54
200	500.47	-208.45
250	482.86	-367.66

$y = mx + n$  Burada  $y$ , kuvveti,  $m$  ve  $n$  ise lineer eğri katsayılarını gösterir

Şekil 6.12 incelendiğinde, en yüksek ve en düşük kuvvet değerleri sırasıyla -100 V ve +250 için elde edilmiştir. Bir başka deyişle, negatif yönde uygulanan voltajla daha yüksek kuvvet elde edilmiştir. Bu sonuç ta, negatif yönde uygulanan voltajlar ile daha iyi bir bakımin yapılabilceğini göstermektedir.



Şekil 6.12 Piezoelektrik aktüatöre voltaj uygulanıp elde edilen veriler üzerinde lineer eğri uydurma sonucu, kuvvetin uygulandığı  $x = 210$  mm noktasında elde edilen deneysel çökme- kuvvet ilişkisi

## 6.8 Analitik Sonuçlar

Öncelikle kompozitten imal edilen kiriş üzerinde laboratuvar ortamında testler uygulanarak elde edilen, çökme-kuvvet eğri sonuçları açısından teorik formülasyonlarla karşılaştırılmaları yapılmıştır. Deneysel olarak test aşamasında kullanılan tabakalı kompozit kiriş ve piezoelektrik yamaya ilişkin malzeme özellikleri Tablo 6.2'de verilmiştir. Analitik yöntemde kullanılan malzeme özellikleri ve uygulanan sınır koşulları deneysel yöntemle aynı olarak kabul



edilmiştir. Deneysel testte kullanılan kompozit kirişin [0/90/0] tabaka oryantasyon açıları, analitik testlerde de aynı kabul edilmiştir. Bunun yanında deneysel olarak Şekil 6.3'te verilen parametrik değişkenler olduğu gibi analitik hesaplamalarda da kullanılmıştır. Bir başka deyişle, burada kirişin uzunluğu  $l = 280$  mm, kalınlığı  $h = 1.25$  mm, genişliği  $b = 35$ mm, piezoelektrik uzunluğu  $p_1+p_2 = 60$  mm, kalınlığı  $\delta = 0.4$  mm, genişliği de kirişin kalınlığı gibi yani  $b = 35$  mm dir. Bunun yanında, kirişte bir tabaka kesilerek yapısında çatlak hasarı oluşturulmuştur. Burada, kirişte oluşturulan hasarın  $x$  eksenine olan mesafesi  $l_1 = 135$  mm, çatlak derinliği  $a = 0.4166$  mm'dir. Kuvvetin uygulandığı bölgenin  $x$  eksenine olan uzaklığı  $l_2 = 210$  mm'dir. Ölçümlerde veri alım ünitesinin örnekleme noktası saniyede 20 olarak ayarlanmıştır. Toplam alınan veri nokta sayısı 1200 dür.

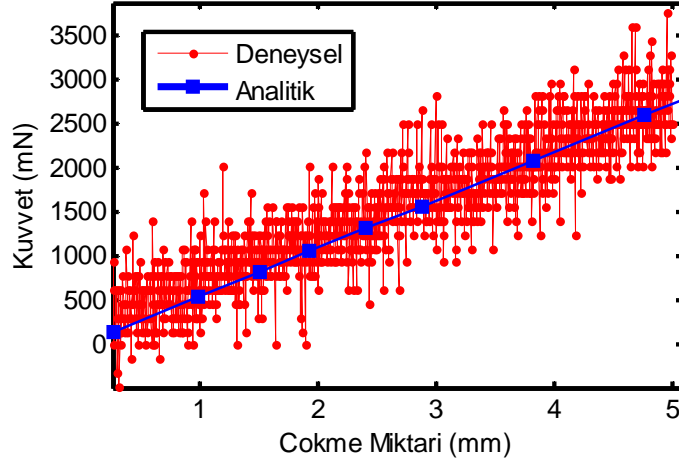
Tablo 6.2 Kompozit kiriş ve piezoelektriğe ilişkin malzeme özellikleri

Parametre	Kompozit Kiriş	Piezoelektrik
$E_{11}$ (MPa)	42000	$C_{33}^D = 10000$
$E_{22}$ (MPa)	7800	
$\nu_{12}$	0.29	0.34
$\nu_{13}$	0.29	
$\nu_{23}$	0.3	
$G_{12}$ (MPa)	4800	
$G_{13}$ (MPa)	4800	
$G_{23}$ (MPa)	2000	
Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1364	7800
Piezoelektrik sabiti $e_{31}$ (C/m <sup>2</sup> )	-	-5.4

Çatlak oranı  $(a/h) = 0.333$ , [0/90/0] tabaka oryantasyonlarından oluşan kompozit bir kirişin, üst yüzeyindeki piezoelektrik aktüatöre -50 V uygulanması sonucu,  $x = 210$  mm'de elde edilen deneysel ve analitik çökme-kuvvet ilişki sonuçları Şekil 6.13'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, deneysel ve analitik sonuçlar birbirleriyle uyum içerisinde oldukları görülmektedir.

Uygulanan kuvvete bağlı olarak analitik yöntemde elde çökme ile kuvvet sonuçları arasındaki ilişki deneysel sonuçlarla doğrulandıktan sonraki aşama,

kompozit kirişlerdeki değişik parametrelerin bakım performansına olan etkilerini incelemektir.

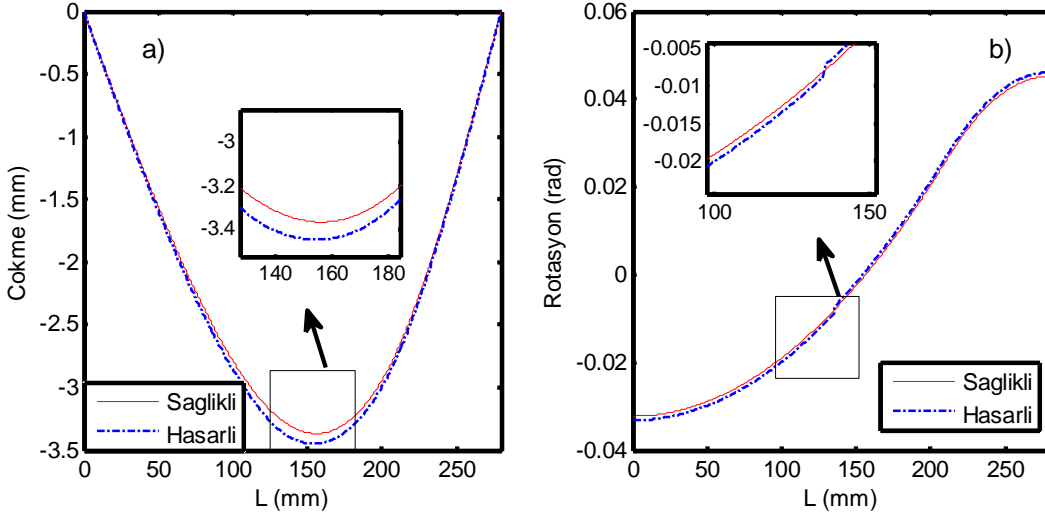


Şekil 6.13 Piezoelektrik aktüatöre -50 V uygulanması sonucu,  $x = 210$  mm'de elde edilen deneysel ve analitik çökme-kuvvet ilişki sonuçları

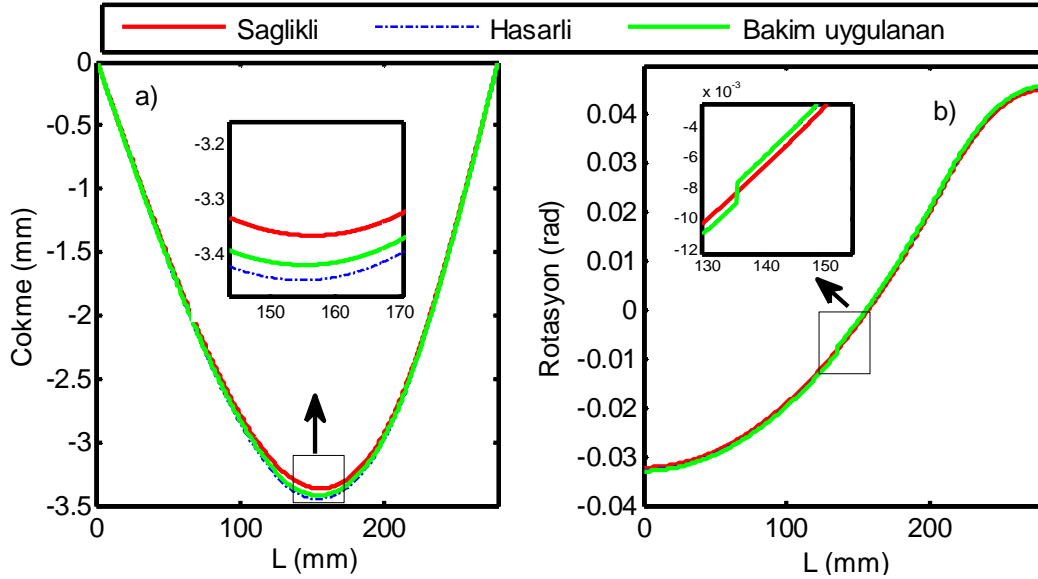
Çatlak oranı  $(a/h) = 0.333$ ,  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N uygulanması sonucu sağlıklı ve çatlak içeren kompozit bir kirişe ilişkin  $l$  uzunluğu boyunca elde edilen çökme ve rotasyon eğrileri Şekil 6.14'te verilmiştir. Burada, yapısında çatlak içeren kompozit kirişin, çatlak hasarından dolayı daha çok çökmenin olduğu görülmektedir. Bunun yanında, sağlıklı kirişin rotasyon eğrileri daha düzgün ve sürekli olurken, çatlak içeren kompozit kirişin yapısında süreksizler görülmektedir (Şekil 6.14).

Piezoelektrik yama aktifleştirilerek Şekil 6.14'te verilen çökme ve rotasyon eğrilerindeki süreksizlikler minimize edilerek bakımının yapılması amaçlanmıştır. Aşırı voltajın uygulanması, kirişte aşırı çökmenin oluşmasına, az uygulanması ise kirişteki süreksizliklerin tam olarak azaltmamasına neden olur. Dolayısıyla, hasarlı kompozit kirişte, hasardan dolayı oluşan süreksizlikler minimize edilerek sağlıklı kompozit kiriş davranması istenir. Bu amaçla kirişte hasar değerlendirilmesi yapılabilmesi için Bölüm 2.8'de verilen YSİ sisteminin temel aksiyomlarında belirtildiği gibi kirişin sağlıklı durumunun bilinmesi gerekir. Eğer, kirişin sağlıklı durumuna ilişkin veriler mevcut değilse, kirişteki hasardan dolayı oluşan lineer olmayan davranış sinyalleri üzerine eğri uydurma, zaman seri modelleri, çok katmanlı perseptronlar veya makine öğreniminde özellikle destek

vektör makinelerinde yaygın olarak kullanılan regresyon analiz teknikleriyle kirişin başlangıç durumu tahmin edilir. Bu şekilde yapının hasar öncesi ve sonrası arasındaki koşullar değerlendirilerek hasar tanılması yapılmaktadır.



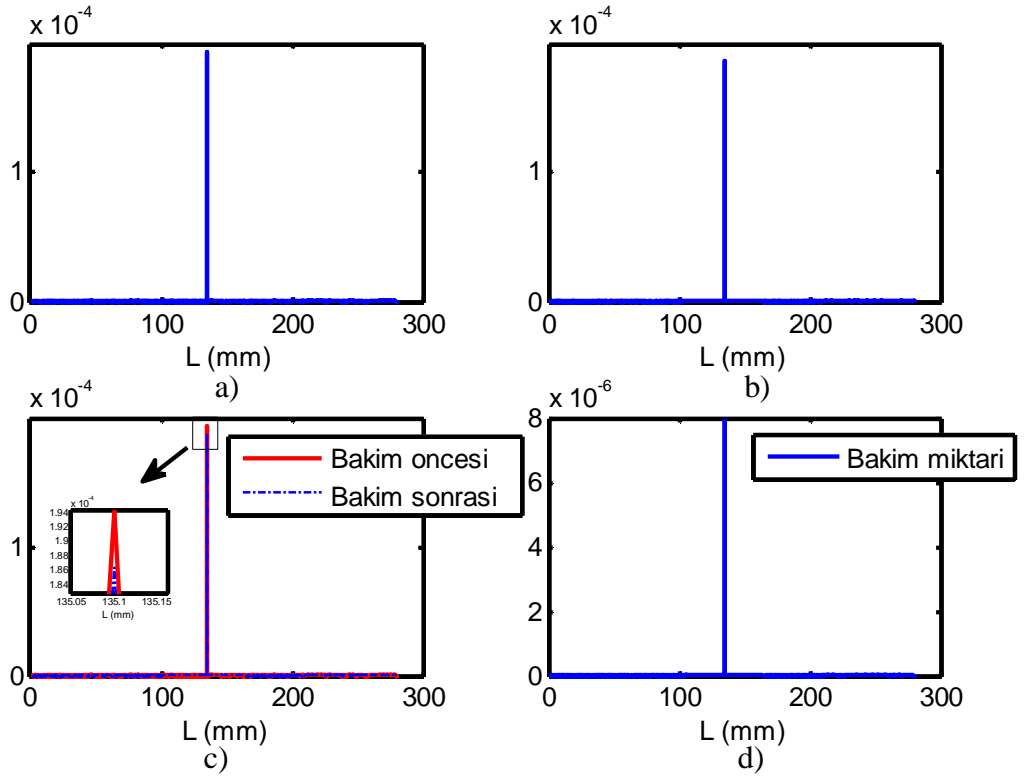
Şekil 6.14  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N uygulanması sonucu sağlıklı ve çatlak içeren bir kirişte uzunluk boyunca elde edilen çökme ve rotasyon değerleri (a- çökme, b- rotasyon)



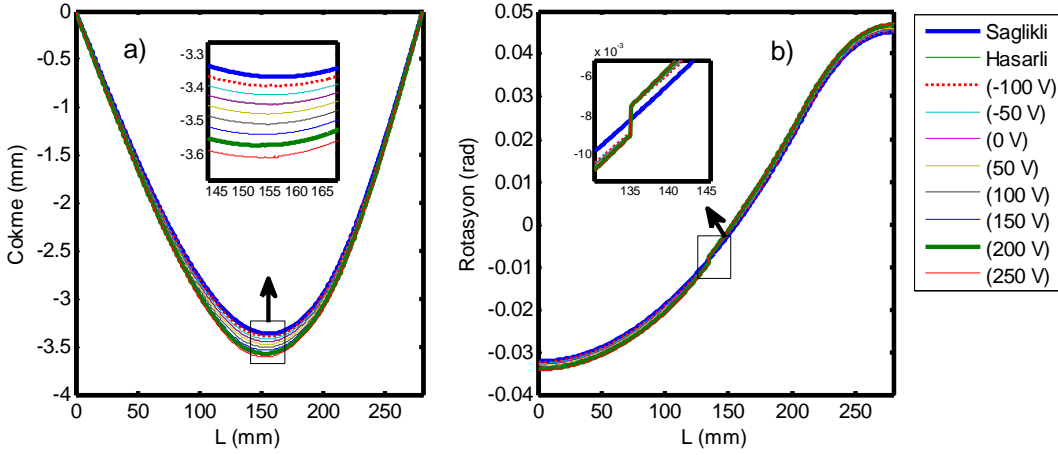
Şekil 6.15  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N ve piezoelektriğe  $-50$  V uygulanması sonucu elde edilen değerler (a- çökme, b- rotasyon)

Çatlak oranı ( $a/h$ ) = 0.333 olan bir kirişte,  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N kuvvet ve piezoelektrik yamaya keyfi olarak  $-50$  V uygulanması sonucu, bakım sonrası elde edilen çökme ve rotasyon eğrileri Şekil 6.15'te verilmiştir. Burada, görsel olarak, direk çökme eğrilerinden hasar tespitinin belirlemek zordur. Ancak, rotasyon eğrileri üzerinden hasar tespitleri yapmak nispeten daha kolaydır. Şekil

6.16'da bölüm 4.2.2'de, bir boyutlu durumlar için birim şekil değiştirme enerjisinin uygulanması sonucu elde edilen hasar tespit sonuçları verilmiştir. Burada, BŞDE hasar tespit algoritmasıyla hasarın olduğu  $l_1 = 135$  mm noktası rahat bir şekilde tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak piezoelektrik aktüatöre keyfi olarak  $-50$  V uygulanmasıyla BŞDE'de oluşan hasar genliklerinin azaldığı görülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi, her ne kadar piezoelektrik yamaya keyfi olarak  $-50$  V uygulandıktan sonra hasar miktarı azalsa da, optimal voltajın uygulanmasının akabinde hasar miktarının daha da azalacağı aşikârdır.

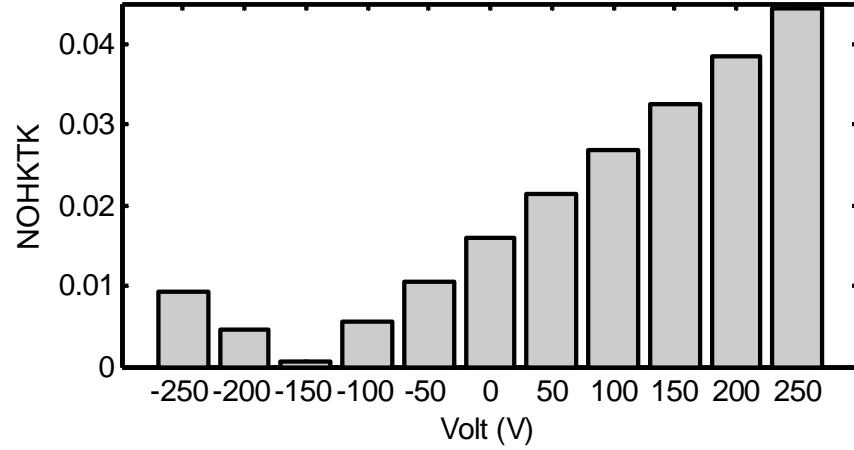


Şekil 6.16  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N için BŞDE ile hasar tespit ve bakımı. a) Bakım öncesi hasar tespiti, b) Bakım sonrası ( $-50$  V ) hasar tespiti, c) Bakım öncesi ve sonrası öncesi hasar tespiti, d) Bakım miktarı

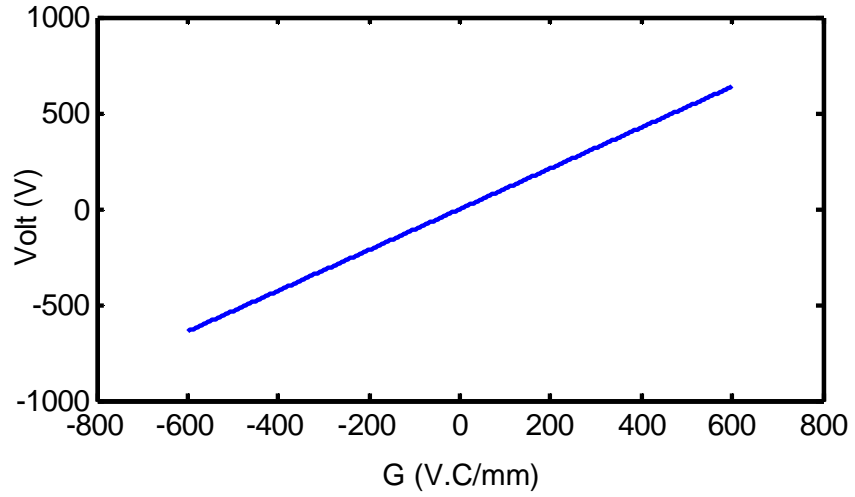


Şekil 6.17  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N ve piezoelektriğe değişik voltaj uygulanması sonucu elde edilen değerler (a- çökme, b- rotasyon)

Çatlak oranı ( $a/h$ ) = 0.333 içeren  $[0/90/0]$  tabakalı oryantasyon açılarındaki kompozit bir kirişte,  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N eksenel yük ve piezoelektrik aktüatörlere değişik voltajlar uygulanması sonucu elde edilen çökme ve rotasyon eğrileri Şekil 6.17'de verilmiştir. Burada, piezoelektrik aktüatörlere yüksek voltajlar uygulandığında bakımın tersi yönünde etkidiği görülmektedir. Aynı şekilde piezoelektrik yamadaki farklı voltajlar için BŞDE ile hasar tespitlerinin yapılmasının akabinde, normalize ortalama hata karenin karakökü (NOHKTK) ile optimal volt bulunmuştur. Örneğin farklı voltajlar için elde edilen NOHKTK değerleri Şekil 6.18'de verilmiştir. Burada, belli bir değerden sonra voltaj arttıkça NOHKTK değerlerinin arttığı görülmektedir. Optimal değerler, -150 V ile -200 V arasında görülmektedir. Uygulanması gereken voltajın optimal değeri,  $G$ 'nin +600 V.C/mm'dan -600 V.C/mm'e, birer azalışla, iteratif olarak aranılarak optimum  $G$  değeri elde edilir. Burada  $G = 600$  V.C/mm'den başlanılmasının nedeni deneysel olarak piezoelektrik aktüatörlerin çalışma voltajları -250 V ile 1000 V arasında olduğundandır. Nitekim  $G$  ile  $V$  arasında Şekil 6.19'da verildiği gibi lineer bir ilişki mevcuttur. Bu nedenle işlemcinin çözüm gücü ve süresinin azaltılması amacıyla  $G$ 'nin bu değerden başlatılması uygun görülmüştür. Daha sonra bulunan  $G$  değeri, denklem 6.34'a konularak optimum uygulanması gereken voltaj da elde edilmiş olur.

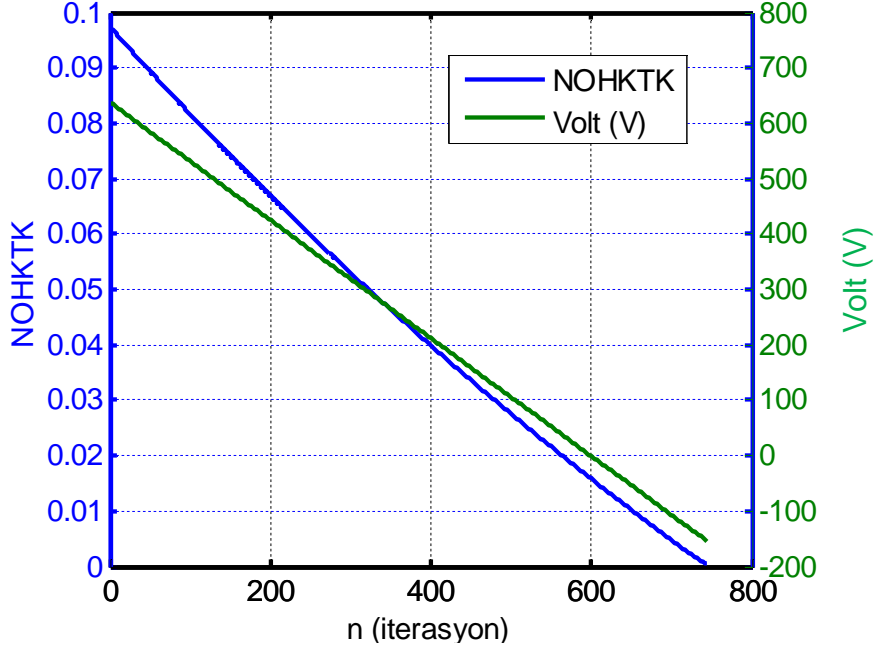


Şekil 6.18  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N için, normalize ortalama hata karekök değerleri (optimum voltaj: -150 V ile -200 V arasında)



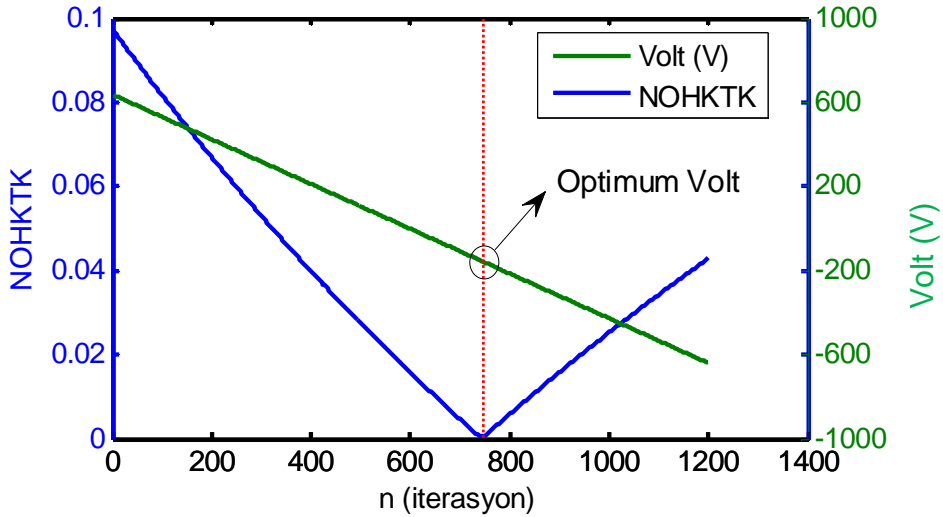
Şekil 6.19  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N için piezoelektriğe uygulanan voltaj ile G arasındaki ilişki

Çatlak oranı  $(a/h) = 0.333$  içeren  $[0/90/0]$  tabakalı oryantasyon açılarındaki kompozit bir kirişte,  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N eksenel yük ve  $NOHKTK = 5E-4$  kabul edilip,  $G = 600$  V.C/mm'den başlanarak ve birer azalma ile iteratif çözüm sonucunda elde edilen optimum voltaj -153.24 olarak bulunmuştur (Şekil 6.20). Optimum voltaj 745. iterasyonda elde edilmiştir.



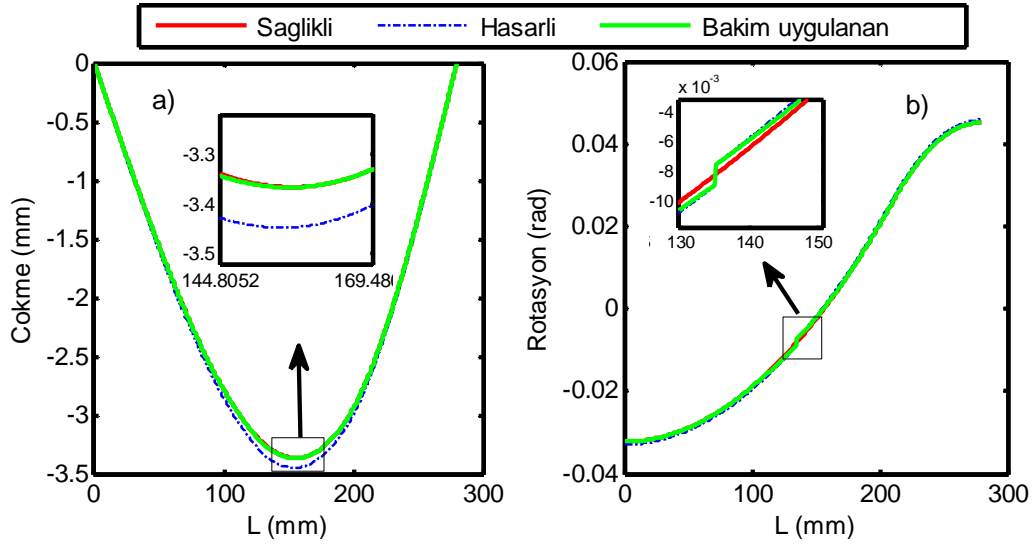
Şekil 6.20  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N için iterasyona bağlı olarak bakım aşamasında uygulanması gereken voltajın NOHKTK'e bağlı olarak optimize edilmesi [ $(a/h) = 0.333$ ]

Bunun yanında  $G = +600$  V.C/mm'den başlanılıp,  $G = -600$  V.C/mm'e kadar 1'er azalma değeriyle optimal voltaj araması yapıldığında, minimum NOHKTK =  $4.9581E-04$  ve 745. iterasyona karşılık geldiği saptanmıştır (Şekil 6.21).



Şekil 6.21  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N uygulanıp ve  $G = (-600$  V.C/mm,  $600$  V.C/mm) arasında arama yapılarak bakım aşamasında uygulanması gereken voltajın NOHKTK'e bağlı olarak optimize edilmesi [ $(a/h) = 0.333$ ]

Hasar tespitinde BŞDE kullanılıp, uygulanması gereken optimal kontrol voltajı OHKTK'den yararlanılarak elde edilen bakım sonrası çökme ve rotasyon eğrileri Şekil 6.22'de verilmiştir. Nitekim, şekil 6.21'de görüldüğü üzere, çatlak oranı  $(a/h) = 0.33$  oranında hasar içeren kompozit bir kirişin bakımı için uygulanması gereken optimal voltaj, -154.3055 V dir.



Şekil 6.22 Çatlak oranı  $(a/h) = 0.33$  ve  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N uygulanıp voltajın optimize edildikten sonra, elde edilen optimum voltajın tekrar uygulanarak bakım uygulandıktan sonra elde edilen a) çökme, b) rotasyon değerleri. (Optimize edilen voltaj = -154.3055)

Şekil 6.22'de, kompozit kirişin piezoelektrik aktüatörlerle bakım uygulanması sonucunda elde edilen bakımlı kompozit kirişe ait çökme eğrilerinin, sağlıklı kirişe çok yakın olduğu görülmüştür. Bunun yanında rotasyon eğrileri açısından değerlendirildiğinde, bakımı yapılan kompozit kirişin, hasarlı kompozit kirişe nazaran, süreksizliklerin azaldığı görülmüştür. Ancak, piezoelektrik aktüatörlerin aktifleştirilmesinden sonra, rotasyon eğrilerinde oluşan süreksizlikler nispeten hasarlı kirişe göre azalsa da, sağlıklı kirişe göre tam olarak kaldırıldığı söylenemez.

Değişik çatlak oranı ile değişik  $P$  kuvvetlerine bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Burada uygulanan gerek  $P$  yükünde, gerekse  $(a/h)$  çatlak oranlarındaki artışlara bağlı olarak, optimal voltajın da negatif yönde şiddetinin arttığı görülmüştür. Çünkü çatlak oranlarında artışlar kompozit kirişteki rijitlik düşüşlerine ve rijitlik düştükçe bakım için piezoelektrik yamaya uygulanan voltajda artar. Burada not edilmesi önemli



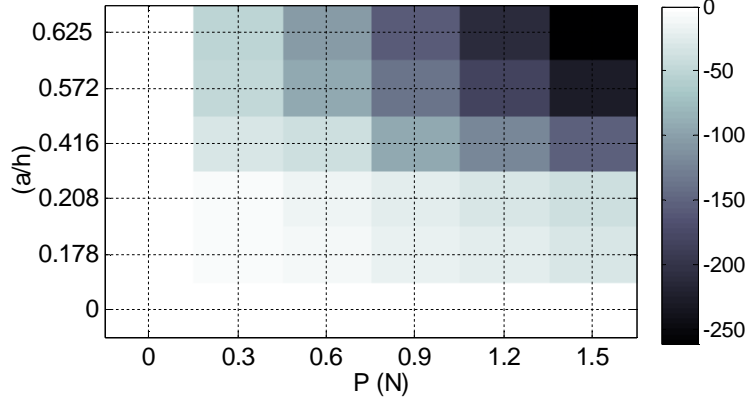
hususlardan birisi, voltaj değeri, 0'dan pozitif yöne veya negatif yöne doğru ilerledikçe, voltaj değerinin büyüdüğünü gösterir. Bir başka deyişle, negatif yönde 0'dan uzak olan değerler 0'a yakın değerlerden küçük olarak bilindiği halde, anlam karmaşasının engellenmesi açısından, burada bu şekilde adlandırılmayacaktır. Çünkü fiziksel olarak negatif yönde, 0'dan uzak olan voltaj değerleri 0'a yakın olan değerlerden büyüktür. Bu yüzden burada büyüklük, voltajın şiddeti ile isimlendirilecektir. Dolayısıyla sonuçların yorumlanmasında bu hususun dikkate alınması gerekir. Örneğin Tablo 6.3'te  $a/h = 0.14286$ ,  $P = 0.3$  N ve  $P = 0.6$  N için elde edilen optimum voltaj değerleri sırasıyla -5.4765 V ve -11.4931 V olarak bulunmuştur. Yukarıdaki bilgiler ışığında,  $P = 0.6$  N için elde edilen optimum voltaj değeri,  $P = 0.3$  N'dan daha büyük olduğu söylenebilir. Bu şekilde  $P$  ve değişken çatlak oranlarının artışlarına paralel olarak piezoelektrik yamalara uygulanması gereken optimum voltajın da arttığı görülmüştür. Ancak,  $P = 1.5$  N ve  $(a/h) = 0.5$ 'ten büyük değerlerindeki hasar kontrolleri, deneysel olarak negatif yönde maksimum -250 V'a kadar çalışan bu şekildeki aktüatör kullanılarak bakımlarının yapılamayacağı unutulmamalıdır. Çünkü 6.6 kısmında belirtildiği gibi bu çeşit aktüatörün çalışma voltajları -250 V ile +1000 voltaj aralığındadır.

Tablo 6.3 Kirişteki çatlak büyüklüğü ve değişken kuvvete bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltajları

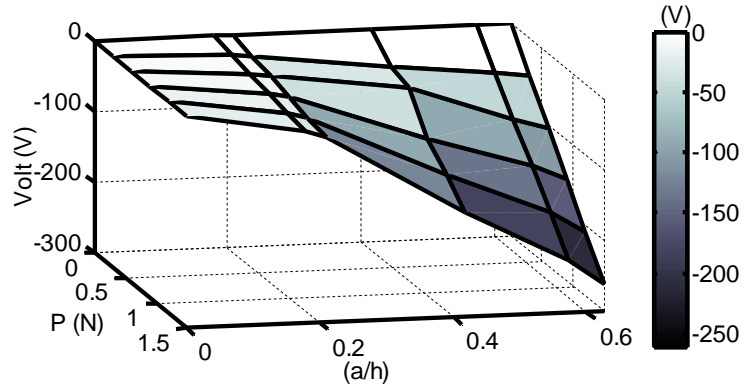
$(a/h) \backslash P$ (N)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
0.00000	0	0	0	0	0	0
0.14286	0	-5.7465	-11.4931	-17.2396	-22.9862	-28.7327
0.16667	0	-7.6621	-15.3241	-22.9862	-30.6483	-38.3103
0.33333	0	-30.2226	-40.4452	-90.6678	-120.89	-151.113
0.45833	0	-44.9082	-89.8164	-134.725	-179.633	-224.541
0.50000	0	-52.1446	-104.289	-156.434	-208.579	-260.723

Aynı şekilde, değişik çatlak oranı ile değişik  $P$  kuvvetlerine maruz bir kirişteki hasarın bakımı için piezoelektrik yamaya uygulanması gereken optimum voltaj kontür grafik olarak Şekil 6.23'de ve yüzey grafik olarak Şekil 6.24'te verilmiştir. Burada, çubuk gri renk dağılımları voltaj ölçeğini göstermektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere  $P = 0$  ve  $a/h = 0$  için optimum voltajda 0'dır. Bu çalışmada dinamik etkilerin çatlak davranışlarına etkileri incelenmemiştir. Bir başka deyişle, hesaplamalar kirişin statik kabulü yapılarak, kütle değişkeni işlemler içerisinde dâhil edilmemiştir. Bu yüzden  $P = 0$  için  $V_{\text{aktüatör}} = 0$  olarak

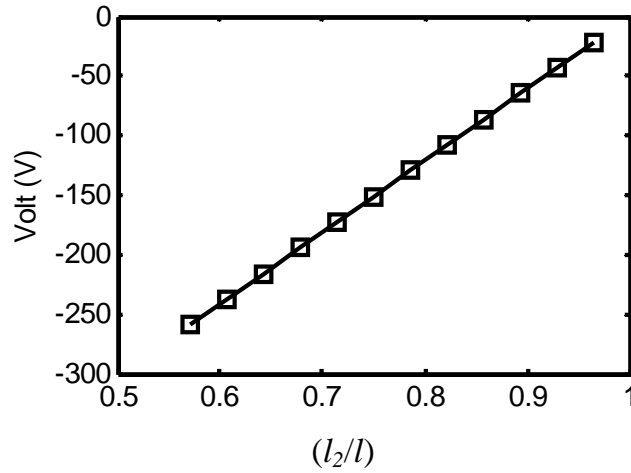
bulunmuştur. Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te,  $P$  ve  $(a/h)$ 'in 0'dan sonraki artışlara bağlı olarak elde edilen optimal voltajlar negatif yönde lineer olarak artış gösterdiği görülmektedir. Maksimum optimum voltaj,  $P = 1.5$  N ve çatlak oranının  $(a/h) = 0.5$  olduğu noktada elde edilmiştir (Tablo 6.3).



Şekil 6.23 Kirişteki değişken çatlak büyüklüğü ve değişken kuvvete bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltajları (kontür grafik)



Şekil 6.24 Kirişteki değişken çatlak büyüklüğü ve kuvvete bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltajları (yüzey grafik)



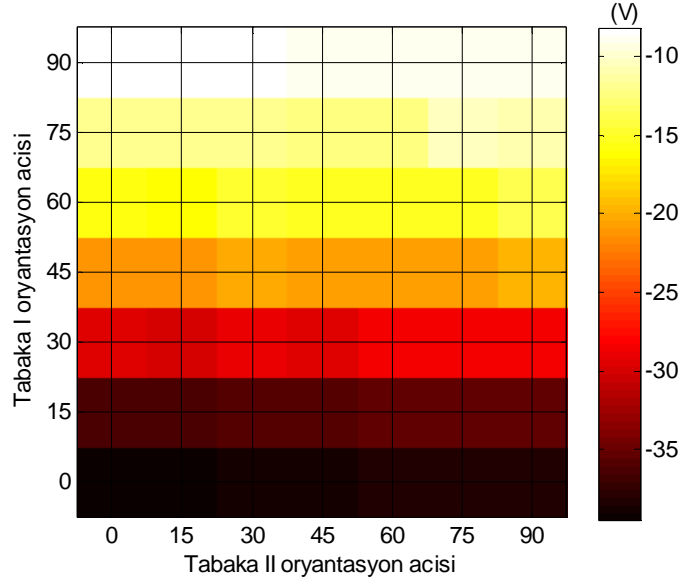
Şekil 6.25 Kirişte uygulanan kuvvet lokasyonuna bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltajı

Çatlak oranı ( $a/h$ ) = 0.333 içeren [0/90/0] tabakalı oryantasyon açılarındaki kompozit bir kirişte,  $P = 1.5$  N'in uygulandığı değişik ( $l_2/l$ )'ye bağlı olarak elde edilen optimum voltajlar Şekil 6.25'te verilmiştir. Burada, kuvvetin uygulandığı lokasyonun  $x$  ekseninde attıkça, optimal piezoelektrik voltajın şiddeti düşmektedir. Bir başka deyişle, kuvvet ile çatlak hasarının bulunduğu lokasyon arasındaki mesafe azaldıkça, kompozit kirişteki çatlak hasarının bakımı için uygulanması gereken optimum voltaj da artmaktadır (Şekil 6.25).

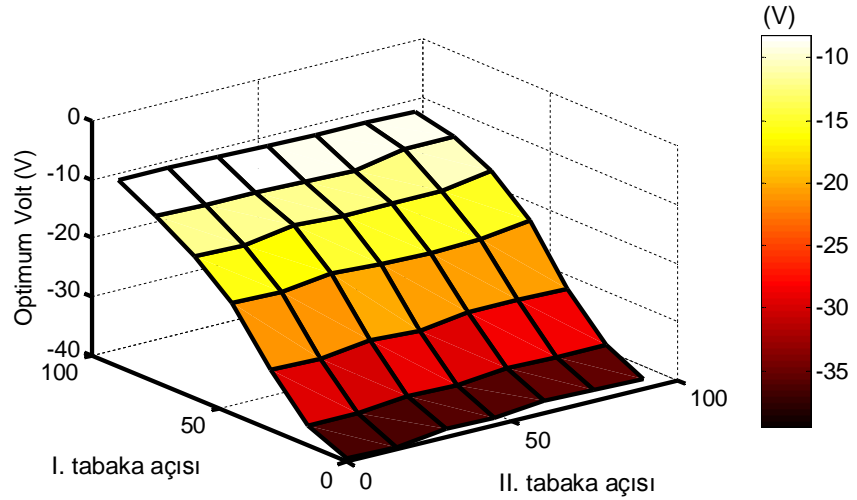
Tablo 6.4 Kompozit kirişin bakımı için 1. ve 2. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj ( $a/h = 0.17$ , Tabaka 3. oryantasyon açısı:  $90^\circ$ )

(I) \ (II)	0	15	30	45	60	75	90
0	-39.39	-39.46	-38.60	-38.85	-38.04	-38.22	-38.31
15	-36.40	-36.52	-35.68	-35.96	-35.11	-35.26	-35.44
30	-29.60	-29.80	-28.90	-29.23	-28.23	-28.31	-28.57
45	-20.94	-21.23	-20.22	-20.61	-20.79	-20.73	-19.51
60	-15.82	-16.04	-14.74	-15.04	-15.21	-15.20	-13.73
75	-11.63	-11.74	-11.92	-12.12	-12.26	-10.56	-10.72
90	-8.15	-8.28	-8.48	-8.69	-8.82	-8.85	-9.05

Çatlak oranı ( $a/h$ ) = 0.17 olan kompozit bir kirişte,  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N uygulanıp, alttan sırayla 1. ve 2. tabakaların oryantasyon açılarına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri Tablo 6.4'te verilmiştir. Bunlara ilişkin kontür grafik ve yüzey grafikleri de sırasıyla Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de verilmiştir. Birimler, derece cinsindedir. Burada, kompozit kirişe ilişkin 3. tabakasının oryantasyon açısı  $0^\circ$  dir. Çatlak hasarı kirişin 1. tabakasında olup, 1. tabakanın oryantasyon açısındaki artışlara bağlı olarak, piezoelektrik yamaya uygulanması gereken optimum voltaj değerleri, 2. tabakanın oryantasyon açısının artışlara nazaran daha yüksek olarak bulunmuştur. Örneğin 2. ve 3. tabakanın oryantasyon açısı  $0^\circ$  olarak kabul edildiğinde ve buna bağlı olarak ta 1. tabakanın oryantasyon açısı  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  için, elde edilen optimum voltaj değerleri, -39.39 V, -36.40 V, -29.60, -20.94 V, -15.82 V, -11.63 V ve -8.15 V sonuçları ile yaklaşık, lineer olarak voltaj şiddetinin azaldığı görülmektedir. Düzlem dışı yüke maruz kompozit bir kirişte en yüksek eğilme rijiditesi  $0^\circ$  oryantasyon açısında elde edilir. Birinci tabakanın oryantasyon açısı Tablo 6.4, Şekil 6.26 ve 6.27'de verildiği üzere  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'a yükseldikçe optimal voltajın da şiddeti azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.26 Kompozit kirişin bakımı için 1. ve 2. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri ( $a/h = 0.17$ , 3. tabaka oryantasyon açısı:  $90^\circ$ ) (kontür grafik)

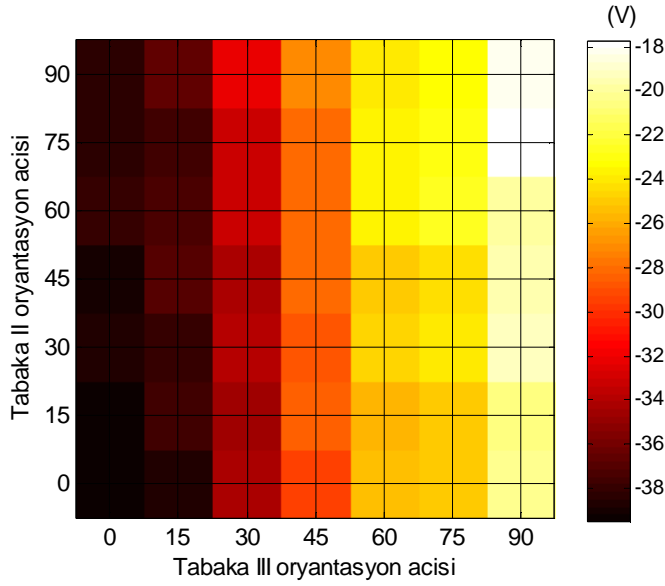


Şekil 6.27 Kompozit kirişin bakımı için 1. ve 2. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri ( $a/h = 0.17$ , 3. tabaka oryantasyon açısı:  $90^\circ$ ) (yüzey grafik)

Aynı şekilde çatlak oranı ( $a/h$ ) = 0.17 olan kompozit bir kirişte,  $x = 210$  mm'de  $P = 1.5$  N uygulanıp, 2. ve 3. tabakaların oryantasyon açı değişimlerine bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri Tablo 6.5'te verilmiştir. Bu değerlere ilişkin, kontür grafik ve yüzey grafikleri de sırasıyla Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da verilmiştir. Burada da, birimler, derece cinsindedir. Analitik hesaplamalarda, kompozit kirişe ilişkin 1. tabakanın oryantasyon açısı  $0^\circ$  olarak kabul edilmiştir.

**Tablo 6.5** Kompozit kirişin bakımı için 2. ve 3. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj ( $a/h = 0.17$ , Tabaka 1. oryantasyon açısı: 0)

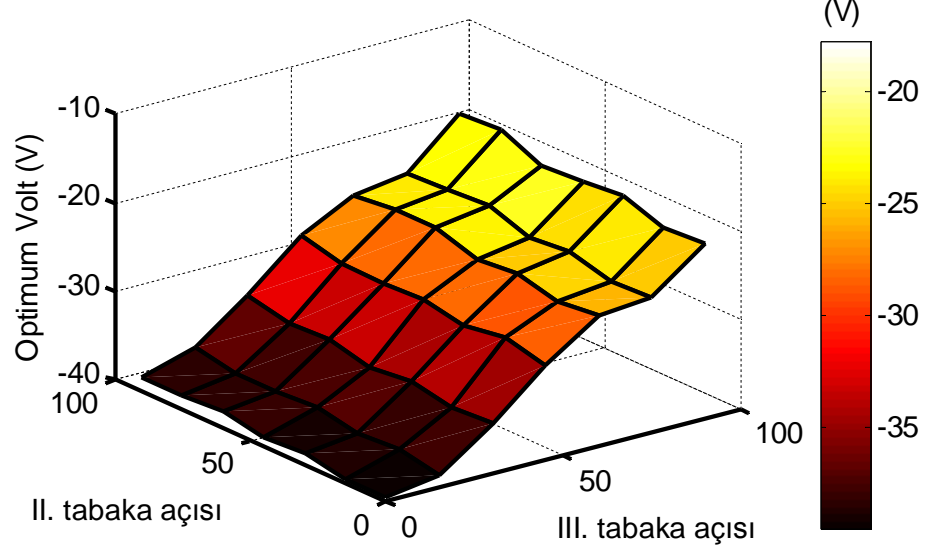
(II) \ (III)	0	15	30	45	60	75	90
0	-39.39	-38.54	-34.33	-29.32	-25.31	-24.92	-20.38
15	-39.46	-37.60	-34.56	-28.31	-25.66	-25.15	-20.69
30	-38.60	-37.84	-33.72	-28.89	-24.57	-23.85	-19.09
45	-38.85	-37.05	-34.10	-27.98	-25.07	-24.24	-19.55
60	-38.04	-37.30	-33.14	-28.22	-23.66	-22.77	-19.84
75	-38.22	-37.46	-33.24	-28.13	-23.64	-22.89	-17.71
90	-38.31	-36.54	-32.30	-27.01	-24.03	-23.22	-18.10



Şekil 6.28 Kompozit kirişin bakımı için 2. ve 3. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri ( $a/h = 0.17$ , Tabaka 1'in oryantasyon açısı: 0) (kontür grafik)

2. tabakanın oryantasyon açısındaki artışlara bağlı olarak, piezoelektrik yamaya uygulanması gereken optimum voltaj değerleri, 3. tabakanın oryantasyon açısının artışlara nazaran daha düşük olarak bulunmuştur. Örneğin 1. ve 2. tabakanın oryantasyon açısı  $0^\circ$  olarak kabul edildiğinde ve buna bağlı olarak ta 3. tabakanın oryantasyon açısı  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  için, elde edilen optimum voltaj değerleri,  $-39.39$  V,  $-38.54$  V,  $-34.33$ ,  $-29.32$  V,  $-25.31$  V,  $-24.92$  V ve  $-20.38$  V sonuçlarıyla yaklaşık, lineer olarak voltaj şiddetinin azaldığı görülmüştür. Ancak 1. ve 3. tabakanın oryantasyonu 0 kabul edilip, 2. tabakanın oryantasyon açısı 0'dan 90'a 15'er derecelik aralıklarla kadar artırıldığında, piezoelektrik aktüatörlere uygulanması gereken optimum voltajlar  $-39.21$  V'dan  $-38.31$  V'a azaldığı görülmüştür. Burada, voltaj değişimlerinin optimum voltaja etkisi, 3. tabakanın 2'ye göre daha fazla olduğu görülmüştür. Sonuç olarak 1 ve 3.

tabakalardaki oryantasyon açısı değişimlerinde optimum voltajın azaldığı görülmüştür. Ancak kirişin nötr ekseninde yer alan 2. tabakadaki değişimler, optimum voltaj üzerinde 1 ve 3'e göre daha az bir etkiye sahiptir.



Şekil 6.29 Kompozit kirişin bakımı için 2. ve 3. tabakaların oryantasyon açısına bağlı olarak elde edilen optimum piezoelektrik voltaj değerleri ( $a/h = 0.17$ , Tabaka 1'in oryantasyon açısı: 0) (yüzeysel grafik)

## 6.9 Tartışma ve Genel Değerlendirmeler

Bu araştırmada, en alt tabakasının yüzeyinde enine çatlak içeren kompozit bir kirişin düzlem dışı yüke maruz kaldığında, yapısındaki çatlakların tespiti ve piezoelektrik malzemelerin elektromekanik özelliklerinden yararlanılarak çatlak bakımının yapılması amaçlanmıştır. Bu şekilde, kompozit kirişin çatlak hasarı bakımının yapılmasıyla, yapısındaki süreksizlikler azaltılarak, bütünlük olarak, dış yükler altında stabil olarak çalışması istenmiştir. Analitik çözümlerinde klasik tabaka teorilerinden, kırılma mekaniği kuramlarından yararlanılmıştır. Statik yüklemelere bağlı olarak, kompozit kirişteki hasar tespitinde birim şekil değiştirme enerjisi ve uygulanması gereken piezoelektrik voltajının tespitinde ortalama hata karekökü (OHKTK) kullanılmıştır. Başlangıçta laboratuvar ortamında, yapısında hasar olarak çatlak ile üretilen kompozit kiriş, 0 ile 3000  $\mu\text{N}$  aralıklarında lineer elastik bölge içerisinde aksel kuvvetlere maruz bırakılıp ve buna eş zamanlı olarak değişik voltajlarda kompozit kirişe iliştirilen aktüatör yamaya voltaj uygulanarak çökme-kuvvet eğrileri elde edilmiştir. Deneysel olarak

elde edilen çökme-kuvvet ilişkileri daha sonra analitik olarak formülasyonların uygulanması ile elde edilen çökme-kuvvet sonuçları karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyum içerisinde oldukları görülerek, teorik olarak uygulanan denklemlerin doğrulamaları yapılmıştır. Bunun akabinde, kompozit kirişte değişik hasar bölgelerinde, hasar büyüklüklerinde ve tabakalardaki açılı değişimlerinde ki kirişin  $l$  uzunluğu boyunca hasar tespitleri yapılmış ve kirişin sağlıklı olarak çalışması için uygulanması gereken optimum voltaj belirlenmiştir. Aynı şekilde bu durum, değişik kuvvetler için de değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, çatlak hasar oranı ve uygulanan yükler arttıkça, kompozit kirişin sağlıklı çalışması için uygulanması gereken voltajı lineer olarak artırır. Ancak eksenel kuvvetin uygulandığı bölgenin yeri, çatlak hasarının bulunduğu bölgeden uzaklaştıkça, piezoelektriklerdeki optimum voltajı azaltır. Bunun yanında, 1. ve 3. tabakadaki oryantasyon açısı yükseldikçe optimum voltajın düştüğü görülmüştür.

Bu çalışmada hasar tespit algoritmalarına yaygın olarak kullanılan birim şekil değiştirme algoritması uygulanıp, çatlak yeri ve büyüklüğü belirlendikten sonra, ortalama hata karekök uygulanıp optimum voltaj ile piezoelektrik aktüatör aktifleştirildi. Bu şekilde aktüatörün farklı noktalara monte edildiği zamanlarda bile gerekli olan voltaj miktarı belirlenebilecektir. İlerleyen çalışmalarda geliştirilen hasar tespit+bakım sistemi için kullanıcı arayüzle görsel grafikler tasarlanacak ve deneysel çalışmalarla desteklenip aktif hasar kontrolünde kullanılabilir. Bir başka şekilde, hasar tespitleri şekil değişim rozetleri ile anlık olarak yapılacak. Alınan sinyaller mikrokontrole gümülen algoritmalarda değerlendirilmesinin akabinde, uygulanması gereken optimum voltaj mikrokontrol tarafından otomatik olarak belirlenebilecektir. ve mikrokontrolde hasar tanılmanın akabinde, dijital sinyaller analoga çevrilip transistör ile daha yüksek voltajlara yükseltilerek direk amplifikatör girişine bağlanacaktır. Belki de kompozit yapıların, dinamik yükler altındaki hasarları önceki kısımlarda geliştirilen vibrohaptik insan makine arayüzüyle entegre edilecektir. Bir başka şekilde, burada, optimizasyon işlemi insanın sinir sistemi ile yapılarak, uygulanması gereken voltaj ise insanın bilişsel yeteneği ile yapılabilir.

## 7. TARTIŞMA

Servis koşulları altında çalışan mühendislik yapılarının, darbe, sıcaklık, basınç, nem gibi çeşitli yüklemelere maruz kaldıklarında, bazı bölgelerinde hasarlar ve bozukluklar oluşabilmektedir. Son 20 yıldır, yapı sağlığı izleme topluluğu, çalışma koşullarında çalışan bu yapılardaki hasarları tespit etmek için birçok strateji geliştirmiştir. YSİ topluluğu genellikle, insan yapımı mühendislik yapılarını, canlı yapıların dokularında yer alan sinir sistemlerine benzer olarak sensörlerle donatıp sağlık durum değerlendirmesi için sensör sinyal verilerini toplamaktadır. Daha sonra, sensör verilerini model tabanlı, tersinir yöntem tabanlı veya veri tabanlı YSİ prosedürlerinde değerlendirerek hasarı tanılamaktadırlar. Bu çalışmanın başlangıç aşaması için, literatürde yaygın olarak uygulanan, model dinamik titreşim tabanlı hasar tespit tekniği algoritmaları, iç bölgelerinde delaminasyon içeren tabakalı kompozit kiriş ve levhaya uygulanmıştır. Bu amaçla, delaminasyon içeren kompozit kiriş için deneysel ve nümerik yöntemler kullanılarak modal analizler uygulanarak mod frekansları bulunmuştur. Deneysel olarak, kompozit kiriş için elde edilen veriler üzerinde hızlı Fourier dönüşümleri uygulanarak, kirişin sağlıklı durumu için elde edilen ilk üç doğal frekans, 64.04, 329.84 ve 396.43 Hz, delaminasyon içeren kompozit kiriş için ise 41.86, 111.21 ve 220.82 Hz değerlerinde veriler alınmıştır. Nümerik yöntemin uygulanması sonucunda sağlıklı kompozit kiriş için elde edilen üç doğal frekans, 63.01, 329.96 ve 397.23 Hz, aynı kirişin hasarlı olması durumunda ise nümerik yöntemden alınan sonuçlar 42.12, 113.11 ve 222.18 Hz olarak görülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde, nümerik yöntem sonuçları ile deneysel yöntemin sonuçlarının, elde edilen doğal frekanslar açısından, uyum içerisinde oldukları görülmüştür. Aynı şekilde, nümerik yöntemin uygulanmasıyla, sağlıklı levha için elde edilen ilk dört doğal frekans, 3.47, 5.57, 21.77 ve 24.84 Hz olurken, yapısında delaminasyon bulundurması durumunda elde edilen ilk dört doğal frekans 3.45, 5.55, 21.54 ve 24.43 Hz olarak bulunmuştur. Uygulanan her iki çözüm tekniğinde, kompozit kiriş ve levhada hasar olması durumunda, doğal frekansların azaldığı görülmüştür. Nümerik yöntemin uygulanmasıyla elde edilen doğal frekanslar, deneysel yöntemle doğrulandıktan sonra, analizler nümerik yöntemle çalıştırılıp, kiriş ve levha için mod şekilleri çıkartılmıştır. Mod şekillerinden eğrilik modları elde edilmiştir. Eğrilik modları, düzgün aralıklı



metot ve birim şekil değiştirme enerjisi algoritmalarında değerlendirilerek, kiriş için bir boyutlu eksen boyunca, levha için ise iki boyutlu yüzeyi boyunca hasar tespitleri yapılmıştır. Kompozit levhaya ilişkin, iki farklı durumu için hasar tespitleri DAM ve BşDE ile değerlendirilmiştir. Birinci durumda, levhanın başlangıçtaki sağlık durumunun biliniyor kabulüyle, ikinci durumda ise levhanın başlangıçtaki sağlık durumunun bilinmediği varsayımı yapılarak hasar teşhisleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, düzgün aralıklı metot ve birim şekil değiştirme enerjisi algoritmalarının hasar teşhisinde yaklaşık olarak eşit hassasiyette hasarın tanılanabildiği görölmüştür. Bunun yanında, 3. ve 4. mod verilerinin DAM ve BşDE kullanılmasıyla, kompozit levhanın başlangıçtaki sağlık durumları bilinmeden hasarın teşhisinin yapılabildiği görölmüştür. Burada, her ne kadar çözümlerinde nümerik yöntemin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar, algoritmalarda değerlendirilip hasar teşhisleri yapılabildiği halde, bu çalışmada bir bölümdeki çalışmada bir kısıtlılık olarak, kompozit kiriş ve levha için mod şekillerinin laboratuvar ortamında deneysel olarak bulunması gerekir. Deneysel olarak laboratuvar ortamında, daha doğru mod şekillerinin elde edilebilmesi için, yapının birçok bölgesine birçok ivmeölçer yerleştirilmesi gerekir. Bunun yanında özellikle düzgün yüzeye sahip olmayan komplike yapılara ilişkin hasar tespitlerini DAM ile BşDE kullanarak yapmak zordur. Bu gibi durumlarda, istatistiksel örüntü tanımayaya dayalı YSİ tekniklerinin uygulanması daha avantajlı olabilir.

Literatürde buna benzer model veya veri tabanlı hasar tespit araçlarıyla birçok uygulamada, birçok çalışma yapıldığı görölmüştür. Ancak, YSİ'de kaydedilen tüm ilerlemelere rağmen insanın bilişsel motor kabiliyetini tam olarak bu şekilde hasar belirleyebilen araçlardan kaldırmak, beraberinde problemler oluşturabilir. Bu amaçla, çalışmanın 5. bölümünde, YSİ tekniğinin çözüm performansının yükseltilmesi amacıyla, invazif olmayan vibro haptik insan-makine arayüz paradigması önerilmiştir. Kooperatif insan-makine arayüz paradigmasının en önemli özelliği, tek başına hasar belirleme sürecine katkı sağlayan, tek makine işlemcisinden veya tek başına hasar belirleme sürecine katkı sağlayan, insanın bilişsel sezgisinden yüksek olduğudur. Bütünleşik insan-makine arayüz paradigmasının geliştirilmesinde, insana özgü sinir sisteminden, YSİ sensör ağlarından, sinyal işleme tekniklerinden, çok değişkenli istatistiksel

yöntemlerden, psikofizik kuramlarından, sinir-bilim kuramlarından, nöral plastisitesinden ve haptik teknolojilerinden yararlanılmıştır. Kompozit malzemelerdeki delaminasyon hasarı, cıvatanın esnemesiyle simule edilebilmektedir. Dolayısıyla, önerilen YSİ insan-makine arayüz yaklaşımı, kafes yapılarından inşa edilen bir kule yapısı üzerinde laboratuvar ortamında test edilmiştir. Kulenin yapısında, tek cıvata veya birden çok cıvatanın gevşetilmesi ile kompozit yapının bir veya birden çok delaminasyon içermesi, yapılarında lineer olmayan davranışların oluşmasına neden olmaktadır. Lineer olmayan bu davranışlar hasarları temsil etmektedir. Bu amaçla, kulenin farklı hasar senaryoları içermesi durumunda, sarsma tablasında tek yönlü aksel hareket sağlanıp değişik bölgelerinde yerleştirilen piezoelektrik tabanlı ivmeölçerlerle, davranışı izlenip veri alım ünitesiyle kaydedilmiştir. Alınan sensör sonuçları, filtreleme ve normalizasyon işlemlerine tabi tutulduktan sonra, veriler üzerinde asal değişkenler analizi uygulanmıştır. Asal bileşenlerin uygulanması sonucu elde edilen skorlar 0-100 puls modülasyonunda kullanılmak üzere haptik kod adıyla geliştirilen yazılımda kaydedilmiştir. Bu süreçte, elde edilen haptik kodlar, daha sonra katılımcıların etkileşim içerisinde buldukları haptik cihaza gönderilip, ilgili haptik uyarımı göre aktifleştirilmiştir. Tüm bu proseslerin gerçekleştirilebilmesi için, deneyi yöneten kişi için grafik tabanlı arayüz ve deneye katkı sağlayan katılımcılar için grafik tabanlı arayüz ile haptik el cihazı tasarlanıp geliştirilmiştir. Haptik kodlar üç farklı yolla gösterilip, katılımcılar üzerinde test edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 1., 2. ve 3. uyarı tipinde, katılımcılardan elde edilen ortalama doğru cevaplama yüzdeleri % 18.98±11, % 88.13±20.21 ve % 68.98±30.91 olarak bulunmuş ve buna bağlı olarak 1., 2. ve 3. uyarı tipi için, 12.52±1.98 s, 5.87±2.33 s ve 8.51±3.2 s'de yanıtladıkları tespit edilmiştir. Daha sonra, uygulanan her üç uyarı tipi içerisinde güçlü ve etkili olanını belirlemek için katılımcılardan elde edilen sonuçlar üzerinde Tukey testiyle yapılan çoklu karşılaştırmalar sonucunda, en iyi sonuçlar, haptik uyarımın sırasıyla katılımcılar üzerinde aktifleştirildiği 2. uyarı tipinde bulunmuştur. Ancak, her ne kadar, katılımcılar en iyi performanslarını 2. uyarı tipinde gösterdikleri halde, en iyi hasar tanımlamanın, sadece 2. haptik uyarıların uygulandığı zamanlarda elde edileceğini söylemek doğru olmayabilir. Çünkü katılımcılara, en iyi haptik farklılıkları ayırt edebilmeleri için, nasıl ve ne çeşit bir

haptik uyarımın uygulanması gerektiği, literatürde halen açık bir sorudur. Belki de, ilerleyen zamanlarda, yapılacak çalışmalara ışık tutması amacıyla haptik deneylerden elde edilen tecrübelerle dayanarak, *i*) YSİ ölçüm verilerinin haptik kodlama tipi, *ii*) haptik örüntü dağılım şekli, *iii*) uygulanan vibro taktıl frekans ve genliği önemli olup, bu parametrelerin dikkate alınması gerekir. Tez çalışmasında, kooperatif insan-makine arayüz YSİ paradigmasının katılımcılar üzerindeki kabiliyeti araştırıldıktan sonra, örüntü tanıma tekniklerinde yaygın olarak kullanılan destek vektör makineleri (DVM), deneysel olarak ölçüm verileri üzerinde uygulanıp hasar teşhisleri yapılmıştır. DVM’de çoklu sınıflandırma işleminde, kullanılan kernel fonksiyonlarına ilişkin parametrelerin, sınıflandırma sonuçlarına olan katkıları, model geliştirme veya başka bir şekilde doğrulama aşamasında, çapraz doğrulamalarla belirlenmiştir. Destek vektör makinelerinde ikili ve çoklu sınıflandırma işlemlerinde, değişik kernellerde kullanılan parametrelerin etkileri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Çoklu karşılaştırmada hasarın sınıflandırılması aşamasında, lineer, polinom, radyal ve sigmoid kerneli elde edilen sonuçlar %  $12.25 \pm 8.06$ , %  $25.56 \pm 27.34$ , %  $60.63 \pm 13.53$  ve %  $27.04 \pm 25.99$  şeklinde bulunmuştur. İstatistiksel olarak, Tukey testiyle yapılan karşılaştırmada kernel tipleri arasında anlamlı farklılıklar saptanmış ve en iyi sonuçlar yaklaşık olarak % 61 başarı skoru ve 6.0439 s’lik işlemci çözüm süresiyle radyal tabanlı kernelin kullanılması durumunda elde edilmiştir.

Tez araştırmasının ikinci hedefi, YSİ’de uygulanan hasar tespit sürecinin yanında, hasarın kontrolü için bakım prosesinin yapılmasına yönelik, bütünleşik YSİ+bakım konsepti geliştirmektir. Bu amaçla, geliştirilen yaklaşıma yönelik uygulama adımları belirtilmiş ve düzlem dışı yüklemeye maruz tabakalı kompozit bir kiriş üzerinde test edilmiştir. Başlangıçta, laboratuvar ortamında, çatlak içeren kompozit kiriş, değişken piezoelektrik voltajlarıyla birlikte eksenel yüke maruz bırakılarak çökme-kuvvet değerleri alınmıştır. Piezoelektrik aktüatörlere uygulanan farklı voltaj değerlerinde  $x = 210$  mm’de ölçülen çökme-kuvvet eğrileri lineer eğilimde olup gürültü içerdiklerinden dolayı, lineer eğri uydurma algoritmasıyla bunlara ilişkin denklemler bulunmuştur. Bunun sonucunda, aynı çökme değerinde bulunan en yüksek ve düşük kuvvet değerleri sırasıyla, -100 V ile 250 V’da bulunmuştur. Daha sonra, deneysel olarak ölçülen çökme-kuvvet eğrileri analitik formülasyonlarıyla karşılaştırılmış ve uyum içerisinde oldukları

görülmüştür. Doğrulama aşamasından sonra, geliştirilen YSİ+bakım yaklaşımının etkinliği ölçülmüştür. Burada, hasar teşhisinde, birim şekil değiştirme enerjisinden yararlanılmıştır. Hasar bölgesi belirlendikten sonra eş zamanlı olarak piezoelektrik, ortalama hata karelerinin toplam kökü (OHKTK) uygulanıp elde edilen hata miktarlarına göre, aktüatör aktifleştirilerek yapının emniyetli ve kontrollü bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Daha sonra, kompozit kirişteki, değişik parametrelerin bakım performansına olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tabakalı kompozit kirişte, çatlak oranı ile uygulanan aksenal kuvvetin artışına bağlı olarak, piezoelektriklere uygulanması gereken optimum voltajında arttığı görülmüştür. Bunun yanında, kompozit kirişe uygulanan aksenal kuvvet ile kirişte yer alan hasar bölgesi arasındaki mesafe azaldıkça, hasarın bakımı için, uygulanması gereken optimum voltajın azaldığı görülmüştür. Kompozit kirişin bakımı için, tabaka oryantasyon açılarının optimum piezoelektrik voltaj üzerindeki etkileri araştırılmış ve 1. ve 3. tabakalardaki oryantasyon açılarındaki artışlara bağlı olarak, optimum voltajın azaldığı görülmüştür. Ancak nötr ekseninde yer alan 2. tabakadaki oryantasyon değişimleri, optimum voltaj üzerinde daha az etkiye sahip olduğu sonucu bulunmuştur. Sonuç olarak YSİ+bakım yaklaşımında, literatürde yaygın olarak kullanılan BŞDE algoritması ve OHKTK uygulanarak yapılmıştır. Bu yaklaşımda, piezoelektrik aktüatörün farklı noktalara monte edildiği zamanlarda bile gerekli olan voltaj miktarı belirlenebilecektir. İlerleyen çalışmalarda, hasar tespit+bakım prosedürleri için grafik tabanlı arayüzler geliştirilip aktif hasar kontrol uygulamalarında kullanılabilir. Her ne kadar önerilen bu yaklaşım, kompozit bir kiriş üzerinde uygulanıp elde edilen sonuçlar çatlak hasarının bakımının yapılabileceğini gösteren veriler alınsa dahi, tekniğin pratik uygulamalarda kullanılmadan önce, ileride gerçek koşullarda çalışan mühendislik yapıları üzerinde doğrulanmasında fayda vardır. Ancak, önerilen tekniğin bu süreçte, gerçek mühendislik yapıları üzerinde uygulanabilirliğinden bahsetmek belki de erken olabilir. Çünkü piezoelektrikler, aktüatör görevinde kullanılmak istenildiği durumlarında, çalışmaları için yüksek miktarda elektriksel güce gereksinim duymaktadırlar. Servis koşullarında, birden çok piezoelektrik yamanın gereksinim duyduğu elektriksel gücü tedarik etmek zor olabilir. Bunun yanında, bu aşamada, bu aktüatörlerin bloke edebildikleri kuvvet miktarları sınırlıdır. Dolayısıyla, ileride piezoelektrik aktüatörlerde yapılacak teknolojik gelişmelere

bağlı olarak, bunların, aktif hasar kontrol uygulamalarındaki kullanımlarının artacağı kanaati mevcuttur.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Abdi H. and Williams L.J.**, 2010, Principal component analysis WIREs Comp Stat, 2: 433–459.
- Aberg M. and Gudmundson P.**, 2000, Micromechanical modeling of transient waves from matrix cracking and fiber fracture in laminated beams, International Journal of Solids and Structures, 37: 4083-4102pp.
- Agrawal B.N. and Treanor K.E.**, 1999, Shape control of a beam using piezoelectric actuators, Smart Mater. Struct. 8729–740pp.
- Alaimo A., Milazzo A. and Orlando C.**, 2011, On the dynamic behavior of piezoelectric active repair by the boundary element method, Int. J. Intelligent Material Systems and Structures, 22(18): 2137–2146pp.
- Alleyn D. and Cawley P.**, 1991, A two dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. J Acoust Soc Am., 89:115968.
- Amer KB.**, 1988, A new philosophy of structural reliability, fail safe versus safe life, Proceedings of the 44th Annual Forum of the American Helicopter Society, 3-16.
- Anderson G.**, 2006, Providing best value IVHM solutions for aging aircraft. In: 9th joint FAA/DOD/NASA conference on aging aircraft, Atlanta, USA.
- Bach-y-Rita P, Collins C, Saunders F, White B. and Scadden L.**, 1969, Vision substitution by tactile image projection. Nature 221: 963-964.
- Bach-y-Rita P. and W. Kercel S.**, 2003, Sensory substitution and the human-machine interface, Trends in cognitive systems, 7(12): 541-46.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Bach-y-Rita P., Kaczmarek KA., Tyler M. and Garcia-Lara J.,** 1998, Form perception with a 49 point electrotactile stimulus array on the tongue: A technical note. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 35(4): 427-30.
- Bainbridge L.,** 1987, Ironies of automation, in: J. Rasmussen, K.D. Duncan and Leplat J. (eds), *New technology and human error*, Chichester, Wiley, 271-284.
- Baker A.A. and Jones R.,** 1988, *Bonded repair of an Aircraft Structure*. Martinus Nijhoff Publishers, The Netherlands.
- Baker A.A.,** 1984, Repair cracked or defective metallic aircraft components with advanced fiber composites-an overview of Australian work, *Composite Structures*, 2: 153-181pp.
- Baker AA, Callinan RJ, Davis MJ, Jones R. and Williams JF.,** 1984, Repair of Mirage III aircraft using BFRP crack patching technique, *Theory and Applied Fracture Mechanics*, 2: 1-16pp.
- Balageas D., Fritzen C-P. and Guemes A.,** 2006, *Structural Health Monitoring*, ISTE Ltd, London, Newport Beach.
- Balamurugan V. and Narayanan S.,** 2008, A piezolaminated composite degenerated shell finite element for active control of structures with distributed piezosensors and actuators, *Smart Mater. Struct.* 17 035031.
- Bao G., Ho S., Suo Z. and Fan B.,** 1992, The role material orthotropy in fracture specimens for composites, *International Journal of Solids and Structures*, 29(9): 1105-1116pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Bao X., Webb D.J. and Jackson D.A.,** 1993, 32-km distributed temperature sensor based on Brillouin loss in an optical fiber. *Opt. Lett.*, 18, 1561-1563pp.
- Barlow H. B.,** 1969, Pattern recognition and the responses of sensory neurons, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 156: 872-881.
- Bear M., Connors B. and Paradiso MA.,** 2007, *Neuroscience: Exploring the brain*, Philadelphia, PA, Lippincott Williams & Wilkins.
- Beral B. and Speckmann H.,** Structure Health Monitoring (SHM) for aircraft structures: a challenge for system developers and aircraft manufacturers, *Structural Health Monitoring, from Diagnostics & Prognostics to Structural Health Management*, 2003, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, Lancaster, PA, DEStech Publications, Inc, 12-29.
- Bocherens E., Bourasseau S., Dewynter-Marty V., Py S., Dupont M., Ferdinand P. and Berenger H.,** 2000, Damage detection in random sandwich material with embedded fiber optic sensors, *Smart Materials and Structures*, 9:310-315pp.
- Bonessio N., Lomiente G. and Benzoni G.,** 2012, Damage identification procedure for seismically isolated bridges, *Structural Control and Health Monitoring*, 19: 565-578pp.
- Braun C.,** 2008, Neural plasticity of the haptic system, *Human Perception: Basics and Applications*, Martin Grunwald (Ed), Birkhuser Verlag, Berlin
- Capp M. and Picton P.,** 2000, The optophone: and electronic blind air. *Engineering Science and Education Journal*, 9(3): 137-143pp.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Carden EP. and Funning P.,** 2004, Vibration based condition monitoring: A review, *Structural Health Monitoring*, 3(4), 355-77pp.
- Cawley P. and Adams R.D.,** 1997, A vibration technique for non-destructive testing of fiber composite structures, *Journal of composite structures*, 13: 161-165pp.
- Chan A., MacLean K. and McGrenere J.,** 2005, Learning and identifying haptic icons under workload. In *Proceedings of World Haptics in Pisa, Italy*,: 432–439.
- Chang C.C. and Lin C.J.,** 2011, LIBSVM, a library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2:27:1--27:27, Software available at <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- Chang F.K.,** 2009, 2011, 2013, 7th, 8th and 9th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, USA.
- Cherkassy V. and Mulier F.,** 1984, *Learning from data: Concepts, theory and methods*, New York: Wiley Interscience.
- Cholewiak R.W. and Collins A.,** 1991, Sensory and physiological bases of touch, in *the physiological of touch*, 23-60p. Lawrence, Erlbaum,
- Christian P, Artem K. and Stefan S.,** 2006, Design and evaluation of low cost force feedback system for myoelectric prosthetic hands, *J. Prosthet. Orththot.*, 18(2): 57-61pp.
- Cipriani C, Alonzo MD. and Carrozza C. A.,** 2012, Miniature vibrotactile sensory substitution device for multifingered hand prosthetics, *IEEE transactions on biomedical engineering*, 59(2): 400-408pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Connolly C.**, 2006, Fibre-optic-based sensors bring new capabilities to structural monitoring. *Sens. Rev.* 26, 236-243pp.
- Culshaw B.**, 2008, Kersey, A. Fiber-optic sensing: A historical perspective. *IEEE/OSA J. Lightw. Tech.*, 26, 1064-1078pp.
- Dashti H.T., Ardalan A., Siahpirani A.F., Tonejc J. et al.**, Pattern Recognition in Collective Cognitive Systems: Hybrid Human-Machine Learning (HHML) By Heterogeneous Ensemble arXiv:1008.5387.
- Dhillon G.S. and Horch KW.**, 2005, Direct neural sensory feedback and control of prosthetics arm. *IEEE Trans. Neural Suit. Rehabil. Eng.*, 13(4): 468-472.
- Doebling SW, Farrar C, Prime MB. and Daniel WS.**, 1996, Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. LA-13070-MS, May.
- Doebling SW., Farrar CR. and Prime MB.**, 1998, A summary review of vibration-based damage identification methods". *Shock Vbr Dig*, (20), 91-105pp.
- Dowell M. and Sylvester G.**, 2000, Turbomachinery prognostics and health management via Eddy current sensing: Current developments, General Dynamics Report.
- Dupont M., Osmont D., Gouyon R. and Bulegeas D.L.**, 2000, Permanent monitoring of damaging impacts by a piezoelectric sensor based integrated system, Structural health monitoring, Proceedings of the second International workshop on structural health monitoring, Stanford, CA, September, 8-10, 1999, Lancaster-Basel, Technomic Publishing Inc, pp.561-570.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Enriquez M. and MacLean K.**, 2008, The role of choice in longitudinal recall of meaningful tactile signals. In Proceedings of Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, 49–56.
- Enriquez M., MacLean K. and Chita C.**, 2006, Haptic phonemes: Basic building blocks of haptic communication. In Proceedings of the International Conference on Multimodal interfaces (ICMI '06) in Banff, Canada, pp. 302–309.
- Farrar C.R. and Worden K.**, 2013, Structural health monitoring a machine learning perspective, John Wiley & Sons Ltd.
- Farrar C.R., Duffey T. A., Doebling S.W. and Nix D.A.**, 1999, Statistical Pattern Recognition Paradigm for Vibration-Based Structural Health Monitoring, Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Technomic Publishing, Lancaster, PA, pp. 764-773.
- Fifield S.D.**, 2005, Experimental Methodology For Embedding Fiber Optic Strain Sensors in Fiber Reinforcement Composites Fabricated By The VARTM/SCRIMP Process, In Department Of Civil And Environmental Engineering, University Of Maine, Orono.
- Figueiredo E., Park G., Farrar C.R., Worden K. and Figueiras J.**, 2011, Machine learning algorithms for damage detection under operational and environmental variability, Structural Health Monitoring;10(6): 559-72pp.
- Gao Y., Spencer B.F. and Bernal D.**, 2004, Experimental verification of the damage locating vector method, Journal of engineering mechanics, 128(1): 227-244.
- Gesheider G.A.**, 1997, Psychophysics: The fundemantels, 3rd ed., Lawrence Erlbaum,

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Giurgiutiu V.**, 2003, Embedded ultrasonics NDE with piezoelectric wafer active sensors, *Instrumentation, Measure, Metrologie*, 3: 149-180pp.
- Goldfine N., Schlicker D. and Washbaugh A.**, 1998, Surface mounted Eddy-current sensors for on-line monitoring of fatigue tests and for aircraft health monitoring. *Proceedings of the 2nd joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft*.
- Goldfine N., Washbaugh A. and Walrath K.**, 1999, Comformable Eddy current sensors and methods for gas turbine inspection and health monitoring, *Gas Turbine Materials Technology*, 105-114.
- Gopalakrishnan S.**, 2009, Modelling aspects in finite elements for structural health monitoring, *encyclopedia on structural health monitoring*, vol 2, Wiley, Chichester, 811-831, Chap.43.
- Gopalakrishnan S., Chacrobarty A. and Roy Mahapatra D.**, 2008, *Spectral finite element method*, Springer, London.
- Gopalakrishnan S., Ruzzene M. and Hanagad S.**, 2011, *Computational Techniques for Structural Health Monitoring*, Springer, London.
- Goranson U.G.**, 1997, jet transport structures performance monitoring, *Structural International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, September 18-20, Lancaster-Basel, Technomic Publishing Co, pp. 133-141.
- Green A.K., Zaidman M., Shafir E., Tur M. and Gali S.**, 2000, Infrastructure development for incorporation fibre-optic sensors in composite materials, *Smart Materials and Structures*, 9: 316-321pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Grosse-Wentrup M., Mattia D. and Oweiss K.,** 2011, Using brain computer interfaces to induce neural plasticity and restore function. *J. Neural Engineering* 18(2): 025004.
- Guo H., Xiao G., Mrad N. and Yao J.,** 2011, Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms, 11, 3687-3705pp.
- Halata Z.,** 1993, Sensory innervation of the hairy skin, *J. Invest Dermatol*, 101: 755-815.
- Hamey CS., Lestari W., Qiao P. and Song G.,** 2004, Experimental damage identification of carbon/epoxy composite beam using curvature mode shapes, *Structural Health Monitoring*, 3(4), 333-53pp.
- Hoc JM.,** 2000, From human machine interaction to human machine cooperation. *Ergonomics*, 43(7): 833-843pp.
- Ihn J-B. and Chang FK.,** 2003, Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using built-in piezoelectric sensor/actuator network: I. Diagnosis, *Smart Mater Struct*, 13: 609620.
- Inaudi, D.** Combined static and dynamic monitoring of civil structures with long-gauge fiber optic sensor. In *Proceedings of IMAC XXIII Conference and Exposition on Structural Dynamics*, Orlando, FL, USA, 31 January–3 February 2005; p3.
- Jlooffe IT.,** 1986, *Principal component analysis*, New York, Springer.
- Kalamkarov A.L., Macdonald D.O., Fitzgerald S.B. and Georgiades A.V.,** 2000, Reliability Assessment Of Pultruded FRP Reinforcements With Embedded Fiber Optic Sensors, *Composite Structures*, 50(1): 69-78.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessel T.M.,** 2000, Principle of neural sciences, 4th ed., McGraw-Hill,
- Kessler S.S.,** 2002, Piezoelectric-based in situ damage detection of composite materials for structural health monitoring systems, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Kim J.I., Ryu Y.S., Hyun M.C. and Stubbs N.,** 2003, Damage identification in beam type structures; Frequency based method v/s mode based method, Engineering structures, 25(1): 57-67pp.
- Ko J.M. and Ni. Y.Q.,** 2005, Technology Developments In Structural Health Monitoring Of Large Scale Bridges, Engineering Structures, 27(12): 1715-1725pp.
- Krawchuk M. and Ostachowicz Wm.,** 1995, Modeling and vibration analysis of a cantilever composite beam with transverse open crack, Journal of Sound and Vibration, 183(1): 69-89pp.
- Lee CK. and Moon FC.,** 1990, Modal sensors and actuators, Journal of Applied Mechanics, 57: 435-441.
- Lee D.G., Mitrovic M., Friedman A., Carman, G.P. and Richards, L.,** 2002, Characterization Of Fiber Optic Sensors For Structural Health Monitoring,” Journal Of Composites Materials, 36(11): 1349-1366pp.
- Lee J., Harris B., Almond DP. and Hammett F.,** 1997, Fibre composite fatigue-life determination, Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 1: 5-15pp.
- Lee JW, Kim J.D., Yun CB, Yi JH. and Shim JM.,** 2002, Health monitoring for bridges under ordinary traffic loadings, J Sound Vib, 257(2): 247-264pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Levi-Montalcini R.**, 1985, The nerve growth factor 35 years later. *Science*, 235: 1154-1162pp.
- Li H., Li D.S. and Song G.B.**, 2004, Recent Applications Of Fiber Optic Sensors To Health Monitoring Of Large Scale Bridges, *Engineering Structures*, 26(11): 1647-1657pp.
- Lin CC. and Hsu CY.**, 1999, Static shape control of smart beam plates laminated with sinus sensors and actuators, *Smart Materials and Structures*, 8: 519-530pp.
- Liu TJ-C.**, 2008, Crack repair performance of piezoelectric actuator estimated by slope continuity and fracture mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, 75(8): 2566-2574pp.
- Lu Q., Ren G. and Zhao Y.**, 2001, Multiple damage location with flexibility curvature and relative frequency change for beam structures, *Journal of sound and vibration* , 253(5): 1101-1114pp.
- Mahns D.A., Perkins M., Sahai V., Robinson L. and Rowe M.J.**, 2006, Vibrotactile frequency discrimination in human hairy skin *J. Neurophysiology*, 95: 1442-1450pp.
- Majumder M., Gangopadhyay T.K., Chakraborty A.K., Dasgupta K. and Bhattacharya D.K.**, 2008, Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sens. Actuat. A*, 147, 150-164pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Mansfield N.J.**, 2005, Human response to vibration, Boca Raton, Florida, Taylor & Francis e-Library.
- Marantidis C., Van Way C.B. and Kudva J.N.**, 1994, Acoustic -emission sensing in an on-board smart structural health monitoring system for military aircraft, Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Intelligent Systems, 2191: 258-264pp.
- Measures R.M.**, 2001, Structural Monitoring With Fiber Optic Technology, Academic Press, San Diego, California.
- Melchner LV., Pallas S. and Sur M.**, 2000, Visual Behavior mediated by retinal projections directed to the auditory pathway, Nature April; 404.
- Merzenich M.M. and Harrington T.**, 1969, The sense of flutter-vibration evoked by stimulation of the hairy skin of primates: comparison of human sensory capacity with responses of mechanoreceptive afferents innervating the hairy skin of monkeys, Exp Brain Res9: 236-260.
- Michael J., Dickson B. and Cambell T.**, 1999, Analysis of use damage tolerance criteria for helicopter design, Proceedings of the 55th Annual Forum of the Almerican Helicopter Society, 2: 1219-1231pp.
- Ming G. and Song H.**, 2011, Adult Neurogenesis in the Mammalian Brain: Significant Answers and Significant Questions. Neuron .; 70, May 26, 687-702.
- Morley J.W. and Rowe M.J.**, 1990, Perceived pitch of vibrotactile stimuli: Effects of vibration amplitude, and implications for vibration frequency coding, J. Physiol, 431: 403-416pp.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Moyo P., Brownjohn J:M:W., Suresh R. and Tjin S.C.,** 2005, Development Of Fiber Bragg Grating Sensors For Monitoring Civil Infrastructure, *Engineering Structures*, 27(12): 1828-1834pp.
- Mustapha F., Manson G., Worden K. and Pierce SG.,** 2006, Damage location in an isotropic plate using a vector of novelty indices. *Mech Syst Signal Process*, 21:1885-1906.
- Myle K. and Binseel M.,** 2007, The tactile modality: A review of tactile sensitivity and human tactile interfaces. Army research laboratory, Report No:ARL-TR-4115.
- Nikpour K. and Dimarogonas AD.,** 1988, Local compliance of composite cracked bodies. *Journal of Composite Science and Technology*, 32: 209-223pp.
- Nyman T.,** 1996, Composite fatigue design methodology: A simplified approach, *Composite Structures*, 2:183-194.
- Oka K., Ohino H., Kurashima T., Matsumoto M., Kumagai H., Mita A. and Sekijima K.,** 1999, Fiber optic distributed sensor for structural health monitoring, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*, 672-679.
- Osseguda R., Kreinovich V., Nazarian S. and Roldan E.,** 2003, Detection of cracks at rivet holes in thin plates using lamb wave scanning, *Proc SPIE*, 5047:55-66.
- Osuna E.E., Freund R. and Girosi F.,** 1997, Support vector machines: training and applications, A.I. Memo No: 1602, C.B, C.L, 144, Massachusetts.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Paget CA., Grondel S., Levin K. and Delebarre C.,** 2004, Damage detection in composite by a wavelet-coefficient technique, Structural health monitoring, 2004, Proceedings of the first European Workshop on structural health monitoring, Cachon, France, July, 10-12, 2002, PA, Destech publication Inc, pp313-320.
- Pandey A.K. and Biswab M.,** 1991, Damage detection in structures using changes in flexibility, Journal of sound and vibration, 169(1): 3-17pp.
- Papadopoulos CA. and Dimarogonas AD.,** 1987, Coupling of bending and torsional of cracked Timoshenko shaft, Intgenieur-Archiv, 57: 257-266pp.
- Pearson K.,** 1901, On lines and planes of closest fit to systems of points in space. Phil Mag, 2: 559-72.
- Platz R., Stapp C. and Hanselka H.,** 2011, Statistical approach to evaluating active reduction of crack propagation in aluminum panels with piezoelectric actuator patches, 20 085009.
- Poupyrev I., Marayuma S. and Rekimoto J.,** 2002, Ambient Touch: Designing tactile interfaces for handheld devices, UIST' 02, 27-30.
- Prosser WH., Seale MD. and Smith BT.,** 1999, Time frequency analysis of the dispersion of Lamb modes. J. Acoust Soc Am, 105(5): 266 92676.
- Raghavan A. and Cesnik CES,** 2005, Finite dimensional piezoelectric transducer modeling for guided wave based structural health monitoring using laser vibrometry, part I and II. Smart Mater Struc, 13:251269.
- Raghavan A. and Cesnik CES.,** 2007, Guided-wave signal processing using Chirplet matching pursuits and mode correlation for structural health monitoring, Smart Mater Struc, 16(2): 355366.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Rakic P.**, 1985, DNA synthesis and cell division in the adult primate brain. Ann N Y Acad Sci, 457:193–211.
- Rakic P.**, 1985, Limits of neurogenesis in primates. Science, 227(4690):1054–1056.
- Ray M.C.**, 2003, Zeroth-Order Shear Deformation Theory For Laminated Composite Plates, Journal Of Applied Mechanics, 70: 374-380.
- Reddy J.N.**, 2007, Theory And Analysis Of Elastic Plates And Shells, 2nd Ed., CRC.
- Rogers A.**, 1999, Distributed optical-fibre sensing, Measurement Science and Technology, 10:75-99.
- Rose JL.**, 2002, A baseline and vision of ultrasonics guided wave inspection potential, J Press Vessel Technol 124:273-282.
- Ruzzene M.**, 2007, Frequency/wave number filterin for improved damage visulization, Smart Mater Struct, 16: 21162129.
- Salvino L., Purekar A. and Dines DJ.**, 2005, Health monitoring of 2-D plates using EMD and Hilbert phase. In: Proceedings of the 4th International workshop on structural health monitoring, Stanford University, CA, USA.
- Sampaio R.P.L., Maia N.M.M. and Silva J.M.M.**, 1999, Damage detection using frequency response function curvature method curvature method, Journal of sound and vibration, 226(5): 1029-1042.
- Schwamb ME., Orosz JA, Carter JA., Welsh WF., Fischer DA Torres G et al.**, A transiting circumbinary planet in a Quadriple Star System. arXiv:1210.3612.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Sharma J, Angelucci A. and Sur M.,** 2000, Induction of visual orientation modules in auditory cortex. *Nature*. February; 404.
- Sharma V.,** Ruzzene M., Hanagud S., 2006, Damage index estimation in beams and plates using laser vibrometry, *AIAA J.*, 44:919923.
- Sih GC. and Chen EP.,** 1981, *Cracks in Composite Materials*, 1st ed., McGraw-Hill, London.
- Sih GC., Paris PC. and Irwin GR.,** 1965, On cracks in rectilinear anisotropic bodies, *International Journal of Fracture Mechanics*, 1, 189-203.
- Silva R.A., Muñoz A., Roberto A. and Lopez A.,** 2008, Structural Health Monitoring Of Marine Composite Structural Joints Using Embedded Fiber Bragg Grating Strain Sensors, *Composite Structures*, 89(2): 224-234pp.
- Soloman S.,** *Sensors Handbook*, McGraw-Hill, Newyork, NY, 1998.
- Stallkamp J., Schlipsing M., Salmen J. and Igel C.,** 2012, Man vs. computer: benchmarking machine learning algorithms for traffic sign recognition *Neural Netw*, 32: 323-32pp.
- Staszewski W.J., Biemans C., Boller C. and Tomlinson G.R.,** 1999, Impact damage detection in composite structures-recent advances, *Structural health monitoring*, 2000, Stanford, CA, September 8-10, Lancaster-Basel, Technomic Publishing Co Inc, pp754-763.
- Staszewski WJ., Boller C. and Tomlinson G.,** 2004, *Health monitoring of aerospace structures, Smart sensors and signal processing*, Wiley, Chichester.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Staszewski W.J., Lee B.C., Mallet L. and Scarpa F.,** 2004, Structural health monitoring using laser vibrometry. Part I and II. *Smart Mater Struct* 13:251269.
- Su Z. and Ye L.,** 2009, Identification of damage using lamb waves; From fundamentals to applications, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Su Z., and Ye L.,** 2004, An intelligent signal processing and pattern recognition technique for defect identification using an active sensor network, *Smart Mater Struct*, 13(4): 957969.
- Sun D.C., Wang D.J. and Xu Z.L.,** 1999, Distributed piezoelectric element method for vibration control of smart plates, *AIAA Journal*, 34: 369-374pp.
- Suresh S.,** 1998, *Fatigue of Materials*, 2nd edition, Cambridge Press.
- Todd M.D., Johnson G.A., Althouse B.A., Vohra S.T.,** 1998, Flexural beam-based fiber bragg grating accelerometers, *IEEE Photonics Letters*, 10:1605-1607.
- Tracy J.J., and Pardeon G.C.,** 1989, Effect of delamination on the natural frequency of composite laminates, *Journal of composite materials*, 23: 1200-1215.
- Vapnik V.N.,** 1998, *The nature of statistical learning theory*, New York, Springer-Verlag.
- Verrillo R.T, Fraioli A.J. and Smith R.L.,** 1969, Sensation magnitude of vibrotactile stimuli, *Attention perception & Psychophysics*, 6(6): 366-373pp.
- Verrillo R.T.,** 1983, Psychophysics of vibrotactile stimulation, *J. Acoust. Soc. Amer*; 77: 225-232pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Visell Y.**, 2009, Tactile sensory substitution: Models for enaction in HCI. *Interacting with Computers*, 21(1-2): 38-53pp.
- Vonderhaegen F., Crevits I., Debernard S. and Millot P.**, 1994, Human machine cooperation: toward and activity regulation assistance for different air-traffic control levels. *International journal of human-computer interaction*, 6: 65-104.
- Wang Q., Quek ST. and Liew KM.**, 2002, On the repair of a cracked beam with piezoelectric patch, *Smart Mater. Struct.*, 11: 404-410pp.
- Wang TC., Shih CF. and Suo Z.**, 1992, Crack extension and kicking in laminates and bicrystals, *International Journal of Solids and Structures*, 29(2): 327-244.
- Weiskroniz L.**, 1986, *Blindsight : A Case Study and Implications*, Clarendon Press.
- Wild G. and Hinckley S.**, 2008, Acousto-Ultrasonic optical fiber sensors: Overview and state-of-the-art. *IEEE Sens. J.*, 8, 1184-1193pp.
- Wu D. and Law S.S.**, 2003, Damage localization in plate, structures from uniform load surface curvature”, *Journal of sound and vibration*, 276(1): 227-244.
- Wu N. and Wang Q.**, 2011, An experimental study on the repair of a notched beam subjected to dynamic loading with piezoelectric patches, *Smart Mater. Struct.*, 20: 115023, 2011.
- Yoshino T., Kurosawa K., Itoh K. and Ose T.**, 1982, Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications. *IEEE J. Quant. Elect.*, 4, 626-665pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Zahn M.**, 1998, Optical, electrical and electromechanical measurement methodologies of fields, charge and polarization dielectrics, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 627-650.
- Zhang Z. and Akhtan A.E.**, 1998, Application of modal flexibility and its derivatives in structural identification, Research in non-destructive evaluation, 10: 43-61pp.
- Zheng G.T., Buckley M.A., Kister G. and Fernando G.F.**, 2001, Blind deconvolution of acoustic emission signals for damage identification in composites, AIAA Journal, 39:1198-1205pp.

## ÖZGEÇMİŞ

Lisans öğrenimini 2006 yılı Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümünde, yüksek lisansı 2008 yılı Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2007-2008 yıllarında STFA'da bakım-kontrol mühendisi olarak, 2012- 2013 yıllarında Los Alamos Araştırma Laboratuvarı (LANL), mühendislik enstitüsünde, araştırmacı olarak çalışmıştır. Hâlihazırda Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği mekanik anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Deneysel-sayısal biyomekanik, psikofizik, haptik teknolojiler ve yapı sağlığı izleme konularında çalışmaktadır. 2009-2014 yılları arasında, bilimsel dergi ve kongrelerde yayınlanan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

### **Bilimsel Dergilerde Yayınlanan Çalışmalar**

Pekedis M., Yildiz H., Numerical analysis of a projectile penetration into the human head via meshless method, *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 14, 1450059, 2014.

Ozan., Koyuncu Ş., Pekedis M., Altay T., Yıldız H., and Gökhan Toker, Greater trochanteric fixation using a cable system for partial hip arthroplasty: a clinical and finite element analysis, *Biomed Research International*, 2014, In-Press.

Olmez S., Dogan S., Pekedis M., Yildiz H., Biomechanical evaluation of sagittal maxillary internal distraction osteogenesis in unilateral cleft lip and palate patient and noncleft patients: A three-dimensional finite element analysis. *The Angle Orthodontist*, 2014, In-Press.

Ateşçi Y.Z, Aydoğdu Ö., Karaköse A., Pekedis., Karal Ö., and Şentürk U., Does urinary bladder shape affect urinary flow rate in men with lower urinary tract symptoms?, *ScientificWorld Journal*, 846856, 2014.

Kuran F.D., Pekedis M., Yildiz H., Aydın F., Eliyatkin B., Effects of hyperbaric oxygen treatment on normal and fragile tendon healing in achilles tendon ruptures, *ACTA Orthop Traumatol Turc*, 46(4):293-300, 2012.



Pekedis M., Yildiz H., Comparison of fatigue behaviour of eight different hip stems: a numerical and experimental study, *J. Biomedical Science and Engineering*, 4, 643-650, 2011.

Atesci Y. Z , Senturk U., Pekedis M., Cinar M. Non-invasive urodynamic analysis using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method based on MR images, *Journal of Medical Science*, 31(5), 1186-93, 2011.

Yegengil C., Pekedis M., Yildiz H. Fracture healing in a denervation and/or nerve ending interpositioning model in the rat, *International journal of Clinical Medicine*, 2, 301-306, 2011.

Ozan F, Yildiz H., Bora O. A. Pekedis M., Coskun G A, Gore O. The effect of head trauma on fracture healing: Biomechanical testing and finite element analysis, *ACTA Orthop Traumatol Turc*, 44(4); 313-321, 2010.

Guven M. Erdem, Pekedis M., Yıldız H., Below-Knee Prosthesis Design, *Electronic Journal of BioTechnology*, 1(1); 7-20, 2010.

Pekedis M., Yildiz H., Meshfree methods and their classification, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 16(1);1-9, 2010.

Pekedis M., Yildiz H., Modelling of Axially Loaded Cantilever Rod Using Element Free Galerkin Method, *Pamukkale University Journal of Engineering Science*, 15(3);353-361, 2009.

Pekedis M., Yildiz H., Solution Of 2D Cantilever Beam by Using The Element Free Galerkin Method with the Finite Element Method, *Sigma Journal of Engineering and Natural Science*, 27;26-38, 2009.

**Bilimsel Kongre/ Konferanslarda Yayınlanan Çalışmalar**

Pekedis M., Mascerañas D., Turan G., Ceylan H., Ercan E., Farrar C.R. and Yıldız H., Structural Health Monitoring via Human-Machine Interface, 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain, July, 15-17, 2014.

Ercan E., Pekedis M., Turan G. and Ceylan H., Structural Health Monitoring with Audio presentations, 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain, July, 15-17, 2014.

Ceylan H., Turan G., Ercan E. and Pekedis M., Structural Damage Detection by using a Single Excitation Record, 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain, July, 15-17, 2014.

Mascarenas D., Choi Y., Kim H.C, Pekedis M., Yildiz H., Plont C.A, Brown, Martin Cowell C., Park G., Hahn H., Lee J.R, Farrar C., A Vibro-Haptic Human-Machine interface for Structural Health Monitoring, The 9th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, USA., September 10-12, 2013

Mascarenas D, Choi Y., Kim H.C., Pekedis M., Lee J.R, Farrar C., Hong S.C., Development of a Novel Human-Machine Interface Exploiting Sensor Substitution for Structural Health Monitoring, 2013 IEEE RO-MAN: The 22nd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, Gyeongju, Korea, August 26-29, 2013

Pekedis M., Yildiz H., Simulation of a projectile penetration to human head via meshless method. The 11th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Salt Lake City, Utah, USA, April 3 rd – 6th, 2013.

Pekedis M., Olmez S., Dogan S., Yildiz H., Patient-specific 3d surgical simulation of distraction osteogenesis and lefort I osteotomy using the finite element method, The 11th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Salt Lake City, Utah, USA, April 3 rd – 6th, 2013

Pekedis M., Ozan F., Dinc M.H., Yildiz H. Investigation of the effects of allogenic mesenchymal stem cells on bone union and regeneration in the necrosed bone by biomechanical test and the finite element method, V. National Biomechanics Congress (with international participation), (Journal of Biomechanics, 44, Supplement 1, 15, 2011), Cesme, Izmir, Turkey, 2010.

Duran D., Kaya E., Pekedis M., Senturk U., Erkek M, Yildiz H. Applications of numerical methods in biomechanics, V. National Biomechanics Congress (with international participation), (Journal of Biomechanics, 44, Supplement 1, 15, 2011), Cesme, Izmir, Turkey, 2010.

Pekedis M., Ozan F., Yildiz H. Developing of a three dimensional foot ankle model based on CT images and non-linear analysis of anterior drawer test by using the finite element method, V. National Biomechanics Congress (with international participation), (Journal of Biomechanics, 44, Supplement 1, 14, 2011), Cesme, Izmir, Turkey, 2010.

Olmez S., Doğan S., Pekedis M., Yildiz H., Gurler T. The evaluation of maxillary advancement technique using internal distraction osteogenesis in unilateral cleft lip and palate patient with finite element analysis, V. National Biomechanics Congress (with international participation), (Journal of Biomechanics, 44, Supplement 1, 14, 2011), Cesme, Izmir, Turkey, 2011.

Olmez S., Doğan S., Pekedis M., Yildiz H., Biomechanical analysis of sagittal maxillary advancement using internal maxillary distractors, European Orthodontics Congress, 19-23 June, Istanbul Convention & Exhibition Centre (ICEC), Istanbul, Turkey, 2011.

Olmez S., Dogan S., Pekedis M., ve Yildiz H., Biomechanical effects of maxillary advancement on the craniofacial skeleton with unilateral cleft lip and palate, 9th European Craniofacial Congress, Salzburg, Austria, 2011.

Pekedis M., Yildiz H., Finite element analysis of the anterior drawer test for foot ankle, European Biotechnology Congress, 28 September-1 October, 2011, Congress Center, Current Opinion in Biotechnology, 22(Supplement 1), S150-S151, Istanbul, Turkey, 2011.

Pekedis M., Yildiz H., Comparison of dynamic fatigue behavior of eight different implanted hip prostheses during gait, International Fracture Conference, 19-21 October, (Proceedings of the 9th International Fracture Conference, 114-124), Istanbul, Turkey, 2011.

Pekedis M., Yildiz H., Non-Destructive damage detection of laminated composite beams based on dynamic analysis techniques, International Fracture Conference, 19-21 October, (Proceedings of the 9th International Fracture Conference, 397-407), Istanbul, Turkey, 2011.

Kuran F.D., Pekedis M., Aydın F. , Eliyatkin N., Bora O.A., Aşıl tendon kopmalarında hiperbarik oksijen uygulamalarının tendon iyileşmesi üzerindeki etkileri, XXII.nd Turkish National Congress Of Orthopaedics And Traumatology (XXII. Ulusal Türk Ortopedi ve Travmatoloji Kongresi, 31 Ekim-5 Kasım, Belek Belek, Antalya, Turkey, 2011.

Olmez S., Doğan S., Pekedis M., Yildiz H., The evaluation advancement technique in unilateral using internal distraction osteogenesis in unilateral cleft lip and palate patient with finite element analysis, International Turkish Orthodontics Congress, Oct. 25-27, Ankara, Turkey, 2010.

#### **Hakemlik Yapılan Dergiler**

Turkish journal of engineering & environmental sciences, 2012.

Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine, 2010.

**Araştırma Projeleri**

Yildiz H., Pekedis M., Yapı Sağlığı İzleme Uygulamaları İçin Noninvazif Vibro Haptik insan-makine Arayüzü İle Ultrasonik Dalga Saçınımların Belirlenmesi, Ege Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi (13-MÜH-086), 2013.

Yildiz H., Pekedis M., Kompozit Malzemelerdeki Delaminasyon Davranışının Piezoelektrik Malzemelerle Modellenmesi, Ege Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi (12-MÜH-046), 2012.