

**T.C.  
HARRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MODÜLER KABUK YAPILARI SİSTEMİNİN  
UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Zeynep YILMAZ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ŞANLIURFA**

**2007**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZ .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vi
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	11
2.1. MKY Sistemi Hakkındaki Literatür Özeti.....	11
2.2. MKY Sisteminde Muhtemel Kullanılabilecek Malzemeler ve Test Yöntemleri Hakkındaki Literatür Özeti .....	14
2.3. MKY Sisteminde Geometrik Tasarım İçin Bilgisayar Kullanımı Hakkındaki Literatür Özeti .....	24
2.4. MKY Sisteminde Muhtemel Kullanılabilecek Yapısal Kabuk Tasarım Teorileri Hakkındaki Literatür Özeti .....	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	42
3.1. Materyal.....	42
3.1.1. Kompozit malzemeler.....	43
3.1.2. Kompozit malzemelerin genel özellikleri.....	45
3.1.3. Matris malzemeleri .....	47
3.1.5. Takviye elemanlarının özellikleri .....	52
3.1.6. Elyaf lar .....	52
3.1.7. Reçine matrisleri .....	54
3.1.8. Kompozit malzemelerin çeşitleri .....	55
3.1.9. Kompozitler için matris malzemelerinin özellikleri .....	59
3.1.10. Termoplastikler.....	61
3.1.11. Termosetler .....	62
3.1.12. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerinin üretim yöntemleri .....	63
3.1.14. Kompozit malzeme kullanımında tasarım esasları .....	66
3.2. Yöntem.....	69
3.2.1. Kabuk yüzeylerin sınıflandırılması.....	69
3.2.2. MKY sisteminin çözümüne katlanmış plak teorisiyle yaklaşım .....	73
3.2.2.1. Plak ve levha davranışı .....	74
3.2.2.2. Katlanma noktaları yüklerinin çözümü.....	75
3.2.2.3. Köşe kaymaları .....	77
3.2.2.4. Gerilme dağılımı .....	79
3.2.2.5. Plak yer değiştirmeleri ve dönmeleri.....	81
3.2.2.6. Mafsal momentlerinin etkileri .....	83
3.2.2.7. Fourier serisinin kullanımı.....	85
3.2.2.8. Whitney metodu analizi.....	85
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	91
4.1. Katlanmış Plak Teorisinin MKY Sistemine Uygulanması .....	91
4.2. MKY Sisteminin Diğer Kabuk Yapı Formlarında Kullanılış Şekilleri.....	105
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	108
5.1. Sonuçlar.....	108
5.2. Öneriler.....	109
KAYNAKLAR .....	111
ÖZGEÇMİŞ .....	115
EKLER.....	116
ÖZET .....	120
SUMMARY .....	123

## ÖZ

Yüksek Lisans Tezi

### MODÜLER KABUK YAPILARI SİSTEMİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Zeynep YILMAZ

Harran Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. H. Murat ALGIN  
Yıl: 2007, Sayfa: 124

Bu araştırma, tarafımızdan geliştirilen ve Modüler Kabuk Yapıları (MKY) olarak isimlendirdiğimiz, geometrik olarak tasarlanan lineer yüzeyle prefabrik parçaların, birbirine geçmesi yoluyla kabuk yapının oluşturulması fikrini temel almaktadır. Bu çalışmada, önerilen sistemin gerçek yük ve sınır koşullarında nasıl davrandığı sorusuna teorik çözümler sunulmakta olup, bu sistemin yapısal tasarımı için gerekli temel prensiplerin oluşturulması yönündeki araştırmalar özetlenmektedir. Bu araştırmayla, yapı mühendisliğinde yeni bir yapı sisteminin temeli atıldığı düşünülmektedir.

Sistemin, bir bütün olarak yük iletme mekanizmasının nasıl olduğu standart kabuk yapıları tasarım prosedürleriyle karşılaştırılarak araştırılmış ve bu sistem için en uygun çözümün nasıl olabileceği detaylarıyla incelenmiştir. Tipik yüklemeler altında örnek çözümler verilerek, MKY sistemi standart teorik modellerle karşılaştırılmıştır. Katlanmış plak teorileri, silindirik kabukların membran ve eğilme teorilerine ek olarak, diğer mevcut kabuk yapılarının teorik detayları incelenmiştir. Bu sistemin hangi tasarım prensibine daha yakın olduğu ve muhtemel yapısal analiz yönteminin nasıl olabileceği araştırılmış, bu yolla MKY sisteminin temel tasarım prensiplerine yaklaşmaya çalışılmıştır.

Ek olarak polimer veya değişik malzemelerin (beton gibi) belli bir şekle sahip olacak tarzda kalıplanması yoluyla prefabrik olarak üretilebilecek olan bu yapı parçaları (modülleri) için gerekli olan muhtemel boyutsal ve şekilsel tasarımları da yapılmıştır. Bu araştırmada, hafifliği ve yüksek dayanımından dolayı, elyaf takviyeli oligamer malzemelerin modül üretiminde kullanılabileceği düşüncesiyle, bu malzemelerin mühendislik özellikleri, muhtemel prefabrik üretim yöntemlerinden polimer enjeksiyonlama sisteminin detayları da, bu çalışmayla verilmektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasıyla önerilen sistemin uygulamaya geçirilebilmesi için, gerekli olduğu düşünülen tüm detaylar ve modüllerin bir bütün olarak davranabilmesi için, nasıl bir bağlantı yapması gerektiği incelenmiştir. Enjeksiyonlama üretim için basit ve ekonomik kalıp tasarımı kriterleri göz önünde bulundurularak, bağlantıların nasıl olması gerektiği de araştırılmıştır.

Sonuç olarak, MKY sisteminin oluşturulmasının mevcut malzeme teknolojisiyle mümkün olduğu anlatılmış olup, bu sistemin yapısal tasarım prensipleri için de mevcut temel teorik altyapı yaklaşımlarının yeterli olduğu bu tezle açıklanmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Kabuk yapıları, Modüler yapılar, Polimer kompozit, Prefabrikasyon

## **ABSTRACT**

**MSc Thesis**

### **RESEARCH INTO THE APPLICABILITY OF MODULAR SHELL STRUCTURAL SYSTEM**

**Zeynep YILMAZ**

**Harran University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. H. Murat ALGIN  
Year: 2007, Page: 124**

This MSc thesis provides a framework into identifying the design criteria and fundamental design parameters of the design method to be developed for the new proposed structural system designated as *Modular Shell Structures* (MSS).

This new shell structural technique having potential to be alternative to overall shell structural systems, in principal, it has in fact better features such as its practicality in application and rapid construction, as well as providing new structural and architectural design alternatives as a structural material and system as a whole. In addition, it introduces the functionality concept to the overall shell structures.

Thesis explains how the connection and fixing details of modules should be employed and how the modules are jointed with the neighbouring units. It also focuses on covering the research areas of investigating MSS for industrial development in practice as well as it aims to build up the fundamental information required for the structural design and the technology that will be developed for this new shell structural system. Thesis classifies the further researches and it demonstrates how they can be undertaken by explaining the mythology behind for the overall system. In this respect, it represents a significant step forward in developing this high technology shell structural system for its general practical use.

The content of research is included; designing the modules' geometry required in the pre-moulding process in which the shapes of certain modules are to be formed, determining the suitable geometrical shapes and dimensions, designing the joint connection details of modules, identifying the load transferring mechanism in the module connections, designing of MSS in the computer environments, identifying materials and their engineering properties that will possibly be used in the production of modules, the prefabrication techniques employed, the theoretical details behind the structural design of MSS system, the typical design examples and the possible theoretical approaches that can be used in the structural design process.

**KEYWORDS:** Shell structures, Modular structures, Polymer Composites, Pre-fabrication



## TEŐEKKÖR

Bu Yüksek lisans tez çalışmam süresince, akademik anlamdaki üstün yardım ve desteklerinden dolayı danışmanım Yrd. Doç. Dr. Halil Murat ALGIN'a, maddi ve manevi desteklerinden dolayı ablam Yrd. Doç. Dr. Zehra Yılmaz Kurçer'e, eniştem Doç. Dr. Mehmet Ali Kurçer'e ve tüm sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Fakültemizdeki tüm Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma ve bölüm hocalarıma destek ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. (a) İnsan Kornea Epitel dokusu, (b) At'ın retina pigmenti, (c) Kahverengi adipose dokusu, .....	2
Şekil 1.2. Bu araştırmayla önerilen yeni kabuk yapıları sistemine görünüş olarak kısmen benzeyen ancak yapısal anlamda kafes sistem formunda olan ve önerilen sistemin bir önceki aşaması olduğu düşünülen bazı yapı örnekleri .....	4
Şekil 1.3. Modüler Kabuk Yapı sisteminin uygulandığı bilgisayar ortamında modellenmiş kompleks bir kabuk yapısından (hyperbolic parabolidal saddle dome) görünüşler ....	6
Şekil 1.4 Küçük ölçekte maket çalışması tarafımızdan yapılmış tipik bir MKY sisteminden görünüşler .....	7
Şekil 1.5. Ahşap malzemeyle küçük ölçekte maketi yapılmış bir MKY sisteminden görünüşler, bu maket çalışmasında kazanılan deneyimler ışığında yeni modül tasarımları yapılmıştır .....	7
Şekil 1.6. Modüler kabuk yapıları sisteminin uygulanabileceğini düşündüğümüz bazı yapı formları .....	8
Şekil 2.1. Americalı mimar Buckminster Fuller tarafından yapılmış Montreal ve Eden proje kubbe yapıları.....	12
Şekil 2.2. Buckminster Fuller tarafından patenti alınmış bazı uzay kefes formlu kubbe yapılar, a) Geodesik kubbe, b) Octet uzay kafes sistemi c) Tensegrity, d) Aspension Geodesik yapı, e) Yıldız Tensegrity (Sekizyüzlü Kafes), f) Katmanlı kubbe .....	12
Şekil 2.3. Düzlem, tek ve çift eğrilige sahip kabuk formları .....	12
Şekil 2.4. a) R. Buckminster Fuller tarafından tasarlanan Tensegrity uzay kafes kubbe yapısında kullanılan elemanların bağlantı detayı insan eklem sistemine benzetilmektedir b) bu sistemin gerçek bağlantı detaylarından bir örnek .....	13
Şekil 2.5. Prof. Werner Sobek ve Doktora öğrencisi Lucio Blandini tarafından Stuttgart Üniversitesi bahçesinde yapılmış cam kubbe yapıdan bazı görünüşler .....	13
Şekil 2.6. Prof. Werner Sobek ve Doktora öğrencisi Lucio Blandini tarafından Stuttgart Üniversitesi bahçesinde yapılmış cam kubbe yapının taban bağlantısı.....	14
Şekil 2.7. Tipik enjeksiyon kalıplama tekniği aşamaları .....	16
Şekil 2.8. Tipik enjeksiyonlama yöntemleri .....	17
Şekil 2.9. Tek karışımli enjeksiyonlama sistemi detayı .....	17
Şekil 2.10. Kullanılacak test ölçüm verilerinin belirlenmesini sağlayacak düzeneğin genel şeması .....	19
Şekil 2.11. Deprem tablası detayları .....	22
Şekil 2.12. Örnek bir bölümlenme (tessellation) yöntemi .....	24
Şekil 2.13. Bölümlenme (tessellation) yönteminin kompleks yüzeylere uygulanması .....	24
Şekil 2.14. Tipik bir OpenGL destekli yüzey oluşturma ve bölümlenme yazılımından ara yüz görüntüsü .....	26
Şekil 2.15. Silindirik kabuk elamanları .....	28
Şekil 2.16. Silindirik kabuğun membran teorisindeki gerilme notasyonları .....	30
Şekil 2.17. $N_{\phi}$ ve $N_{x\phi}$ gerilmeleri .....	32
Şekil 2.18. Silindirik kabuğun gerilme bileşenlerinin notasyonu .....	33
Şekil 2.19. Katlanmış plakların ana yük taşıma mekanizması .....	40
Şekil 2.20. Bir katlanmış plak kabuk yapısı örneği, Groenedaal hipodromu .....	40
Şekil 3.1. Çekme – Uzaman eğrisi .....	47
Şekil 3.2. Bazı kabuk yüzeyleri .....	70
Şekil 3.3. Bazı katlanmış plak çeşitleri .....	73
Şekil 3.4. Katlanmış plak kuvvet konfigürasyonu .....	76
Şekil 3.5. Yön seçimleri .....	77
Şekil 3.6. Birbirine yakın iki $n$ ve $n + 1$ plaklarının davranışı .....	77
Şekil 3.7. $T_n$ kenar kaymasının etkisi .....	80
Şekil 3.8. Deformasyondan sonra plakların konfigürasyonu .....	82
Şekil 3.9. Göz önünde bulundurulmuş altta çekme oluşturan momentler .....	84
Şekil 3.10. $T_n$ ve $T_{n-1}$ kenar kayma çiftinin görünümü .....	87

Şekil 3.11. Mafsallarda plakların durumu .....	88
Şekil 3.12. Mafsallarda momentlerin sebep olduğu açısal değişiklik.....	89
Şekil 4.1. Katlanmış plak teorisinin uygulandığı kare yüzey alanlı modüllerden oluşturulmuş MKY sisteminin idealize edilmiş şekli .....	92
Şekil 4.2. Katlanmış plaklar teorisinin MKY sistemine uyarlaması örneğinin sonlu elemanlar metoduna değişik yükleme ve mesnet şartlarında modellenmesi ve deformasyon örneklemeleri .....	104
Şekil 4.3. Üçgen ve bağımsız modüllerden oluşturulmuş 2m çaplı bir yarım küre kabuk .....	105
Şekil 4.4. Üçgen modüllerden oluşturulmuş yarım küre kabuk yapısı.....	106

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Çizelge 2.1. Uygulanacak test metotları standartları ve gerekli numune sayıları.....	20
Çizelge 3.1. Kompozit yapı eleman tipleri.....	46
Çizelge 3.2. Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelerle karşılaştırılması.....	57
Çizelge 3.3. Bazı ileri kompozit uygulamaları.....	59
Çizelge 3.4. Termoplastik polimerler için tipik polimerizasyon derecesi (PD) ve molekül ağırlığı (mw) .....	61
Çizelge 3.5. Kompozit malzemelerinin mekanik özellikleri .....	67
Çizelge 3.6. Kabuk yüzeylerinin ve MKY sisteminin sınıflandırılması.....	72
Çizelge 4.1. Örnek MKY sisteminin bazı teorik analiz sonuçları ve Sonlu Eleman Model sonuçlarıyla karşılaştırması.....	104

## SİMGELER DİZİNİ

$w_{\delta}$	Ölü Yük
$w_h$	Hareketli Yük
$w_t$	Toplam Yük
$w_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün ağırlığı
$h_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün genişliği
$l$	Sistemin uzunluğu
$l_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün yatay eksendeki uzunluğu
$\phi_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün yatay eksenle yaptığı açı
$\gamma_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün kendisinden sonraki modülle yaptığı açı
$d_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün kalınlığı
$A_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün kesit alanı
$Z_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün kesit modülü
$I_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün atalet momenti
$J_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün atalet momenti ara katsayısı
$P_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir mesnetteki katlanma noktası yükleri
$S_{n,n+1}$	$n$ 'den $n+1$ 'e dağıtma kuvveti
$S_{n,n-1}$	$n$ 'den $n-1$ 'e dağıtma kuvveti
$m_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir mesnette oluşan moment
$\Delta P_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir mesnette momentten oluşan ek yükler
$\Delta S_{n,n+1}$	$n$ 'den $n+1$ 'e ek yüklerden oluşan dağıtma kuvveti
$\Delta S_{n,n-1}$	$n$ 'den $n-1$ 'e ek yüklerden oluşan dağıtma kuvveti
$R_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modüldeki net yük
$m_{0,1...n}$	Net modül yükünden oluşan momentler
$T_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan her bir modülün kenar kayma kuvveti
$v_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan mesnetlerin yer değiştirmesi
$\mathcal{G}_{1...n}$	1'den $n$ 'e kadar olan mesnetlerin yer değiştirmesinden oluşan açısız değişiklikler
$\omega_{1...n}$	Yüklemeden dolayı oluşan açısız değişiklik
$\psi_{n,n-1}$	Travers momentlerinden oluşan açısız değişiklik
$\psi_{n,n+1}$	Travers momentlerinden oluşan açısız değişiklik
$f_{1...n}$	Her bir modül bağlantı kenarlarında oluşan uzunlamasına gerilme
$E$	Elastik modül
$\sigma$	Normal gerilme
$\tau$	Kayma gerilmesi
$G$	Kayma modülü
$R$	Eğrilik yarıçapı

$g$	Ölü ağırlık
$p_0$	Kar yükü
$N$	Birim kuvvet
$Q$	Birim kesme kuvveti
$M$	Moment
$\varepsilon$	Birim uzama
$\gamma$	Birim kayma gerinmesi

## 1. GİRİŞ

Günümüzde mevcut monolitik malzemelerin, yapısal anlamda kabuk yapılarının yapım aşamalarını zorlaştırdığı, bu yapılar için ideal bir malzeme kompozisyonu sağlamadığı ve bu tür yapı sistemlerinin oluşturulmasındaki zorluklar, doğada en ideal yapı biçimlerinden olan kabuk yapı formlarının, hak ettiği popülerliğe yeterince ulaşamamasına sebep olmuştur. Kabuk yapılarına duyulan ihtiyaç, onun alternatif malzemelerle ve yapısal anlamda sistemsel gelişimi gereksinimini doğurmuştur. Bu tez çalışması, bu ihtiyaca cevap verebilecek, tarafımızdan geliştirilen, yeni bir yapı sisteminin pratiğe uygulanabilirliğini araştırarak, bu sistemin yapısal tasarım prosedürlerinin temel prensiplerine yönelik detaylarla, endüstriye adaptasyonu için gerekli temel verilere ulaşmayı hedeflemektedir.

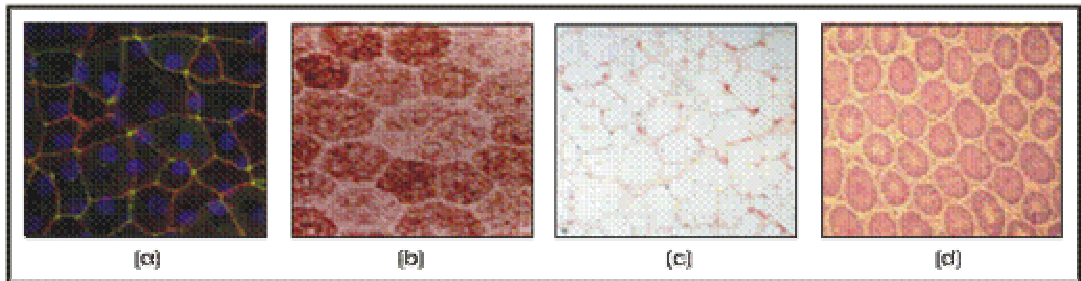
Modüler Kabuk Yapıları (MKY) olarak adlandırdığımız bu yeni yapı sisteminin, özellikle kabuk yapıları için, günümüzde monolitik ve yerinde yapılan (in-situ) kabuk yapılarda kullanılan, betonarme, çelik, monolitik Polimer Matris Kompozit (PMK), Elyaf Takviyeli Kompozit (ETK) sistemlerinden çok daha üstün olabileceği düşünülmektedir. Bu sistem, genel anlamıyla, uygulamada pratik ve yapıyı hızlı inşa edebilme özelliğinin yanında, malzeme ve yapı sistemi olarak da pek çok teknolojik ilerlemeyi bünyesinde barındırmaktadır.

Malzeme olarak ileri polimer kimyası teknolojisindeki gelişmelerden yararlanılarak prefabrike edilmiş, belli geometrideki modüllerin birbirine geçmesi yoluyla, parçacıklı kabuk yapı, değişken pek çok yüzeysel forma sahip olacak tarzda oluşturulur. Bu sistemde kabuk yapının modüler olmasından dolayı, parçalar (modüller) sökülüp takılabilir, yerleri değiştirilebilir, bozulan parçalar değiştirilebilir, yapı ihtiyaca göre büyütülebilir veya küçültülebilir, sökülüp taşınabilir, biçimsel formu değiştirilebilir. Bu sisteme eşdeğer bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu tez, aynı zamanda bu yeni yapı sisteminin yapı mühendisliği açısından temel alt

yapısının nasıl oluşturulabileceğini açıklamaya çalışarak, temel tasarım kriterlerinin nasıl belirlenebileceği ve muhtemel teorik yapısal tasarımının detayları konularında araştırma özetleri vermekte ve kapsamlı tartışmalar sunmaktadır. Bununla birlikte tasarım parametrelerinin hangi uluslararası standartlara uyması gerektiği de tartışılmıştır. Bu sistem için uygun malzeme çeşitleri ve üretim metotları konusunda da detaylı araştırmalar verilmiştir.

Bu sistemin uygulamaları, kabuk yapılarını, monolitik ve yerinde yapılan (in-situ) metotlardan kurtarmayı hedeflemektedir. İleriki araştırmalar yardımıyla, bu tezde verilen standartlar kullanılarak gerekli testlerin ve uygulama prensiplerinin gerçekleştirilmesi durumunda, bulunacak veriler sayesinde, mevcut tüm kabuk yapıları sistemlerine alternatif, onlardan yapısal ve mimari olarak daha üstün olduğu düşünülen, bu yeni sistemin, yapısal tasarım aşamasının altyapısının nasıl oluşturulacağı, bu araştırma ile somutlaştırılmaya çalışılmıştır.

Kabuk yapılar, doğada yaygın olarak görülen yapı formlarından biridir (örnek: kaplumbağa kabuğu, bitki yaprakları, yumurta kabuğu, hücre zarı, karpuz ve pek çok meyve kabuğu vs.). Doğadaki bu tür yapı formlarının genel özelliği, en az malzemeyle gerekli dayanım ve yük dağılımını sağlayarak, ortamı dış etkilerden korumalarıdır. Doğada modüler kabuk yapıları sistemiyle benzerlik gösteren organik formlar mevcuttur, örneğin Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi, her bir hücre, üç boyutlu olarak bağ dokularıyla bir bütünlük oluşturmakta olup, kuvvet iletimini tek bir yapı gibi sağlamaktadır.



Şekil 1.1. (a) İnsan Kornea Epitel dokusu, (b) At'ın retina pigmenti, (c) Kahverengi adipose dokusu, (d) Fare dokusu



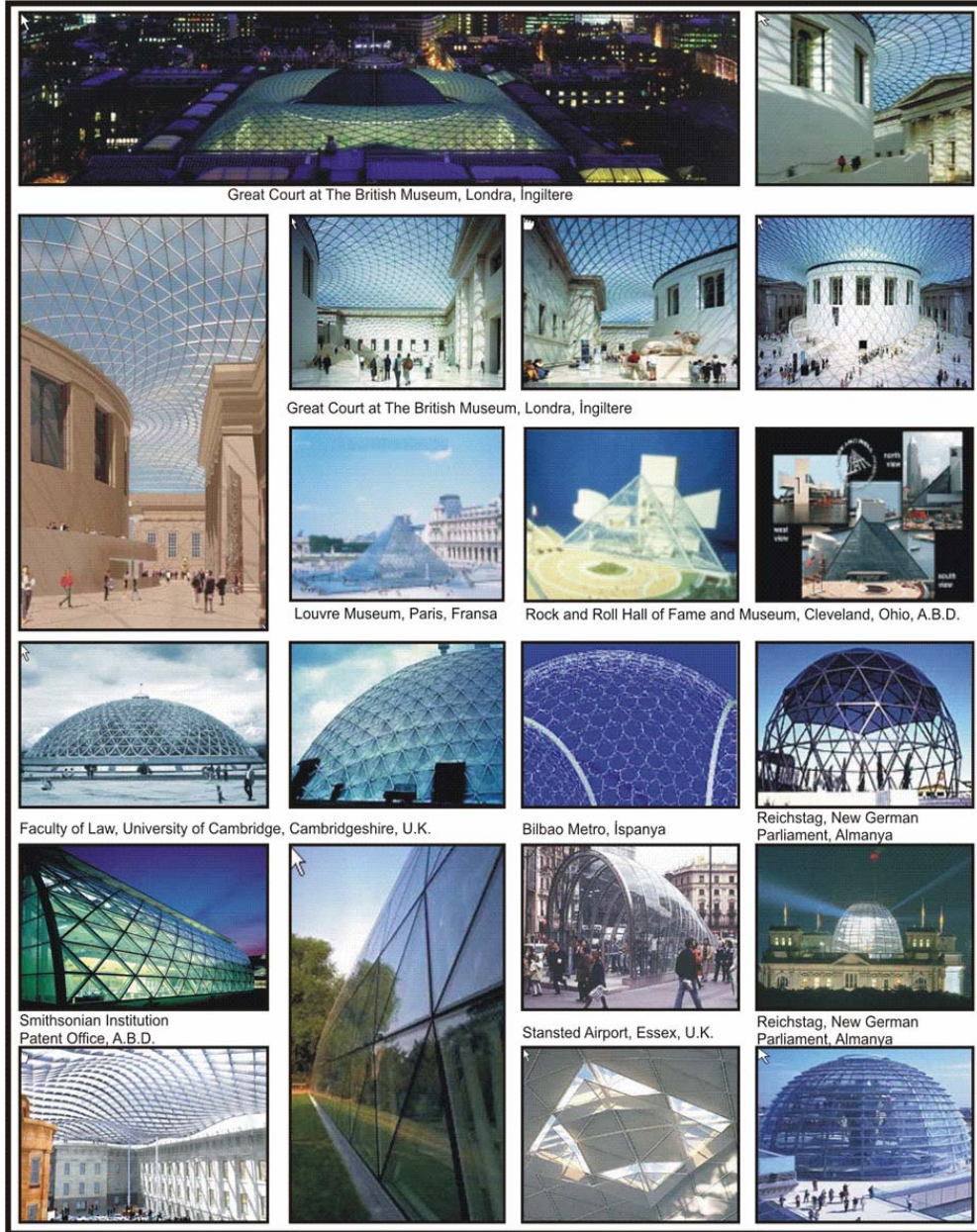
Bu üç boyutlu geometri, biçimsel olarak bir nar meyvesinin taneciklerine benzer. Bu durumda her bir hücre, üç boyutlu geometriye sahip parçalardan (modüllerden) oluşmuş, kendi içinde bireysel davranan, fakat bir bütün olarak çalışan ve kuvvetleri ileten bir yapı sistemi gibi düşünülebilir. Bu fikrin üç boyutlu kabuk dışı uygulamaları, ileriki bir araştırma konusu olup, bu tez çalışmasının dışında bırakılmıştır. Ancak, bu yapı, sadece yüzeysel olarak düşünüldüğünde, hücreler ve yağ dokularının beraber çalıştığı bir kabuk sistem gibi algılanabilir.

Her bir hücre, tek parça segmentler gibi düşünüldüğünde ve bu parçacıkların birbirine uygun bir geometride ve tarzda bağlandığı kabulüyle, bu oluşan yapı şekli, modüllerden meydana gelen bir kabuk yapı sistemine benzer. Bu benzerlikten yola çıkılarak, bu sistem *modüler kabuk yapılar* (MKY) olarak isimlendirilmiştir.

Yapı mühendisliğinde, özellikle geniş açıklıkları daha az malzemeyle geçebilme özelliğine sahip olan kabuk yapı formlarında kullanılacak malzemenin de, hafif, yeterli yük dayanımına sahip ve bir yapı sistemi dahilinde kolay uygulanabilir olması gereklidir.

Kullanılacak ana malzeme ve monolitik uygulamalarla ilgili pek çok araştırma, ulusal ve uluslararası öncü araştırma kuruluşları tarafından yapılmaktadır. Görünüş olarak kısmen bu sistemi anımsatan ve taşıyıcı sistem olarak da uzay kafes sistem kullanılmış uygulamalar bulunmaktadır. Bu araştırmayla önerilen yeni kabuk yapıları sistemine görünüş olarak kısmen benzeyen, ancak yapısal anlamda kafes sistem formunda olan ve önerilen sistemin bir önceki aşaması olduğu düşünülen bazı yapı örnekleri Şekil 1.2.'de verilmiştir.

MKY sisteminin uygulanabilirliğinin araştırılması konusundaki bu tez çalışmasının kapsama alanı, öncelikle, bu sistemin en büyük özelliklerinden biri olan sökülüp takılabilen parçalı sistemin bağlantılarının tasarlanması, bilgisayar ortamındaki analizler yardımıyla boyutlandırılması ve sistemin mekanik davranışının incelenmesidir.



Şekil 1.2. Bu araştırmayla önerilen yeni kabuk yapıları sistemine görünüş olarak kısmen benzeyen ancak yapısal anlamda kafes sistem formunda olan ve önerilen sistemin bir önceki aşaması olduğu düşünülen bazı yapı örnekleri

Pratikte karşılaşılabilecek tipik ve kritik yüklemelerin muhtemel sebep olacağı, tasarlanan bağlantı detaylarındaki gerilme iletimi, büyüklüğü ve yoğunlaşmasının, tasarımın ne kadar iyi detaylandırıldığı gösterdiğinden, bu tez MKY sisteminin yapısal anlamda uygulanabilirliğini bu yolla araştırarak, ilk teorik alt yapısını oluşturmayı hedeflemektedir. Bu yolla, bu yeni sistemin yapısal tasarımı ve teknolojisi için gerekli olan temel parametreler belirlenecektir. Temel anlamda bulunan tüm verilerle, mevcut tüm kabuk yapıları sistemlerine alternatif ve onlardan

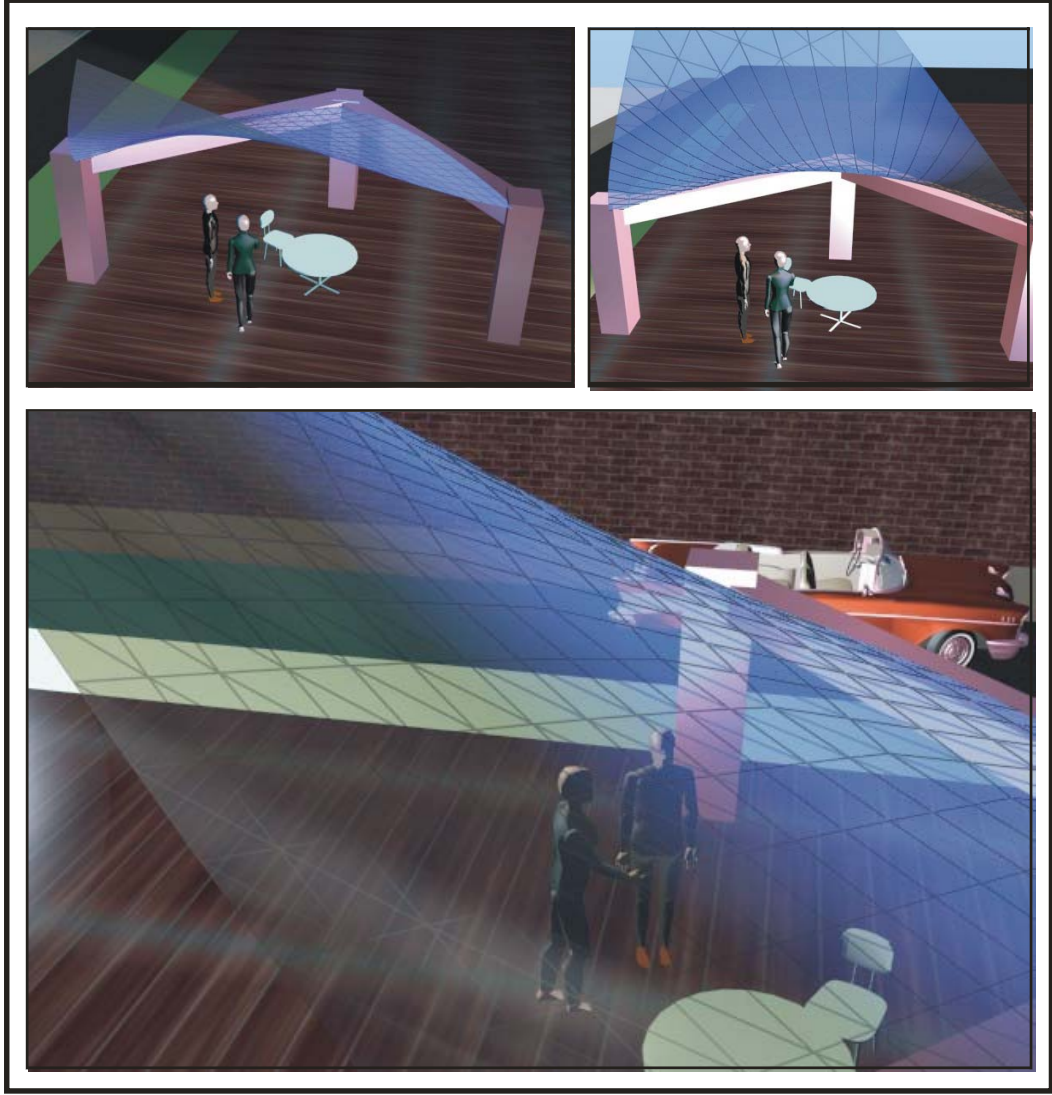
yapısal ve mimari olarak çok daha üstün olduğu düşünülen bu sistemin, yapısal tasarım aşamasının altyapısının oluşturulması bu tez çalışmasının ana hedeflerinden biridir.

Bu tez çalışması, kabuk yapı formlarında kullanılacak malzemenin hafifliği, yeterli yük dayanımına sahip olması ve bir yapı sistemi dahilinde kolay uygulanabilmesi gereksinimine bir çözüm sunmaya çalışmaktadır. Bu çalışma, Modüler Kabuk Yapıları olarak adlandırdığımız bu yeni yapı sisteminin, tasarım kriterlerinin ve geliştirilecek tasarım metodunun, gerekli temel parametrelerinin belirlenmesini amaçlar. Bu yolla, mevcut kabuk yapı sistemlerindeki malzeme ve yapım aşamalarına, teknolojik anlamda modern alternatifler sunularak uygulamada pratiklik kazandırılması sağlanmaya çalışılacaktır.

Bu yeni yapı sisteminin, tasarım kriterlerinin ve muhtemel yapısal tasarım metodunun, gerekli temel parametrelerinin belirlenebilmesi için temel prensiplerin detaylandırılması ve bu sistemin uygulanabilirliğinin hem modül detaylarının araştırılmasıyla, hem de bu detayların yeterliliğinin bilgisayar ortamında analizi ile gösterilmesi bu tez araştırmasının ana kapsama alanlarıdır.

Bu yapı sistemi, önceden imal edilmiş (prefabrike edilmiş), belli geometrideki modüllerin birbirine geçmesi yoluyla, yapıyı değişken pek çok yüzeysel forma sahip olacak tarzda oluşturur. Örnek olarak Şekil 1.3.'te bilgisayar modellemesi yapılmış tipik bir modüler kabuk yapı sistemi verilmiştir.

Prefabrikasyonda kolaylık açısından, kullanılacak modüllerin, belli bir veya birkaç standart şekle sahip olması arzulanmaktadır. Bu modüllerin, uygun boyutlarının ve şekillerinin ne olacağı, araştırma konularından biridir. Kendi içerisinde bireysel davranan modüller, tüm strüktür göz önünde bulundurulduğunda, bağlantı (geçme) noktalarındaki yük iletimi sayesinde (interlock), tek bir yapı gibi, kabuk yapının şekil fonksiyonunu oluşturur (Algin ve Knapton, 1998; Algin ve Knapton, 1995).

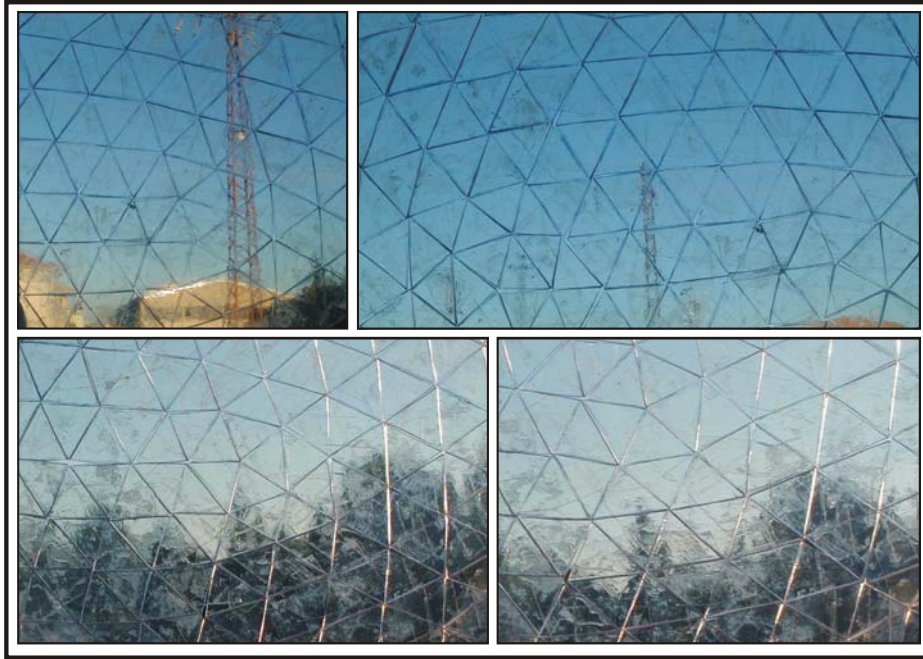


Şekil 1.3. Modüler Kabuk Yapı sisteminin uygulandığı bilgisayar ortamında modellenmiş kompleks bir kabuk yapısından (hyperbolic paraboloidal saddle dome) görüşler

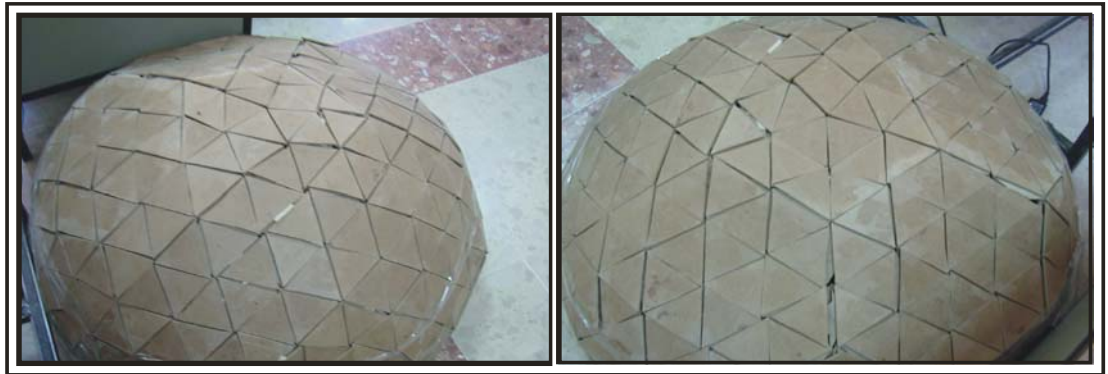
Modüllerin birbirine geçmedeki (bağlantı detaylarındaki) toleransları sayesinde, her modül, komşu modülle değişken bir açısal bağlantı yapar. Bu tolerans, global strüktürün oluşmasını sağlamaktadır. Modüller arasındaki açısal değişkenliğin, tüm kabuk yapının yüzeyi boyunca farklılık göstermesi yoluyla ve şekil fonksiyonunun oluşturulması amacıyla, istenilen forma sahip bir kalıp (framework) üzerine modüller monte edilerek, strüktürün (kabuk yapı yüzeyinin) oluşturulabileceği düşünülmektedir. Ancak zeminde montajı yapıldıktan sonra, istenilen formu oluşturabilecek tarzda, askılama metoduyla yükseltilip, kendinden şekillenebilecek biçimde de kabuk yüzeyinin oluşturulabileceği düşünülmektedir. Bütün kabuk elemanları (modüller) standart formdadır. Üçgen modüllerin, değişken



yüzeylerin oluşturulmasında matematiksel açıdan daha uygun olduğu, yapılan ön çalışmalarda belirlenmiştir. Tarafımızdan yapılan ölçekli maket çalışmasından bazı görüşler Şekil 1.4. ve 1.5.'te verilmiştir. Prefabrike edilecek standart modül boyutlarının, tüm istenen genel şekil fonksiyonlarını oluşturacak tarzda, bir veya birkaç farklı boyuttan fazla olmaması, uygulama (konstrüksiyon) aşamasında kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir. Bunun diğer bir avantajı, üretim aşamasındaki zorlukların azaltılmasıdır.

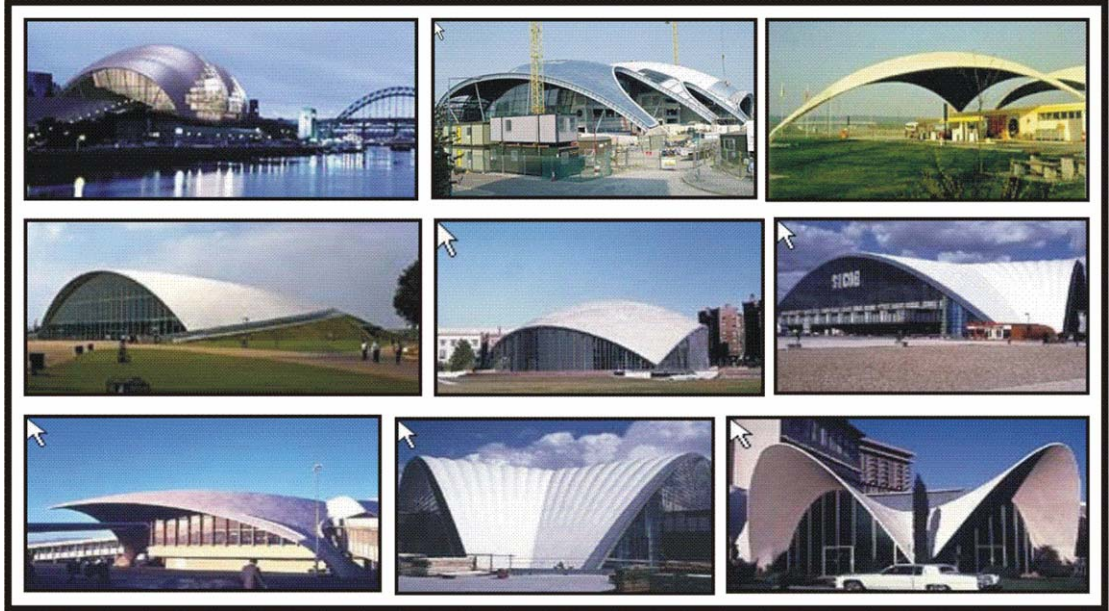


Şekil 1.4 Küçük ölçekte maket çalışması tarafımızdan yapılmış tipik bir MKY sisteminden görüşler



Şekil 1.5. Ahşap malzemeyle küçük ölçekte maketi yapılmış bir MKY sisteminden görüşler, bu maket çalışmasında kazanılan deneyimler ışığında yeni modül tasarımları yapılmıştır

Modüllerin birbirlerine geçme (bağlantı detayları) kenarlarında sızdırmazlık contaları kullanılacak ve ortam dış hava etkilerinden korunacaktır. Bu sızdırmazlık contalarının esnek davranışının diğer bir avantajı da deprem ve rüzgar yükü gibi yatay yüklerin yarattığı titreşimleri sönmüleyerek azaltmasıdır. Kullanılan bu contalar (tipik *chloroprene elastomer* gibi davranarak), özellikle deprem durumunda, doğal bir sismik izolasyon sağlayarak, yapının stabilitesini koruyup oluşacak yatay yükleri tüm sisteme azalan bir titreşimle yayacaktır. Modüler kabuk yapıları sisteminin uygulanabileceğini düşündüğümüz, bazı örnek kabuk yapı biçimleri Şekil 1.6.'da verilmiştir.



Şekil 1.6. Modüler kabuk yapıları sisteminin uygulanabileceğini düşündüğümüz bazı yapı formları

Bu yeni sistemin, monolitik ve yerinde yapılan (in-situ) betonarme, çelik ve ETK-PMK sistemleriyle kıyaslandığında en önemli avantajları şunlardır;

- Optimum tasarıma imkan sağlayacak derecede hafif ve dayanımının yüksek olması,
- Bu sistemde yüzey kaplama malzemesi aynı zamanda taşıyıcı sistemin iskeletini de oluşturduğundan estetik ve ekonomik avantajlar sunar,
- Uygulaması kolay ve hızlıdır,
- Prefabrik üretim, standart dayanım olanağı sunar,

- Yapı pek çok yüzeysel forma sahip olacak tarzda oluşturulabilir,
- İhtiyaca göre yapı büyütülüp küçültülebilir, şekli değiştirilebilir,
- Kolayca sökülüp taşınabilir,
- Bozulan parçaları değiştirilebilir,
- Konstrüksiyon hatalarını en aza indirir,
- Yapı hizmet ömrünü tamamladıktan sonra kolayca sökülüp çevreye zarar vermeden tekrar kullanılabilir. Atık malzeme oluşturmaz bu yönüyle çevre dostudur,
- Yapı modülleri önceden üretildiği için, kalıp maliyeti yerinde kalıplamaya kıyasla çok daha ucuzdur,
- Çok soğuk veya çok sıcak iklimlerde dahi yapı oluşturulabilir,
- Çelik ve betonarme yapılardaki gibi korozyon problemi yoktur,
- Kontrolsüz imalat şartları olmadığından yapı daha güvenli olarak yapılabilir,
- İşletme maliyeti çok daha düşüktür,
- Bağlantı noktalarının esnek olmasından dolayı çelik ve betonarme yapılardaki gibi oturma problemi veya deprem kuvvetleri bu yapı sistemine çok daha az etkili olacaktır. Bu durumda, yapının stabilitesini etkileyen üst yapı hasarları çok daha az olur,
- Yapı modülleri prefabrik üretildiği ve geometrik olarak modüllerin yapı formundaki pozisyonları belli olduğundan, tasarım ve uygulamada kolaylık sağlar, hatalı yapı yapma riskini azaltır,
- İhtiyaca göre aydınlık mekan sağlar,
- Modüller farklı renk ve dokularla üretilebilir,
- Yapının hizmet ömrü süresince boyayla ilgili bakım ihtiyacı yoktur,
- Hijyeniktir ve temizlenmesi kolaydır,
- Daha özgün ve modern mimari uygulamalara imkan sunar.

Bu şekilde oluşturulan kabuk yapıları, genel kabuk sistemlerinde olduğu gibi, yük dağılımını yapının tümünde yüzeye yaymakta olup, kafes sistemlerdeki gibi açıklık oluşmasına da imkan sunmaktadır.

Tasarım parametrelerine en uygun cevap vereceği düşünölen bu yeni kabuk yapıları sistemi aşğıdaki yapılarda kullanılabilir.

- Geniş açıklıklı çatı sistemi olarak; terminal, istasyon, stadyum, kubbe yapılar, vb.
- Hızlı konstrüksiyonun gerektiği yerlerde; deprem sonrası geçici konutlar, şantiye binaları, afet yardım ve acil barınak mekanı oluşturmada, vb.
- Geçici yapılarda; fuar, sergi, sirk, vb.
- Savunma bakanlığının ihtiyaç duyabileceği yapılarda; hangar, karargah binaları, askeri koğuş, köprü, vb.
- Sera yapılarında,
- Bina iç ve dış mimari uygulamalarında; dış cephe giydirme, iç mekanlarda seperasyon, asma tavan, bölme panel duvar vb. uygulamalarda
- Tüketicinin alıp kendi başına yapabileceği uygulamalarda; araba garajı, kış bahçesi, otobüs durağı, gölgelik, kamerya, vb.



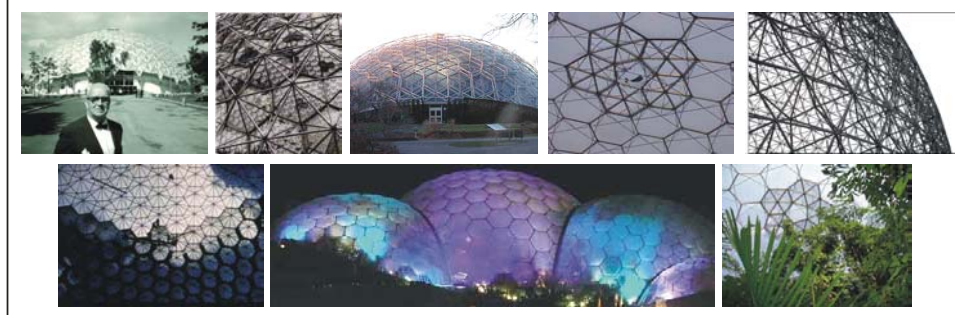
## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. MKY Sistemi Hakkındaki Literatür Özeti

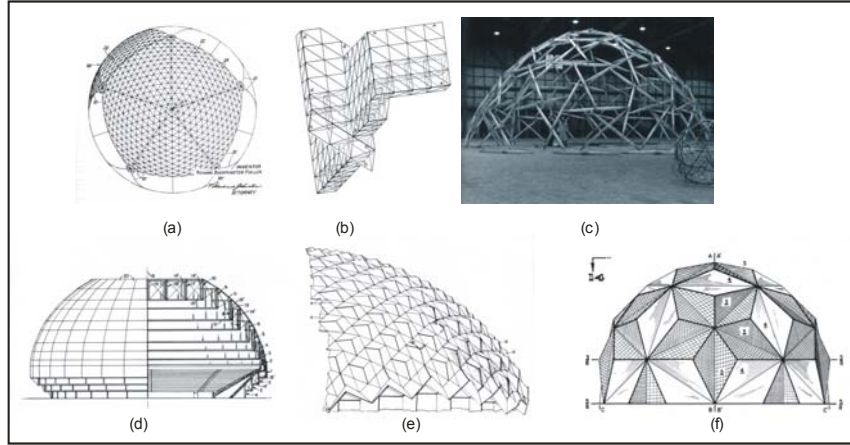
Bu tez çalışmasıyla önerilen, MKY sistemine eşdeğer bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Ancak görünüş olarak kısmen bu sistemi anımsatan ve taşıyıcı sistem olarak da uzay kafes sistem kullanılmış uygulamalar bulunmaktadır. İlk betonarme kabuk yapıları uygulaması 1919 yılında Alman mühendis Bauersfeld (1919) tarafından yapılan yarım küre formundaki planetaryumdur. Aslında bu uygulama modern kabuk yapılarının da ilk uygulamasıdır.

Bu uygulamayı takiben 1949 yılında, “dahi” olarak nitelendirilen Amerikalı mimar Buckminster Fuller, ucuz ve etkili yerleşim mekanları oluşturmak için benzer fakat oldukça yeni bir sistemi tanıtmıştır (Snyder, 1980; Zung, 2001) Bu sistem şu anda bilinen ismiyle uzay kafes sistemidir. Bu yöntemle 28 m çaplı Ford yönetim binasının çatısı yapılmıştır (Pawley, 1991). Bu yapı, geleneksel beton kubbe kabuklarıyla kıyaslandığında %95 daha hafif olup sadece 3 ayda tamamlanmıştır. 1 700 kg toplam ağırlıkta 12 000 alüminyum çubuk elemanı kullanılmıştır ve her bir üçgen kafes içersinde fiberglass elemanlar kullanılmıştır (Ward, 1984). 1970’lerde modern bakış açısının popüler olmasıyla bu sistem oldukça yaygınlaşmıştır. Bu yapılardan en önemlileri arasında 1982 yılında inşa edilen, 48-m çaplı yarı küre formunda olan, Walt Disney World's Epcot Center gelir (Zung, 2001). Diğer ünlü yapılar arasında, Montreal’de Fuller tarafından yapılan altıgen elemanlı yarım küre formlu kafes yapısı ve Eden projesi örnek olarak verilebilir. Bu projelerden bazı görünüşler Şekil 2.1.’de verilmiştir (Zung, 2001). R. Buckminster Fuller tarafından pek çok uzay kafes çeşidi tasarlanmış ve çoğu uygulanmıştır. Bu tasarımlardan bazıları Şekil 2.2.’de gösterilmiştir (Zung, 2001). Bunlar düzlem, tek eğrili, çift eğrili veya daha kompleks çok eğrili olarak biçimlidirler (Şekil 2.3.). Özellikle Şekil

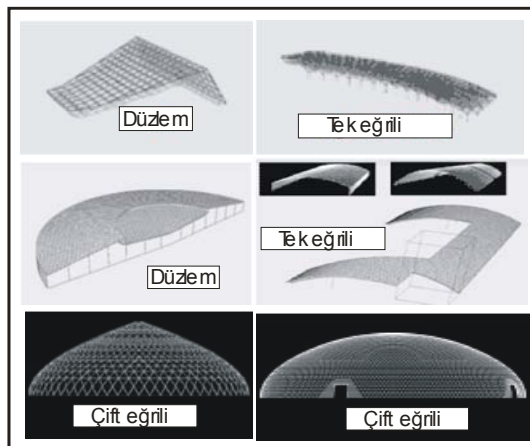
2.2c’de gösterilen tensegrity uzay kafes sistemi, oldukça popüler olmuştur. Bu sistemin bağlantı detayları insan eklem sistemine benzer (Ward, 1984) (Şekil 2.4.).



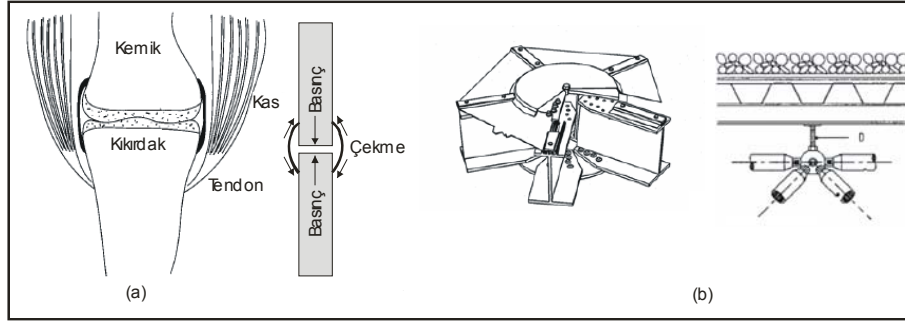
Şekil 2.1. Americalı mimar Buckminster Fuller tarafından yapılmış Montreal ve Eden proje kubbe yapıları (Zung T.K. 2001)



Şekil 2.2. Buckminster Fuller tarafından patenti alınmış bazı uzay kafes formulu kubbe yapıları (Zung, 2001), a) Geodesik kubbe, b) Octet uzay kafes sistemi c) Tensegrity, d) Aspension Geodesik yapı, e) Yıldız Tensegrity (Sekizyüzlü Kafes), f) Katmanlı kubbe

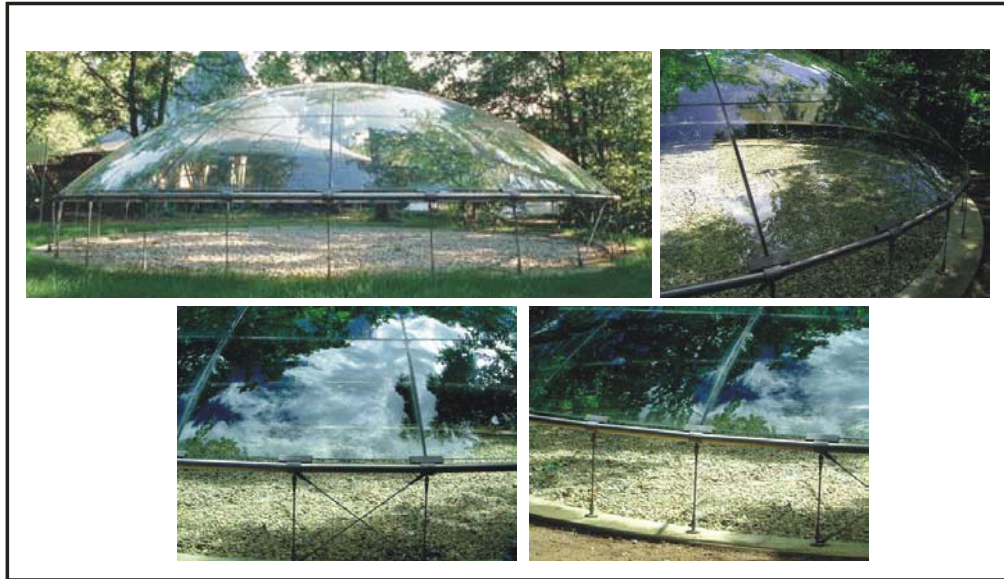


Şekil 2.3. Düzlem, tek ve çift eğrilige sahip kabuk formları (Applewhite, 1986)



Şekil 2.4. a) R. Buckminster Fuller tarafından tasarlanan Tensegrity uzay kafes kubbe yapısında kullanılan elemanların bağlantı detayı insan eklem sistemine benzetilmektedir (Ward, 1984). b) bu sistemin gerçek bağlantı detaylarından bir örnek (Ward, 1984)

Son zamanlarda (2004 yılında), Stuttgart Üniversitesi bahçesinde Prof. Werner Sobek ve Doktora öğrencisi Lucio Blandini tarafından, çelik konstrüksiyonun 8.5 m çaplı kubbe yapıda kullanılmadığı strüktür, sadece cam kullanılarak inşa edilmiştir (Blandini, 2005). Bu yapı, bu tez’de araştırılan sisteme benzemektedir, ancak cam elemanlar eğriseldir ve bu anlamda MKY’den ayrılırlar. Cam elemanlar sadece bu form için üretilmiş olup, başka bir formda kullanılamazlar. Cam elemanların eğrilikleri sabittir. Bu yapı Şekil 2.5.’de gösterilmiştir (Blandini, 2005). Ancak MKY sisteminin taban bağlantı kısımları bu yapının taban bağlantı kısımları gibi düşünülebilir (Şekil 2.6.).



Şekil 2.5. Prof. Werner Sobek ve Doktora öğrencisi Lucio Blandini tarafından Stuttgart Üniversitesi bahçesinde yapılmış cam kubbe yapıdan bazı görüşler (Blandini, 2005)



Şekil 2.6. Prof. Werner Sobek ve Doktora öğrencisi Lucio Blandini tarafından Stuttgart Üniversitesi bahçesinde yapılmış cam kubbe yapının taban bağlantısı (Blandini, 2005)

## 2.2. MKY Sisteminde Muhtemel Kullanılabilecek Malzemeler ve Test Yöntemleri Hakkındaki Literatür Özeti

Çağımız teknolojisinin popüler araştırma konularından olan ETK ve monolitik polimer kompozit kabuk yapıları üzerine pek çok araştırma öncü araştırma kuruluşları tarafından yapılmaktadır. Özellikle NASA (National Aeronautics and Space Administration), FAA (Federal Aviation Administration) ve A.B.D. Savunma Bakanlığı, bu konudaki test yöntemleri, tasarım kriterleri, üretim metotları gibi konularda kapsamlı bir altyapıya sahiptir.

Bu tür kompozitlerin kullanım alanı her geçen gün artmakta ve pek çok sektörde geleneksel malzemelerin yerini almaktadır; inşaat mühendisliğinde yapı güçlendirmesinde beton ve çelik yerine kullanılması, otomobil şase yapımında çelik yerine kullanılması, uzay gemilerinde ve uçak yapımında alüminyumun yerine kullanılması vb.

MKY sisteminde kullanılması gerektiği düşünülen ana malzeme polimer reçinedir. Polimerler, hafifliği, sağlamlığı ve korozyona karşı yüksek dayanıma sahip olması nedeniyle, yaygın bir şekilde inşaat mühendisliğinde kullanılmaktadır. *Oligamer* reçine olarak genelde isimlendirilen bu grup polimerlerin ortak özelliği

belli bir formu alacak tarzda, ortam sıcaklığında kalıplanabilmeleridir (Agarwal ve Broutman, 1990; Jones, 1999; Gibson, 1994).

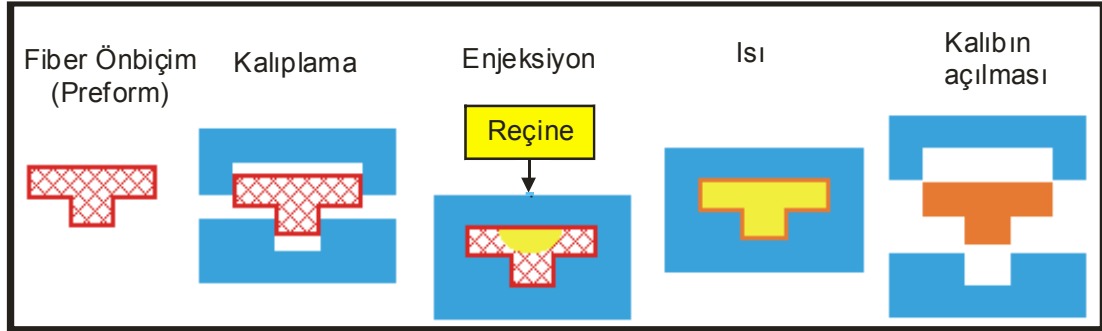
ETK olarak kullanılan, bu termoset polimerler ortam ısısı sayesinde, akışkan formundan *vitrifikasyon* aşamasıyla rijit forma geçerler (Shuart ve ark., 2000). Elde edilen rijit polimer, tüm kısımlarında kimyasal bağların sebep olduğu bir ağ yapısına sahiptir ve termoplastiklerden çok daha az ısıya duyarlıdır (Jones, 1999). Bu polimerin ısı dayanımını artırır, erime veya akmasını önler. Bu grup polimerlere örnek, *Urethane, epoxy, polyester, vinylester, phenol formaldehyde, bismaleimide* vs. verilebilir.

Pek çok türleri bulunan bu grup polimerler, kalıplama için uygun reçine viskozitesine sahip olup, polimerizasyondan sonra mükemmel ısı, kimyasal madde ve sünme dayanımına sahiplerdir (Agarwal ve Broutman, 1990; Jones, 1999; Gibson, 1994). Yanmayan polimer çeşitleri de vardır (FAA, 2001).

Ekonomik olarak ucuz olan türleri bulunmaktadır (örneğin *epoxy, polyester*). Düşük yatırım maliyetleriyle iyi yüzey kalitesine sahip olacak tarzda kalıplanabilen bu tür polimerler kullanılarak, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle fiber takviyeli veya takviyesiz kompleks şekiller rahatlıkla oluşturulabilir (DDCMHB, 2002).

Şekil 2.7.'de bu kalıplama yönteminin aşamaları şematik olarak gösterilmiştir. Bu kalıplama yöntemi için uygun reçinenin, viskozitesinin 200 cps'den düşük olmaması, reçine karışımının uygulama süresinin ısı altında 2 saatten fazla olması, ve 175 °C'den az uygulama ısısında bu sürenin ortalama 1 saatten az olmaması gereklidir (Agarwal ve Broutman, 1990). Bu durumda, MKY sistemi için gerekli olan modüllerin en ekonomik şekilde gerçekleştirilebilmesi için en ideal malzeme, oda ısısında sertleşmesi avantajından dolayı, *aliphatic urathane acrylic* ve *epoxy* türü polimer gurubu olmaktadır. *Aliphatic urathane acrylic*'in *epoxy*'ye olan üstünlüğü ise UV ve mekanik dayanımının yüksek olan türlerinin olmasıdır (DDCMHB, 2002). Ancak *Polyurethane, epoxy*'ye göre (endüstride henüz yeterince yaygınlaşmadığı için) yaklaşık üç kat daha pahalı bir malzemedir. Tarafımızdan yapılan ön denemeler

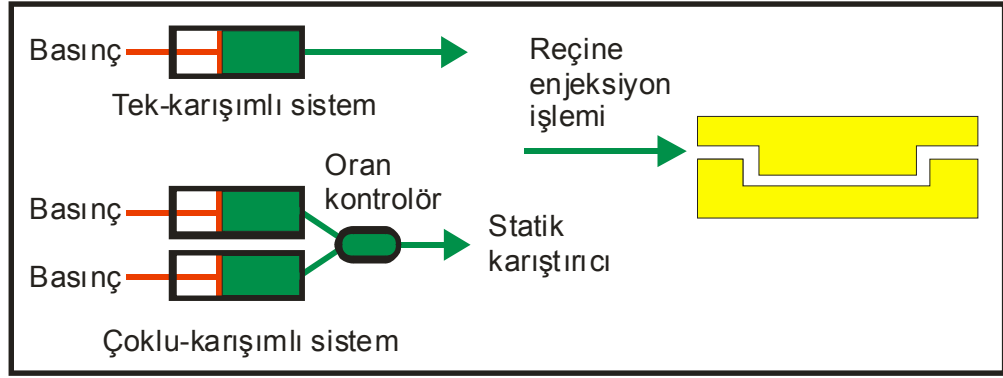
gösteriyor ki, ileride yapılacak uygulamaların en ekonomik şekilde gerçekleştirilebilmesi için, makul UV sınırları arasında olan, düşük viskoziteli *epoxy* reçine uygun seçenek olarak görülmektedir.



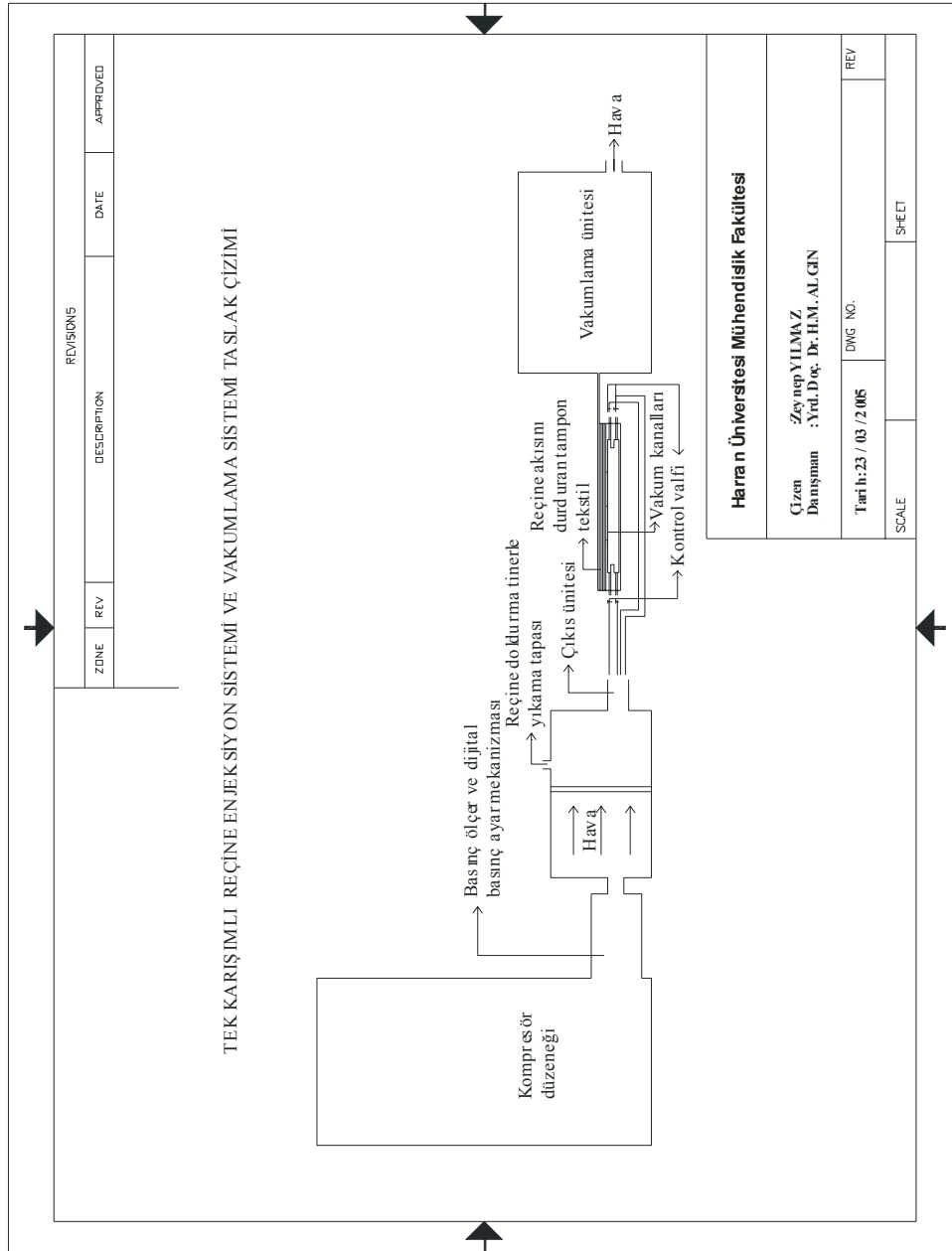
Şekil 2.7. Tipik enjeksiyon kalıplama tekniği aşamaları (DDCMHB, 2002)

Polimer reçinelerin kalıplamasında kullanılan teknik, endüstride sıkça uygulanır. Birbirine uyan iki kalıp içine, fiber (elyaf) önbiçim (preform) konur ve polimer karışımı düşük basınçla enjeksiyon nozullarından pompalanır ve ısı yardımıyla reçinenin sertleşmesi sağlanır (DDCMHB, 2002). Bu aşamalar Şekil 2.7.'de şematik olarak gösterilmiştir. Önbiçim (preform) için modüllerin istenen dayanımları ve uygun permabilite değerleri çerçevesinde, pek çok fiber çeşidi pazarda mevcuttur (örneğin karbon, cam, kevlar vs.). Bunlar uygulama türüne göre iki veya üç boyutlu, örgülü veya dikişli olabilir.

Isı uygulamaları için endüstride, üç genel yöntem kullanılmaktadır, bunlar kalıbın oturduğu üst ve alt düzlemlerin ısıtılması, kalıp içinde belli noktalardan ısı kanallarıyla ısıtma ve son olarak, kalıbın fırında ısıtılmasıdır. Isıtma işlemi polimerizasyonu hızlandırmak için yapılır. Ancak ekonomik olması gayesiyle fiber-glass kalıp kullanılması düşünüldüğünde, soğuk dökümle oda sıcaklığında kurutma işlemi uygulanabilir. Enjeksiyon işlemi en ekonomik olarak Şekil 2.8.'de gösterilen tek karışımli enjeksiyonlama sistemi tercih edilerek yapılabilir. Bu enjeksiyon ve vakumlama düzeneğinin detayları Şekil 2.9.'da verilmiştir.



Şekil 2.8. Tipik enjeksiyonlama yöntemleri



Şekil 2.9. Tek karışimli enjeksiyonlama sistemi detayı

Özellikle NASA ve FAA, ETK ve PMK malzemeleri hakkında test yöntemleri, tasarım kriterleri ve üretim metotları gibi konularda kapsamlı bir altyapıya sahiptir. ETK, otomobil, uçak, uzaygemisi, açık deniz yapıları, inşaat altyapıları, elektronik ve deniz araçları gibi pek çok değişik uygulamalarda kullanılmaktadır (Agarwal ve Broutman, 1990). Yüksek performans gerektiren uygulamalarda ETK tipik olarak, polimer matrisi içersinde çok yönlü karbon veya cam fiberlerle biçimlenir. Bu tür çok yönlü kompozitler fiberin eni ve boyu yönünde farklı rijitlik ve dayanıma sahiplerdir. ETK'nin bu *ortotropic* özelliği, onun yoğun fiber yönünün yük uygulama yönüne göre ayarlanabilmesini sağlama avantajı sunar. Bu durum optimum rijitlik, dayanım ve yapının daha hafif olmasını sağlar. Kompleks kompozit yapılar için çok yönlü fiberler bir avantajdır (DDCMHB, 1996). Çok yönlü fiberler kullanılarak fiberin değişik açılarda uygulamaları sonsuz bir varyasyon sağlar. Ancak tasarımcının gerekli rijitliği ve dayanımı bilmesi gereklidir. Her bir matris kombinasyonunun laboratuarda testinin pratik olmaması dolayısıyla, verilen yönde kompozitin mekanik özelliklerini belirleyen bir metot geliştirilmiştir. Lineer Laminasyon Teorisi (LLT) veya Klasik Laminasyon Teorisi (Agarwal ve Broutman, 1990; Jones, 1999; Gibson, 1994) olarak literatürde referans edilen bu metot, eğer çok yönlü fiberin mekanik özellikleri biliniyorsa kullanılabilir.

LLT metodunda bağımsız koordinat eksenleri, çok yönlü fiber yönüne göre adlandırılır. Ana malzeme yönü olan 1-2-3 koordinat sistemi, çok yönlü fiberin x-y-z koordinat sistemine uyarlanır. Yön-1, Yön-2 ve Yön-3, sırasıyla, boyuna enine ve düzleme dik, fiber eksen yönlerini gösterir ve x-y-z koordinat sistemi, yapının geometrisine göre düzenlenir. LLT metodunun kullanımında, Yön-1 eksenindeki elastik modülün ( $E_{11}$ ), Yön-2 eksenindeki elastik modülün ( $E_{22}$ ) ve kayma modülünün ( $G_{12}$ ) bilinmesi gereklidir (Gibson, 1994). Poisson oranlarından biri de ( $\nu_{12}$  veya  $\nu_{21}$ ) bilinmelidir. Benzer bir şekilde, çekme gerilmeleri ( $\sigma'_{11}$  ve  $\sigma'_{22}$ ), basınç gerilmeleri ( $\sigma^c_{11}$  ve  $\sigma^c_{22}$ ) ve düzlem kayma gerilmesinin ( $\tau_{12}$ ) bilinmesi gerekir (Gibson, 1994). LLT düzlem gerilme şartlarını kabul eder, dolayısıyla  $E_{33}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$  ve aynı zamanda  $\sigma^f_{33}$ ,  $\sigma^c_{33}$ ,  $\tau_{13}$  ve  $\tau_{23}$  gerekmemektedir. Genelde 0°-ply

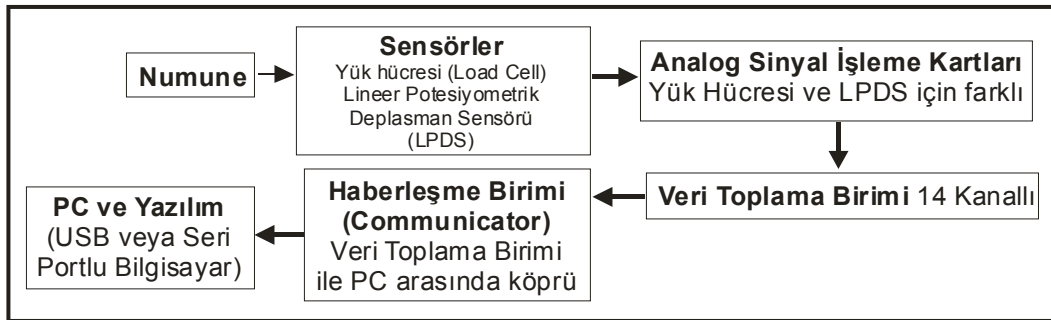


eksenel basınç dayanımı denilen boyuna basınç gerilmesinin ( $\sigma_{11}^c$ ) belirlenmesinde güçlükler yaşanmaktadır (DDCMHB, 1996).

ASTM (American Society for Testing and Materials)'nın *round-robin* basınç testi gösteriyor ki standart basınç test metotları bile çok farklı sonuçlara ulaşabilir (DOT/FAA, 1999; DOT/FAA, 2000). Bu durumda, tasarımda güvenlik faktörü artırılmakta ve tasarım-üstü, daha ağır bir yapı oluşturulmaktadır.

Kolay uygulanabilen, hassas sonuçlar veren, kompozit malzemeler için güvenilir bir basınç testi metodu, özellikle basınca çalışan elamanların yapısal tasarımında önemlidir. Parametrik, Kombine Basınç Yüğü (KBY) test metodu çalışması (DOT/FAA, 1999) gösteriyor ki, numune kalitesi, yükün pozisyonu, fiberle olan açısı ve basınç kafasının boyutsal toleransının, malzemenin basınç taşıma özelliklerinin ölçümünde önemli bir etkisi vardır. Ölçümlerin daha hassas yapılabilmesi için numune hazırlanması ve test prosedürlerinin iyileştirilmesi yönünde öneriler ve rehber çalışmalar mevcuttur (örneğin FAA ve NASA araştırma raporları vs.).

MKY sistemi için üretilecek modüllerinin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için ne tür testlerin, hangi standarda uyması gerektiği ve gerekli numune sayıları literatürlerden yararlanılarak aşağıda anlatılmış olup Çizelge 2.1.'de özetlenmiştir. Numune test ölçüm verilerinin belirlenmesini sağlayacak düzeneğin genel şeması Şekil 2.10.'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Kullanılacak test ölçüm verilerinin belirlenmesini sağlayacak düzeneğin genel şeması

Çizelge 2.1. Uygulanacak test metotları standartları ve gerekli numune sayıları

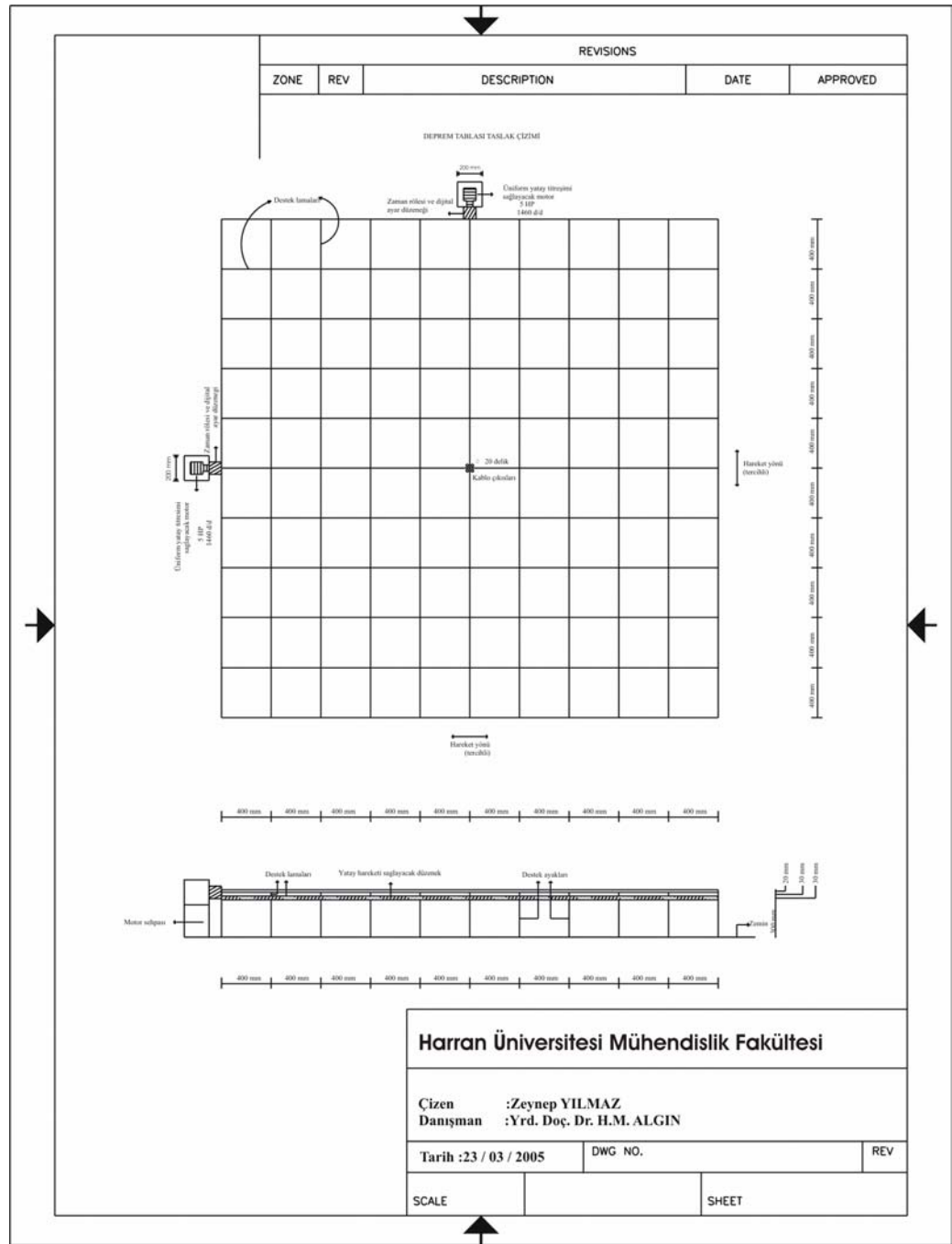
Test Kategorisi	Test metotlarının standartları		Yapılabilecek testler	Üretici firma tarafından yapılması gereken testler	Ortalama 40 cm kenarlı üçgen formunda modüller için numune sayısı
	ASTM	SACMA			
Reçine içeriği	D 3529, C 63, D 530, D 3171, D 2734	RM 23, RM24, RM 10	---	✓	---
Reçine akışı	D 3531	RM 22	---	✓	---
Reçine jelleşme süresi	D 3532	---	---	✓	---
Fiberin alansal ağırlığı	D 3776	RM 23, RM24	---	✓	---
Ortam nem ölçümü	D 5229	RM 11	✓	---	---
Fiber hacmi	D 3171, D2734	RM 11	---	✓	---
Boşluk içeriği	D 2584	---	✓	---	6
Yoğunluk	D 792, D 1505	---	✓	---	6
Ply kalınlığı (CPT)	---	RM 10	✓	---	Mevcut numuneler üzerinde yapılabilir
Tg (Glass Transition temperature), kuru ve ıslak	D 4065	RM 18	---	✓	---
Çekme testi	D3039, D 5450	RM 4, RM 9	✓	---	6
Basınç testi	D 4310, D5467	RM1, RM 6	✓	---	6
Düzlem kayma testi	D3518, D5448, D 3579, D4255	RM 7	✓	---	6
Dayanım testi	D 2344	RM 8	✓	---	6
Mod I Kırılma Dayanımı	D 5528	---	✓	---	6
					<b>Toplam numune sayısı = 42 adet</b>

ETK malzemelerinin çekme dayanımının belirlenmesinde kullanılan EN 2561 ve ASTM D 3039 metotlarından ASTM D 3039 metodu MKY sistemi için üretilen modüllerin testlerinde kullanılabilir. Bu konudaki FAA (Federal Aviation Administration) raporu (DOT/FAA/AR, 1999) gösteriyor ki, fiberlerin tam sürekli olmadığı durumlarda ASTM D 3039 metodu daha uygundur. Çekme test numunelerinin değişen geometrisinin, sonuçlara çok az bir etkisinin olduğu belirlenmiştir. Hem EN 2561 hem de ASTM D 3039 standartları minimum beş numune testi öngörür. AMS 2980 ve 3970 standartları ise minimum altı numune testi öngörür. Dolayısıyla çekme testleri altı numune üzerinde, ASTM D 3039 standartlarına göre yapılabilir. Kırılma modu gözlenerek Elastik modül ve Poisson oranları ASTM D 3039 standardında öngörülen şekilde hesaplanmalıdır. ETK

malzemelerinin basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan prEN 2850-B ve SACMA SRM 1 R-94 test metotlarından SACMA SRM 1 R-94 (SACMA, 1988) standartlarında belirtilen ve FAA tarafından kabul edilen test metodu (DDCMHB, 1996), bu testler için kullanılabilir. Bu konudaki FAA raporu (DOT/FAA/AR, 1999) gösteriyor ki, bu iki test metodu da çok benzer sonuçlar vermektedir. Basınç dayanımı belirlenecek olan numunenin geometrik farklılığının sonuçlara çok az bir etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. Bu standartta öngörülen numune sayısı altıdır (DOT/FAA/AR, 1999). Elastik modül değerleri SACMA SRM 1 (SACMA, 1988) standardına göre belirlenmelidir. Düzlemsel kayma testleri 8-ply p45° lamine numune üzerinde ASTM D 3518 standartlarına göre yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Hem prEN 6031 test metodu hem de AMS 2980 and 3970 standartları, yönsüz örgülü fiber için 8-ply p45° lamine ölçülerini öngörür. prEN 6031 ve ASTM D 3518 standartları minimum beş, AMS 2980 ve 3970 standartları da minimum altı numune testini gerektirir. Dolayısıyla bu testler ASTM D 3518 standartlarına göre altı numune üzerinde yapılmasının uygun olduğu anlaşılmaktadır. Darbe (impact) testleri “SACMA SRM 2-88” (SACMA, 1988) standartlarına uygun olarak yapılmalıdır.

Mil-Hdbk-17-1F dokümanı (DDCMHB, 2002) A.B.D. Savunma Bakanlığı'nın yayınladığı, yapı malzemesi olarak PMK kullanımı hakkında tavsiyeler veren ve standartları karşılaştıran bir referans kitapçıktır. Bu dokümanın tavsiyelerine uyularak malzeme seçimi ve test metotları uygulanabilir. Yük ölçümleri ve aygıt standartları ASTM E4 (2000)'de detaylı olarak tanımlanmıştır. ISO 5893 (1999) standardında ise, kullanılacak test cihazlarının standartları verilmiştir. USACERL (1998) tarafından yayınlanan “Yapı komponentlerinde ileri tasarım kompozitlerinin uygulaması ve geliştirilmesi” adlı rapordan ve NASA Rapor 4751 (2000)'den de yararlanılarak en uygun polimer ve fiber çeşidi belirlenmelidir. Yüksek performanslı fiber takviyeli polimer kompozit yapıların fabrikasyon teknikleri hakkında pek çok araştırma yapılmıştır ve bu araştırmalar bir rehber niteliği taşımaktadır (Shuart ve ark., 2000). Darbe testleri “Dynatup 8250 drop-weight impact testing machine (DOT/FAA/AR, 2002; SACMA, 1988)” kullanılarak yapılmalıdır. Etki alanları X-RAY fotoğraflarla ve uygun metotlarla incelenmelidir.

Yapının muhtemel maruz kalacağı yatay yüklemeleri, gerçeğe en yakın bir şekilde laboratuarda oluşturabilmek gayesiyle, örnek yapının taban alanının rahatça oturabileceği büyüklüğe sahip (öngörülen yaklaşık boyut 4m x 4m) ve değişken yatay dış yüklemeyi gerçekleştirecek (zaman ayarlı motorla çalışan) bir düzenek (deprem tablası) oluşturulmalıdır. Bu deprem tablasının taslak çizimi Şekil 2.11.'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Deprem tablası detayları

Örnek yapıyı biçimlendirecek modüller, bu sehpa üzerinde monte edilerek, örnek yapı deprem tablası üzerine oturtulabilir. Bu yapı deprem tablası üzerine taban bağlantı pabuçlarıyla sabitlenmelidir. İhtiyaç duyulan bu taban bağlantı pabuçları ilk aşamada metal olarak üretilebilir.

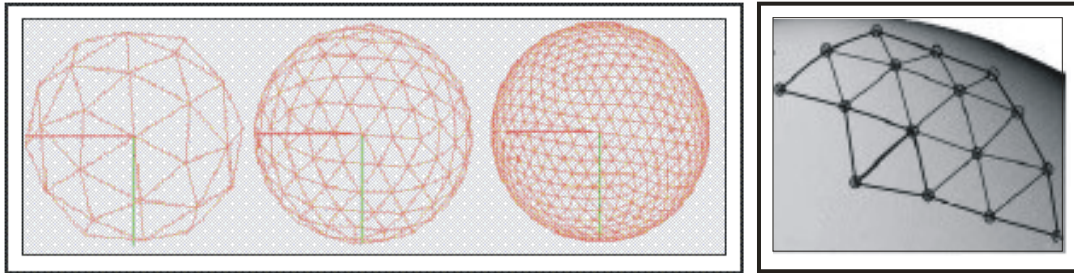
Tüm yapı formu için yüklemeler standart hidrolik baskı aparatlarıyla, yüzey üzerinde değişik pek çok noktalara, statik yüklemelerdeki değişkenlik göz önünde tutularak, uygulanabilir. Ayrıca üniform yükleme desenleri oluşturularak, tüm bu yükleme bölgelerindeki yük-deformasyon ilişkisi belirlenebilir. Yüklemeler dijital yükleme aparatıyla (load cell) ölçülerek, deformasyonlar yaylı Lineer Potensiyometrik Deplasman Sensörleri (LPDS) yardımıyla belirlenip, bilgisayar ortamına veri kayıt sistemi (data logger) kullanılarak kaydedilir (Bakınız Şekil 2.10.). Birim uzama ve kısaltmalar çift yönlü gerinim pulları (strain gauge) yardımıyla ölçülerek ve özellikle kritik bağlantı noktalarındaki birim şekil değiştirme ölçümleri yardımıyla, bağlantı kısımlarının tasarımda göz önünde tutulması gereken kritik gerilme değerleri belirlenmelidir. MKY sisteminin, sera, hangar ve büyük kapalı alan uygulamaları için, örnek yapının iç hava sirkülasyonu ile ilgili testleri de yapılmalıdır.

Deprem tablası kullanılarak, yapıya uygulanacak uygun yatay yüklerin oluşturacağı ek gerilmeler ve deformasyonlar da aşamalı olarak ölçülmelidir. Kritik yükleme ve deformasyon limitleri tüm yapı ve bağlantı detayları için parametrik olarak incelenmelidir. Sızdırmazlık contalarının sismik izolasyon özelliği araştırılmalıdır. Deprem yüklerini ve titreşimleri sönümlenme özellikleri incelenmelidir. Tüm bu test yöntemleri uluslararası standartlara uygun bir şekilde yapılmalıdır. Yapılması gereken testlere ait bu standartlar Çizelge 2.1.'de özetlenmiştir.

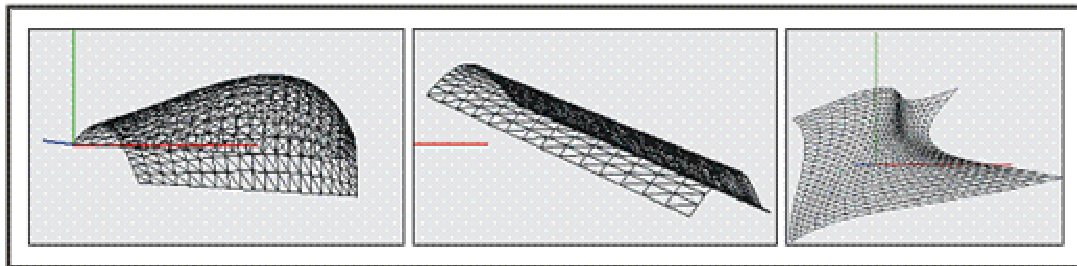
Yapılacak testlerde kullanılması gereken düzeneğin genel yapısı şematik olarak Şekil 2.10.'da gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, numune üzerine yük uygulamasından sonra, yük değerlerine göre deformasyon verileri, yük hücresi (load cell) ve LPDS'ler tarafından ölçülmelidir.

### 2.3. MKY Sisteminde Geometrik Tasarım İçin Bilgisayar Kullanımı Hakkındaki Literatür Özeti

MKY sisteminde kullanılan modüller, belli ve standart bir şekle, yapı sistemi içerisinde oryantasyona ve topolojiye sahiptirler. Bu sistem için sıradan sonlu elemanlar metoduyla modellemede, modüller, şekil, oryantasyon ve topoloji olarak, model boyunca aynı özelliği gösteremediğinden dolayı, sonlu elemanlar modellemesi karmaşık görülmektedir. Bağlantı detayları, sürtünme ve temaslar göz önünde bulundurularak, deformasyon aşamaları, özel olarak araştırılmalıdır. Modüler kabuk yapılarının yüzey formu boyunca, en yeterli bölümlenme (discretization), gerçek modüllerin şekline, oryantasyonuna ve topolojilerine göre yapılmalıdır. Şekil 2.12. tipik bir bölümlenme yönteminin bir küre yüzeyine uygulanmasını aşamalı olarak göstermektedir. Yukarıdaki sebeplerden dolayı yapısal analiz modellemeleri için, özel bir bilgisayar programı yazılımına ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Modüllerin bağlantı detaylarında oluşan geometrik açısal sapma derecelerinin belirlenmesi sağlanmalıdır. İleri uygulamalı matematiğin temel konularından olan bu bölümlenme yöntemi, bilgisayar mühendisliğinde üç boyutlu kompleks eğrili yüzeylerin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Şekil 2.13.'de görüldüğü gibi bu metot pek çok kompleks kabuk yüzeyine uygulanabilir.



Şekil 2.12. Örnek bir bölümlenme (tessellation) yöntemi



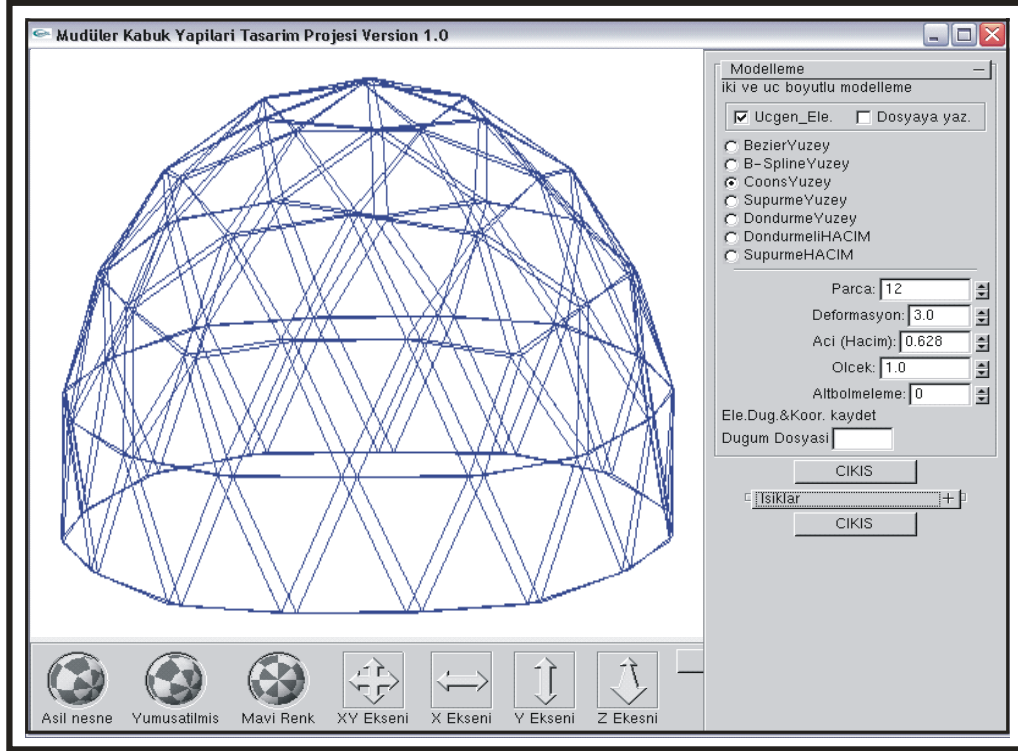
Şekil 2.13. Bölümlenme (tessellation) yönteminin kompleks yüzeylere uygulanması

Üç boyutlu kompleks düzlemde algebrik eğrili yüzeylerin bölünmesi (tessellation) değişik pek çok tekniklerle yapılmakta olup, uygulamalı matematik ve bilgisayar mühendisliğinde ana araştırma konularından biridir (Cundy ve Rollett, 1989; Muneo ve ark., 2005; Li ve ark., 2005; Goldman, 2004, Holla ve ark., 2003; Shimada ve Gossard, 1998). Bu teknikler, obje yüzey formlarının gerçeğe çok yakın bir şekilde bilgisayar ortamında oluşturulmasına ve renklendirilmesine (rendering) imkan sunmaktadır.

Genelde yüzeylerin bölünmesinde kullanılan bu programlar, bu araştırma için gerekli olan eşit bölümlenmeyi içermemektedir (3D grafik programları). Bu tür bilgisayar modellemelerinde OpenGL isimli algoritma paketi sıkça kullanılmaktadır. Mevcut yazılımlardan yararlanılarak, MKY sistemi için Visual C++ programlama dili ve API olarak da OpenGL kullanılarak geometrik tasarımı içeren bir bilgisayar programının gerçekleştirilmesi gerektiği saptanmıştır. Şekil 2.14.'de Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde danışmanlığımızda hazırlanmış bir MKY sistemi geometrik tasarım programı denemesinden bir ara yüz görüntüsü verilmektedir.

Şekil 2.14.'deki form, yüzey boyunca aşamalı değişik sayıda bölümlenmelerden oluşmuş olup, yüzey için 2 değişik parça büyüklüğü ve şekli kullanılmıştır. Görüldüğü gibi eğrisel yüzey formlarının kolayca oluşması sağlanmaktadır.

MKY'nin yüzey formu boyunca, en yeterli bölümlenmesi (discretization), gerçek modüllerin şekline, oryantasyonuna ve topolojilerine göre yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Yukarıdaki sebeplerden dolayı yapısal analiz modellemeleri için, tam kapsamlı bir bilgisayar programı yazılımına ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır. Bu programda modüllerin bağlantı detaylarında oluşan geometrik açısal sapma derecelerinin belirlenmesi sağlanmalıdır.



Şekil 2.14. Tipik bir OpenGL destekli yüzey oluşturma ve bölümlenme yazılımından ara yüz görüntüsü

Bu bilgisayar yazılımı Visual C++'da, API olarak OpenGL kullanan bir yazılım olması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu yazılım aşağıdaki şekilde düzenlenebileceği anlaşılmaktadır.

- 1) İlk etapta, modüler kabuk yapı formunda oluşturulacak nesneye ait yüzey şeklinin belirlenmesi gerekir. Yüzey formunun bilgisayar ortamında oluşturulabilmesi için, bilgisayar mühendisliğinde yaygın olan geometrik modelleme yöntemleri kullanılmalıdır. Bu yöntemler;
  - a) Yüzeye ait sınır eğrileri, yüzeyin iç şeklini belirleyen teğet ve burulma vektör değerleri, kontrollü olarak kullanıcı tarafından girilmelidir. Bu sınır eğrileri ve vektörler yardımıyla Hermite yada Coons tipi yamalar kullanılmak suretiyle yüzey formu oluşturulmalıdır (Goldman, 2004).
  - b) Yüzeye ait kontrol noktaları girilmek suretiyle Bezier yüzeyi, B-spline yüzeyi gibi özel yüzey modelleme teknikleri kullanılmalıdır (Goldman, 2004).



- c) Bilgisayarlı grafik ve geometrik modellemede sıkça kullanılan, döndürmeli yüzey modelleme tekniği kullanılarak yüzey modellenmelidir.
- d) Yukarıda belirtilen yüzey modelleme tekniklerinin yetersiz ve tanımlayamadığı yüzeyler için ise, yüzeyler, birleştirilmek (blending) suretiyle modelleme işlemi gerçekleştirilmelidir (Goldman, 2004).
- 2) Birinci madde de belirtilen ifadeler, kabuk yüzey formunu oluşturma işlemidir. Yüzey formu modellendikten sonra üzerinde bölümlenme (mesh generation) işlemi yapılmalıdır. Bu işlem için İlerleyen Cephe Yöntemi ve Doğrudan Grid Üretme Yöntemi gibi yöntemler kullanılmalıdır (Goldman, 2004). Bu yöntemler nesne sınırları modellendikten sonra, iç kısmın bölümlenmesi işlemidir. Bölümlenme elemanı olarak en çok iki değişken varyasyonlu üçgen şekiller kullanılabilir.
- 3) Kabuk iç kısmı bölümlendikten sonra, iç kısımdaki parçaların (modüllerin) şeklinin aynı olması gereklidir. Bahsedilen eş değer elemanlı bölümlenme için önceden bölümlenmiş parçalar üzerinde, gerek koordinatları değiştirmek suretiyle, gerekse aralarındaki açıları düzeltmek suretiyle, yumuşatma (smoothing) yada düzeltme (refinement) işlemi yapılmalıdır (Goldman, 2004). Bu işlemler için Laplacian, Winslow gibi yumuşatma yöntemleri kullanılabilir (Goldman, 2004). Böylece modellenmiş kabuk yapı yüzeyinin iç kısmındaki parçalar (modüller) mümkün olduğu kadar eşit boyutlarda olacaktır.
- 4) Modellenmiş ve eşit elemanlardan bölümlenmiş kabuk yapı yüzeyine ait veriler yapısal analiz için kullanılabilir şekilde kaydedilmelidir. Yapısal analiz işlemi için kullanılacak Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne göre veya Bölüm 4'de anlatılan çözümlemenin ihtiyaç duyacağı tarzda düzenlenip kaydedilmelidir.

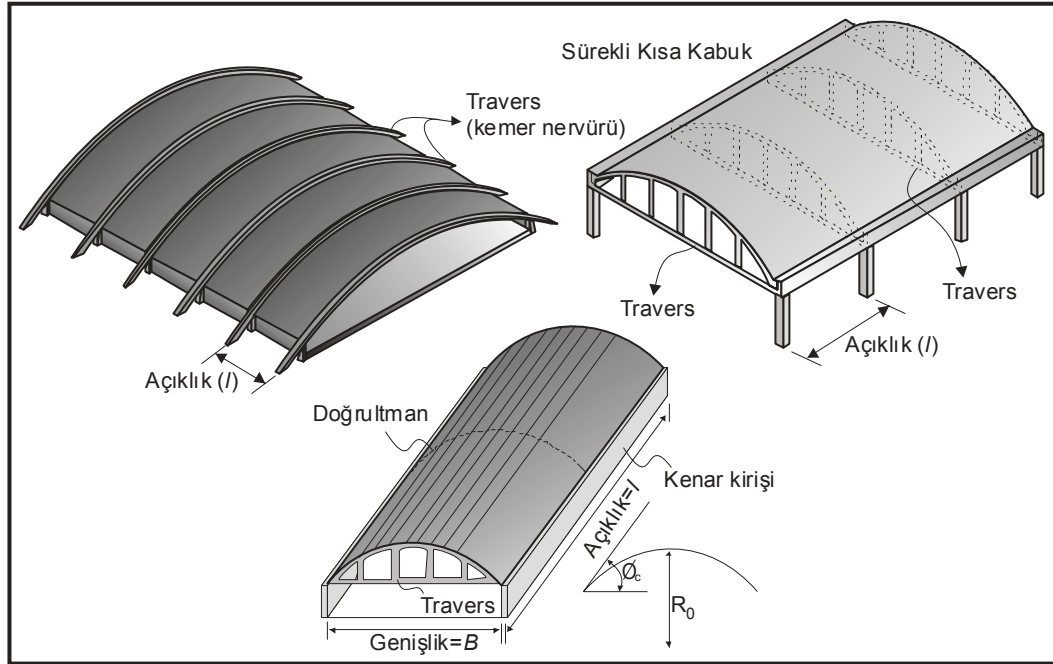
Bu şekil optimizasyonu algoritmasının temel özelliği eşit bölümlenmeye imkan yaratmasıdır. Bu bağlamda diğer yüzey oluşturma programlarından farklıdır.

#### 2.4. MKY Sisteminde Muhtemel Kullanılabilecek Yapısal Kabuk Tasarım Teorileri Hakkındaki Literatür Özeti

Kabuklar ve katlanmış plaklar gerilmeli kabuk yapıları sınıfına girerler. Kabukların yapısal hareketleri plaklardan farklıdır. Geometrik yapıları daha fazla yük taşımalarına yardımcı olur. Düzlemindeki direkt gerilme yoluyla yük taşıyan kabuğa membran denir. Membranın mümkün olabilmesi için kabuğun ince kabuk olması gerekir. Novozhilov (1964)'a göre, kabuğun ince kabuk olarak sınıflandırılabilmesi için kalınlığının eğrilik yarıçapına oranının denklem 2.1'de verilen gibi olması gerekir.

$$\frac{d}{R} \leq \frac{1}{20} \quad (2.1)$$

Bu tez çalışmasında sadece ince kabuklara konsantre olunmuştur. Bir silindirik kabuk, bir düzlem eğri boyunca hareket eden düz bir hat tarafından üretilen bir yüzey olarak düşünülebilir. Düz hattı rehber teşkil eden düzlem eğriye doğrultman (directrix) denir (Şekil 2.15.).



Şekil 2.15. Silindirik kabuk elamanları

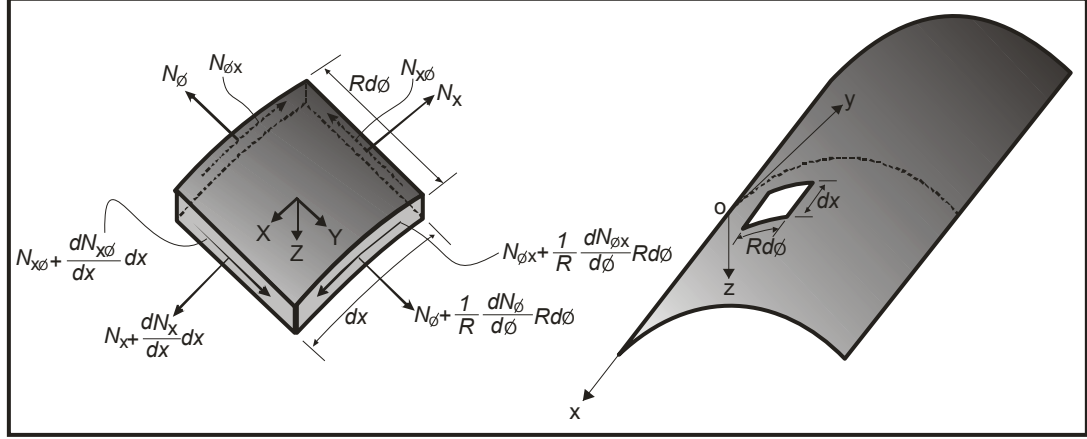
Doğrultmanlar genellikle bir daire yayı, yarı elips, parabol vb. olabilir. Bir silindirik kabuk bazen kenar kirişi veya kenar elemanına sahip olabilirler. Kabuğun her iki ucundaki destek elemanlarına travers (Traverse) denir. Travers tek parça kapalı bir form alabileceği gibi, kafes kemer, rijit çerçeve de olabilir. Genellikle kabuğun travers noktalarında basit mesnetlenmiş olduğu kabul edilir. Normalleri doğrultusunda yük taşımazlar. Birbirine yakın iki travers arasındaki mesafeye kabuğun açıklığı denir. Kabuk kemerinin iz düşümüne genişlik (chord width) denir.

Silindirik kabukların tasarımında genelde göz önünde bulundurulan yükler arasında, özellikle kabuğun ölü ağırlığı ( $g$ ) ve kar yükü ( $p_0$ ) vardır. Kar yükü bölgeye düşen yağış miktarına bağlıdır ve kabuğun yatay iz düşümü üzerine üniform olarak etki ettiği kabul edilir (Ramaswamy, 1968). Tropik ülkelerde kabuk yüzeyi üzerine etkiyen 480-720 N/m<sup>2</sup> hareketli yük kar yükü olarak kabul edilir (Ramaswamy, 1968). Rüzgarın etkisi sadece silindirik bir kabuğun bir kısmına, yarı aksenal açının 40 dereceyi aşmaması yoluyla etkilir.

Membran teorisinde kabuk, eğilme gerilmelerine karşı koyamayan bir membran olarak idealize edilir. Böyle bir gerilme durumunun mevcut olabilmesi için kabuğun kapalı bir yüzeye sahip olması gerekir. Gerilmenin tam membran durumuna bir örnek, akışkan basıncına maruz dairesel bir boru şekli verilebilir. Pratikte kabuklar sonlu bir uzunluğa sahip olup, köşe uçlarının desteklenmesi veya desteklenmemesi şeklinde oluşurlar. Eğilme gerilmeleri konsantre yükler, kesip çıkartılmış kısımlar ve destekleme uçları için geliştirilebilir. Membran teorisi bir kabuğun yapısal davranışında pek çok durumda kullanışlıdır.

Bir silindirik kabuğun düzlemsel eğriye sahip doğrultmanını göz önünde bulunduralım. Eğrinin orjinini, orta açıklıktaki doğrultmanın üst noktasında kabul edelim (Şekil 2.16.).  $x$  koordinatı bu üst kısım boyunca ölçülür,  $y$  koordinatı doğrultman boyunca ve  $z$  koordinatı iç normali doğrultusunda ölçülür. Şekil 2.16.'da birim kabuk elemanına, uygulanan kuvvetler gösterilmektedir.  $N_x$ ,  $N_\theta$  ve  $N_{x\theta}$  her bir birim genişlikteki kuvvetleri göstermektedir.  $X$ ,  $Y$  ve  $Z$  sırasıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$

yönlerinde her bir birim alana uygulanan dış kuvvetlerin bileşenlerini simgelemektedir.  $dy = Rd\theta$  ifadesi açıkça görülebilir.



Şekil 2.16. Silindirik kabuğun membran teorisindeki gerilme notasyonları (Ramaswamy, 1968)

Değişken doğrultmanlara sahip silindirik kabuklardaki gerilmelerin incelenmesiyle aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir (Ramaswamy, 1968).

- Membran teorisine göre ince bir kabuk kısmen kemer ve kısmen bir kiriş gibi davranır. Kemer davranışı kenar kirişine reaksiyonu iletmeye sorumludur ve kiriş davranışı, traverslerle, kabuğun eğrileri arasında gelişen kayma kuvvetleri yoluyla oluşur. Kenarlarda teğetin düşey olması durumunda tam kiriş davranışı oluşur. Eğer seçilen doğrultman uygulama yükü, değişken eğrilik şeklinde ise kabuk bağımsız kemerlerin serisine dönüşür ve kiriş davranışı tamamen kaybolur.
- Kabuğu basit mesnetlenmiş bir kiriş gibi varsayan, herhangi bir kesitteki hesaplanan dış eğilme momentleri aşağıdakilerle sınırlıdır.
  - a)  $N_x$  kuvvetinden kaynaklanan
  - b) Kenar kirişteki eksenel  $P$  kuvvetinden kaynaklanan
  - c) Kenar kirişe etkiyen eğilme momentinin düşey bileşeninden kaynaklanan.

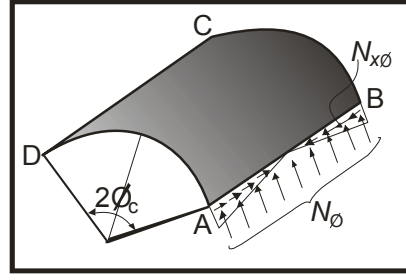
Kabuk ucunun teğetin düşey olma özel durumunda, eğilme momenti  $a$  ve  $b$  şıklarının bir kombinasyonu olarak ele alınır. Eğer

doğrultman yükün değişken eğriliği şeklinde ise dış eğilme momenti tamamen  $c$  şıkkındaki gibidir.

- $N_\theta$ 'ın değeri ve varyasyonları bütün kesitlerde aynıdır.  $N_\theta$  traverslerde sınır şartlarından bağımsızdır.
- Membran durumunda kabuğun dengesi  $N_\theta$ ,  $N_{x\theta}$  ve  $N_x$  düzlem gerilmeleriyle olur. Eğilme momentleri ve iletilen kaymalar yoktur.

Eğilme teorisinde denge denklemleri ve gerilme-uzama ilişkileri sekizinci dereceden tek bir lineer kısmi diferansiyel denklemle kombine edilmiştir. Yüklemin fourier serisi olarak ifade edilmesinin amacı kabuğun orta açıklığı için geliştirilen diferansiyel denklemin diğer kısımlara uygulanabilmesi içindir. Membran teorisinde  $\theta$  açısı kabuğun kenarı ile üst noktası arasında belirlenir. Eğilme teorisinin geliştirilmesinde  $\phi$  açısı sol uçtan ölçülür. Dolayısıyla membran teorisinin sonuçları  $\theta$  yerine  $\phi$  konarak, düzenlenmesi gerekir.  $\theta = (\phi_c - \phi)$  olacağı açıktır.  $\theta$ 'nın  $\phi$  yerine kullanılmasından dolayı  $N_\theta$ ,  $N_{x\theta}$  ve  $N_x$  gerilmelerini  $N_\phi$ ,  $N_{x\phi}$  ve  $N_x$  şeklinde tekrar adlandırmak daha uygun olacaktır. Bu değişiklikler membran teorisindeki gerilmelerin çıkartılmasında kullanılır. Dolayısıyla denge denklemleri yardımıyla bu gerilme ifadelerine ulaşılır.

Pratikte pek çok betonarme silindirik kabuk membranlar gibi davranmazlar (Ramaswamy, 1968). Kabuğun kenarları boyunca gerilmeler ve yer değiştirmeler, membran teorisinde verileden farklıdır. Bunlar kabuğun desteklenme şekline bağlıdır, diğer bir deyişle, destek kenarları boyunca mevcut olan fiziksel sınır şartlarının çeşidine bağlıdır. Örneğin  $AB$  ve  $CD$  serbest kenarlı bir kabuk düşünelim, bu kenarlar boyunca membran teorisi  $N_\phi$  ve  $N_{x\phi}$  gerilmelerinin mevcudiyetini gösterir (Şekil 2.17.). Fakat sınır şartlarından anlaşılacağı gibi, bu gerilmeler kenarın serbest olmasından dolayı oluşmaz. Gerçek sınır şartları, hat yükleri uygulanarak gerçekleştirilir. Fakat bu tür hat yüklerinin uygulanması, kabuğun eğilmesine ve membran durumundan ayrılmasına sebep olur. Bu durumda kabuk yeni bir denge durumu arar ve bu aşamada eğilme momentleri burulma momentleri ve radyal kaymalar oluşur. Eğilme teorisi bu etkilerin araştırılması için gereklidir.

Şekil 2.17.  $N_\phi$  ve  $N_{x\phi}$  gerilmeleri

Silindirik kabukların gerilme analizi üç aşamada yapılır.

- Kabuğa etkiyen yüzey yüklerine göre membran analizi
- Yüklenmemiş kabuğun eğilme analizi
- Kabuğun düz kenarları boyunca mevcut olan gerçek sınır şartlarını oluşturma amacıyla  $a$  ve  $b$  şıklarının sonuçlarının süperpozisyonu

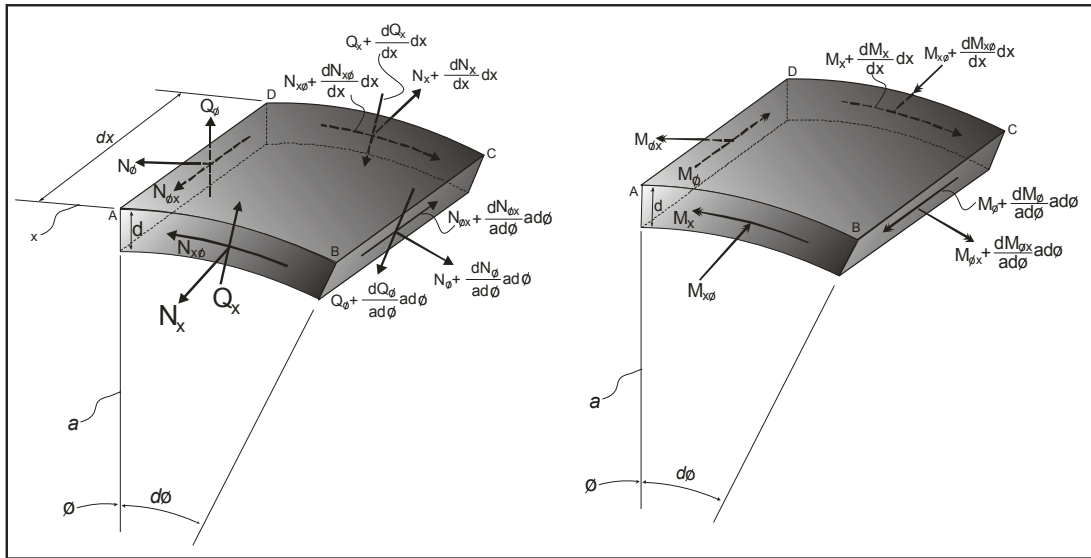
$b$  şıkkı aşaması sık sık *kenar dağıtma analizi* olarak referans edilir. Genellikle kenar dağıtma düz kenara göre düşünülür, eğrisel kenarlar pek çok durumda göz ardı edilir. Yukarıda tanımlanan gerilme analizinin aşamaları kenar etkilerinin membran gerilmelerine etkittirilmesini içerir. Bu tam olarak doğru değildir, fakat pek çok pratik amaç için yeterince hassastır (Ramaswamy, 1968).

1932'den bu yana betonarme silindirik kabukların analizinde birkaç yaklaşık eğilme teorisi geliştirilmiştir. Bunlardan ilki Finsterwalder (1932) tarafından geliştirilmiştir. Bazı basitleştirme kabulleri yaparak Finsterwalder ilk olarak kabuk çatıların analizi için bir teori geliştirilmiştir. Bütün kabuk teorilerindeki kabuller ve Finsterwalder teoreminin basitleştirme kabulü aşağıda sıralanmıştır.

- Malzeme homojen ve izotropik olup hook kanuna uyar.
- Kabuk yüzeyi normal yönündeki gerilmeler göz ardı edilir.
- Kabuğun orta yüzeyi normalindeki düz element, deformasyondan sonra bile düz ve normal kalır.
- Kabuk yüzeyinin bütün deformasyonları küçüktür.
- Analizde  $M_x$ ,  $Q_x$  ve  $M_{x\phi}$  göz ardı edilir.

$a'$  dan  $d'$  ye kadar olan kabuller silindirik kabukların bütün eğilme teorilerinde ortak olup,  $e$  şikkındaki kabul Finsterwalder tarafından problemi basitleştirmek için uygulanmıştır.

Şekil 2.18.'de gösterilen gerilme bileşkelere maruz yüklenmemiş kabuğun bir elementi için denge denklemleri çıkarılır.  $M_x$ ,  $Q_x$  ve  $M_{x\phi}$ 'nin göz önüne alınmadığı vurgulanmalıdır. Finsterwalder teorisinde göz ardı edilen  $M_x$ ,  $M_{x\phi}$  ve  $Q_x$ 'i dikkate alan ve "tam" sonuç verdiği düşünülen, kıyaslamalı daha basit teorisin D-K-J teorisi olduğu düşünülmektedir (Ramaswamy, 1968). Bu teoride üç yer değiştirme ifadesi  $u$ ,  $v$  ve  $w$  bağımsız formdadır. Teori, Donell-Karman-Jenkins teorisi olarak bilinir. Donell (1933) ince kabuklu dairesel silindirlerin stabilitesi üzerine ilk çalışmayı yapmıştır. Karman ve Tsien (1941) aynı teoriyi kullanarak silindirik kabukların burkulması üzerine çalışmıştır. Silindirik kabuk çatılarının analizinde Jenkins (1947) bu teorileri kullanarak uygulamalar yapmış olduğundan, adı geçen teori Donell-Karman-Jenkins (D-K-J) teorisi olarak bilinir.



Şekil 2.18. Silindirik kabuğun gerilme bileşenlerinin notasyonu

Eğilme altında silindirik kabukların yapısal davranışı bir diskin yapısal hareketi (kendi düzleminde yüklenmiş kabuğa karşılık gelen), düzlem davranışı (kendi düzleminde sağ açılarda yüklenmiş kabukla biçimlenmiş) ve kabuk davranışı (esnek membran olarak) ile bağdaştırılarak yaklaşımlar yapılır. Bu üç davranış disk

davranışı, plak davranışı ve membran davranışı olarak tanımlanabilir. D-K-J teorisindeki düzenlemeler ilk olarak Csonka (1960) tarafından önerilmiştir.

*Finsterwalder Teorisi*  $M_x$ ,  $M_{x\phi}$  ve  $Q_x$  dikkate alınarak tekrar düzenlenmiştir.  $M_{x\phi} = M_{\phi x}$  ve  $N_{x\phi} = N_{\phi x}$  kabul edilmiştir (Şekil 2.18.). Schorer (1935) teorisi basitliğinden dolayı uygulama alanı bulmaktadır. Finsterwalder'den önce onun gibi Schorer  $M_x = Q_x = M_{x\phi} = 0$  kabul etmiştir. Teorideki diğer kabul teğetsel uzama konusundadır (Denklem 2.2).

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{1}{a} \left( \frac{\partial v}{\partial \phi} - w \right) \quad (2.2)$$

ve kayma gerinmesi denklem 2.3'de verilmiştir.

$$\gamma_{xy} = \left( \frac{1}{a} \frac{\partial u}{\partial \phi} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.3)$$

$\varepsilon_x = \partial u / \partial x$  enine gerinmesi ile kıyaslandığında yukarıdaki iki değer küçüktür. Bu kabul denklem 2.4'deki ilişkiyi doğurur.

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{a} \frac{\partial u}{\partial \phi} \text{ ve } w = \frac{\partial v}{\partial \phi} \quad (2.4)$$

Schorer teorisi sadece “uzun kabuklara” uygulanabilir. Enine moment eğrilik ilişkisi Donnell teorisindeki gibi farz edilir (Denklem 2.5)

$$M_{\phi} = -\frac{D}{a^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \phi^2} \quad (2.5)$$

Eğer  $\phi'$  ye göre bütün küçük türevler yüksek mertebeden türevlerle kıyaslanarak göz ardı edilir ise, Schorer karakteristik denklemi ifadesi Finsterwalder karakteristik denkleminden çıkartılabilir. Bu yapılır ise, Finsterwalder karakteristik denklemindeki ilk ve son terimler kalır ve Schorer denklemi ile aynı formunu alır. Aslında bu yol Schorer (1935) 'in yayınında izlediği yoldur. Fouirer serisinin ilk terimiyle sınırlama yapılırsa, bu durum denklem 2.6'da verilen şartı gerektirir (Ramaswamy, 1968).

$$\frac{l}{a} \geq \pi \quad (2.6)$$



Başka bir deyişle Schorer'e göre bu teori,  $l/a \geq \pi$  şartına sahip kabuklar için ancak geçerlidir. Schorer teorisi aynı zamanda D-K-J teorisinin bir alt özel durumu olan  $\kappa \rightarrow 0$  durumu içinde indirgenebilir. Bu durumda D-K-J kökleri Schorer köklerine indirgenir. Diğer taraftan, gerilme bileşkeleri ve yer değiştirmeler için ifadeler iki teoride de aynıdır.

Daha önceden bahsedildiği gibi, tasarımın amacı yeterince hassas bir şekilde yüklenmemiş kabuğun eğilme teorisinden çıkartılan, gerilme bileşkelerini ve yer değiştirmelerini dikkate almaktır. Yani membran teorisinden gerilme bileşkeleri ve yer değiştirmeler, hesaplanan diferansiyel denklemin homojen çözümüne eklenir. Bu genellikle üniform dağılan yüklemeler için yeterince tatmin edicidir. Bu da, membran çözümünün belirli integrali olarak ele alınmasını gerektirir. Diğer yüklemeler için membran teorisinde çıkartılan çözümler yerine, verilen yüklemeye bağlı belirli integral kullanımı gerekebilir.

Literatürde kullanılan *uzun* ve *kısa* kabuklar tanımları değişmektedir. Kısaca tartışmak gerekirse aşağıdaki şartlardan birini temel alan, kısa ve uzun sınıflandırmaları kullanılabilir (Kelkar ve Sewell, 1987).

- Kabuktaki, boyuna ve kayma gerilmelerinin hesaplanmasında, kabuğun eğrisel kesit alanına sahip bir kiriş gibi kabul edilmesi ve basit eğilme teorisi kullanılması, bazı avantajlar içerir. Bu *Lundgren kiriş teorisinin* temelidir (Lundgren, 1960). Dolayısıyla kabuk teorisi yazarları, kirişlerdeki lineer dağılıma yakın, boyuna gerilmenin dağılımına sahip, bir kabuğun sınır oranlarının tanımlanması konusunda denemeler yapmışlardır. Eğer kenar kirişi olmayan kabuklar için  $l/a \geq 5$  olursa bu uygulama gerçekleştirilebilir. Kenar kirişinin olma durumu, bu katsayıyı 3'e düşürür. Dolayısıyla, verilen  $l/a$  oranını aşan kabuklar "uzun" olarak bazen tanımlanır. Kabuğun boyuna gerilme dağılımı, kenarları boyunca olan, destek ve yüklemeleri ile değişen kabuğun deformasyonuna bağlıdır. Böylece, kenar elemanının boyutları, çeşidi

ve kabuktaki yükleme, bu limitin tanımında dikkate alınması gereken diğer faktörlerdir.

- Pek çok yazar silindirik kabuk teorisini basitleştirmek için, gerilme bileşikleri ve yerdeğiştirme ifadelerindeki ikincil terimleri veya karakteristik denklemden daha az önemli terimleri, göz ardı etmeye çalışmışlardır. Örneğin Finsterwalder  $M_x = Q_x = 0$  ve  $M_{x\phi} = 0$  farzedmiştir. Schorer bir adım ileri giderek, Finsterwalder karakteristik denklemlerindeki yüksek dereceden türev dışındaki terimleri göz ardı ederek, daha sadeleşmiş bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu tür yaklaşımların geçerlilik derecesinin tanımlanması ve uygulanabilirliği kabuğun sınıflandırması önem kazanmaktadır. Bu içerik çerçevesinde, “uzun” ve “kısa” terimleri kullanımı önem arz eder. Finsterwalder ve Schorer yaklaşımları, genellikle uzun kabuklara uygulanabilir. Schorer’in kendisi teorisinin geçerli olduğu sınırı,  $l/a \geq \pi$  olarak belirlemiştir. Bu sınır, bazen kabuğun uzun veya kısa olarak sınıflandırılması için kullanılmaktadır. Bazı çalışmalar gösteriyor ki, Schorer ve Finsterwalder’in teorileri geçerlilik oranlarına göre kabaca aynıdır.  $l/a \geq \pi$  ifadesini aşan durumlarda, kenar kirişine sahip pek çok kabuk için, gerilme dağılımı oldukça lineerdir.
- Kabuğun uzun veya kısa olarak sınıflandırılması, bazen kabuğun düz kenarlarından olan dağılımı temel alır. Bu durumda ASCE kitapçığı (1952), eğer  $l/a < 1.60$  ise, kabuğu kısa olarak sınıflandırır. Bazen, kabuğun kısa veya uzun olması  $B/(l^2 ad)^{1/4}$  parametresiyle tanımlanır. Eğer  $B/(l^2 ad)^{1/4} < 3$  ise kabuk uzun olarak ve eğer  $B/(l^2 ad)^{1/4} > 5$  ise kabuk kısa olarak düşünülür. 3 ve 5 katsayıları arasındaki parametrelere sahip kabuklar, yarı kısa olarak sınıflandırılırlar.

Aas-Jakobsen (Ramaswamy, 1968) tarafından kabuk, uzun, kısa ve orta olarak sınıflandırılmıştır. İki parametre  $\rho$  ve  $\kappa$  (Aas-Jakobsen parametreleri), sınıflamada kullanılır. 4 ve 7 arasındaki  $\rho$  değerlerine sahip kabuklar, 0.03 ve 0.12  $\kappa$

değerlerine karşılık gelen kabuklar, uzun olarak, 10 ve 20 arasındaki  $\rho$  değerlerine sahip kabuklar, 0.15 ve 0.30  $\kappa$  değerlerine karşılık gelen kabuklar, kısa olarak isimlendirilir.  $\rho$  değerinin 7 ve 10 arasında değiştiği kabuklar orta dereceden kabuk olarak bilinir ve bunlara nadiren pratikte rastlanır. Aas-Jakobsen'nin önerdiği sınırlar ASCE kitapçığı ile uyushmaktadır.

Yukarıda, Finsterwalder, D-K-J ve Schorer teorileri özetle anlatıldı. Bunlar pek çok betonarme ince kabuk tasarımında yeterlidir. Bu tanımları tamamlamak için, diğer bazı eğilme teorileri üzerine bazı özetler aşağıda verilecektir ve bu teoriler daha tam olarak kabul edilir. Verilen her bir teori için, karakteristik denklem kısa bir yorumla anlatılacaktır. Kıyaslamayı daha anlamlı kılmak için, Aas-Jakobsen parametreleri olan  $\rho$  ve  $\kappa$  notasyonları kullanılacaktır.

Flügge (1960),  $u$ ,  $v$  ve  $w$  üç ardışık diferansiyel denklem çıkaran ilk teorisyendir. Pek çok betonarme kabuklar için,  $k < 10^{-5}$  olarak kabul edilir. Flügge karakteristik denklemi tam olarak kabul edilir ve diğer teorilerin hassasiyetini belirlemede ölçü olarak kullanılır.

Aas-Jakobsen'in teorisi, kullanılan denge denklemleri ve kuvvet yerdeğiştirme ilişkileri, Flügge teorisiyle aynıdır. Karakteristik denklemi Flügge'ünkünden sadece küçük önemsiz terimlerle farklılaşır.

ASCE (1963) Kitapçığı,  $a/l < 0.20$  değerine sahip çok uzun kabuklar için, detaylı bir metot geliştirir.

Holand (1957), ASCE kitapçığında verilen karakteristik denklemiyle aynı denkleme ulaşmıştır, fakat onun kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri ASCE kitapçığında (ASCE, 1963) kabul edilenlerden farklıdır. ASCE metotundan farklı olarak belirli integral olarak membran çözümlerini kullanmaz.

Eğer poisson oranı sıfır ise, bütün bu teoriler D-K-J karakteristik denklemine çok benzer. ASCE kitapçığında açıklandığı gibi bu teoriler kısa kabuklar,  $l/a \leq 1.60$

veya  $l/a \geq 1.60$  için yeterince hassastır. D-K-J denklemindeki  $\bar{m}$  üssel sabiti aşağı yukarı diğer tam karakteristik denklemleriyle aynıdır. Tek önemli fark, paydadaki  $\rho$ ' nin üssel teriminin dikkate alınmamasıdır. Kısa kabuklar için  $\rho$ 'nin büyük olmasından ötürü, bu büyük bir sorun oluşturmaz.

Finsterwalder teorisi sadece uzun kabuklara uygulanır. Rohwer (1988) ve Pietraszkiwicz (1984) göstermiştir ki,  $\rho > 5$  durumuna sahip kısa kabuklar için, tatmin edici değildir. Finsterwalder formülizasyonunda, iki tutarsızlığa dikkat çekilmiştir. Eğer bu tutarsızlıklar kaldırılırsa Finsterwalder teorisi Schorer teorisiyle nerdeyse aynı olur (Rohwer, 1988).

Schorer yaklaşımının geçerlilik oranı, pratikte Finsterwalder teorisiyle aynıdır. Fakat Finsterwalder karakteristik denkleminde farklı olarak, Schorer karakteristik denklemini kabuk boyutlarına bağlı olmayan, daha açık köklere sahiptir. Yani hesaplamalar daha az zaman alır ve daha az yorucudur.

Silindirik kabukların eğilme teorisi üzerindeki tartışmaların sonucu olarak, tasarım açısından şöyle söylenebilir, eğer kabuk uzunsa  $l/a \geq \pi$ , Schorer teorisi ve eğer kabuk kısa ise  $l/a \leq 1.60$ , D-K-J teorisi kullanılabilir. Orta dereceli kabuklar için, tam sonuç veren teorilerden biri kullanılabilir.

Sistematik olarak silindirik kabukların tasarımını içeren hesaplamaları organize etmek önemlidir. Böylelikle her aşamada kontrol edilebilirler. Hesaplamalar en iyi matris formunda yapılır. İleri matematikten sakınan tasarımcılar, çoğu zaman mukavemet yaklaşımlarını temel alan silindirik kabukların tasarımı için basit bir metodun olup olmadığını sık sık sorarlar. Silindirik kabukların büyük bir kısmı, yeterince hassas olarak eğrisel kesitli kirişler gibi düşünülerek, analiz edilebilirler. Kabuğun uzunluğu yönündeki  $N_x$  ve kayma gerilmesi  $N_{x\phi}$ ' yi belirlemek için, sırasıyla  $M_c/I$  ve  $VQ/Ib$  bilinen formülleri kullanılabilir.  $M_\phi$  ve  $N_\phi$ ' yi belirlemek için kemer analizinin prensipleri kullanılabilir. Her ne kadar, Finsterwalder ve Aas-Jakobsen kiriş yaklaşımını ilk önerenler olsa da, bu yaklaşım

Lundgreen (1960) tarafından detaylandırıldığından bu metot Lundgreen yaklaşımı olarak bilinir. Kiriş teorisinin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- İleri matematik tekniklerini kullanamayanlar için kabuk analizini mümkün kılmaktadır.
- Analitik teoriden farklı olarak, dairesel olmayan doğrultmanlara sahip kabuklar analiz edilebilir.
- Üniform olmayan kalınlığa sahip kabuklara uygulanabilir.
- Boyuna ve enine yönlerdeki nervürlerle güçlendirilmiş kabuklara uygulanabilir.
- Chronowicz (1960) tarafından iddia edildiği gibi, aynı zamanda kabuğun taşıdığı hat yükleri, bu metotta dikkate alınabilir. Ancak, bu tür yükleme lokal deformasyonlara sebep olmadığından, kullanılmasında kiriş teorisinin kabulleri bozulabilir.
- Kabuğun yapısal hareketi kolayca canlandırılabilir.

Kiriş teorisinde aşağıdaki kabuller uygulanır.

- Kesitin deformasyonları düzleminde göz ardı edilir.
- $M_x$  (ve dolayısıyla  $Q_x$ ) ve  $M_{x\phi}$  göz ardı edilebilir.
- $N_{x\phi}$  kayma kuvvetinin sebep olduğu  $\gamma_{xy}$  gerinmesi ve enine kısalma göz ardı edilir.

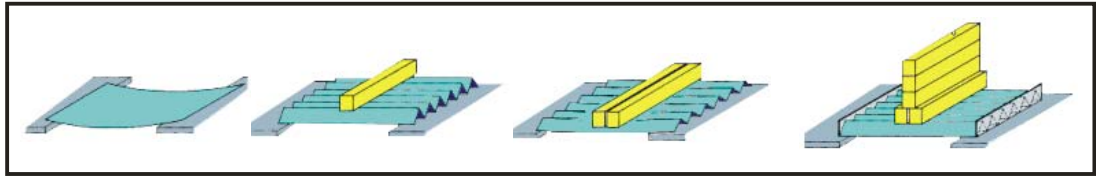
İlk kabul, *Bernoulli* kabulüyle yer değiştirilebilir ki, burada düzlem kısımlar deformasyondan sonra düzlem kalır. İkinci kabulün doğru olabilmesi için, kabuğun uzun olması gereklidir. Dolayısıyla, kiriş teorisinin uygulanabilirliği, oldukça uzun kabuklarla sınırlıdır. Eğer bu kabuller yeterince iyi bir şekilde sağlanırsa, kiriş metodu uygulanabilir.

En azından ön tasarım hedefleri için, güvenli bir şekilde kiriş metodunun uygulanabilmesi için, kabuklara uygulanacak oranlar bilinmelidir. Genelde üniform

yüklenmiş aşağıdaki kabuk sınıflarına kiriş teorisi uygulanabilir (Ramaswamy, 1968).

- Eğer  $l/a > 5$  ise, kenar kirişleri olmayan tekil kabuklara
- Eğer  $l/a > 3$  ise, yüksek derinliğe sahip olmayan kenar kirişli uzun tekil kabuklara

Katlanmış kabukların ana yük taşıma mekanizması, Şekil 2.19.'da verildiği gibidir. Katlanmış plakların yapısal davranışı, kabuklara çok benzer. Sürekli eğrisel silindirik kabuklara kıyasla, daha fazla malzeme sarf edilir. Katlanmış plak biçimlerinin vereceği izlenimler, çoğu zaman bu ek masrafa değer ve prizmatik, piramitsel veya düzlemsel eğri şeklinde değişik uygulamaları vardır (Şekil 2.20.).



Şekil 2.19. Katlanmış plakların ana yük taşıma mekanizması



Şekil 2.20. Bir katlanmış plak kabuk yapısı örneği, Groenedaal hipodromu, Belçika

Ehlers (1930), ilk olarak bu konudaki yapısal analizi geliştirmiştir. Bu ilk basitleştirilmiş yöntemde, plakların bağlantıları boyunca, birbirleriyle mafsallı olduğu farz edilmiş ve aralarındaki uzunluğuna kayma önlenmiştir. Mesnetlerdeki, enine momentler göz ardı edilmiştir. Gruber (1932), daha tam bir teori geliştirerek, mesnetlerin rijitliğini ve birbirleri arasındaki kıyaslamalı yer değiştirmeleri, dikkate

almıştır. Gruber, mesnet rijitliğinin göz ardı edilmesi durumunda, önemli hataların olabileceğini göstermiştir. Daha sonra pek çok araştırmacı, bu konuya elastisite teorisi temelli, pek çok katkı sağlayarak, diferansiyel ve alcebrik denklemler oluşturmuşlardır. 1947’de Amerika’da katlanmış plakların analizlerini basitleştirmek için, tasarımda kullanılabilen nümerik prosedürler geliştirilmiştir. Gerilme dağıtma prosedürü ilk olarak Winter ve Pei (1947) tarafından tanıtılmıştır. Ancak, bu metot mesnetlerin kıyaslamalı yer değiştirmesini göz ardı etmektedir.

Gaafar (1954) mesnetlerdeki yer değiştirmeleri dikkate alarak, katlanmış plakların analizi için uygulanabilir bir metot yayınlamıştır. Bu metot, daha sonra Simpson (1958) tarafından geliştirilmiştir. Amerika’da bazı tasarım ofislerinde kullanılan diğer bir metotta, Whitney (1959) adaptasyonu olup, daha önceden Girkmann (1948) tarafından önerilmiştir. Yitzhaki (1959) ve Vlasov (1939)’da katlanmış plaklar hakkında değişik prensipler öne sürmüşlerdir. Bu tezde Whitney ve Simpson metotları kullanılmıştır. Bu metotlar, göz önünde bulundurulan pek çok problemin çözümünde kullanılabilir. Bu metotların hepsi ASCE Task Committee on Folded Plate Construction (1963) raporunda detaylı olarak tartışılmıştır.

Çatı olarak genelde kullanılan katlanmış plakların üniform kalınlığa sahip olduğu, mesnetlerinin rijit olduğu, malzemenin elastik homojen ve izotropik olduğu, ve bütün plakların düzlem kısımlarının deformasyondan sonra da düzlem kaldığı kabul edilir. Ancak, dikkat edileceği üzere tüm yapının düzlem kesiti, deformasyondan sonra düzlem kalması gerekmez.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Malzeme olarak ileri polimer kimyası teknolojisindeki gelişmelerden yararlanılarak prefabrike edilmiş, belli geometrideki modüllerin birbirine geçmesi yoluyla, parçacıklı yapı şeklinde oluşturulması düşünülen MKY sisteminde kullanılacak ana malzemeler, bu bölümde tanıtılmıştır. Bu sistem için ileri malzeme kimyası teknolojisindeki oligamer reçine ve monolitik ETK (Elyaf Takviyeli Kompozit)-PMK (Polimer Matris Kompozit) gelişmelerinden yararlanılması, yapının hafif ve dayanımının yüksek olması yönünden önemlidir. Çağımız teknolojisinin popüler araştırma konularından olan ETK ve monolitik polimer kompozit kabuk yapıları üzerine pek çok araştırma, öncü araştırma kuruluşları tarafından yapılmaktadır. Özellikle NASA (National Aeronautics and Space Administration), FAA (Federal Aviation Administration) ve ABD Savunma Bakanlığı, bu konudaki test yöntemleri, tasarım kriterleri, üretim metotları gibi konularda kapsamlı bir altyapıya sahiptir.

Bu tür kompozitlerin kullanım alanı her geçen gün artmakta ve pek çok sektörde geleneksel malzemelerin yerini almaktadır; örneğin otomobil şase yapımında çelik yerine kullanılması, uzay gemilerinde ve uçak yapımında alüminyumun yerine kullanılması vb. MKY sisteminde kullanılması gerektiği düşünülen ana malzeme polimer reçinedir. Polimerler, hafifliği, sağlamlığı ve korozyona karşı yüksek dayanıma sahip olması nedeniyle, yaygın bir şekilde inşaat mühendisliğinde kullanılmaktadır (Güven, 1990). Oligamer reçine olarak genelde isimlendirilen bu grup polimerlerin ortak özelliği belli bir formu alacak tarzda, ortam sıcaklığında kalıplanabilmeleridir (Agarwal ve Broutman, 1990; Jones, 1999; Gibson, 1994). ETK olarak kullanılan, bu termoset polimerler ortam ısısı sayesinde, akışkan formundan vitrifikasyon aşamasıyla rijit forma geçerler. Elde edilen rijit



polimer tüm kısımlarında kimyasal bağların sebep olduğu bir ağ yapısına sahiptir ve termoplastiklerden çok daha az ısıya duyarlıdır (Jones, 1999). Bu polimerin ısı dayanımını arttırır, erime veya akmasını önler. Bu gurup polimerlere örnek, Urethane, epoxy, polyester, vinylester, phenol formaldehyde, bismaleimide vs. verilebilir. Pek çok türleri bulunan bu gurup polimerler, kalıplama için uygun reçine viskozitesine sahip olup, polimerizasyondan sonra mükemmel ısı, kimyasal madde ve sünme dayanımına sahiplerdir (Agarwal ve Broutman, 1990; Jones, 1999; Gibson, 1994). Yanmayan polimer çeşitleri de vardır (FAA, 2001). Ekonomik olarak ucuz olan türleri bulunmaktadır (örneğin epoxy, polyester). Düşük yatırım maliyetleriyle iyi yüzey kalitesine sahip olacak tarzda kalıplanabilen bu tür polimerler kullanılarak, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle fiber takviyeli veya takviyesiz kompleks şekiller rahatlıkla oluşturulabilir.

Polimer reçineler ve elyaf takviyeli kompozit malzemeleri konusunda aşağıda başlıklar halinde temel bilgiler verilmiştir.

### 3.1.1. Kompozit malzemeler

Günümüzde kompozit malzemeler, hayatımızın her noktasında karşılaşılabileceğimiz bir yaygınlıkta kullanılmaktadır. Kompozit malzemenin tanımı kısaca; farklı iki maddenin heterojen bir yapıda, maddelerin iyi özelliklerinin bir araya toplanması veya yeni bir özellik ortaya çıkarmak için birleştirilmesi olarak verilebilir (Shuart ve ark., 2000). Kompozit malzeme, belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme gurubudur. Bu bir araya getirmede amaç, bileşenlerin hiç birinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Buna göre malzeme, heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak homojen bir malzeme gibi davranmaktadır. Dolayısıyla, birbirine karışmayan iki veya daha fazla katının bileşimiyle oluşan katı malzemelere "kompozit malzeme" denebilir. Kompozit yapı oluşumuyla geliştirilmesi istenen özelliklerin birkaçı şöyle sıralanabilir (Jones, 1999).

- Yorulma dayanımı,

- Mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı,
- Aşınma dayanımı,
- Korozyon dayanımı,
- Kırılma tokluğu,
- Yüksek sıcaklık özellikleri,
- Isıl iletkenliği,
- Ağırlık,
- Rijitlik,
- Fiyat ve
- Estetik görünüm gibidir.

Kompozit malzemeler reçine (matrix) ve takviye (reinforcement) bileşenlerinden oluşur. Kompozitler temel olarak kalıp görevi gören reçine içine gömülmüş sürekli veya kırılmış elyaflardan oluşmaktadır. Bu bileşenler birbirleri içinde çözülmezler veya karışmazlar. Kompozit malzemelerde elyaf sertlik, sağlamlık gibi yapısal özellikleri, reçine malzemesi ise elyafın yapısal bütünlüğü oluşturması için birbirine bağlanmasını, yükün elyaf arasında dağılmasını ve elyafın kimyasal etkilerden ve atmosfer şartlarından korunmasını sağlar (Armatlı, 1999). Günümüzde gemi yapımından bina yapımına, ev aletleri üretiminden uzay teknolojisine kadar hemen hemen her alanda çok yaygın bir kullanımı bulunan kompozit malzemenin üretimi son birkaç yüz yıla mal edilmiş gibi görülse de ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır.

Kompozit malzeme kavramının ortaya atılması ve konunun bir mühendislik konusu olarak ele alınması ancak 1940'lı yılların başında gerçekleşmiştir. İlk çağlardan beri insanlar kırılma malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak bu kırılma özelliğinin giderilmesine çalışmışlardır. Bu konularda en iyi örneklerden biri kerpiç malzemedir. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler, malzemenin gerek üretimi ve gerekse

kullanımı sırasındaki dayanımını artırmaktadır. Cam liflerinin üretimi, eski Mısır'a kadar tarihlendirilmektedir (Sönmez, 2000). M.Ö 1600 yıllarında Mısır'da ince cam liflerinin yapımının bilindiği söylenmektedir. Cam liflerinin sanayide kullanımıyla ilgili ilk kayıt, 1877 tarihlidir (Sönmez, 2000).

Günlük uygulamalarda en yaygın kullanım olanağı bulmuş olan liflerle donatılmış kompozit malzemelerden ikisi, asbest lifleriyle donatılı kompozit malzemeler ve cam lifleriyle donatılı polyester kompozitlerdir. İlk kez ince levha yapımında kullanılan çimento ve asbest kompozitleri yıllar boyu önemini koruyan ve bu gün hala kullanılan bir malzemedir. Öte yandan, liflerle donatılı sentetik reçineler 1950'li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır (Sönmez, 2000). Bu malzemenin en tanınmış grubunu "cam lifi donatılı polyester reçine kompoziti" oluşturmaktadır. Ülkemizde "fiberglass" diye tanınan bu malzeme 1960'lı yılların başından itibaren Türkiye'de sıvı depoları, çatı levhaları, küçük boyda deniz teknelerinin yapımı gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan "Anadol"un kaportası bu malzemeden üretilmiştir (Sönmez, 2000). Cam lifleriyle donatılı sentetik reçine matrisli malzemeler için dilimizde "Cam Takviyeli Plastik (CTP)" adı yerleşmiştir. Cam takviyeli plastiklerin üretiminde, en çok kullanılan malzeme olan polyesterin yanı sıra, günümüzde, diğer termoset ve termoplastik reçinelerde kullanılmaktadır.

### 3.1.2. Kompozit malzemelerin genel özellikleri

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle belli özelliklerden birinin veya bir kaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu belirli amaçlara yönelik olarak kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Hepsinde değişmeyen temel ilke, bileşenlerin zayıf yönlerinin amaç doğrultusunda iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir. Kompozit malzemeyi oluşturan matris (takviyelendirilen malzeme) ve takviye eden malzeme olarak iki ana madde vardır. Bu yapı elemanlarının tipleri Çizelge 3.1.' de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Kompozit yapı eleman tipleri

<b>Matris Malzemeler</b>	<b>Takviye Elemanları</b>	<b>Kompozit Yapının Şekli</b>
Polimerler	Lifler	Tabakalar
Metaller	Kıl-kristal	Film-Folye
Seramikler	Pudra	Honey-Combs
	Yonga	Filament Sarılmış Yapılar
	Granül	Kaplamalar

Kompozit malzemeler, mevcut geleneksel malzemelerin teknoloji karşısında belli ihtiyaçlara cevap verememesi durumunda üretilmektedir. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleriyle ilgili araştırma ve geliştirme faaliyetleri her geçen gün artarak devam etmektedir. Kompozit malzemeler yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastik modülü/yoğunluk oranına sahip olmalarından dolayı, uygulama alanları hızla artmaktadır.

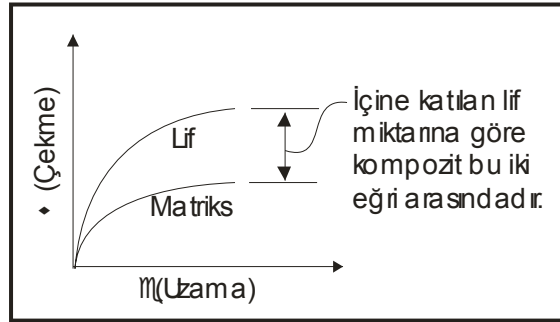
Genelde kompozit malzemeler, düşük modül ve dayanıma sahip reçine ve bu reçinenin içerisinde daha az oranda dağılmış olan takviye elemanından oluşmaktadır. Takviye elemanları olarak kullanılan kısa ve uzun elyaflar, whiskerler, kırılmış veya parçacıklı seramikler değişik yapılara sahiplerdir. Takviye elemanlarının ana işlevi gelen yükü taşıyarak matrisin dayanımını ve rijitliğini arttırmaktır.

Matrisin fonksiyonlarından biri, elyaf-matrisi bir arada tutarak yükü ve gerilimi takviye elemanına aktarmaktadır. Matrisin fonksiyonlarından bir diğeri ise, takviye elemanları kırılğan olduğundan bu elemanları dış etkilere karşı korumak ve matrisin plastiklik ve süneklik özelliğinden dolayı elyaflarda oluşan çatlakları engellemektir. Bir kompozit malzemenin yoğunluk ve çekme dayanımı gibi özellikleri kendisini oluşturan bileşenlerin özelliklerinden hesaplanabilir. Bahsedilen özellikleri sağlayabilmek için, gerekli şartlar, uygun matris-takviye elemanı seçimi, üretim tekniği, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak yapılmalıdır. Matrisler gelen yükü takviye elemanlarına ilettikleri için matris-takviye elemanı ara yüzeyinin kuvvetli olması gerektiğinden, uygun matris-takviye elemanının seçimi, sistemin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkiler (Sönmez, 2000).

### 3.1.3. Matris malzemeleri

Kompozit malzeme genellikle lif ve matris olmak üzere en az iki malzemeden oluşur. Şekil 3.1.'de genel olarak lif ve matrisin çekme–uzama eğrisi görülmektedir. Kompozit yapıda lif seçimine etki eden faktörler şunlardır (Güven, 1990):

- Hafiflik (özellik ağırlık)
- Mukavemet ve modül (çekme ve basma)
- Yorulma mukavemeti
- Yorulmadaki kopma mekanizması (malzemenin gevrek ya da sünek olması)
- Elektrik ve ısı iletkenliği
- Ekonomiklik



Şekil 3.1. Çekme – Uzama eğrisi (Güven, 1990)

Kompozit malzemelerde takviye amacıyla kullanılan elyaflar aşağıdaki gibi verilebilir (Armatlı, 1999);

- Sentetik, organik elyaflar; Naylon, aramid (düşük yoğunluklu ve güçlü elyaflardır)
- Sentetik inorganik, elyaflar ; Cam,karbon boron
- Doğal elyaflar (günümüzde yerlerini sentetik elyaflara bırakmışlardır) vb.

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır (Sönmez, 2000). İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir yada birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gösterir. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyen etkenlerdir. Matris elyafa göre zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur (Sönmez, 2000).

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise, elyaf yada matriste oluşacak bir çatlakın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse, elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar (Sönmez, 2000). Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise, elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğru bir çatlak elyaf-matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler (Sönmez, 2000). Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tipleri epoksi, polyester, vinylester ve fenolik reçinelerdir (Sönmez, 2000). Yüksek mukavemet göstermeyen durumlarda en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinesidir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise genellikle epoksi reçinesi kullanılmaktadır.

Matris, kompozitlerin ikinci ana bileşenidir. Matris malzemeler, polimer matrisler, metalik matrisler ve kullanım alanları çok az olan yüksek sıcaklık matrisleri şeklinde gruplanabilir (Sönmez, 2000). Kompozitin istenen başarıyı göstermesi, matris seçimine bağlıdır. Matris seçiminde göz önünde tutulan matris görevleri ve özellikleri şöyle sıralanabilir (Güven, 1990):

- Kuvvetleri liflere iletmek,
- Lifleri, korozyon ve oksidasyon gibi, ortamın etkisi ve darbelerden korumak
- İstenen özelliklere uygun olması
- Maliyet
- Nem ve su alma özelliği
- Kayma sertliği, darbe özellikleri
- Viskozite, erime noktası
- Kür zamanı.

Kompozit malzemelerde polimer esaslı matrislerin yanı sıra metal, seramik türevi malzemeler de matris olarak kullanılmaktadır. Diğer matrislerin kullanılmasına rağmen kompozit malzemelerin % 90'ı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir (Sönmez, 2000). Matris malzemelerinin genellikle plastik esaslı olmasından dolayı kompozit malzemeler de genellikle takviye edilmiş plastikler olarak adlandırılırlar. Metal matrislerin büyük çaplı uygulamalarda kullanılması pahalı ve çalışmaları zordur (Sönmez, 2000). Seramik matrisler ise yüksek oranda kırılabilir olmalarından dolayı yeterli dayanıklılığa sahip olmamaları nedeniyle kullanım alanları yüksek ısı ile kullanılan yerlerle sınırlanmaktadır. Karbon matrisli kompozit malzemeleri üretimi oldukça zor ve pahalıdır (Sönmez, 2000).

Matrisler güçlü yapışma, çevre ve atmosfer şartlarına yüksek dayanım ve yüksek mekanik özellikler gösterirler. Bir matrisin öncelikle sağladığı mekanik özellikler yüksek sertlik ve yüksek dayanıklılık değerleridir. İyi bir malzeme sert olmalıdır, fakat gevrek bir malzemenin gösterdiği davranışlardan dolayı performansı düşmemelidir (Sönmez, 2000). Bu özellikleri büyük ölçüde karşılayan polimer esaslı

matrisler termoset ve termoplastik matrisler olarak iki türdür. Termoset esaslı kompozit malzeme matrisleri en çok kullanılandır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak, kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan bir süreçtir (Sönmez, 2000). Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Termoset reçineler kimyasal etkiler altında çözülmez ve olağandışı hava şartlarında uzun ömürlüdürler. Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına karşılık matris olarak kullanılan türleri sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte, üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır (Sönmez, 2000). Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de sahiptirler. Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni üretimindeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir (Sönmez, 2000). Kompozit yapının bağ oluşumu, *arabirim* kavramı ile açıklanabilir. Arabirimin sahip olduğu bağ kuvveti değeri, kompozitin davranış karakterlerini belirler. Arabirimde fiziksel kimyasal ve mekaniksel bağların ve takviye elemanının geometrisinin önemi vardır. Arabirimdeki yapışma;

- Yüzeylerin şekillerine,
- Arabirimi meydana getiren malzemelerin yapılarına,
- Temas basınçlarına,
- Yüzeylerde kalan elementlere,
- Yüzeylerdeki fonksiyonel gruplara,
- Kalmış gerilimlere ve
- Çalışma sıcaklığına bağlıdır.

Reçine maddesi, takviye elemanını çok iyi sarabilmeli ve ıslatabilmelidir. Islanma iyi olmazsa, zayıf bir arabirim meydana gelir. Arabirimdeki bağ normal



koşullarda yeterli sağlamlıkta oluşmuyorsa, bir takım yöntemler kullanılır. Arabirimi kuvvetlendirmekte kullanılan en geçerli yöntem birleştirme maddeleri kullanmaktır. Kimyasal ajan olarak adlandırılan bu maddeler matris ve takviye elemanına uygun olarak seçilmelidir. Mekanik bağ oluşumu yeterli değildir, çok çabuk ayrılma ve kopmalar meydana gelir (Sönmez, 2000).

#### 3.1.4. Kompozit malzemelerin genel avantaj ve dezavantajları

Kompozit malzemelerin genel avantajları şu şekilde sıralanabilir (Armatlı, 1999);

- Farklı mekanik özellikler elde etmek için farklı katmanlardan ve farklı kombinasyonlarla kompozit malzeme oluşturulabilir.
- Kompozit malzemeler kimyasallara, korozyona ve hava şartlarına dayanıklıdır.
- Karmaşık parçaların tek olarak üretilebilmesinden dolayı parça sayısının azalmasını sağlarlar. Böylece ara birleştirme detay ve parçalarının azalmasıyla üretim süresi kısalmır.
- Yüksek dayanıklılık/ yoğunluk oranı
- Yüksek modül/ağırlık oranı

Bu malzemelerin dezavantajları ise (Armatlı, 1999);

- Hammaddenin pahalı olması
- Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesme dayanıklılık özelliği bulunmaktadır.
- Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur.
- Kompozitler kırılğan (gevrek) malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler, onarımları yeni problemler yaratabilir.

Mevcut malzemelerle kompozit malzemeler karşılaştırıldığında birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Dolayısıyla kompozit malzemeler diğer malzemelere göre daha hafif olduğundan kullanım alanı geniş olmaktadır. Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre çekme dayanımı ve elastik modülünün daha yüksek, uzama miktarı ise daha düşük olduğu görülmektedir.

### 3.1.5. Takviye elemanlarının özellikleri

Kompozit malzemelerin oluşturulmasında matris içerisinde yüksek dayanımlı takviye elemanları olan cam, karbon, boron, alüminyum oksit ve silisyum karbür gibi değişik yapıya sahip malzemeler kullanılmaktadır. Bir kompozit malzemede optimum özelliklerin elde edilmesi isteniyorsa, elyaf veya kılcal kristalli formun kullanılması gerekmektedir. Kompozit malzemede kullanılan takviye elemanının görevi, gelen yükü taşımak, matrisin dayanımını ve rijitliğini arttırmaktır. Kompozit malzemeye gelen yükün elyaflara iletilebilmesi için ara yüzey bağının kuvvetli olması gerekir ve ana faz ile ara faz arasında fiziksel ve kimyasal uyumun olması gereklidir (Sönmez, 2000). Kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması açısından matris ve takviye elemanının ısı genleşme katsayıları arasında da uyumun olması gereklidir. Kompozitin dayanımını elyafların şekli, boyu, yönlendirilmesi, matrisin mekanik özellikleri ve yeterli elyaf/matris ara yüzey bağı gibi faktörler etkilemektedir.

### 3.1.6. Elyaf

Cam elyaflar en ucuz olan takviye elemanıdır ve polimer esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı kimyasal bileşimlere sahip olan cam elyaf türleri E-camı, S-camı ve C-camı olarak bilinmektedir. Cam elyafların bu türleri birbirinden farklı özelliklere sahiptir. Örneğin; E-camı iyi elektrik yalıtım özelliğine sahip, S-camı yüksek modüle sahip fakat pahalı, C-camı ise iyi korozyon direncine sahip ancak mekanik özellikleri düşüktür (Sönmez, 2000). Yüksek kaliteli elyafları üretebilmek için yüksek saflıktaki malzemelerin homojen şekilde ergimiş olması, yüksek sıcaklıkta çekilmesi ve hemen koruyucu kaplama uygulanmış olması gerekmektedir.

Cam elyaflar, camların elektrik fırınında yaklaşık 1 200-1 500 °C de ergitilmesi ve ergiyen camların bir platin alaşımlı olan potanın tabanındaki binlerce delikten hızlı şekilde aşağı doğru demetler halinde çekilerek ve soğutma bölgesinden geçilerek üretilir (Sönmez, 2000). Daha sonra kaplama uygulanması ve demetler halinde makaralara sarılır ve yaklaşık 3 kg'lık demetler olarak depolara gönderilir. Kaplama formülüzasyonu karmaşık olup elyafları hasardan korur. Kaplama maddesi genellikle *silane* ihtiva eder (Sönmez, 2000). Bu molekülün bir kısmı Si-O bağları aracılığıyla cam ile reaksiyona girerken, *silane* üzerindeki organik gruplar reçine ile uyumluluk sağlarlar. Bu elyaflar karbon kadar hafif ve rijit olmamasına rağmen oldukça ucuzdur (Sönmez, 2000). Karbon elyaflar yüksek çekme dayanımına ve yüksek elastik modülüne sahip olan takviye elemanıdır. Karbon elyaflar organik maddelerden üretildikleri için organik fiber olarak ta adlandırılabilirler.

*Aromid* "aromatik polyamid" in kısaltılmış adıdır. *Polyamidler* uzun zincirli polimerlerdir. Aromidin moleküler yapısında altı karbon atomu birbirine hidrojen ile bağlanmıştır. İki farklı tip aromid mevcuttur. Bunlar *kevlar 29* ve *kevlar 49*'dur. Camdan daha hafif ve daha rijit olan bu malzeme, fiyat açısından da cam lifleri dışında kalan bir çok lif türünden daha ucuzdur. Yüksek sıcaklıkta sünme dayanımı oldukça iyidir. Ayrıca korozyon dayanımı da oldukça iyidir. Uçak yapılarında, düşük basınç mukavemetleri nedeniyle karbon elyaflarla birlikte *hibrit* kompozit olarak, kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadır (DDCMHB, 2002).

Yüksek dayanımlı ve pahalı bir malzeme olan *bor* lifleri, günümüzde özellikle metal matris elemanlarıyla birlikte metal matris malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Elyaf çapı 0.1 mm ile 0.2 mm arasında olan ve diğer bir çok life göre oldukça kalın bir lif özelliği gösteren malzeme, yüksek çekme mukavemetine ve elastik modüle sahiptir (DDCMHB, 2002). Elastik modülü ise 400 Gpa olup bu değer S camının elastik modülünden 5 kat daha fazladır (DDCMHB, 2002). Üstün mekanik özelliklere sahip bor elyaflar, uçak yapılarında kullanılmaktadır. Ancak maliyetinin çok fazla olması nedeniyle yerini karbon elyaflara bırakmıştır. Yüksek sıcaklıktaki özellikleri bor liflerinden daha iyidir. *Silisyum karbür* elyaflar 1 370 °C'de mukavemetinin sadece %30'unu kaybeder (DDCMHB, 2002). Bor elyaf için

bu 640 °C' dir. Bu elyaflar genellikle Titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında, titanyum, alüminyum, vonodyum alaşımlı matris ile kullanılırlar.

### 3.1.7. Reçine matrisleri

Pek çok çeşit reçine matrisleri pazarda mevcuttur. Bu reçinelerin sadece önemli iki türü olan epoksi ve polyester reçinelere burada değinilmiştir.

Epoksiler iki yada daha fazla *epoksit* içeren bileşenlerden oluşurlar. *Polifenol*'ün *epikloridin* ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilirler. Epoksilere uygulanan kür işlemleri sayesinde yüksek sıcaklıklara dayanımı 150-200 °C'ye artırılabilir. Büzülmesi %2'den azdır (Armatlı, 1999).

Avantajları:

- Kopma mukavemetleri yüksektir.
- Elyaf yapılarda yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- Düşük ve yüksek sıcaklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.

Dezavantajları:

- Polyesterle karıştırıldığında pahalıdırlar.
- Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur.

Epoksilerin avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerle kullanılabilmesi nedeniyle, uçak yapımında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar.

Polyester matrisler *dibazik* asitlerin, *dihidrik* alkoller (glükol) yada *dihidrik* fenollerle karışımının yoğunlaşması oluşurlar. Polyesterlerin ana tipleri polyester bileşeninin doymuş asitle yada alternatif malzeme olarak glükolle modifikasyonu temeline dayanır. Ayrıca kür işlemi ile matrisin esnekliği iyileştirilerek kopma gerilmesi arttırılabilir (DDCMHB, 2002).

Avantajları:

- Elyafın nemini dışarı kolayca atabilmesini sağlayan düşük vikoze
- Düşük maliyet
- İyi çevresel dayanım

Silikon reçineler, diğerlerinden farklı olarak yapılarında karbon yerine inorganik esaslı silikonlar bulunan malzemelerdir. Mekanik ve elektriksel özelliklerini, çok az değişikliklerle 250 C°'ye kadar koruyabilen silikon esaslı reçinelerin kullanımları, mekanik dayanımlarının diğer reçinelere göre daha düşük ve maliyetinin de genelde daha yüksek olmasındandır. Süpersonik arabalarda kullanılırlar (Sönmez, 2000).

### 3.1.8. Kompozit malzemelerin çeşitleri

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında, kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, malzemelerinin formuna göre bir sınıflama yapmak mümkündür (Sönmez, 2000).

- Elyafı kompozitler
- Parçacıklı kompozitler
- Tabakalı kompozitler
- Karma kompozitler

Elyaf kompozit türü, ince elyafların matris yapısında yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir etkidir. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranları arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı da artmaktadır (Sönmez, 2000). Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir etken ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise, elyaflarla temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

Dayanımı yüksek elyafların sünek matris içerisine ilave edilmesiyle, çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanımı yüksek olan, elyaf takviyeli kompozitler elde edilir. Gelen yükü matris elyaflara aktarırken yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlamaktadır. Takviyeli kompozitlerde farklı takviye elemanı kullanılmaktadır. Örneğin; örgülü elyaflar, şerit fitil elyaflar ve dikişli elyaflar. Farklı yönlerde farklı özellikler elde edebilmek için, sürekli ve tek yönlü elyaflarla takviye yapılmalıdır. Sürekli elyaflar istenilen yöne yönlendirilebilme özelliğine sahip olduğundan dolayı, üzerine gelen yükmeden oluşan çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri için gerekli dayanıma sahip olabilirler. Bu özellik, sürekli elyafları diğer takviye elemanlarından daha üstün kılar. Genel kompozit malzemelerin geleneksel malzemelerle karşılaştırması Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelerle karşılaştırılması  
(Tarakçılar ve ark., 1995; Sönmez, 2000)

Malzeme cinsi	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Çekme dayanımı (MPa)	Elastik modülü (GPa)	Uzama (%)
Aluminyum	2.8	84	71	-
Al-2024	2.8	247	89	8-20
Al alaşımı	2.8	600	71	-
Titanyum	4.45	700	117	20
Ni alaşımı	8.18	450-1200	204	26-45
Ahşap	0.7	110	13	
Alaşımsız çelik	7.86	460	210	20
Ötektik çelik	7.8	300	210	-
Düşük alaşımlı çelik	7.8	600	207	20-30
Dökme demir	-	275	138	0.6
Prinç/%30 Zn	8.5	550	100	-
Karbon/epoksi	1.62	1400	220	0.8
Kevlar/epoksi	1.38	1310	83	-
Cam/epoksi	1.66	1510	165	-
Cam/polyester	1.90	750	38	1.8
Karbon/epoksi	1.50	1650	140	-
Cam/polyester	1.55	110	9	2

Uzun elyaflar kendi doğrultularında uygulanan çekme kuvvetine yüksek dayanım gösterirler. Bir elyaf takviyeli kompozit üzerine, hem elyaf yönünde hem de elyaf yönüne dik doğrultuda kuvvet uygulandığında, kompozitin mekanik özelliklerini attırmak için, değişik açılarda takviyelendirme yapılması gerekmektedir. Böylelikle yüksek özelliklere sahip kompozitlerin elde edilmesi mümkündür.

Parçacıklı kompozitler bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılarıdır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısıl ve elektrikli iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik matris içeren yapıların (cermet), sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir (Sönmez, 2000). Bunlar kollar, kulplar, elektrikli parçaları, muhafazalar vb. gibi küçük parçacıkların yapımında kullanılırlar.

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan türdür. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi sayesinde, çok yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılarıdır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilirler. Pek çok katmanlı kompozit düşük maliyet, yüksek dayanım veya hafifliğini korurken, aşınma veya *abrasiv* aşınma direnci, gelişmiş görünüm ve mükemmel ısıl genleşme özelliklerini kapsamaktadır. Buna karşın korozyon ve aşınma direnci gibi önemli özelliklerin pek çoğu öncelikle kompoziti oluşturan elemanlardan birine bağlıdır. Katmanlı kompozitlerin sayısı öylesine fazla ve uygulamaları, amaçları, öylesine çoktur ki davranışları hakkında genelleme yapılması mümkün olmayabilir. Elektrik şarjını depolamak için kullanılan kondansatörler esas itibariyle dönüşümlü olarak bir iletken ve bir yalıtkan katmanların üst üste gelerek meydana getirdiği katmanlı kompozitlerdir. Katmanlar organik bir yapıştırıcı ile yapıştırılmış malzeme katmanlarıdır. En yaygın katman, her bir alternatif katta dik açılarla ağaç kaplama açılarının dizildiği kontraplaklardır. Bu katlar *fenolik* veya *amine* reçineler gibi bir yapıştırıcı ile birleştirilir (Sönmez, 2000). Emniyet gözlükleri, *polivinil butiral* gibi plastik bir yapıştırıcı ile iki cam malzemesinin birleştirildiği katman malzemelerdir. Cam kırıldığı zaman yapıştırıcı cam parçacıklarının ayrılmasını önler. Katmanlar, motorlarda, yalıtım için dişlilerde, basılmış devre katlarında kullanılmaktadır. Yapıştırıcı katmanlar, mükemmel hafiflik, alevlenmeyi geciktirici, darbe dayanımı, korozyon direnci, kolay şekillendirme ve işleme, sürtünme ısısının dağıtılması ve iyi yalıtım özelliklerini bünyesinde toplamaktır.

İleri kompozitler, uçak ve uzay sanayisi gibi, dayanım, bükülmezlik ve hafiflik kombinasyonunun gerekli olduğu uygulamalarda kullanılırlar. Bazı örnekler Çizelge 3.3.'te verilmiştir. İleri kompozitlerde tipik olarak polimer veya metal matris içerisinde boron grafit veya kevlar fiber kullanılır. İleri kompozitler fiber cam ve yüksek dayanım alaşımlarından daha iyi dayanım ve yorulma direncine sahiptirler.



Çizelge 3.3. Bazı ileri kompozit uygulamaları (Sönmez, 2000)

Malzeme	Uygulamalar
Alüminyum	Havacılık, uzay (uzay mekiği dahil), bot teknesi
Kevlar – Epoksi	Spor gereçleri (tenis raketleri,golf sopası,olta çubuğu) uçaksavar kılıfı
Kevlar – Polyester	Uzay, otomotiv, spor gereçleri
Grafit – Polimer	Hafif otomotiv uygulamaları, su ve denizcilik uygulamaları, korozyon dirençli
Cam – Polimer	uygulamalar, spor gereçleri, uzay ve havacılık parçaları.

İleri kompozitler, yüksek özgül dayanım avantajı sağlamak için modern uçaklarda hem yapısal hem de yüzey kısmında yoğun olarak kullanılmaktadır (Sönmez, 2000). Bu kompozitlerin dayanımı, sıcaklık nispeten düşük olduğunda daha da artar. *Grafit, boron veya silisyum karbürle* mukavemetlendirilmiş alüminyum titanyum veya nikel gibi metal matris kompozitler, yüksek sıcaklıkla karşılaşıldığında kullanılır.

### 3.1.9. Kompozitler için matris malzemelerinin özellikleri

Yüksek performanslı kompozit malzeme üretimi için, matris malzemesi elyaflar arasına emdirilmeli, elyafları ıslatabilmeli, kimyasal veya belli şartlarda yapışma için bağ oluşturmalı, mümkün olan düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılaşma yapabilmelidir (Sönmez, 2000). Üretim esnasında veya bundan sonraki işlemler sırasında, matris ve elyaf arasında diğer kimyasal etkileşimler olmamalı ve matris zamanla kararlı kalmalıdır. Üretim sırasında matrisin kimyası nedeniyle elyaflarda herhangi bir fiziksel hasara olmamalıdır (Sönmez, 2000).

Yukarıdakilerle birlikte bir kompozit malzemedeki kullanılan uygun matris seçimi ile, birçok önemli fonksiyonlar yerine getirilir. Elyaf takviyeli kompozitlerde matrisin yerine getirmesi gereken başlıca fonksiyonları şöyle sıralanabilir (Tarakçılar ve ark., 1995; Sönmez, 2000).

- Düzenlenmiş elyafları bir arada tutarak kuvvetleri elyaflara iletme. Bu özellikle çekme ve kaymayla birlikte basma yüklemeleri için önemlidir.

- Elyafı çevresel etkilerden ve darbelerden korumaktır. Cam-elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan çoğu matrisler, suya ve korozyona karşı çok hassastır. Bazı matris malzemeler üretim sırasında elyafı ile reaksiyona girerler. Bu yüzden matris seçimi kadar elyaf seçimi de önemlidir.
- Çatlakları durdurur. Kullanılan elyafı genellikle yüksek dayanım ve elastik modüle sahip fakat çok gevrekler. Elyafı ayrı ayrı birim içindeymiş gibi davranırken, matris malzemesi kırılma oluncaya kadar bağımsız olarak yük taşıyıcı gibi davranır. Bu yüzden herhangi bir çatlak ani kırılmaya sebep olmaz. Örnek olarak bir elyaf kırılırsa bitişik elyafa geçmeden önce yükü matrise iletir. Bu nedenle matrisin ve matris elyaf arasında ara yüzey bağının, kompozitin tokluğu üzerine önemli etkisi bulunmaktadır. Bu gereksinimlerin çoğunu karşılayan en kolay malzemeler ya hafif metaller ve alaşımları ya da termosetlerdir.

Plastikler *monomer* denilen kimyasal ünitelerden meydana gelen zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir. Bir monomer polimerizasyon yoluyla başka monomer molekülleri ile birleşerek tekrarlanan ünitelerden oluşan çok uzun zincir şeklinde bir makro-molekül meydana getirir, bunların en basit şekli polietilendir (Sönmez, 2000). Karbon atomları ile başka elementlerin atomlarından oluşmaktadır. Plastiklerin yapısı amorf şeklinde olup, uzun ve karışık yapı zincirlerin komşuları ile uyum sağlayıp, düzenli yapı oluşturmaları çok zordur. Amorf ana yapı içinde oluşan küçük kristal yapı bölgeler, kristaller olarak adlandırılır, oluşan kristaller rasgele yönelirler (Sönmez, 2000). Plastikler hafif olması ve kolay işlenebilmelerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Karışık geometriye sahip şekiller bile, kolaylıkla bir kalıba enjekte etmek suretiyle üretilebilmektedir, bu nedenle de bazen bunlara reçine denilmektedir.

Polimerizasyonla üretilen bir makromolekül  $n$  adet tekrarlanan ünitelerden oluşur. Verilen bir polimerleşmiş malzeme serisi içinde moleküller uzunlukça değişik olduğundan dolayı, demet için  $n$  ortalama olup, bunun istatistiksel dağılımı normaldir (Sönmez, 2000).  $n$  ortalama değeri, serinin polimerizasyon derecesi olarak

adlandırılır (DP). Polimerizasyon derecesi (DP) polimerin özelliklerine etki eder. Daha yüksek DP mekanik dayanımı artırır. Fakat katı durumda viskoziteyi artırır ve işlemin yapılmasını daha zorlaştırır.

Bir polimerin *molekül ağırlığı* ( $m_w$ ), molekül içindeki ünitelerin molekül ağırlıklarının toplamıdır. Dolayısıyla her bir tekrarlanan birimin molekül ağırlığının  $n$  katıdır. Bir seride farklı moleküller için  $n$  değişir, molekül ağırlığı ortalama olarak değerlendirilmelidir. Bazı polimerlerin  $m_w$  ve DP tipik değerleri Çizelge 3.4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Termoplastik polimerler için tipik polimerizasyon derecesi (PD) ve molekül ağırlığı ( $m_w$ ) (Tarakçılar ve ark., 1995; Sönmez, 2000)

Polimer cinsi	DP(n)	$m_w$
Polietilen	10000	300000
Polistireyn	3000	300000
Polivinil klorür	1500	100000
Naylon	120	15000
Polikarbonat	200	40000

### 3.1.10. Termoplastikler

*Termoplastikler* oda sıcaklığında katı malzeme olarak adlandırılır. Rijit bir yapıya sahip değildir. Isıtılırsa yumuşar, sıcaklık arttıkça viskozitesi düşer. Bu özellik bunlardan yapılan ürünleri daha ekonomik yapar ve kolaylıkla şekillenmesini sağlar (Sönmez, 2000). Tekrar soğutulduklarında yeniden sertleşirler. Sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda, viskozitesi yüksektir. Bu nedenle ara yüzey bağı termosete göre daha zordur. Ancak şekillendirme kapasitesi iyi olduğundan bunların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu polimerler, kristalin veya şekilsiz (amorfe) olabilir. Kristal şekilli olanlarda moleküller büyük uzaklıklarda, oldukça düzenli şekil oluştururlar. Amorf polimerlerde ise uzun zincirler birçok noktada birbirine dolaşmıştır. Bunlar polimeri daha büyük sıcaklıklarda rijit yapar. Kısa elyafla, küçük hacim ortamında, hamur ve levha kalıplama yöntemi ile kullanılmaktadırlar. Kimyasal etkilere karşı hassastırlar. Tutuşma direnci daha iyidir.

Termoplastiklerin özellikleri şöyle özetlenebilir (Sönmez, 2000).

- Çok düşük rijitlik
- Çok düşük çekme dayanımı ve sertlik
- Daha büyük süneklik, yaklaşık %1 ila 500 arasında değişir.
- Kuvvet etkisinde oda sıcaklığında bile sünme ve zamana bağlı şekil değiştirmeler oluşur.

Termoplastikler, üretilen bütün sentetik polimerlerin yaklaşık % 70' ini meydana getirir. Termosetler ve elastomerler ise yaklaşık % 30' unu oluşturur. Tipik olarak kullanılan termoplastikler, *Acetal*, *Acrylonitrile-Butadiene-Styren (ABS)*, *Selüloz*, *Poli-tetra-flor-etilene= Fluoropolymers (PTFE)*, *Poli amid (PA)*, *Polikarbonat (PC)*, *Polietilen (PE)*, *Polyester (PET)*, *Polivinil klorür (PVC)*, *Naylon 6.6*, *Polistiren (PS)* ve *Polipropilen (PP)* dir. Ancak, bu üç tür olan polimerler bazen birbiri içerisine girebilir. Termoplastik olan belli polimerlerden termosetler de yapılabilir.

### 3.1.11. Termosetler

Termosetler, polimerizasyonla iki kademede elde edilir. Birincisi, malzemeyi ihtiva eden monomerler lineer zincirlerin bir araya getirdiği reaktörde başlarken, ikinci polimerizasyon işlemi esnasında, sıcaklık ve basınçla reaksiyona girmeyen kısımlar sıvılaşarak molekül zincirleri üç boyutlu yapıya sahip olur ve rijitdirler (Sönmez, 2000). Bunlar tekrar ısıtılarak yumuşatılmaz. Epoksi ve polyesterler, elyaf takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matris malzemeleridir. Bunların fiziksel ve mekaniksel özellikleri, moleküllerin büyüklüğüne, yoğunluğa ve çapraz bağın uzunluğuna bağlıdır. Ancak, polyesterler cam elyafı iyi *ıslatır* ve dolgu maddesi olarak kullanılabilirler. Bunların sakıncası ise, sertleşme sırasında % 10 kadar kendini çekmesidir (büzülmesidir) (Sönmez, 2000). Bu büzülme ise, liflerin basma gerilmeleri altında burkulmasına neden olur. Termosetlerin dayanımları termoplastiklere göre yüksektir.

### 3.1.12. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerinin üretim yöntemleri

Arzu edilen performansa uygun olarak kompozit malzemelerinin üretiminde, maliyet unsuru ilk düşünülmesi gereken parametrelerden biridir. Üretim maliyetini, performans, tasarım, malzeme seçimi ve şekil verme yöntemi doğrudan etkilemektedir. Kompozit yapıyı oluşturan bileşenlerin seçimi ve bileşen konfigürasyonu, üretim maliyetini önemli ölçüde düşürebilir. Tasarım konsepti ile maliyetin düşürülmesi, her zaman geçerli bir yöntem olup daima göz önüne alınmalıdır. Mukavemet ve tokluk, minimum ağırlık, yüksek sıcaklıkta kullanılabilirlik, yorulma mukavemeti, düşük bakım masrafı, korozyon dayanımı, hasar toleransları ve tamir kolaylıkları gibi, faktörler birlikte düşünülerek, en düşük maliyetli, en kolay üretilen bir kompozit sistemi seçilmelidir.

Sürekli elyafın bir bağlayıcı ortamından geçirildikten sonra, dönel madrenle, önceden belirlenmiş sarım geometrisine uygun sarılması yöntemine, elyaf sarma adı verilmektedir (Sönmez, 2000). Genellikle sarılan öz veya mandrel, sarım işleminden sonra çıkarılır. Bazı hallerde sabit mandrel kullanılarak kompozit kabuk ile takviye edilebilir. Elyaf sarma yönteminin bazı avantaj ve dez avantajları aşağıda verilmiştir (Sönmez, 2000).

- Sürekli elyaf ağı ile yüksek mukavemet sağlar
- Ardarda sarılan elyaflar mukavemeti artırır.
- İmalatı kolaydır.
- Oldukça büyük yapılar elde edilebilir.
- Yüksek elyaf yoğunluğuna ulaşılabilir.
- Avantajlı üretim maliyetine sahiptir.

Çeşitli simetrik malzemelerin üretildiği elyaf sarma yönteminin bazı dez avantajları aşağıda verilmiştir (Sönmez, 2000).

- Mandrelin çıkartılabileceği şekilde tasarlanması
- Konveks yüzeylerin elde edilememesi
- Sarım yolunun kolaylıkla değiştirilememesi
- Kompleks ve pahalı mandrellerin kullanılması
- Zayıf bir dış yüzeye sahip bulunması

Bu olumsuzluklara rağmen, boru, fittings, tüp, basınçlı kaplar, küresel ve silindirik yapılarda oldukça tercih edilen bir yöntemdir.

Takviye elemanının reçine yüzeyine yerleştirilmesi, reçine sıvama veya elyaf dokuma ile kalıp formuna uygun yüzeylerin elde edilmesi, genelde açık-kalıp yöntemi olarak bilinir (Sönmez, 2000). Doğranmış, ufaltılmış, tanelere ayrılmış kısa boylu elyaf ve partüküller ile dokunmuş demet şeklinde veya dokunmamış kumaş yapısındaki takviye malzemesi, reçine yüzüne yatırılarak, çeşitli el aletleri ile sıvanıp, tam-ısıtma temin edilerek kompozit malzemenin elde edilmesi, günümüzde çok yaygın olarak kullanılan bir metottur. Bu amaçla en çok ahşap kalıp kullanılmakla birlikte alüminyum ve plastik kalıplarda kullanılabilmektedir. Kalıp yüzeyi aynı zamanda ayırıcı özelliğe sahip sert yüzey temin eden “gelcoat” ile sıvandıktan sonra takviye malzemesi yatırılarak reçine ile sıvanır. Sıvama tekniği elyaf oranını etkilediğinden önemlidir. Elle sıvama ve elyafa şekil verme yerine vakum-folyo altında aynı işlemler yapılabilir. Bu itibarla açık kalıp kompozit üretim yöntemi üç kategoride incelenmektedir. Bunlar; elle yatırma, elyaf fırlatma (üfleme) ve vakum torbasında şekillendirme yöntemidir (Sönmez, 2000).

Ara yüzey ayırma elemanı (kalıp ayırıcı) olarak buharlaşan bir çözücüde çözülmüş *fluorokarbon* türevleri kullanılmaktadır. Kompozit yüzeyde sert fluorokarbonlu ince film oluşurken, her türlü renklendiricilerle renklendirilebilmektedir. Kalıpta kompozit ayırıcısı olarak silikon boyalarda kullanılabilir. Ancak müteakip işlemler ve servis ortamlarında çeşitli sorunlar

oluşmaktadır. *Politetrafluoroetilen* ayırıcılar özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir.

Elyaf – reçine karışımı şekillendirilmiş kalıptan geçirilirken aynı zamanda da sertleştirilerek çeşitli profieller ve özel kesitli kompozit malzemelerin eldi edilmesi mümkündür (Sönmez, 2000). Cam elyaf ve yüksek mukavemetli elyafların uygun reçine matrisi ile çekilmesi gelecekte alüminyum ve çelik türevlerini ikame edecek boyutlara ulaşacağı öngörülmektedir. Örgülü veya gelişigüzel dağılmış elyaf termoset reçine ortamında çekilmektedir (Sönmez, 2000).

Termoset veya termoplastik matris içine dağılmış takviye elemanları, belli basınç altında presleme yöntemiyle sıkıştırılarak sertleştirilir. Havacılık sektörüne yönelik kompozit ürünler için epoksi matrisler kullanılırken, kar ve demiryolu taşıtları için poliester ve vinilester reçineli matrisler kullanılmaktadır. 3-5 cm boyunda kesilmiş elyaflar, mikserde reçine ile karıştırılırlar, reçinere *katalist*, dolgu malzemesi, kalıp sıyırma malzemesi ile magnezyum oksit ihtiva edilir (Sönmez, 2000). Mikserde iyice karıştırılmış hamur, uygun ortamda uzun süre saklanabilir. 130-160 °C sıcaklığa ısıtılmış kalıp boşluğuna gerekli hacimde karışım hamuru yerleştirilerek 4-21 Mpa basınç altında birkaç dakika bekletilir (Sönmez, 2000). Parçanın özelliğine, elyaf oranına ve reçine grubuna göre sertleşme süresi 1-4 dakika arasında değişir (Sönmez, 2000). Koltuklar çeşitli kaplar ve yapı elemanlarının üretimine imkan veren presleme metodunun, gelecekte alüminyum ve plastik enjeksiyon döküm ürünlerine alternatif olacağı öngörülmektedir.

Genellikle partikül şeklindeki takviye fazı, sıvı reçine veya metalle birlikte hidrostatik veya pres basıncı altında dökülebilir (Sönmez, 2000). Bu yöntemle döküm yöntemi denir. Özellikle aşınmaya dayanıklı kompozit malzemeler bu yöntemle üretilirler. Soğukta ve sıcakta katılaşabilen reçineler ile alüminyum ve magnezyum gibi metaller bu amaçla kullanılmaktadır (Sönmez, 2000). Piston gibi aşınmaya müsait malzemeler taneli kompozit döküm malzemelerdir. Fren pabuçları ve basınç altında çalışan malzemeler bu yöntemle üretilebilir (Sönmez, 2000).

### 3.1.14. Kompozit malzeme kullanımında tasarım esasları

Takviye doğrultusunda çok yüksek özgül mukavemet ve rijitlik, şekillendirilebilme kabiliyeti ve elastik olarak yüksek kopma uzaması, çok iyi yorulma dayanımı, kalıcı deformasyon olmaması, düşük ve kontrol edilebilir ısıl genleşme katsayısı, çok düşük enine ve ısıl elektrik iletim katsayısı, tabakalı kompozitlerin tabaka yapılarının istenen amaca göre düzenlenebilmesi kompozitlerin tercih nedenleridir. Dezavantajları ise; malzeme bünyesinde hasara sebep olacak şekilde ikincil gerilmelerin meydana gelebilmesi, kritik uygulamalarda uzun zaman alan masraf gerektiren detaylı gerilme analizi gerekliliği, üretim ve kullanım yerinde yüksek sıcaklık olması durumunda, fiber matris ısıl genleşmelerinin farklı olması sebebiyle hasara götüren iç gerilmeler, lineer elastik özellikleri sebebiyle gevrek kırılma tehlikesi, kullanım ortamı sıcaklığının matris malzeme özellikleriyle sınırlanması, sıcaklık sebebiyle özellikle polimer matrisli malzemelerde sürünme tehlikesi, bağlantı yerlerinde çok dikkatli dizayn gerekliliği, olarak sayılabilir. Kompozit malzemelerin tasarımında göz önüne alınması gereken mekanik özellikleri Çizelge 3.5.'de özetlenmiştir.

Kompozit malzemedен yapılan tanklar, sütunlar, basınçlı kaplar ve tüp gibi yapı elemanları ve bunların tasarımı; öncelikle kompozit için uygun üretim metodu, elyaf doğrultusu ve en uygun malzemelerin seçimini gerektirir. Bunlardan her birinin, malzemenin mekanik özellikleri ve son ürünün dayanımını ve elastikliği üzerine belirli etkisi vardır. Belirli uygulamalar için metal ve plastik esaslı kompozitlerin tasarımı arasındaki fark, kompozit parçayı meydana getiren bileşenlerin fabrikasyon zamanında olmasıdır. Bu nedenle tasarım aşaması üretim tekniğinin seçimiyle birlikte düşünülmelidir. İlk önce kompozitin tasarım işlemleri için elyaf ve matris malzemeleri seçimi yapılır.



Çizelge 3.5. Kompozit malzemelerinin mekanik özellikleri (Sönmez, 2000)

MALZEME	Yoğunluk P (gr/cm <sup>3</sup> )	Elastik Modul E (GPa)	Çekme Muk. $\sigma_c$ (GPa)	Maks. Şek.Değ. (%)
G E L E N E K S E L ÇELİK (3140)	7.90	200.0	1.85	11.00
ALÜM. ASG (6061)T6	2.70	70.0	0.35	11.00
ALÜMİNYUM AU4G 1(2024)74	2.80	73.0	0.29	11.00
ALÜMİNYUM A25G4(7075)T6	2.80	76.0	0.45	11.00
TİTANYUM T6V	4.40	119.0	1.14	14.00
BOR/EPOKSİ	2.10	270.0 *	2.00 *	6.50 *
BOR/ALÜMİNYUM	2.70	225.0 **	1.25	10.00 *
GRAFİT/EPOKSİ	1.70	208.0 * 10.3 **	1.34 * 0.03 **	0.78 * 0.29 **
KARBON/EPOKSİ	1.50	142.0 * 10.3 **	1.60 * 0.07 *	1.10 * 0.57 *
KEVLAR/EPOKSİ	1.35	80.0 * 5.5 *	1.38 * 0.03**	1.70 * 0.50 *
CAM/EPOKSİ	2.20	53.0 * 12.4 **	1.45 * 0.04 *	2.70 * 0.30 *
KARBON/ POLYESTER	1.68	127.5 * 7.6 **	1.52 * 0.04 *	1.20 * 0.53 *
KEVLAR/ POLYESTER	1.40	76.0 * 5.5 **	1.20 * 0.02 **	1.60 * 0.40 **
CAM/ POLYESTER	1.90	39.0 * 9.6 **	1.13 * 0.02 *	2.80 * 0.21 *

\* Elyaf lar yönünde \*\* Elyaf lara dik yönde

Polimer malzemelerin özellikleri çok farklıdır. Çünkü bunların mekanik davranışları visko-elastiktir. Bunun sonucu olarak da rijitlik ve dayanım özellikleri, frekans ve yükleme miktarı zamana bağlıdır (Sönmez, 2000). Bununla beraber, polimerlerin davranışları anizotropiktir. Bu anizotropiklik malzemenin üretimi sırasında, polimer molekülleri yönlendiği zaman ortaya çıkmaktadır. Kompozit malzemede elyaf düzenlenmesi rastgele değilse, elyaf lar düzenli yönlendirilmişse, malzeme anizotropik özellikler verecektir. Klasik malzemelerden farklı olarak, kompozit malzeme üzerine gelecek kuvvetin doğrultusu, şiddeti ve tesirleri çok büyük önem arzeder. Çünkü kompozit malzemede fiberlerin takviye açısına göre malzeme üzerindeki gerilme dağılımı değişmektedir.

Karbon fiberleri gibi iletim özelliği iyi olan fiberlerin kullanıldığı kompozitlerde ise, fiber malzemesinin özelliklerine yakınlık gösterir (Sönmez,

2000). Herhangi bir kompozit yapıda bile, kullanılan malzemelerin ısıl genleşme özelliklerinin farklı olması sebebiyle, ısı yükü altında farklı uzamalar sonucu büyük gerilmeler ortaya çıkabilir. Bu gerilmeler, dışarıdan malzemeye herhangi bir yük uygulansa bile malzemedeki hasara yol açacak kadar büyük olabilmektedir. Tabakalı üretimde ise farklı tabakalar arasında aynı uzamaya rağmen takviye doğrultusundaki farklılıklar sebebiyle çarpılma şeklinde hasarlar oluşabilmektedir. İzotropik malzemelerde oluşan bu gerilmeler çeşitli ısıl işlemler ile ortadan kaldırılabılırken kompozit malzemelerde bu durum mümkün olmamaktadır. Bu yüzden ikincil bir yük olarak ısı yükünün de bulunduğu durumlarda malzeme tayini önem kazanır. Tabakalı üretim durumunda tabakalar, uzamalar birbirini ortadan kaldıracak şekilde yerleştirilmelidir. Birleşme yerinin dizaynında, bu gerilmelerin de dikkate alınması gerekir.

Fiber-matris ara yüzey bağ kuvvetine bağlı olarak oluşan yorulma, yük doğrultusu ile fiber doğrultusunun farklı olduğu durumlarda oluşan yorulma şeklidir. Fiber boyunca oluşan çatlakın ilerlemesi ile hasar meydana gelir. Kumaş şeklindeki takviyelerde genellikle bu şekilde yorulma oluşur. Fiber ve yük doğrultusu aynı olursa oldukça yüksek yorulma direnci elde edilir. Bu durumda, fiber hacim oranı arttıkça yorulma direncide artmaktadır. Tabakalı yapıdaki yorulma ise, mukavemetlerine göre daha yüksek gerilme uygulanan tabakalardan başlayarak yayılır. Tabakalı yapının kumaş fiberlere göre yorulma dirençleri daha büyüktür.

Sünek malzemelerde çarpışma sonucu plastik deformasyon ve gözle görülebilen hasarlar oluşur. Kompozitlerin çarpmaya karşı davranışı çarpmada absorbe ettikleri enerji ile belirlenir. Bu da ara yüzey bağ gerilmelerinin değerine bağlıdır. Eğer bağ dayanımı düşükse malzeme zayıf mukavemet özellikleri göstermekle beraber enerji absorpsiyonu iyi olacağından çarpmaya karşı iyi bir dayanım gösterecektir. Çok yüksek bağ dayanımına sahip kompozitler gevrekleşme eğilimindedir. Pratikte fiberlere yapılan yüzey işlemleri ile ara yüzey bağ dayanımı kontrol edilebilmektedir. Tokluk, malzemenin kırılma dayanımının bir ölçüsüdür. Yorulma ve çarpma yüklerine karşı kompozit malzemelerin davranışlarının belirlenmesinde önemli bir karşılaştırma parametresidir (Sönmez, 2000).

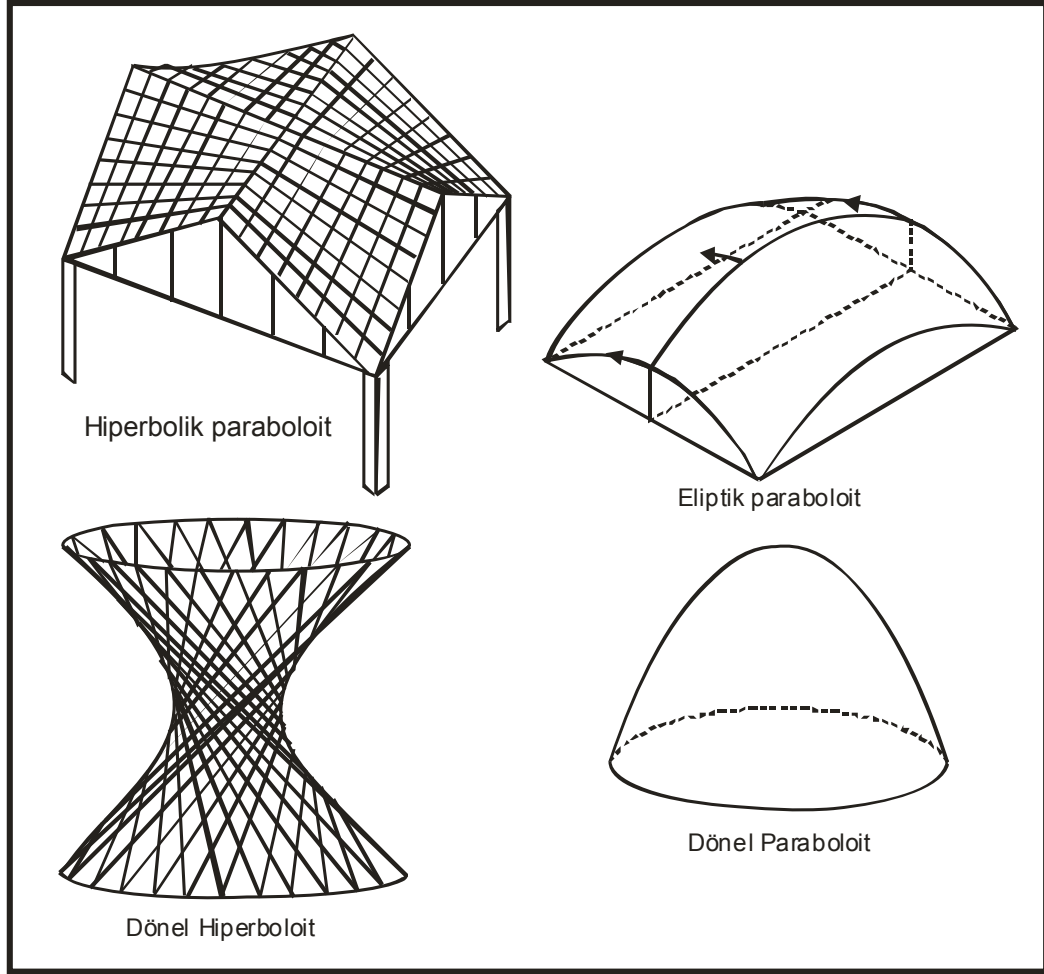
Dizaynda göz önünde bulundurulması gereken diğer önemli bir faktörde kompozit elemanlarının başka bir parça ile birleştirilmesi durumudur. Gerek “kompozit-kompozit”, gerekse “kompozit-diğer malzemeler” arasındaki birleşmelerde birleştirme şekilleri, yerleri ve usulünün çok dikkatli olarak tayin edilmesi gerekmektedir. Kompozit malzemelerden yapılmış makine elemanlarının metal malzemeler için geçerli olan sökülebilir ve sökülemez birleştirme sınıflandırılması içine alınması çoğu zaman mümkün olmaz. Bu yüzden kompozitten yapılacak eleman komple eleman olarak, birleştirme yerlerindeki delik, pim, vida v.s.de mümkünse komple imalat için düşünülmelidir. Çok parçadan imal edilen elemanların, kompozit malzemenin hafifliği sebebiyle yekpare olarak imal edilmesi ise bir avantaj olmaktadır.

### 3.2. Yöntem

Bu yüksek lisans tez araştırmasında, aynı zamanda bu yeni yapı sisteminin yapı mühendisliği açısından muhtemel tasarım metodunun nasıl olacağına ilişkin mevcut teorik kabuk yapıları yöntemleri araştırılmıştır. Bu yaklaşımlarla MKY sisteminin yapısal tasarımının alt yapısının nasıl oluşturulabileceğini açıklamaya çalışarak, temel tasarım kriterlerinin nasıl belirlenebileceği ve muhtemel teorik yapısal tasarımının detayları konularında araştırmalar yapılmıştır. Bu özel kabuk yapı sistemi için en uygun kabuk teorisinin araştırılmasına çalışılmıştır. Bu konu ile ilgili temel bilgiler özet olarak aşağıda anlatılmıştır.

#### 3.2.1. Kabuk yüzeylerin sınıflandırılması

Kabuk yüzeylerini sınıflamadan önce bazı ek tanımlamalar yapılmaya ihtiyaç vardır. Şöyle ki, *üretilen yüzey* düz bir hattın hareketi tarafından biçimlenen bir yüzey olarak tanımlanabilir. Eğer her noktada tek bir düzlemsel hat kullanılıyorsa, o yüzeye tek biçimli yüzey denir. Eğer her noktada iki düz hat kullanılmışsa bu yüzeye çift biçimli yüzey denir. Konik kabuklar, konoidler ve silindirler tek biçimli yüzeylere örnektir. Hiperbolik paraboloid ve hiperboloid eğriler çift biçimli yüzeylere örnektir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Bazı kabuk yüzeyleri

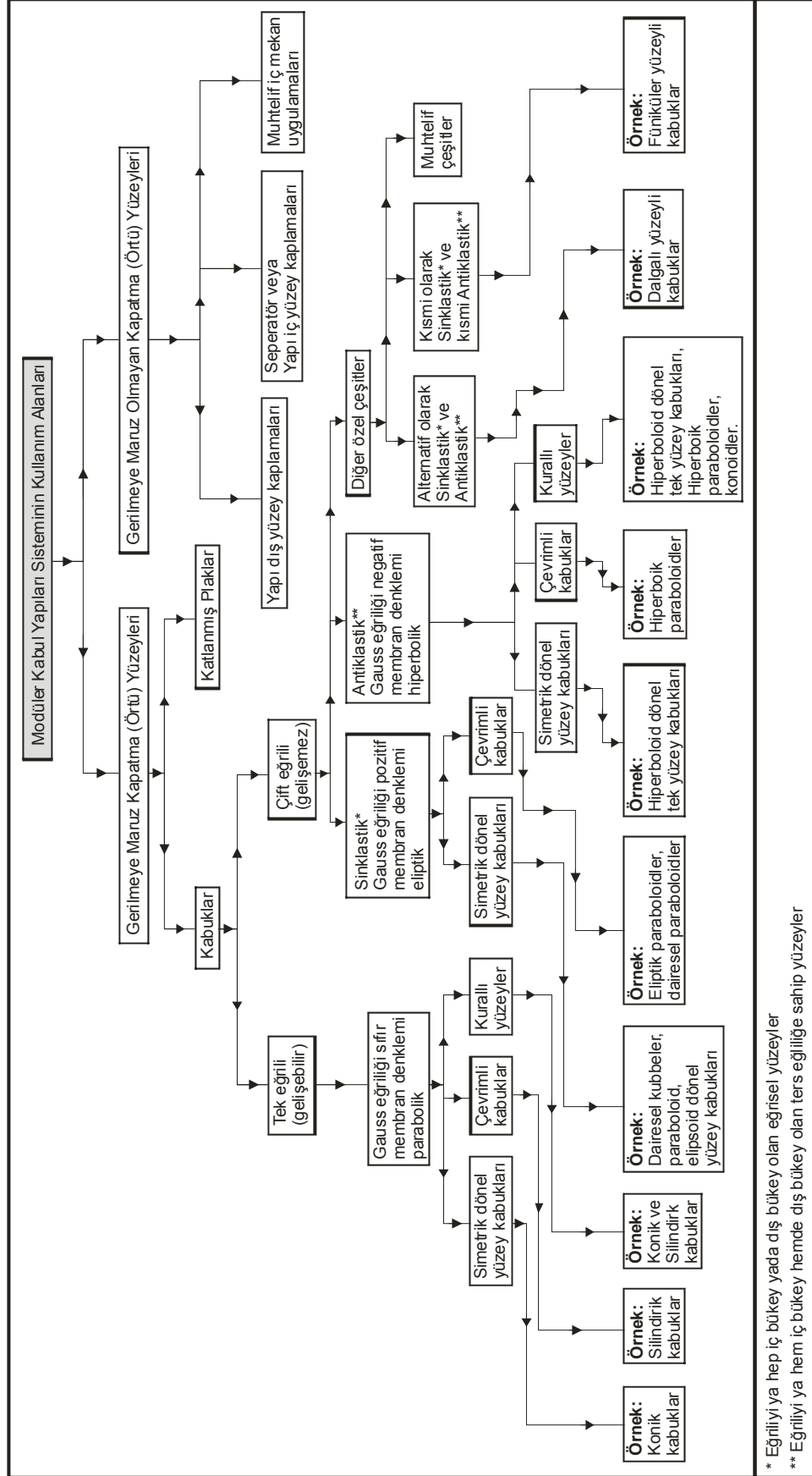
Biçimlenmiş yüzeyler düzlem kalıplar tarafından şekillendiğinden pratikte avantajları vardır. Değişen bir yüzey (surface of translation) düzlem eğriye paralel diğer bir eğri üzerindeki hareket tarafından üretilebilir. Düzlemler, birbirlerine sağ açılı iki eğriden oluşur. Eğrilerden biri silindirdeki gibi, bir düz hat olabilir. Eliptik paraboloid bir konveks parabol tarafından üretilir ve bu konveks parabolün diğer bir konveks parabol üzerindeki hareketiyle oluşur veya bir konkav parabolün diğer bir konkav parabol üzerinde hareketiyle oluşur (Şekil 3.2). Bunun özel durumu, her iki parabolünde aynı olmasıyla oluşan parabolik yüzey eğrileridir. Eğer bir konveks parabol bir konkav parabol üzerinde hareket ediyorsa veya tam tersi olursa bir hiperbolik paraboloid oluşur.

Kabuk yüzeyleri genel olarak tek eğrili veya çift eğrili olarak sınıflandırılır. Silindirler ve konik yüzeyler tek eğrili yüzeylere örnek olarak verilebilir. Tek eğrili

yüzeyler geliştirilebilir (developable)'dır. Bu durumda bir silindir, uzatma, kısaltma ve yırtılma olmadan düzlem dikdörtgene dönüştürülebilir. Benzer şekilde bir koni bir daire parçasına dönüştürülebilir. Çift eğrili yüzeyler geliştirilebilir değildir (nondevelopable). Bu durumda yük altında düzlemsel hale gelme eğilimleri yoktur. Bu durum, bu tür yüzeylerin üstün performansını açıklar.

Kabuk yüzeylerin ileri sınıflandırması Gauss eğriliğine göre yapılabilir. Alt sınıflandırma kabuğun değişebilen, biçimlenmiş veya eğrisel döndürme şekline bağlı olarak yapılabilir. Bir kabuğun hem değişken hem de biçimlenmiş yüzey şekli olabilir. Silindir ve hiperbolik paraboloid buna örnek verilebilir. Aynı şekilde, yüzey hem döndürülmüş hem de biçimlenmiş olabilir. Hiperboloid döndürülmüş yüzey buna örnek verilebilir. Kabuk yüzeyleri çeşitleri ile MKY sisteminin kullanım alanları Çizelge 3.6.'da sınıflandırılmıştır.

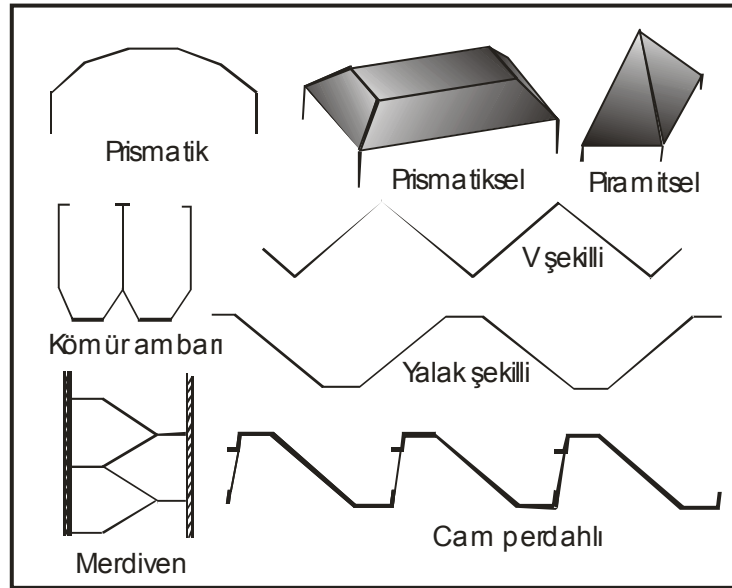
Çizelge 3.6. Kabuk yüzeylerinin ve MKY sisteminin sınıflandırılması



### 3.2.2. MKY sisteminin çözümüne katlanmış plak teorisiyle yaklaşım

MKY sisteminin lineer yüzeyle modüllerinin belli bir açıda birleştirilmesiyle oluşan yapı, kabuk yapıları teorisindeki katlanmış plak yapılarına benzer. Bu benzerliklerinden dolayı, MKY sisteminin teorik hesap yönteminin de katlanmış plak teorisiyle benzerlik göstereceği düşüncesiyle, bu hesap zinciri için katlanmış plak teorisi uyarlanmıştır. Örnek çözümlerden önce, katlanmış plak teorisi ile ilgili temel prensipler aşağıda verilmiştir.

Katlanmış plakların yapısal davranışı kabuklara çok benzer. Sürekli eğrisel silindirik kabuklarla kıyasla, daha fazla malzeme sarf edilir. Şekil 3.3.'de görüldüğü gibi, biçimlerinin vereceği izlenimler çoğu zaman bu ek masrafa değer, prizmatik, piramitsel veya düzlemsel eğri şeklinde değişik uygulamaları vardır.



Şekil 3.3. Bazı katlanmış plak çeşitleri

Ehlers (1930) ilk olarak bu konudaki yapısal analizi geliştirmiştir. Bu ilk basitleştirilmiş yöntemde, plakların bağlantıları boyunca birbiriyle mafsallı olduğu farz edililerek, aralarındaki uzunluğuna kayma önlenmiştir. Mesnetlerdeki enine momentler göz ardı edilmiştir. Gruber (1932) daha tam bir teori geliştirerek, mesnetlerin rijitliğini ve birbirleriyle kıyaslamalı yer değiştirmeleri dikkate almıştır. Daha sonra pek çok araştırmacı bu konuya elastisite teorisi temelli pek çok katkı

sağlayarak, diferansiyel ve alcebrik denklemler oluşturmuşlardır. 1947 de Amerika'da katlanmış plakların analizlerini basitleştirmek için, tasarımda kullanılabilen nümerik prosedürler geliştirilmiştir. Gerilme dağıtma prosedürü, ilk olarak Winter ve Pei (1947) tarafından tanıtılmıştır. Ancak bu metot, mesnetlerin kıyaslamalı yer değiştirmesini göz ardı etmektedir.

Gaafar (1954) mesnetlerdeki yer değiştirmeleri dikkate alarak, katlanmış plakların analizi için uygulanabilir bir metot yayınlamıştır. Bu metot daha sonra Simpson (1958) tarafından geliştirilmiştir. Amerika'da bazı tasarım ofislerinde kullanılan diğer bir metot da Whitney (1959) adaptasyonu olup, daha önceden Girkmann (1948) tarafından önerilmiştir. Yitzhaki (1959) ve Vlasov (1939) da katlanmış kabuklar hakkında değişik prensipler öne sürmüşlerdir. Bu metotlar pek çok problemin çözümünde kullanılabilir. Bu metotların hepsi ASCE Task Committee on Folded Plağın Construction (1963) raporunda detaylı olarak tartışılmıştır. Bu rapor, Gaafar metodunun değişmiş bir versiyonunu, elle hesaplama metodu olarak, tasarımda kullanmayı daha uygun bulmaktadır. Bu tez'de ana plak teorisi irdelendiğinden Whitney ve Simpson metodu anlatılacak ve MKY üzerine uyarlanacaktır.

Çatı olarak genelde kullanılan katlanmış plakların, üniform kalınlığa sahip olduğu, mesnetlerinin rijit olduğu, malzemenin elastik homojen ve izotropik olduğu ve bütün plakların düzlem kısımlarının deformasyondan sonra da düzlem kaldığı kabul edilir. Ancak dikkat edileceği üzere tüm yapının düzlem kesiti deformasyondan sonra düzlem kalması gerekmez.

### 3.2.2.1. Plak ve levha davranışı

Katlanmış plakların yapısal davranışı "levha" ve "plak" davranışı olarak karakterize edilir. Sürekli bir levha olarak düşünüldüğünde her bir plağa normal yönde uygulanan yükler katlanma noktaları arasında enine eğilmeye sebep olur. Buna *levha davranışı* denir. Kısım 3.2.2'deki kabullerden dolayı, plak bir yönlü levha gibi davranır ve genelde boyuna yöndeki levha davranışı göz ardı edilir.



Traverslerde, uçlarından mesnetlenmiş plaklar, düzlemlerine etkiyen yüklerin etkisi altında eğilirler. Bu *plak davranışı* olarak tanımlanır. Kısım 3.2.2'deki kabullerden dolayı plak davranışından kaynaklanan eğilme gerilmeleri, her bir plak boyunca lineer bir dağılım gösterdiği düşünülebilir.

### 3.2.2.2. Katlanma noktaları yüklerinin çözümü

İlk aşamada plakları mesnetlerinde mafsallı olarak düşünelim. Mafsallardaki momentlerin etkisi daha sonra dikkate alınacaktır. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi, birbirine yakın plakların birleştiği katlanma noktalarına uygulanan  $P_n$  gibi yükler, katlanma noktası yükleri olarak bilinir. Katlanmış plağın birim uzunluğu göz önüne alınarak, katlanma noktası yükleri denklem 3.1, 3.2 ve 3.3'de verildiği gibi yazılabilir.

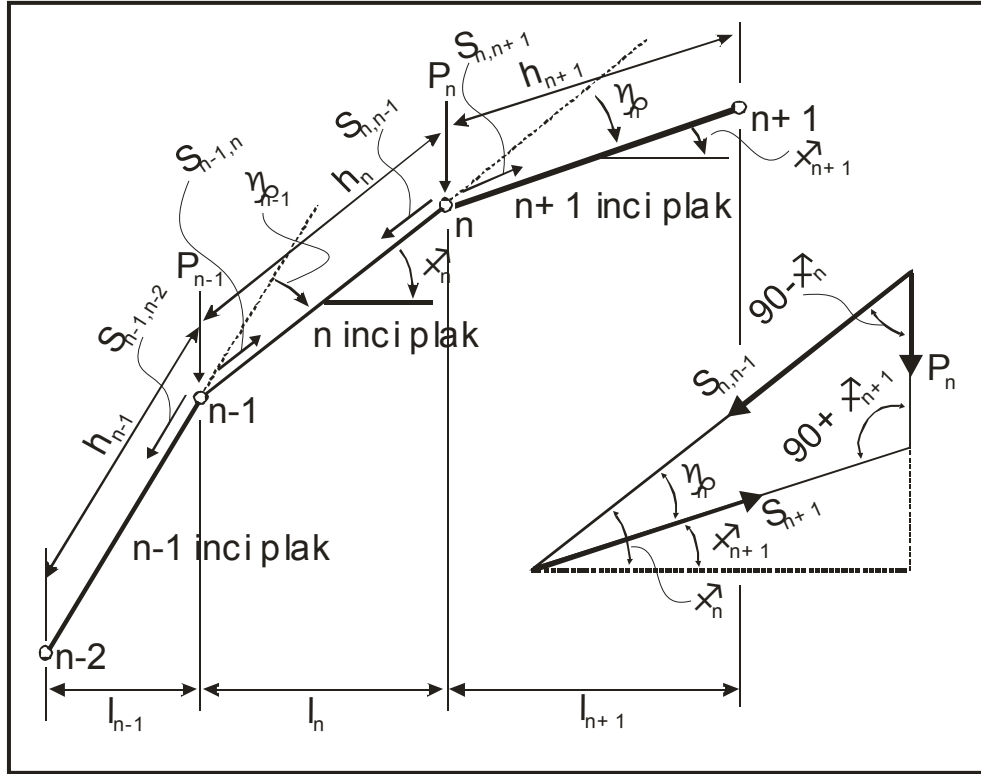
$$P_1 = p_1 h_1 + \frac{1}{2} p_2 h_2, \quad (3.1)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} (p_2 h_2 + p_3 h_3) \quad (3.2)$$

ve

$$P_n = \frac{1}{2} (p_n h_n + p_{n+1} h_{n+1}) \quad (3.3)$$

$P_n$  yükü, plak yükleri olan  $S_{n,n-1}$  ve  $S_{n,n+1}$ 'e dönüştürülür.  $S_{n,n-1}$  ve  $S_{n,n+1}$  sırasıyla  $n$ 'inci ve  $n+1$ 'inci plaklara, kuvvetler üçgeni yoluyla etkililir.  $S_{n,n-1}$  şeklinde plak yüklerinin tanımlanmasında kullanılan ilk indis  $n$ , yükün etkidiği mafsalı, ikinci indis  $n-1$ , plak yükünün yönlendiği mafsalı gösterir. Yani,  $S_{n,n-1}$  plak yükü  $n$ 'den  $n-1$ 'e yönlenmiştir.  $n$  katlanma noktasında eğer pozitifse,  $n$ 'den  $n-1$ 'e yönlenmiştir. Eğer bu değer negatif olursa,  $S_{n,n-1}$  kuvvet oku,  $n$ 'inci katlanma noktasında  $n$ 'e yönlenmiştir.



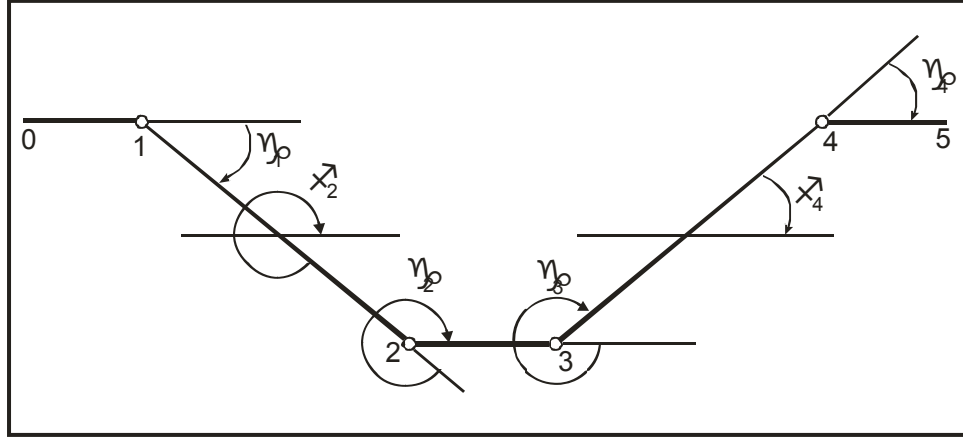
Şekil 3.4. Katlanmış plak kuvvet konfigürasyonu

Açıkça görülebilir ki,  $n$ 'inci plak tarafından taşınan net plak yükü  $(S_{n,n-1} - S_{n-1,n})$  dir. Şekil 3.4'deki kuvvetlerin üçgeninden, denklem 3.4 ve 3.5 yazılabilir.

$$S_{n,n-1} = \frac{P_n \cos \phi_{n+1}}{\sin \gamma_n} \quad (3.4)$$

$$S_{n,n+1} = \frac{P_n \cos \phi_n}{\sin \gamma_n} \quad (3.5)$$

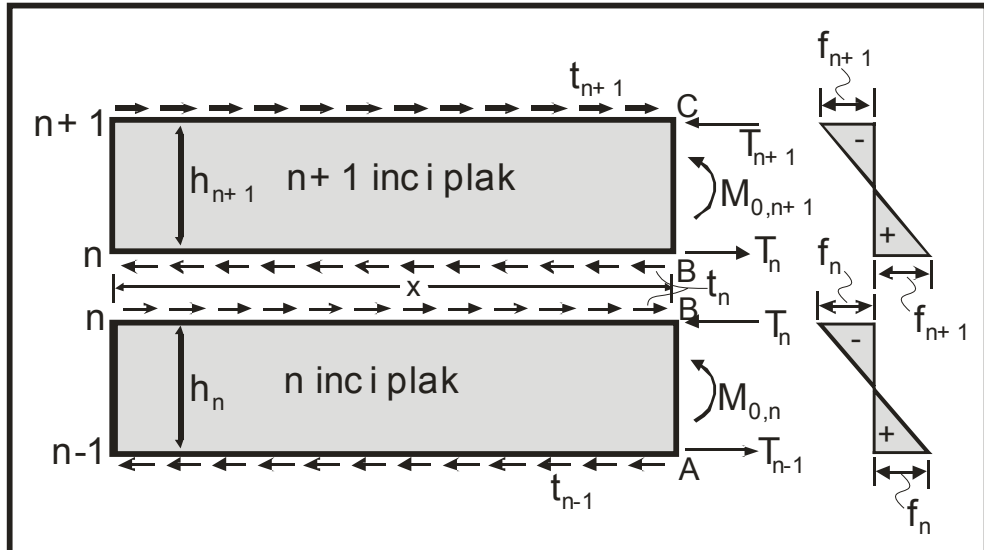
Açıların ölçülmesinde aşağıdaki kurallar dikkate alınmalıdır. Her bir plak için ölçülen  $\phi$  açısı, daha yüksek numaralı mesnete doğru yönlenmiş olup, saat ibresi yönünde sağa doğru yatay referans hattına ve  $\gamma$  açısı da, Şekil 3.5' de gösterildiği gibi, bir önceki plaktan bir sonraki plağın yönüne doğru, saat ibresi istikametinde ölçülür.



Şekil 3.5. Yön seçimleri

### 3.2.2.3. Köşe kaymaları

Şekil 3.6'daki plak davranışı göz önünde bulundurularak, birbirine yakın  $n$  ve  $n+1$  plakları  $M_{0,n}$  ve  $M_{0,n+1}$  momentleri uygular. Eğer plaklar bağımsız ise  $n$ 'inci kenarda,  $f_n$  ve  $f_{n+1}$  kenar gerilmeleri oluşur. Fakat iki plak birbiriyle bağlantılıdır ve bağımsız olarak eğilmezler. Dolayısıyla, kayma gerilmeleri ortak kenar olan  $n$  boyunca oluşur. Bu kayma gerilmelerinin büyüklüğü, ortak kenarları boyunca  $n$  ve  $n+1$  plaklarında oluşan kenar gerilmeleri ile aynıdır.

Şekil 3.6. Birbirine yakın iki  $n$  ve  $n+1$  plaklarının davranışı

Şekil 3.6.'da  $T_{n-1}$ ,  $T_n$  ve  $T_{n+1}$  kenar kayma kuvvetleri, denklem 3.6'da verildiği gibi, bunlara karşılık gelen kenar gerilmeleri ile ilişkilendirilmiştir.

$$T_{n-1} = -\int_0^x t_{n-1} dx \quad (3.6a)$$

$$T_n = -\int_0^x t_n dx \quad (3.6b)$$

$$T_{n+1} = -\int_0^x t_{n+1} dx \quad (3.6c)$$

Şekil 3.6.'da görülebileceği gibi,  $n+1$ 'inci plağın  $B$  noktasında kenar gerilme, denklem 3.7'deki gibi verilebilir.

$$\frac{M_{0,n+1}}{Z_{n+1}} + \frac{T_n h_{n+1}}{2Z_{n+1}} + \frac{T_n}{A_{n+1}} - \frac{T_{n+1}}{A_{n+1}} + \frac{T_{n+1} h_{n+1}}{2Z_{n+1}} \quad (3.7)$$

Burada  $Z_{n+1}$ ,  $A_{n+1}$  ve  $h_{n+1}$  sırasıyla kesit modülü, alan ve  $n+1$ 'inci plağın genişliği gösterir. Benzer şekilde  $n$ 'inci plağın  $B$  noktasında kenar gerilmesi, denklem 3.7'deki gibi yazılabilir.

$$-\frac{M_{0,n}}{Z_n} - \frac{T_{n-1} h_n}{2Z_n} + \frac{T_{n-1}}{A_n} - \frac{T_n}{A_n} - \frac{T_n h_n}{2Z_n} \quad (3.8)$$

Yine burada,  $Z_n$ ,  $A_n$  ve  $h_n$  sırasıyla kesit modülü, alan ve  $n$ 'inci plağın genişliğini gösterir.  $Z_{n+1}$  ve  $Z_n$  kesit modülleri, denklem 3.9'daki şekilde yazılabilir.

$$Z_{n+1} = d_{n+1} h_{n+1}^2 / 6 \text{ ve } Z_n = d_n h_n^2 / 6 \quad (3.9)$$

Burada  $d_{n+1}$  ve  $d_n$  plakların kalınlığını gösterir.  $AB$  ve  $BC$  plakları için  $B$  noktasındaki kenar gerilmenin, plakların rijit bağlantısından dolayı aynı olması

gerektiği gözlenebilir. Yukarıda çıkartılan iki ifadenin birbirine eşitlenmesi yoluyla denklem 3.10'daki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{T_{n-1}}{A_n} + 2\left(\frac{T_n}{A_n} + \frac{T_n}{A_{n+1}}\right) + \frac{T_{n+1}}{A_{n+1}} = -\frac{1}{2}\left(\frac{M_{0,n}}{Z_n} + \frac{M_{0,n+1}}{Z_{n+1}}\right) \quad (3.10)$$

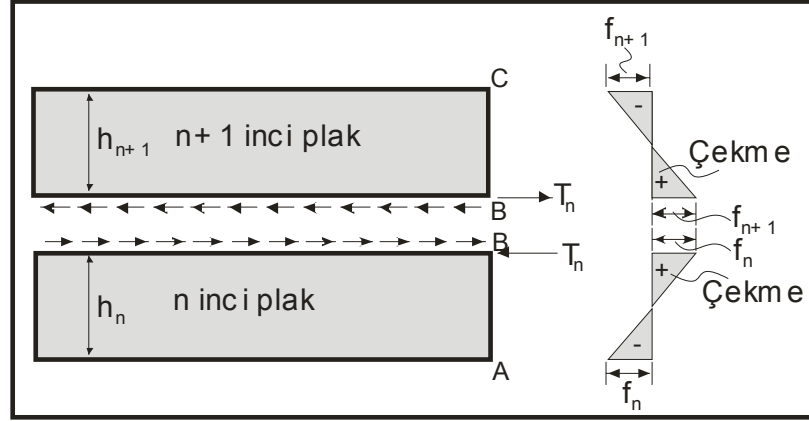
Bu ilişki *üç kenar kayması teoremi* olarak isimlendirilir ve *üç moment teoremi* ile benzerdir. Bu benzerlik sürekli kirişlere uygulanan moment dağılım prosedürüyle benzerlik gösteren gerilme dağılım prosedürünün çıkartılmasında kullanılır.

### 3.2.2.4. Gerilme dağılımı

Hem  $n$  plağı, hem de  $n+1$  plağının, ortak  $n$  kenarı boyunca, kenar kaymalarının uygulanmasıyla, gerilmenin sürekliliği bir önceki başlık altında sağlandı.  $n+1$  ve  $n$  plakları bağımsız olduğu farz edildiğinde, kenar gerilmeleri olan  $f_{n+1}$  ve  $f_n$ ,  $AB$  ve  $BC$  plaklarının  $B$  noktasında oluşur. Kenar kaymalarının uygulaması,  $f_n$  ve  $f_{n+1}$  değerlerinin doğrulanma etkisini sağlar. Böylelikle eşit olurlar. Bu gerilmeleri düzeltmek için, 3.10 denklemi kullanılarak kenar kaymaları denkleminin çözülmesi gerekmez. Doğrulama aşağıdaki gerilme dağılımı yoluyla direkt olarak etkili olabilir.

Şimdi,  $T_n$  kenar kaymasının etkisini göz önünde bulunduralım. Şekil 3.7. referans alınarak denklem 3.11 yazılabilir.

$$\frac{T_n}{A_{n+1}} + \frac{T_n h_{n+1}}{2Z_{n+1}} + f_{n+1} = -\frac{T_n}{A_n} - \frac{T_n h_n}{2Z_n} + f_n \quad (3.11)$$

Şekil 3.7.  $T_n$  kenar kaymasının etkisi

Bu ilişki  $B$  noktasında gerilme ifadesinin sürekliliğinden başka bir şey değildir. Gerekli sadeleştirme yapıldıktan sonra, bu denklem 3.12 denklemine dönüştürülebilir.

$$4T_n \left( \frac{1}{A_n} + \frac{1}{A_{n+1}} \right) = (f_n - f_{n+1}) \quad (3.12)$$

3.11 denklemi referans alınarak ve  $T_n$  kenar kaymasının etkisi dikkate alınarak,  $f_{n+1}$  gerilmesi  $4T_n/A_{n+1}$  eklemesiyle doğrulanır. Fakat 3.12 denklemden, 3.13 denklemi yazılabilir.

$$\frac{4T_n}{A_{n+1}} = (f_n - f_{n+1}) \left( \frac{A_n}{A_n + A_{n+1}} \right) \quad (3.13)$$

Benzer şekilde  $f_n$  gerilmesi denklem 3.14'deki gibi eklemeye doğrulanır.

$$-(f_n - f_{n+1}) \left( \frac{A_{n+1}}{A_n + A_{n+1}} \right) \quad (3.14)$$

Şimdi, dağıtma teoremine ulaşılabacaktır. Sırasıyla  $B$  noktasındaki  $n+1$  ve  $n$  plaklarında dağıtılacak gerilmeler, denklem 3.15'de verildiği gibidir.

$$(f_n - f_{n+1}) \left( \frac{A_n}{A_n + A_{n+1}} \right) \text{ ve } -(f_n - f_{n+1}) \left( \frac{A_{n+1}}{A_n + A_{n+1}} \right) \quad (3.15)$$

$B'$ 'deki  $T_n$  kenar kaymasının uygulaması,  $A$  ve  $C$  noktalarında gerilmelere de sebep olur. Bunlar, denklem 3.16 v 3.17'de verilmiştir.

$$\frac{T_n}{A_{n+1}} - \frac{T_n h_{n+1}}{2Z_{n+1}} = -\frac{2T_n}{A_{n+1}} = -\frac{1}{2}(f_n - f_{n+1}) \frac{A_n}{A_n + A_{n+1}} \quad (3.16)$$

ve

$$-\frac{T_n}{A_n} + \frac{T_n h_n}{2Z_n} = \frac{2T_n}{A_n} = +\frac{1}{2}(f_n - f_{n+1}) \frac{A_{n+1}}{A_n + A_{n+1}} \quad (3.17)$$

Bu gösteriyor ki,  $B'$ 'deki dağılan gerilmeler  $-1/2$  gibi bir taşıma faktörüyle oluşur.  $A$  ve  $C$  kenarlarından doğan  $T_{n+1}$  ve  $T_{n-1}$  kenar kaymalarının etkisi, benzer şekilde yapılabilir.  $A$  ve  $C$ 'den,  $B'$ 'ye ulaşan taşıma moment dağılım prosedüründe olduğu gibi, aşamalı dağıtmayı gerektirir. Burada anlatılan dağılım prosesi uygulamasında,  $f_n$  ve  $f_{n+1}$ 'e uygulanacak işaretler çekme durumunda pozitiftir.

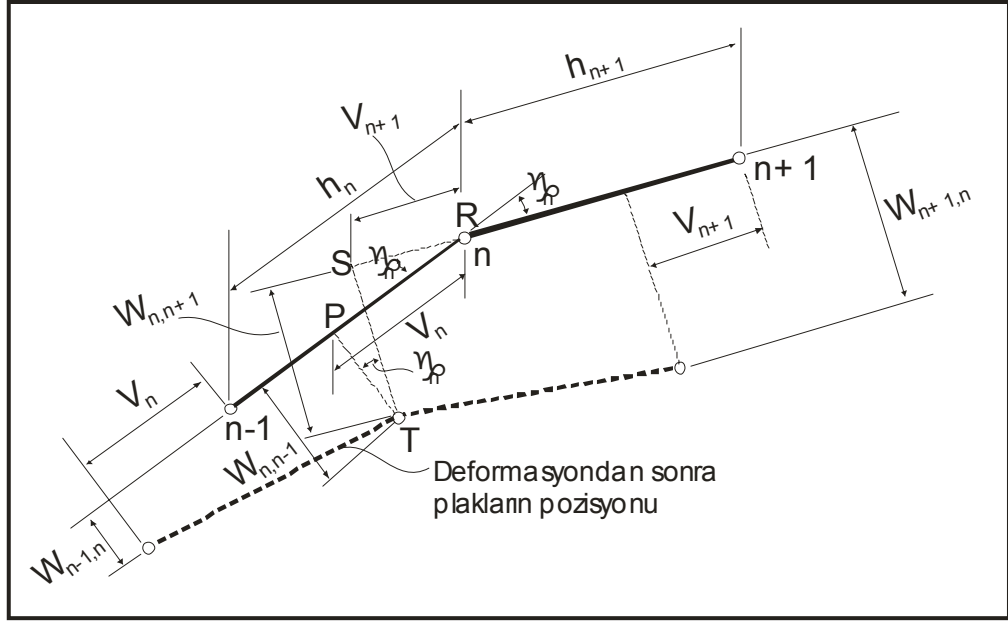
### 3.2.2.5. Plak yer değiştirmeleri ve dönmeleri

Şekil 3.8.'de görülebildiği gibi,  $v_n$  ve  $v_{n+1}$   $n$ 'inci ve  $n+1$ 'inci plakların düzlemlerinde, düzlem yer değiştirmelerini,  $w_{n,n-1}$ ,  $w_{n,n+1}$ ,  $w_{n-1,n}$  ve  $w_{n+1,n}$  mesnetlerde oluşan, düzlemleriyle sağ açıda, düzlemlerin sapmalarını gösterir. Yani,  $w_{n,n+1}$ ,  $n$  ve  $n+1$  mafsallarını birleştiren plağın,  $n$  mafsalındaki sapmasıdır. İlk indis sapmanın olduğu mafsalı gösterir. Şekil 3.7. dikkate alınırsa, denklem 3.18 yazılabilir.

$$v_n = (PQ + QR) = w_{n,n-1} \tan \gamma_n + \frac{v_{n+1}}{\cos \gamma_n} \quad (3.18)$$

$w_{n,n+1}$  'e göre denklem 3.18 düzenlenirse, denklem 3.19 yazılabilir.

$$w_{n,n-1} = v_n \cot \gamma_n - \frac{v_{n+1}}{\sin \gamma_n} \quad (3.19)$$



Şekil 3.8. Deformasyondan sonra plakların konfigürasyonu

Aynı zamanda, denklem 3.20 yazılabilir.

$$w_{n,n+1} = ST = (SQ + QT) = v_{n+1} \tan \gamma_n + \left( v_n - \frac{v_{n+1}}{\cos \gamma_n} \right) \frac{1}{\sin \gamma_n} = \frac{v_n}{\sin \gamma_n} - v_{n+1} \cot \gamma_n \quad (3.20)$$

Benzer ifadeler  $w_{n-1,n}$  ve  $w_{n+1,n}$  için denklem 3.21'deki gibi yazılabilir. Yani,

$$w_{n-1,n} = \frac{v_{n-1}}{\sin \gamma_{n-1}} - v_n \cot \gamma_{n-1} \quad (3.21)$$

$$w_{n+1,n} = v_{n+1} \cot \gamma_{n+1} - \frac{v_{n+2}}{\sin \gamma_{n-1}}$$



Bu ifadeler,  $n$  ve  $n+1$ 'inci plakların rotasyonunun hesaplanmasını sağlayan ifadelerdir. Bu rotasyonlar,  $\mathcal{G}_n$  ve  $\mathcal{G}_{n+1}$  olarak isimlendirilirse, denklem 3.22 ve 3.23 yazılabilir.

$$\mathcal{G}_n = \frac{1}{h_n} (w_{n,n-1} - w_{n-1,n}) = \frac{1}{h_n} \left[ v_n (\cot \gamma_n + \cot \gamma_{n-1}) - \frac{v_{n+1}}{\sin \gamma_n} - \frac{v_{n-1}}{\sin \gamma_{n-1}} \right] \quad (3.22)$$

ve

$$\mathcal{G}_{n+1} = \frac{1}{h_{n+1}} \left[ v_{n+1} (\cot \gamma_{n+1} + \cot \gamma_n) - \frac{v_{n+2}}{\sin \gamma_{n+1}} - \frac{v_n}{\sin \gamma_n} \right] \quad (3.23)$$

$\mathcal{G}_n$  ve  $\mathcal{G}_{n+1}$  dönmelerinin sonucu olarak mafsaldaki açılma azalma =  $(\mathcal{G}_{n+1} - \mathcal{G}_n)$  olacaktır.

### 3.2.2.6. Mafsal momentlerinin etkileri

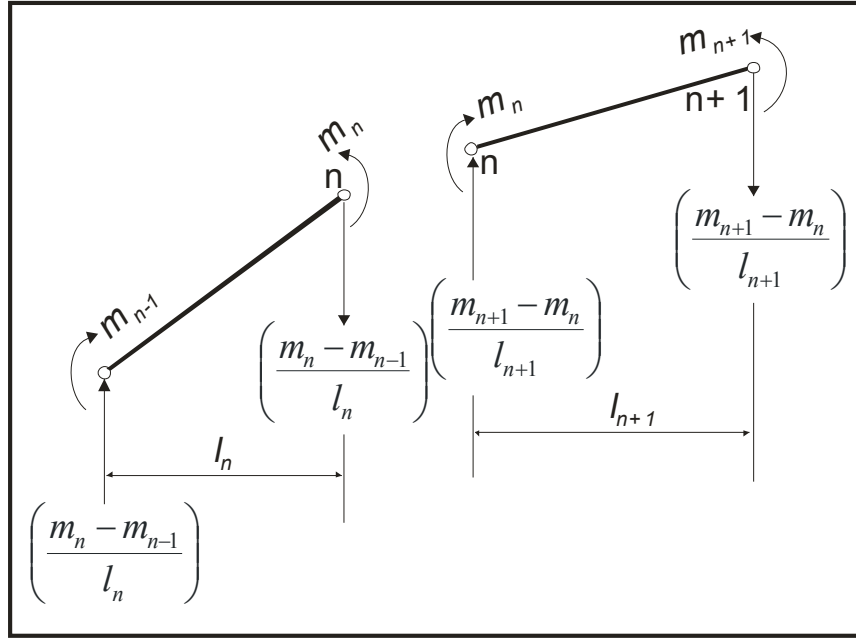
Plaklar rijit olarak birbiriyle bağlantılı olduğundan mesnetlerde momentler oluşur.

Şekil 3.9.'da gösterildiği gibi, altta çekme oluşturan momentleri göz önünde bulunduralım. Bu momentler mafsallarda yukarı doğru reaksiyonlar doğurur. Yani,  $n$ 'inci mafsalda momentler, denklem 3.24'de verildiği gibi, yukarı yönde reaksiyonlara sebep olurlar.

$$\frac{m_{n+1} - m_n}{l_{n+1}} - \frac{m_n - m_{n-1}}{l_n} \quad (3.24)$$

Fakat bilindiği üzere bu tür kuvvetler mafsallarda gerçekte mevcut değildir. Bu şartın gerçekleşmesi için, denklem 3.25'deki ilişkiyle verilen mafsallardaki  $\Delta P_n$  büyüklüğüne sahip aşağı doğru kuvvetlerin uygulanması gerekir.

$$\Delta P_n = \frac{m_{n+1} - m_n}{l_{n+1}} - \frac{m_n - m_{n-1}}{l_n} \quad (3.25)$$



Şekil 3.9. Göz önünde bulundurulmuş altta çekme oluşturan momentler

Böylelikle mafsal momentlerinin etkileri, mafsallara ek yükler uygulanarak dikkate alınabilir. Bu ek mafsal yükleri, plak yüklerine  $P_n$  katlanma noktası yüklerinde olduğu gibi, dönüştürülebilir. Böylelikle  $n$  mafsalına uygulanan  $\Delta P_n$  katlanma noktası yükü, denklem 3.26 ve 3.27’de verildiği gibi  $\Delta S_{n,n-1}$  ve  $\Delta S_{n,n+1}$  yüklerine dönüşür.

$$\Delta S_{n,n-1} = \Delta P_n \frac{\cos \phi_{n+1}}{\sin \gamma_n} \quad (3.26)$$

$$\Delta S_{n,n+1} = \Delta P_n \frac{\cos \phi_n}{\sin \gamma_n} \quad (3.27)$$

$n$ ’inci plakta net plak yükü denklem 3.28’deki gibi olur.

$$\Delta S_{n,n-1} - \Delta S_{n-1,n} \quad (3.28)$$

Plak rotasyonları kenar kaymaları, plak sapmaları ve plak momentlerinin hesaplarında, katlanma kenarı yükleri  $P_n$  ve ek katlanma kenarı yükleri  $\Delta P_n$ ’nin

sebeplendiği toplam plak yükleri kullanılmalıdır.  $n$  'inci plakta  $R_n$  toplam plak yükü denklem 3.29'daki gibi hesaplanır.

$$(S_{n,n-1} - S_{n-1,n}) + (\Delta S_{n,n-1} - \Delta S_{n-1,n}) \quad (3.29)$$

### 3.2.2.7. Fourier serisinin kullanımı

$p_n$  yükü, katlanma kenarı yükleri  $P_n$ , kenar kaymaları  $T_n$  ve plak yer değiştirmeleri  $v_n$  değerlerinin hepsinin, Fourier serisi ile tanıtılması uygun olacaktır. Bu prosedürün avantajı, katlanmış plakların orta noktaları için problem çözüldüğünde  $M_{0,n}$  ve  $T_n$  gibi değerlerin, diğer kısımlar için kolayca belirlenebilmesidir. Böylelikle, diğer tüm kısımlarda kenar gerilme dağılımı kolaca bulunabilir. Fourier serisinin ilk teriminin kullanılması yeterli hassasiyet sağlar. Eğer  $\bar{P}_n$ ,  $n$  katlanma kenarında gerçek üniform dağılan katlanma noktası yükü ise,  $P_n$  ile arasındaki ilişki,  $\bar{P}_n = P_n \sin(\pi x/l)$  veya  $P_n = (4/\pi)\bar{P}_n$  şeklindedir. Benzer ilişkiler, Sinüs dağılımını takip eden  $T_n$ ,  $M_{0,n}$ ,  $v_n$  ve  $\mathcal{G}_n$  ifadelerine uygulanabilir. Bu tür Fourier tanıtımı, eğer katlanmış plak basit mesnetlenmiş ise kullanılabilir. Fourier serisinin kullanımını mümkün kılabilmek için, plağın açıklığı boyunca yükün üniform dağılan yük olması gerekmez. Fakat bütün plaklar için, dağılım aynı olmalıdır. Bu tür durumlarda uygun Fourier serisi bulunabilir ve yeterli seri terimleri dikkate alınır.

### 3.2.2.8. Whitney metodu analizi

Whitney (1959) tarafından tanıtılan metot aslında ilk olarak, Girkmann (1948) tarafından önerilen metodun düzenlenmiş halidir. Bu iki metottaki tek fark, kenar plağa yapılan işleme alakalıdır. Girkmann (1948) bu plağı, üç kenarından desteklenmiş ve bir tarafı serbest kenarlı plak olarak ele almıştır. İki diyagramda plak basit mesnetlenmiştir (Bakınız Şekil 3.10.). Rijit olarak bir sonraki plağa bağlanmış üçüncü kenar sürekli olarak düşünülür. Bu uygulama oldukça gerçeğe yakın sonuç

verir. Withney kenar plağını ankastre kabul ederek, bu işlemi oldukça basitleştirmiştir. Aşağıda adımlar halinde, Withney'in metodunun uygulama prosedürü verilmektedir.

- 1)  $\bar{p}_n$  üniform yükleri, ilk Fourier terimi yerine yazılır ve buna karşılık gelen  $P_n$  katlanma kenarı yüklerine ulaşılır.
- 2) Katlanma kenar yükleri çözülür, 3.4 ve 3.5 bağıntıları kullanılarak her bir mafsal için plak yüklerine ulaşılır.
- 3) 3.25 bağıntısındaki ek katlanma kenarı yükleri, mafsal momentleri dikkate alınarak mafsallara uygulanır. Bulunan  $\Delta P_n$  katlanma noktası yükü, denklem 3.26 ve 3.27 kullanılarak plak yüklerine dönüştürülür. Bu ifadeler bilinmeyen  $m_2$ ,  $m_3$  vs mafsal momentleri içerir. Bunlar problemin bilinmeyenleridir.
- 4) Plaklardaki  $R_n$  net plak yükleri denklem 3.29 kullanılarak hesaplanır. Bu ifadeler aynı zamanda mesnetlerdeki bilinmeyen enine momentleri içerir.
- 5) Denklem 3.10 kullanılarak, kenar kayma denklemleri yazılır ve kenar kaymaları,  $m_2$ ,  $m_3$  vs bilinmeyenlerine göre çözülür.
- 6) Denklem 3.30 kullanılarak  $v_n$  plak yer değiştirmeleri hesaplanır.

$$v_n = \frac{1}{EI_n} \left( \frac{l}{\pi} \right)^4 \left[ R_n + \frac{T_n + T_{n-1}}{2} \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 h_n \right] \quad (3.30)$$

Burada,  $I_n = d_n h_n^3 / 12$  plağın atalet momentidir.  $v_n$ ' sapmasıyla tanıtilan bu ifadenin ikinci terimi, kenar kaymasından kaynaklanır ve aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Şekil 3.10. göz önünde bulundurularak  $T_n$  ve  $T_{n-1}$  kenar kayma çiftinin sebep olduğu, plağın merkez kısmındaki moment, denklem 3.31'e eşittir.

$$\frac{T_n h_n}{2} + \frac{T_{n-1} h_n}{2} \quad (3.31)$$

Şekil 3.10.  $T_n$  ve  $T_{n-1}$  kenar kayma çiftinin görünümü

$T_n$  ve  $T_{n-1}$ 'in aslında bir Sinüs dalgasının merkez büyüklüğü olduğu hatırlanarak, denklem 3.32 yazılabilir.

$$-EI_n \frac{d^2 v'_n}{dx^2} = \frac{T_n + T_{n-1}}{2} h_n \sin \frac{\pi x}{l} \quad (3.32)$$

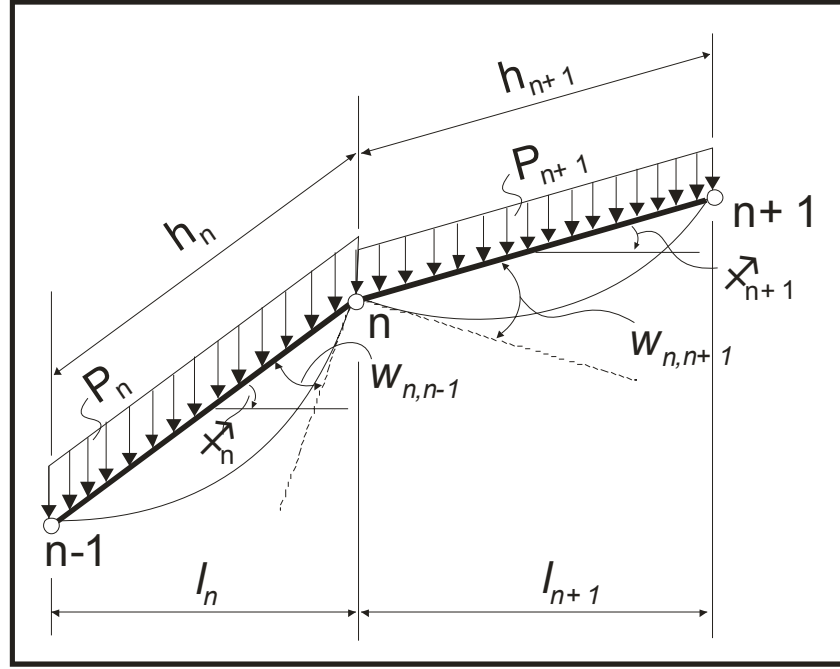
$x$ 'e göre iki defa integral alınarak, kenar kaymalarından kaynaklanan plak yerdeğiştirmesi  $v'_n$  bulunur. Böylelikle denklem 3.33 yazılabilir.

$$v'_n = \frac{1}{EI_n} \frac{T_n + T_{n-1}}{2} \left( \frac{l}{\pi} \right)^2 h_n \sin \frac{\pi x}{l} \quad (3.33)$$

Merkezde bu ifadenin değeri denklem 3.34'teki gibi olacaktır.

$$\frac{1}{EI_n} \frac{T_n + T_{n-1}}{2} \left( \frac{l}{\pi} \right)^2 h_n \quad (3.34)$$

- 7) Altıncı adımda hesaplanan  $v_n$  plak yer değiştirmesinin değeri ile, denklem 3.22 ve 3.23 kullanılarak, plak rotasyonları hesaplanır.
- 8) Levha davranışından kaynaklanan plak eğiminin sebep olduğu mafsallardaki açısal değişiklik belirlenir. Bu iki yolla hesaplanır:
  - a) İlk aşamada, Şekil 3.11.'de gösterildiği gibi, mafsallarda plaklar basit mesnetlenmiş kabul edilir.



Şekil 3.11. Mafsallarda plakların durumu

$n-1$  ve  $n$ 'inci mafsallarda  $n$ 'inci plağı basit mesnetlenmiş kabul ederek  $n$ 'inci mafsalda plak eğimi  $w_{n,n-1}$ , denklem 3.35'deki gibi *alan momentleri teoremi* kullanılarak yazılabilir.

$$w_{n,n-1} = \frac{(p_n \cos \phi_n) h_n^3}{24EJ_n} \quad (3.35)$$

Burada  $J_n = d_n^3/12$  levha davranışında plağın atalet momentidir.  $h_n \cos \phi = l_n$  olduğundan eğim denklem 3.36 gibi yazılabilir.

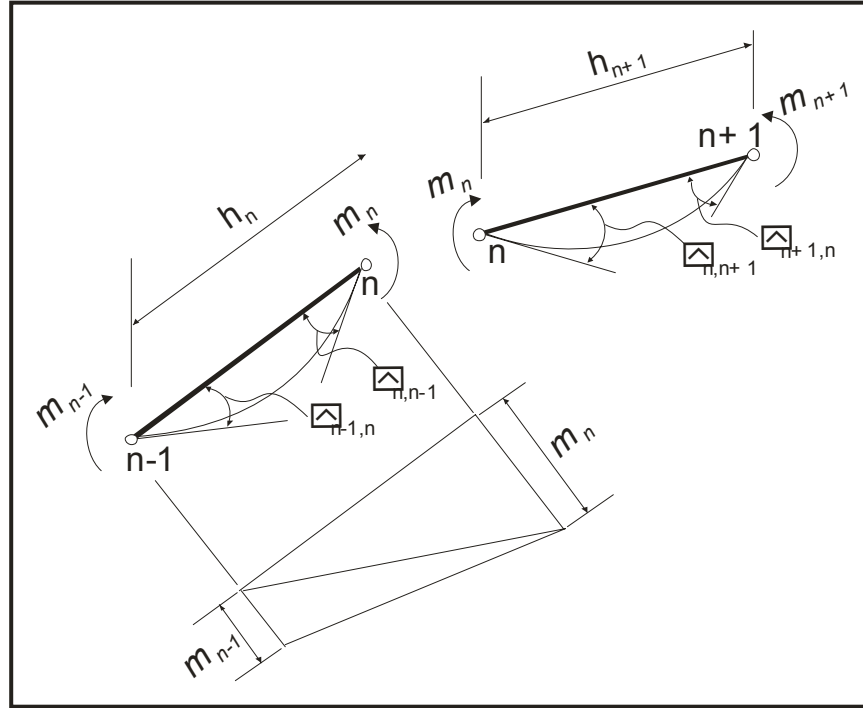
$$w_{n,n-1} = \frac{p_n l_n h_n^2}{2Ed_n^3} \quad (3.36)$$

$p_n$  gerçek yük  $\bar{p}_n$ 'nin ilk Fourier bileşeni olmasından dolayı,  $p_n = (4/\pi)\bar{p}_n$ . Benzer bir şekilde, denklem 3.37 yazılabilir.

$$w_{n,n+1} = \frac{p_{n+1} l_{n+1} h_{n+1}^2}{2Ed_{n+1}^3} \quad (3.37)$$

$n$ 'inci mafsaldaki toplam açısal değişim  $(w_{n,n-1} + w_{n,n+1})$  olacaktır.

- b) Mafsal momentlerinin sebep olduğu açısal değişiklik hesaplanır (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Mafsallarda momentlerin sebep olduğu açısal değişiklik

$n$ 'inci plağa alan moment teorimi uygulanarak  $n$ 'inci mafsaldaki eğim denklem 3.38'deki gibi yazılabilir.

$$\psi_{n,n-1} = \frac{h_n}{6EJ_n} (2m_n + m_{n-1}) \quad (3.38)$$

Bu enine momentlerle tanımlanan, Fourier serisinin ilk teriminin merkez büyüklüğü,  $m_{n-1}$  ve  $m_n$  benzer şekilde denklem 3.39'daki gibi yazılabilir.

$$\psi_{n,n+1} = \frac{h_{n+1}}{6EJ_{n+1}}(2m_n + m_{n+1}) \quad (3.39)$$

Böylece  $n$ 'inci mesnetteki toplam açısal değişiklik =  $(\psi_{n,n-1} + \psi_{n,n+1})$  olacaktır.

- 9) 3.22 ve 3.23 denklemleri kullanılarak plak yerdeğiştirmelerinin sebep olduğu  $\mathcal{G}_n$  ve  $\mathcal{G}_{n+1}$  açısal değişiklik hesaplanır. Bu durumda, mafsaldaki açısal azalma,  $(\mathcal{G}_{n+1} - \mathcal{G}_n)$  ifadesine eşittir.
- 10) Mafsallarda birbirine yakın plakların rijit mafsallar oluşturarak bağlanmasından dolayı mafsallarda açısal değişiklik olmaz. Dolayısıyla 8a, 8b ve 9 adımlarında hesaplanan açıda ki azalmaların toplamı sıfıra eşitlenmelidir ve bu denklem 3.40'daki şekilde yazılabilir.

$$(w_{n,n-1} + w_{n,n+1}) + (\psi_{n,n-1} + \psi_{n,n+1}) + (\mathcal{G}_{n+1} - \mathcal{G}_n) = 0 \quad (3.40)$$

Eğer katlanmış plaklar,  $n$  kadar plaktan oluşuyorsa ve problem simetri içermiyorsa oluşturulacak bu tür denklemlerin sayısı  $n - 3$ ' tür.

- 11) Onuncu adımda oluşturulan denklemlerin ardışık çözümü yapılır ve bilinmeyen mafsal momentlerinin bulunması sağlanır.
- 12) Mafsal momentleri bilinerek,  $R_n$  plak yükleri ve böylelikle  $M_{0,n}$  plak momentleri ve  $T_n$  kenar kaymaları hesaplanabilir. Bu değerler sayesinde merkez kısımda plaktaki kenar gerilmeleri hesaplanır. Bu değerler yoluyla diğer kısımlardaki kenar gerilmeleri sinüs eğrisini takip eden açıklık boyunca dağılımları hesaplanır.  $\pi^3/32$  faktörü ile çarpılarak kenar gerilmelerinin değerleri doğrulanır. Bu doğrulamanın sebebi, Fourier serisinin sadece ilk teriminin kullanılmasından dolayıdır.



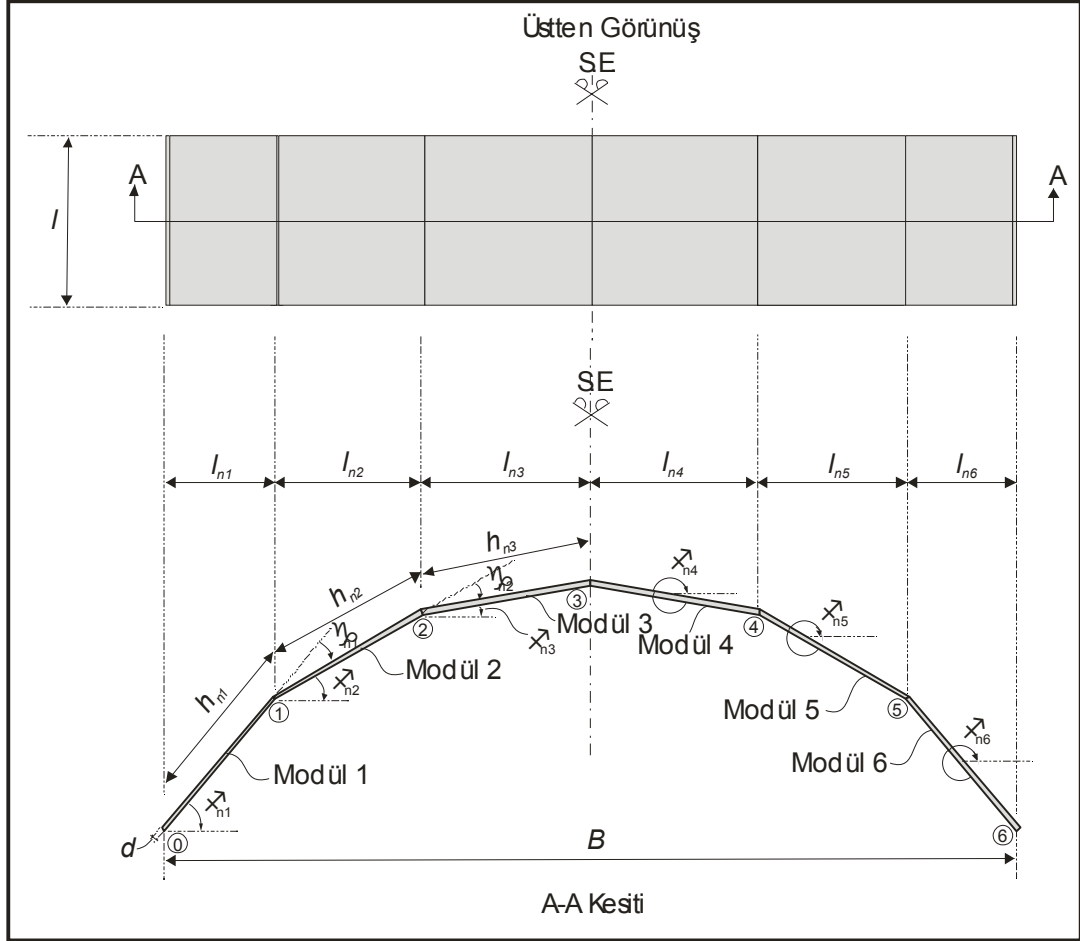
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

### 4.1. Katlanmış Plak Teorisinin MKY Sistemine Uygulanması

Bu başlık altında, Kısım 3.2.2.'de anlatılan katlanmış plak teorisinin tipik bir MKY sistemine uyarlanması anlatılmıştır. Bilgisayar destekli olması gereken kompleks MKY sistemlerinin yapısal analizlerinin elle yapılması beklenemez, ancak bu tasarımda kullanılacak teorisinin, bu sisteme uygunluğunun kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu açıdan seçilen örnek, az sayıda modüllerden oluşmuş nispeten basit bir forma sahiptir. Altı adet lineer yüzeyli parçadan oluşan bu sistemin bile, bu yöntemle çözülmesi sayfalar almaktadır. Dolayısıyla, yapısal tasarımda bilgisayar kullanılması gereklidir.

Şekil 4.1.'de gösterilen bu örnekte, yaklaşık 400mm×400mm×10mm boyutlarına sahip elyaf takviyeli lineer yüzeyli polimer modüllerin belli açılarla birbirlerine geçmesiyle, bir silindirik kabuk formu oluşturulmuştur. Bu hesaplamalarda, modüllerin birbirlerine olan mesnet bağlantılarında tam moment iletimi olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul, Ek 1 ve Ek 2'de gösterilen tasarlanmış üçgen modüller ve detay bağlantı kısımlarından görülebileceği üzere, aslında pek de gerçek dışı bir kabul değildir, çünkü tüm sistem birlikte düşünüldüğünde, modüller birbirleriyle tam temas halindedirler ve ara bağlantılarla tam interlock mekanizması olduğu düşünülmektedir. Ancak, bu yorumlar detaylanan modüllerin tam olarak üretilmesi ve gerçek yapının oluşturulması, testlerinin yapılması (Bölüm 2 ve 3'de detaylı anlatılmıştır), gerçek davranışının incelenmesi sonucu mümkün olabilecektir. Bu aşamada, bağlantıların tam moment transferini sağladıkları yönünde, bu araştırmada yapılan kabul, bu tez araştırmasının MKY sisteminin ilk araştırması olmasından dolayı, uygulanabilir bir kabul olduğu düşünülmektedir. Kabuk yapısı tasarımında kullanılan katlanmış plak teorisinin, MKY sistemine nasıl uygulanabileceği, seçilen bir örnek yapı üzerinde daha iyi anlatılabilir. Bu amaçla,

örnek çözömlleme tekniği aşağıda aşamalı olarak verilmektedir. Seçilen örnek yapı detayları Şekil 4.1.'de g6sterilmiştir.



Şekil 4.1. Katlanmış plak teorisinin uygulandığı kare yüzey alanlı modüllerden oluşturulmuş MKY sisteminin idealize edilmiş Şekli

Şekil 4.1.'de ki sistem için veriler aşağıda sıralanmıştır.

Polimerin Yoğunluğu = 1.90 gr/cm<sup>3</sup> (Çizelge 4.5.'den alındı)

$$w_6 = 0.078 \text{ N/mm}$$

$$w_h = 2.055 \text{ N/mm}$$

$$w_t = w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = w_6 = 2.133 \text{ N/mm}$$

$$h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h_5 = h_6 = 410.97 \text{ mm}$$

$$l = 410.97 \text{ mm}$$

$$l_1 = 260.97 \text{ mm}, l_2 = 355.91 \text{ mm}, l_3 = 404.73 \text{ mm},$$

$$l_4 = 404.73 \text{ mm}, l_5 = 355.91 \text{ mm}, l_6 = 260.97 \text{ mm}$$

$$\phi_1 = 50^0, \phi_2 = 30^0, \phi_3 = 10^0, \phi_4 = 350^0, \phi_5 = 330^0, \phi_6 = 310^0$$

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = \gamma_6 = 20^0$$

$$d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = d_5 = d_6 = 10 \text{ mm}$$

$$A_n = h_n d_n = A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A_5 = A_6 = 4109.7 \text{ mm}^2$$

$$Z_n = d_n \frac{h_n^2}{6} = Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z_5 = Z_6 = 281494 \text{ mm}^3$$

$$I_n = d_n \frac{h_n^3}{12} = I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = 57842774 \text{ mm}^4$$

$$J_n = \frac{d_n^3}{12} = J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = J_5 = J_6 = 83.33 \text{ mm}^3$$

İlk aşamada, modülleri mesnetlerinde mafsallı olarak düşünelim. Mafsallardaki momentlerin etkisi daha sonra dikkate alınacaktır. Birbirine yakın modüllerin birleştiği katlanma noktalarına uygulanan  $P_n$  gibi yükler, katlanma noktası yükleri olarak bilinir. Modüllerin birim uzunluğu göz önüne alınarak, bu yükler denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak aşağıdakiler yazılabilir.

$$P_1 = P_5 = \left( w_1 h_1 + \frac{1}{2} w_2 h_2 \right) \frac{4}{\pi} = 4.074 \text{ N}$$

$$P_2 = P_3 = P_4 = \frac{1}{2} (w_2 h_2 + w_3 h_3) \frac{4}{\pi} = 2.716 \text{ N}$$

$P_n$  yükü, kuvvetlerin üçgeninden bulunan denk 3.4 ve 3.5 kullanılarak modül yüklerine çevrilir.

$$S_{1,0} = \frac{P_1 \cos \phi_2}{\sin \gamma_1} = 10.315 \text{ N}$$

$$S_{1,2} = \frac{P_1 \cos \phi_1}{\sin \gamma_1} = 7.656 \text{ N}$$

$$S_{2,1} = \frac{P_2 \cos \phi_3}{\sin \gamma_2} = 7.819 \text{ N}$$

$$S_{2,3} = \frac{P_2 \cos \phi_2}{\sin \gamma_2} = 6.877 \text{ N}$$

$$S_{3,2} = \frac{P_3 \cos \phi_4}{\sin \gamma_3} = 7.819 \text{ N}$$

$$S_{3,4} = \frac{P_3 \cos \phi_3}{\sin \gamma_3} = 7.819 \text{ N}$$

$$S_{4,3} = \frac{P_4 \cos \phi_5}{\sin \gamma_4} = 6.877 \text{ N}$$

$$S_{4,5} = \frac{P_4 \cos \phi_4}{\sin \gamma_4} = 7.819 \text{ N}$$

$$S_{5,4} = \frac{P_5 \cos \phi_6}{\sin \gamma_5} = 7.656 \text{ N}$$

$$S_{5,6} = \frac{P_5 \cos \phi_5}{\sin \gamma_5} = 10.315 \text{ N}$$

$$m_1 = m_5 = -P_1 \frac{l_1}{2} \frac{4}{\pi} = -676.804 \text{ N mm}$$

Mafsal momentleri dikkate alınarak mafsallara ek modül birleşme noktası yükleri, denklem 3.25 kullanılarak uygulanır.

$$\Delta P_1 = \frac{m_2 - m_1}{l_2} = 1.90162 + 0.0028097 m_2$$

$$\Delta P_2 = \frac{m_3 - m_2}{l_3} - \frac{m_2 - m_1}{l_2} = -1.90162 - 0.00528048 m_2 + 0.00247078 m_3$$

$$\Delta P_3 = \frac{m_4 - m_3}{l_4} - \frac{m_3 - m_2}{l_3} = 0.00247078 m_2 - 0.00494157 m_3 + 0.00247078 m_4$$

$$\Delta P_4 = \frac{m_5 - m_4}{l_5} - \frac{m_4 - m_3}{l_4} = -1.90162 + 0.00247078 m_3 - 0.00528048 m_4$$

$$\Delta P_5 = -\frac{m_5 - m_4}{l_5} = 1.90162 + 0.0028097 m_4$$

Bu ek mafsal yükleri,  $P_n$  modül birleşme noktası yüklerinde olduğu gibi, denklem 3.26 ve 3.27 kullanılarak modül yüklerine dönüştürülür.

$$\Delta S_{1,0} = \Delta P_1 \frac{\cos \phi_2}{\sin \gamma_1} = 4.81506 + 0.00711441 m_2$$

$$\Delta S_{1,2} = \Delta P_1 \frac{\cos \phi_1}{\sin \gamma_1} = 3.57387 + 0.00528051 m_2$$

$$\Delta S_{2,1} = \Delta P_2 \frac{\cos \phi_3}{\sin \gamma_2} = -5.47548 - 0.0152045 m_2 + 0.00711434 m_3$$

$$\Delta S_{2,3} = \Delta P_2 \frac{\cos \phi_2}{\sin \gamma_2} = -4.81506 - 0.0133706 m_2 + 0.00625624 m_3$$

$$\Delta S_{3,2} = \Delta P_3 \frac{\cos \phi_4}{\sin \gamma_3} = 0.00711434 m_2 - 0.0142287 m_3 + 0.00711434 m_4$$

$$\Delta S_{3,4} = \Delta P_3 \frac{\cos \phi_3}{\sin \gamma_3} = 0.00711434 m_2 - 0.0142287 m_3 + 0.00711434 m_4$$

$$\Delta S_{4,3} = \Delta P_4 \frac{\cos \phi_5}{\sin \gamma_4} = -5.22465 + 0.00678842 m_3 - 0.014508 m_4$$

$$\Delta S_{4,5} = \Delta P_4 \frac{\cos \phi_4}{\sin \gamma_4} = -5.47548 + 0.00711434 m_3 - 0.0152045 m_4$$

$$\Delta S_{5,4} = \Delta P_5 \frac{\cos \phi_6}{\sin \gamma_5} = 3.57387 + 0.00528051 m_4$$

$$\Delta S_{5,6} = \Delta P_5 \frac{\cos \phi_5}{\sin \gamma_5} = 4.81506 + 0.00711441 m_4$$

Modüllerdeki  $R_n$  net modül yükleri ise, denklem 3.29 kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$R_1 = (S_{1,0}) + (\Delta S_{1,0}) = 15.1301 + 0.00711441 m_2$$

$$R_2 = (S_{2,1} - S_{1,2}) + (\Delta S_{2,1} - \Delta S_{1,2}) = -8.88557 - 0.020485 m_2 + 0.00711434 m_3$$

$$\begin{aligned} R_3 &= (S_{3,2} - S_{2,3}) + (\Delta S_{3,2} - \Delta S_{2,3}) \\ &= 5.75825 + 0.020485 m_2 - 0.0204849 m_3 + 0.00711434 m_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_4 &= (S_{4,3} - S_{3,4}) + (\Delta S_{4,3} - \Delta S_{3,4}) \\
&= -6.16784 - 0.00711434 m_2 + 0.0210171 m_3 - 0.0216223 m_4 \\
R_5 &= (S_{5,4} - S_{4,5}) + (\Delta S_{5,4} - \Delta S_{4,5}) = 8.88557 - 0.00711434 m_3 + 0.020485 m_4 \\
R_6 &= (-S_{5,6}) + (-\Delta S_{5,6}) = -15.1301 - 0.00711441 m_4
\end{aligned}$$

Net modül yüklerine göre momentler aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\begin{aligned}
m_{0,1} &= R_1 \frac{l^2}{\pi^2} = 258918 + 121.747 m_2 \\
m_{0,2} &= R_2 \frac{l^2}{\pi^2} = -152057 - 350.556 m_2 + 121.746 m_3 \\
m_{0,3} &= R_3 \frac{l^2}{\pi^2} = 98539.7 + 350.555 m_2 - 350.554 m_3 + 121.746 m_4 \\
m_{0,4} &= R_4 \frac{l^2}{\pi^2} = -105549 - 121.746 m_2 + 359.661 m_3 - 370.018 m_4 \\
m_{0,5} &= R_5 \frac{l^2}{\pi^2} = 152057 - 121.746 m_3 + 350.556 m_4 \\
m_{0,6} &= R_6 \frac{l^2}{\pi^2} = -258918 - 121.747 m_4
\end{aligned}$$

Daha sonra, denklem 3.10 kullanılarak aşağıdakiler yazılabilir.

$$\begin{aligned}
2 T_1 \left( \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) + \frac{T_2}{A_2} &= -\frac{1}{2} \left( \frac{m_{0,1}}{Z_1} + \frac{m_{0,2}}{Z_2} \right) \\
m_2 &= 467.034 + 0.532086 m_3 + 2.39484 T_1 + 0.59871 T_2 \\
\frac{T_1}{A_2} + 2 T_2 \left( \frac{1}{A_2} + \frac{1}{A_3} \right) + \frac{T_3}{A_3} &= -\frac{1}{2} \left( \frac{m_{0,2}}{Z_2} + \frac{m_{0,3}}{Z_3} \right) \\
4.95731 \times 10^7 + m_2 + 211946 m_3 &= 112774 m_4 + 126895 T_1 + 507579 T_2 + 126895 T_3 \\
\frac{T_2}{A_3} + 2 T_3 \left( \frac{1}{A_3} + \frac{1}{A_4} \right) + \frac{T_4}{A_4} &= -\frac{1}{2} \left( \frac{m_{0,3}}{Z_3} + \frac{m_{0,4}}{Z_4} \right) \\
m_2 + 0.039802 m_3 + 0.598709 T_2 + 2.39484 T_3 + 0.598709 T_4 &= 30.6332 + 1.08506 m_4
\end{aligned}$$

$$\frac{T_3}{A_4} + 2T_4 \left( \frac{1}{A_4} + \frac{1}{A_5} \right) + \frac{T_5}{A_5} = -\frac{1}{2} \left( \frac{m_{0,4}}{Z_4} + \frac{m_{0,5}}{Z_5} \right)$$

$$m_2 + 0.159859 m_4 = 382.007 + 1.95419 m_3 + 1.12521 T_3 + 4.50085 T_4 + 1.12521 T_5$$

$$\frac{T_4}{A_5} + 2T_5 \left( \frac{1}{A_5} + \frac{1}{A_6} \right) = -\frac{1}{2} \left( \frac{m_{0,5}}{Z_5} + \frac{m_{0,6}}{Z_6} \right)$$

$$877.74 + m_3 = 1.87939 m_4 + 1.12521 T_4 + 4.50085 T_5$$

Yukarıdaki beş lineer denklem  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  ve  $T_5$ 'e göre çözümlürse;

$$T_1 = -233.3405 + 0.410865 m_2 - 0.34928 m_3 + 0.0957884 m_4$$

$$T_2 = 153.295 + 0.026798 m_2 + 0.508398 m_3 - 0.383154 m_4$$

$$T_3 = 10.8235 - 0.518049 m_2 - 0.014063 m_3 + 0.548104 m_4$$

$$T_4 = -145.4236 + 0.375139 m_2 - 0.518626 m_3 + 0.0030749 m_4$$

$$T_5 = 231.3726 - 0.0937847 m_2 + 0.351837 m_3 - 0.418333 m_4$$

Modüllerin yerdeğiştirmeleri, denklem 3.30 kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$v_1 = \frac{1}{EI_1} \left( \frac{l}{\pi} \right)^4 \left( R_1 + (T_1) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{h_1}{2} \right)$$

$$\frac{1}{E} (62.4155 + 0.0609965 m_2 - 0.0212337 m_3 + 0.00582324 m_4)$$

$$v_2 = \frac{1}{EI_2} \left( \frac{l}{\pi} \right)^4 \left( R_2 + (T_1 + T_2) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{h_2}{2} \right)$$

$$\frac{1}{E} (-49.8521 - 0.0771052 m_2 + 0.0456918 m_3 - 0.0174697 m_4)$$

$$v_3 = \frac{1}{EI_3} \left( \frac{l}{\pi} \right)^4 \left( R_3 + (T_2 + T_3) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{h_3}{2} \right)$$

$$\frac{1}{E} (39.1302 + 0.0738472 m_2 - 0.0736593 m_3 + 0.0460463 m_4)$$

$$v_4 = \frac{1}{EI_4} \left( \frac{l}{\pi} \right)^4 \left( R_4 + (T_3 + T_4) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{h_4}{2} \right)$$

$$\frac{1}{E} (-39.4093 - 0.0447065m_2 + 0.074022m_3 - 0.0759622m_4)$$

$$v_5 = \frac{1}{EI_5} \left( \frac{l}{\pi} \right)^4 \left( R_5 + (T_4 + T_5) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{h_5}{2} \right)$$

$$\frac{1}{E} (50.211 + 0.0171043m_2 - 0.0461581m_3 + 0.0784673m_4)$$

$$v_6 = \frac{1}{EI_6} \left( \frac{l}{\pi} \right)^4 \left( R_6 + (T_5) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{h_6}{2} \right)$$

$$\frac{1}{E} (-62.5351 - 0.00570143m_2 + 0.0213891m_3 - 0.0614505m_4)$$

Noktalardaki açısai değişiklikler ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

1) Modülün sapmasından kaynaklanan açısai değişiklikler, denklem 3.23 kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$g_2 = \frac{1}{h_2} \left( v_2 (\cot \gamma_2 + \cot \gamma_1) - \frac{v_3}{\sin \gamma_2} - \frac{v_1}{\sin \gamma_1} \right)$$

$$\frac{1}{E} (-1.38899 - 0.00199028m_2 + 0.00128604m_3 - 0.000602603m_4)$$

$$g_3 = \frac{1}{h_3} \left( v_3 (\cot \gamma_3 + \cot \gamma_2) - \frac{v_4}{\sin \gamma_3} - \frac{v_2}{\sin \gamma_2} \right)$$

$$\frac{1}{E} (1.15824 + 0.001854m_2 - 0.00183657m_3 + 0.00128038m_4)$$

$$g_4 = \frac{1}{h_4} \left( v_4 (\cot \gamma_4 + \cot \gamma_3) - \frac{v_5}{\sin \gamma_4} - \frac{v_3}{\sin \gamma_3} \right)$$

$$\frac{1}{E} (-1.16254 - 0.00124482m_2 + 0.00184215m_3 - 0.00190151m_4)$$

$$g_5 = \frac{1}{h_5} \left( v_5 (\cot \gamma_5 + \cot \gamma_4) - \frac{v_6}{\sin \gamma_5} - \frac{v_4}{\sin \gamma_4} \right)$$

$$\frac{1}{E} (1.39633 + 0.000587318m_2 - 0.00129596m_3 + 0.00202677m_4)$$



2) Yüklemeden dolayı oluşan açısai değişiklik, denklem 3.36 ve 3.37 kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\omega_2 = \frac{4}{\pi} \left( \frac{w_2 h_2^2 l_2}{2Ed_2^3} + \frac{w_3 h_3^2 l_3}{2Ed_3^3} \right)$$

$$\frac{1}{E} (174450)$$

$$\omega_3 = \frac{4}{\pi} \left( \frac{w_3 h_3^2 l_3}{2Ed_3^3} + \frac{w_4 h_4^2 l_4}{2Ed_4^3} \right)$$

$$\frac{1}{E} (185646)$$

$$\omega_4 = \frac{4}{\pi} \left( \frac{w_4 h_4^2 l_4}{2Ed_4^3} + \frac{w_5 h_5^2 l_5}{2Ed_5^3} \right)$$

$$\frac{1}{E} (174450)$$

3) Travers momentlerinden oluşan açısai değişiklik, denklem 3.38 ve 3.39 kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\psi_{2,1} = \frac{h_2}{6EJ_2} (2m_2 + m_1)$$

$$\frac{1}{E} 0.821973 (-676.804 + 2m_2)$$

$$\psi_{2,3} = \frac{h_3}{6EJ_3} (2m_2 + m_3)$$

$$\frac{1}{E} 0.821973 (2m_2 + m_3)$$

$$\psi_{3,2} = \frac{h_3}{6EJ_3} (2m_3 + m_2)$$

$$\frac{1}{E} 0.821973 (m_2 + 2m_3)$$

$$\psi_{3,4} = \frac{h_4}{6EJ_4} (2m_3 + m_4)$$

$$\frac{1}{E} 0.821973 (2m_3 + m_4)$$

$$\psi_{4,3} = \frac{h_4}{6EJ_4}(2m_4 + m_3)$$

$$\frac{1}{E}0.821973(m_3 + 2m_4)$$

$$\psi_{4,5} = \frac{h_5}{6EJ_5}(2m_4 + m_5)$$

$$\frac{1}{E}0.821973(-676.804 + 2m_4)$$

Her noktadaki toplam açısai değişiklik sıfıra eşitlenirse (denklem 3.40),

$$(\omega_2) + (\psi_{2,1} + \psi_{2,3}) + (\vartheta_3 - \vartheta_2) = 0$$

$$\frac{1}{E}(52828.1 + m_2 + 0.248759m_3 + 0.000572035m_4) = 0$$

$$(\omega_3) + (\psi_{3,2} + \psi_{3,4}) + (\vartheta_4 - \vartheta_3) = 0$$

$$\frac{1}{E}(226707 + m_2 + 4.01963m_3 + 0.999899m_4) = 0$$

$$(\omega_4) + (\psi_{4,3} + \psi_{4,5}) + (\vartheta_5 - \vartheta_4) = 0$$

$$\frac{1}{E}(9.49142 \times 10^7 + m_2 + 446.928m_3 + 1796.71m_4) = 0$$

Yukarıdaki üç denklem  $m_2$ ,  $m_3$  ve  $m_4$ 'e göre çözülrse,

$$m_2 = -44249.29 \text{ N} \times \text{mm}$$

$$m_3 = -34384.45 \text{ N} \times \text{mm}$$

$$m_4 = -44249.01 \text{ N} \times \text{mm}$$

Bu değerler yukarıdaki denklemlerde yerine yazılırsa;

$$m_{0,1} = -5.12831 \times 10^6 \text{ N} \times \text{mm}$$

$$m_{0,2} = 1.11736 \times 10^7 \text{ N} \times \text{mm}$$

$$m_{0,3} = -8.74681 \times 10^6 \text{ N} \times \text{mm}$$

$$m_{0,4} = 9.28783 \times 10^6 \text{ N} \times \text{mm}$$

$$m_{0,5} = -1.11735 \times 10^7 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$m_{0,6} = 5.12828 \times 10^6 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$T_1 = -10642.6 \text{ N}$$

$$T_2 = -1559.33 \text{ N}$$

$$T_3 = -835.387 \text{ N}$$

$$T_4 = 951.559 \text{ N}$$

$$T_5 = 10794.4 \text{ N}$$

1 inci modül için;

$$m = m_{0,1} + T_1 \frac{h_1}{2} = -7.3152 \times 10^6 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$f_0 = \frac{m}{Z_1} - \frac{T_1}{A_1} = -23.3974 \text{ N/mm}^2$$

$$f_1 = -\frac{m}{Z_1} - \frac{T_1}{A_1} = 28.5767 \text{ N/mm}^2$$

2 inci modül için;

$$m = m_{0,2} + T_1 \frac{h_2}{2} + T_2 \frac{h_2}{2} = 8.66632 \times 10^6 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$f_1 = \frac{m}{Z_2} - \frac{-T_1 + T_2}{A_2} = 28.5767 \text{ N/mm}^2$$

$$f_2 = -\frac{m}{Z_2} - \frac{-T_1 + T_2}{A_2} = -32.9971 \text{ N/mm}^2$$

3 üncü modül için;

$$m = m_{0,3} + T_2 \frac{h_3}{2} + T_3 \frac{h_3}{2} = -9.23889 \times 10^6 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$f_2 = \frac{m}{Z_3} - \frac{-T_2 + T_3}{A_3} = -32.9971 \text{ N/mm}^2$$

$$f_3 = -\frac{m}{Z_3} - \frac{-T_2 + T_3}{A_3} = 32.6448 \text{ N/mm}^2$$

4 üncü modül için;

$$m = m_{0,4} + T_3 \frac{h_4}{2} + T_4 \frac{h_4}{2} = 9.3117 \times 10^6 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$f_3 = \frac{m}{Z_4} - \frac{-T_3 + T_4}{A_4} = 32.6448 \text{ N/mm}^2$$

$$f_4 = -\frac{m}{Z_4} - \frac{-T_3 + T_4}{A_4} = -33.5144 \text{ N/mm}^2$$

5 inci modül için;

$$m = m_{0,5} + T_4 \frac{h_5}{2} + T_5 \frac{h_5}{2} = -8.75991 \times 10^6 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$f_4 = \frac{m}{Z_5} - \frac{-T_4 + T_5}{A_5} = -33.5144 \text{ N/mm}^2$$

$$f_5 = -\frac{m}{Z_5} - \frac{-T_4 + T_5}{A_5} = 28.7243 \text{ N/mm}^2$$

6 ıncı modül için;

$$m = m_{0,6} + T_5 \frac{h_6}{2} = 7.34636 \times 10^6 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$f_5 = \frac{m}{Z_6} - \frac{-T_5}{A_6} = 28.7243 \text{ N/mm}^2$$

$$f_6 = -\frac{m}{Z_6} - \frac{-T_5}{A_6} = -23.4712 \text{ N/mm}^2$$

Gerçek momentler;

$$\frac{\pi}{4} m_2 = -34753.3 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$\frac{\pi}{4} m_3 = -27005.5 \text{ N}\times\text{mm}$$

$$\frac{\pi}{4} m_4 = -34753.1 \text{ N}\times\text{mm}$$

Uzunlamasına gerilmeler;

$$\frac{\pi^3}{32} f_1 = 27.6893 \text{ N/mm}^2$$

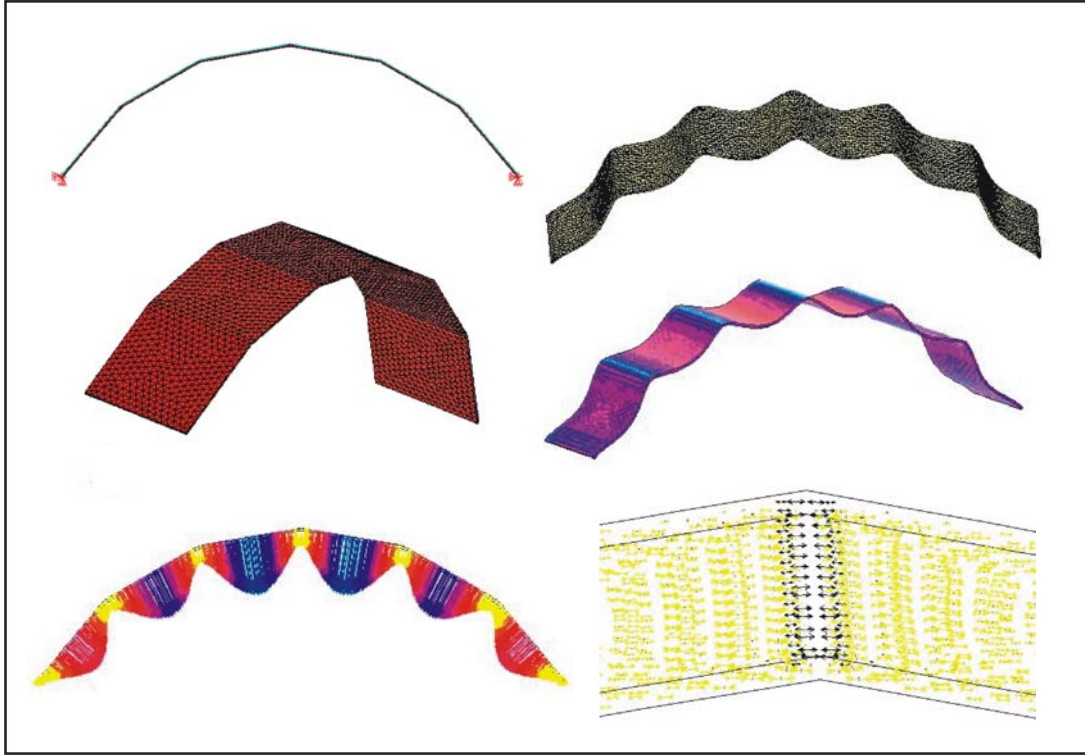
$$\frac{\pi^3}{32} f_2 = -31.9724 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\pi^3}{32} f_3 = 31.631 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\pi^3}{32} f_4 = -32.4736 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\pi^3}{32} f_5 = 27.8323 \text{ N/mm}^2$$

Şekil 4.2.'de bu örnek yapının, sonlu elemanlar yöntemine göre yapılmış modellenmesi ve bazı detay kesitler gösterilmektedir. Bu çözümlmelerden de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçların bazıları Çizelge 4.1.'de verilmiştir.



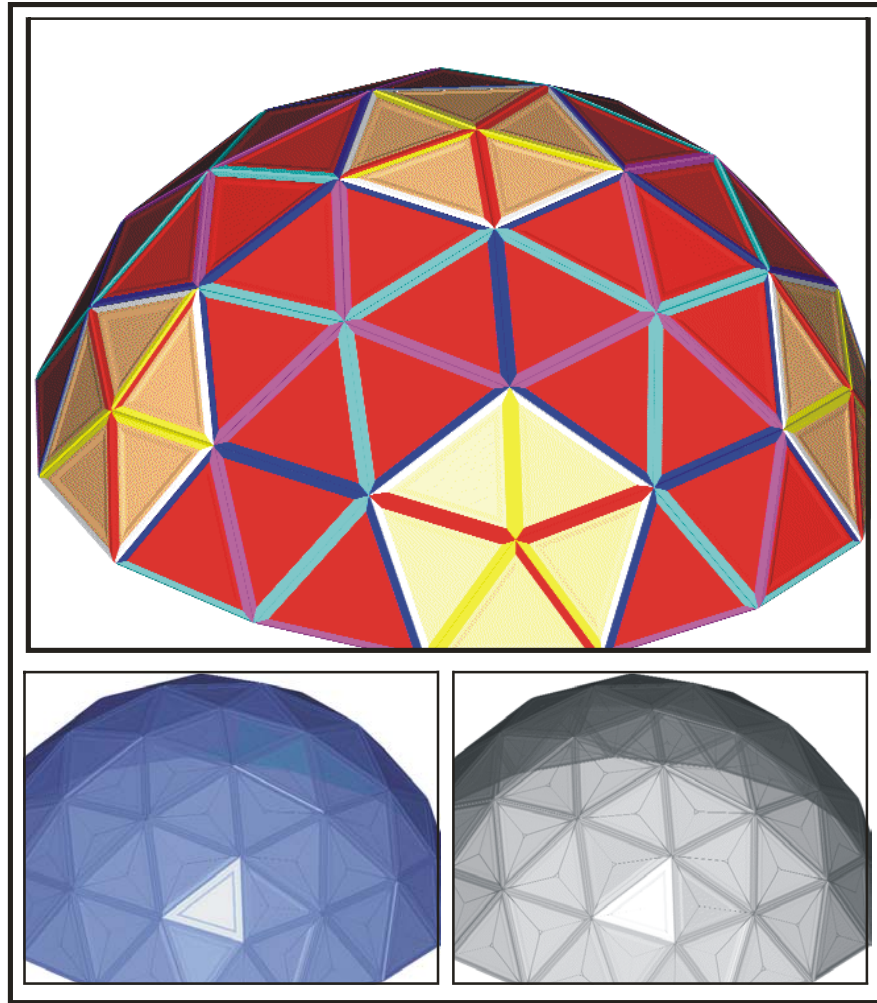
Şekil 4.2. Katlanmış plaklar teorisinin MKY sistemine uyarlaması örneğinin sonlu elemanlar metoduna değişik yükleme ve mesnet şartlarında modellenmesi ve deformasyon örneklemeleri

Çizelge 4.1. Örnek MKY sisteminin bazı teorik analiz sonuçları ve Sonlu Eleman Model sonuçlarıyla karşılaştırması

Bazı Sonuç Değerleri	MKY sisteminin teorik yapısal analizinden				
	Modül Bağlantı Noktaları				
	1	2	3	4	5
$\sigma_z$ (N/mm <sup>2</sup> )	27.6893	-31.9724	31.631	-32.4736	27.8323
$v_n$ (mm)	-0.057	0.0675	-0.0719	0.0725	-0.0682
$T_n$ (N)	-10642.6	-1559.33	-835.387	951.559	10794.4
$m_n$ (N×mm)	-676.804	-34753.3	-27005.5	-34753.1	-676.804
Bazı Sonuç Değerleri	Sonlu Elemanlar Metodu analizinden				
	Modül Bağlantı Noktaları				
	1	2	3	4	5
$\sigma_z$ (N/mm <sup>2</sup> )	19.42	-25.45	24.67	-28.52	19.39
$v_n$ (mm)	-0.067	0.072	-0.079	0.071	-0.064
$T_n$ (N)	-10549.1	-1580.5	-914.5	1004.3	10568.5
$m_n$ (N×mm)	-630.3	-34780.2	-27173.7	-34764.4	-676.804

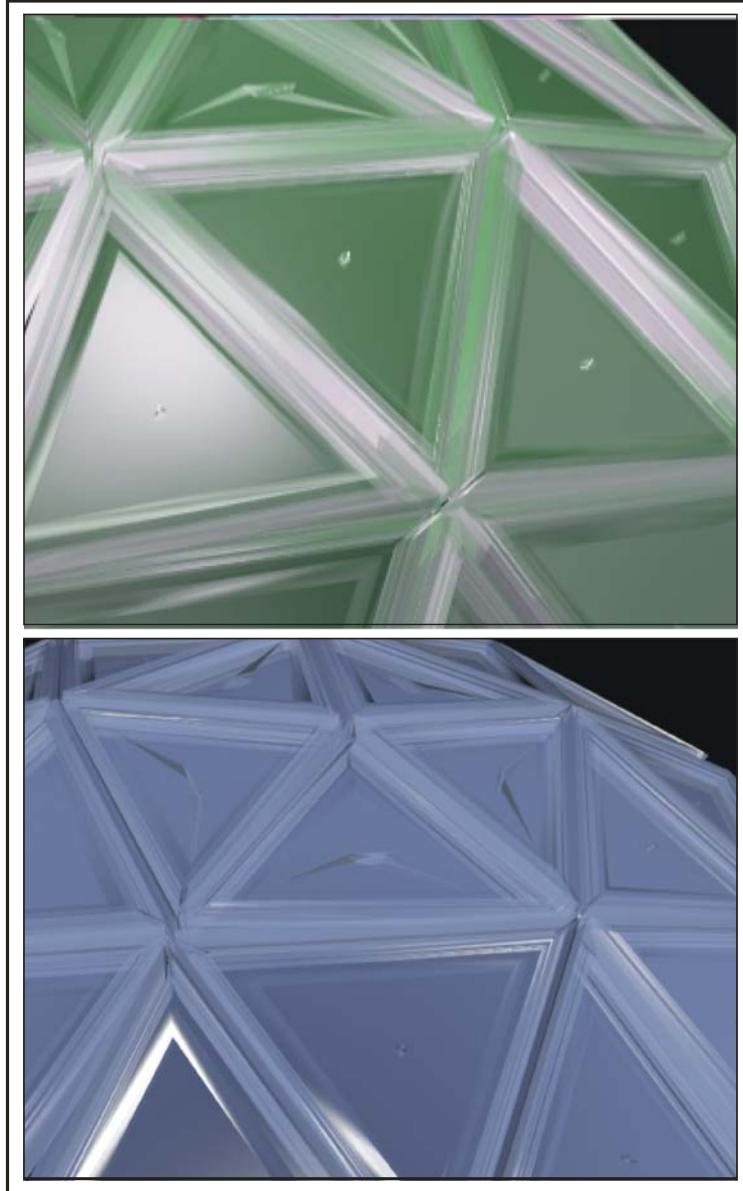
## 4.2. MKY Sisteminin Diğer Kabuk Yapı Formlarında Kullanılış Şekilleri

Kısım 3.2.2’de anlatılan katlanmış plak yapılar gibi düşünülerek, bu teorinin MKY sistemine uygulanış biçimleri, aslında Çizelge 3.6.’da verilen tüm kabuk yapılarını kapsayabilir. Bu yapılar örnek bir veya iki eğrili kabuk yapılar ve dönel eğrili kabuklar verilebilir. Bunu sağlayabilmek için Bölüm 2’de anlatıldığı gibi üçgen modüllerin kullanılması gerekmektedir. Tarafımızdan değişik pek çok yapı şekilleri bilgisayarda oluşturularak en ideal formun belirlenmesine çalışılmıştır. Özellikle vurgulamak gerekir ki, sadece bağlantı detay elemanlarının açısızlık oluşturacak şekilde farklı tasarımları yoluyla, pek çok kabuk yapı formu rahatlıkla oluşturulabilir. Örnek olarak 2m çaplı bir yarım küre şekli detaylı olarak oluşturulmuştur (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Üçgen ve bağımsız modüllerden oluşturulmuş 2m çaplı bir yarım küre kabuk

Şekil 4.3.'de verilen kabuk formu, farklı çizim programları kullanılarak da oluşturulmuş olup geometrik dataların en hassas şekilde elde edilmesine çalışılmıştır (Şekil 4.4.). Bu bilgisayar tasarımlarıyla ulaşılmak istenen ana hedef, değişik kabuk formlarının oluşturulmasına imkan sunan en uygun modül büyüklüğünün, geometrisinin, bağlantı ara parçalarının ve modülün sayısal detaylarının belirlenmesine ek olarak, bu parçaların kabuğu oluşturması için, yapı üzerinde almaları gereken topolojinin belirlenmesidir. Bu, belli geometrik forma sahip modüllerin, değişik yapı formlarında pratik olarak kullanılabilmesinin en önemli aşamasıdır.



Şekil 4.4. Üçgen modüllerden oluşturulmuş yarım küre kabuk yapısı



Bölüm 3’de anlatılan prefabrik üretim için bu belirlenen geometrideki elyaf takviyel polimer olarak düşünölen modöllerin, polimer enjeksiyonlama metoduyla üretilebilmesi için kalıplarının yapılması gerekmektedir. Bu kalıp yapım aşaması, endüstride özel bir branş olup, bu konuda deneyimli kalıp yapımcılarıyla temasa geçilmiştir. Onlarında tavsiyeleri ışığında, en kolay bir şekilde kalıp tasarımının yapılabileceği modül şekilleri araştırılmış, pekçok başarılı ve başarısız deneyimler yapılmıştır. Sonuçta, Şekil 4.4’de yakın plan görünüşü verilen modöller ve bağlantı detaylarının kullanılması konusunda anlaşılmıştır. Bu üçgen formlu modöller, iki tip üçgen ana modöllerden ve bu üçgenlerin kenarlarının birbirleriyle kenetlenmesini sağlayan, iki ana tip bağlantı parçalarından oluşmaktadır. Ek 1 ve Ek 2’de bu iki üçgen modöllerin ve bağlantı parçalarının detay çizimleri verilmiştir. Bu üçgenlerin oluşturduğu kabuk formuyla ilgili örnek görünüşler Şekil 4.3. ve 4.4.’de verilmiştir.

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmayla, yapı mühendisliğinde özellikle geodesik kabuk yapıları başta olmak üzere, her türlü kabuk yapı uygulamalarında kullanım alanı bulması beklenen, Modüler Kabuk Yapıları (MKY) sistemi olarak tanıtılan yapı tekniği, tarafımızdan geliştirilmiş olup, temel alt yapısı bu tez’de, oldukça geniş kapsamlı araştırmalar sonucu oluşturulmaya çalışılmıştır. İnşaat mühendisliğinde yapı güçlendirmesinde sınırlı kullanıma sahip olan, fiber elyaf takviyeli polimerler, bu yeni sistem sayesinde yapı mühendisliğinde önceden üretilmiş taşıyıcı eleman olarak kullanılabilir. Bu sistem mevcut tüm kabuk yapı sistemleriyle kıyaslanmış olup, yapısal, konstrüksiyonel ve estetik olarak, üstün ve önemli özellikleri tanıtılmıştır. Geleneksel kabuk yapıları sistemleriyle kıyaslandığında, bu yeni kabuk yapı sisteminin, bu tez’deki bilgiler ışığında ileriki araştırmalarla geliştirilip yapı mühendisliğine uygulanması yolu ile, yeni bir bilimsel araştırma alanının açılacağı düşünülmektedir.

Bu sistemin her açıdan temel alt yapısını oluşturmayı hedefleyen bu tez çalışması, dünyada bu konuda yapılan ilk çalışma olmasından dolayı, ulusal bilim başta olmak üzere, uluslararası anlamda yapı mühendisliğinde ve mimaride, alternatif bir kabuk yapı sistemi ve bu branşların alt endüstri dallarında yeni bir sektör oluşturmaya aday olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla, bu bağlamda, gelişen ülkemizin ihtiyacı olan bilimsel farklılık ve yeni teknolojilere önderlik etme gereksinimine de cevap vermeye çalışmaktadır.

MKY sisteminde kullanılan modüller ve bağlantı detaylarının geometrik tasarımının nasıl olabileceği, bağlantı parçalarının tasarımı, kullanılacak malzemeler ve bu malzemelerin bileşenleri araştırılmıştır. Bu malzemelerle ileride

yapılacak modüllerin, ne tür testlerinin yapılması gerektiği, bu testlerin uyması gereken uluslar arası standartlar verilerek, prefabrik üretim şeklinde imal edilmesi mümkün olan bu modüllerin, polimer enjeksiyonlama yöntemine göre üretilebilmesi için gerekli olan çelik kalıplama sistemine uygun tasarlanan modül ve bağlantılarının hangi üretim teknikleriyle prefabrik üretiminin yapılabileceği araştırılmıştır. Bu modül ve bağlantıların, istenilen kabuk geometrisini oluşturabilmeleri için, hangi topolojide ve hangi açılarla birbirlerine bağlantı ara elamanlarıyla birleştirilmesi gerektiği, üzerine de yoğunlaşmıştır. Buna ek olarak, MKY sisteminin muhtemel yapısal tasarımının nasıl olabileceği araştırılmış, mevcut kabuk yapıları teorileri irdelenmiş ve katlanmış plakların teorik temellerinden yararlanılarak, tek eğrili bir MKY sistemi örnekleme de sayısal olarak bu tez’de verilmiştir. Bu tez araştırmasında, aynı zamanda bu yeni yapı sisteminin inşaat mühendisliği açısından muhtemel tasarım metodunun nasıl olacağına ilişkin, mevcut teorik kabuk yapıları yöntemleri araştırılmış ve bu yolla yapısal tasarımının alt yapısının nasıl oluşturulabileceği açıklanmaya çalışılmıştır. Temel tasarım kriterlerinin nasıl belirlenebileceği ve muhtemel teorik yapısal tasarımının detayları konularında araştırmalar tanıtılmıştır.

Sonuç olarak, MKY sisteminin oluşturulmasının mevcut malzeme teknolojisiyle mümkün olduğu anlatılmış olup, bu sistemin yapısal tasarım prensipleri için de mevcut temel teorik altyapı yaklaşımlarının yeterli olduğu bu tezle açıklanmıştır. Muhtemel teorik yaklaşımlar verilmiş ve tasarım örnekleme yapılmıştır.

## 5.2. Öneriler

Bu özel kabuk yapı sistemi için en uygun kabuk teorisinin araştırılmasına çalışılmıştır. MKY sisteminin lineer yüzeyli modüllerinin belli bir açıda birleştirilmesiyle oluşan yapı, kabuk yapıları teorisindeki katlanmış plak yapılarına benzediğinden, MKY sisteminin teorik hesap yönteminin de katlanmış plak teorisine benzerlik göstereceği düşüncesiyle, bu hesap zinciri için katlanmış plak teorisi uyarlanmıştır. Örnek çözümler verilerek katlanmış plak teorisi ile ilgili temel

prensipler irdelenmiştir. Ancak yapılan bu uygulamalarda modül bağlantı noktalarındaki birleşim toleransları dikkate alınmamıştır. Oldukça kapsamlı olan bu sistemin, her başlığı bu çalışmada ele alındığından, ileride yapılacak belli başlıklara yoğunlaşmış çalışmalarda, bu kabul iyileştirilebilir ve gerekli testleri bu tezde verilen test yöntemleri ve standartlar ışığında yapılabilir.

İleriki araştırmalarda, tezde verilen malzeme, test yöntemleri, modül bağlantı detayları, modül ve bağlantı elemanlarının geometrik bilgileri ışığında, yine bu araştırmayla verilen test standartlarına uygun testleri yapılarak, bu bağlantıların yük iletme mekanizmaları daha detaylı incelenebilir. Bu bilgiler ışığında, modül bağlantı noktaları için daha uygun kabullerin yapılabilmesi olanaklı olacak ve bu tezle önerilen katlanmış plak teorisi, bu sisteme daha detaylı uyarlanabilecektir. Ayrıca bu tez’de incelenen tek eğrili kabuk yapı örneği, döne eğrili ve çift eğrili kabuk yapı formlarına, katlanmış plak teorisinde üç boyutlu teorik düzenlemeler yapıldıktan sonra, ileride uygulanabilir.

## KAYNAKLAR

- AGARWAL, B. D., and BROUTMAN, L. J., 1990. Analysis and Performance of Fiber Composites. Second Edition, Wiley and Sons, New York, 320p.
- ALGIN, H. M., and KNAPTON, J., 1998. The Effects of Surface Thickness into the Structural Performance of Paver Pavement. Proc. of the 3rd. Int. Workshop on Concrete Block Paving, Cartagena, Colombia, pp. 301-316.
- ALGIN, H. M., and KNAPTON, J., 1995. The Mathematical Solution to Interlock in Concrete Element Pavement. Proc. of the 4th. Int. Masonry Conf., London, UK, 7(2):307-313.
- APPLEWHITE, E. J., 1986. The Mind Of Buckminster Fuller. Synergetics Dictionary, Garland Publishing, Inc. New York and London, 410p.
- ARMATLI, K. M., 1999. Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet Maliyet Analizleri. Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksek Okulu, Eskişehir, 175s.
- ATTENE, M., FALCIDIENO B., SPAGNUOLO M., and WYVILL G., 2003. A Mapping-Independent Primitive for the Triangulation of Parametric Surfaces. Graphical Models, 65(5):260-273.
- ASCE Manual, 1952. Design of Cylindrical Concrete Shell Roofs. ASCE manual of engineering practice, No. 31, New York, USA, 190p.
- ASCE, 1963. Phase 1 - Report on Folded plate construction – Report of the Task Committee on Folded Plate Design. ASCE Structural Division, pp. 365– 406.
- ASTM E-4, 2000. Standard Practices for Force Verification of Testing Machines. Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 310p.
- BAUERSFELD, W., 1919. Zeiss Historica Journal, Autumn, 22:8-11.
- BLANDINI, L., 2005. The Glass Dome. Glass Processing Days, Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK), University of Stuttgart, Pfaffenwaldring, 14, D - 70569 Stuttgart, Germany, <http://www.glassfiles.com/library/17/article937.htm>
- CHRONOWIEZ, A., 1960. The Design of Shells. A Practical Approach, 2nd Ed., Crosby Lockwood & Son, Ltd., London, 168p.
- CSONKA, P., 1960. On the Stres-function of the Circular Cylindrical Shell. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, Budapest, 403p.
- CUNDY, H., and ROLLETT, A., 1989. Mathematical Models. 3rd Ed., Stradbroke, England: Tarquin Pub., pp. 60-63.
- DDCMHB, 2002. Department of Defense Composite Materials Handbook. MIL-Hdbk-17-1F, Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials, Department of Defense, USA, 320p.
- DDCMHB, 1996. Department of Defense Composite Materials Handbook. MIL-HDBK-17, Comparison of 0° Compressive Strength for M55J/954-2A, Lockheed Martin Astronautics and Fiberite Inc., Proceedings of the Polymer Matrix Composites Group Coordination Meeting, 34th Meeting, Schaumburg, IL, 410p.
- DONNELL, L. H., 1933. The Stability of Thin Walled Tubes under Tension. National Advisory Committee for Aeronautics Report 479, Washington, D.C., 370p.

- DONNELL, L. H., 1933. A new theory for the buckling of thin cylinders under axial compression and bending. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 56:108-114.
- DOT/FAA/AR, 2002. Design, Manufacturing, and Performance of Stitched Stiffened Composite Panels With and Without Impact Damage. Federal Aviation Administration (FAA), Final Report, No: DOT/FAA/AR-02/111 Office of Aviation Research, Washington, D.C. 20591, USA, 210p.
- DOT/FAA, 1999. Verification of the Combined Load Compression (CLC) Test Method. Federal Aviation Administration (FAA), Final Report, No: DOT/FAA/AR-00/26, Office of Aviation Research, Washington, D.C. 20591, USA, 213p.
- DOT/FAA, 2000. Fire-Safe Polymers and Polymer Composites. Federal Aviation Administration (FAA), Final Report, No: DOT/FAA/AR-04/11, Office of Aviation Research, Washington, D.C. 20591, USA, 180p.
- DOT/FAA/AR, 1999. A Comparison of CEN and ASTM Test Methods for Composite Materials. Federal Aviation Administration (FAA), Final Report, No: DOT/FAA/AR-04/24, Office of Aviation Research, Washington, D.C. 20591, USA, 176p.
- EHLERS, G., 1930. Ein Neues Konstruktions Prinzip. Bauingenieur, Berlin, 11(8):125.
- FAA, 2001. Fire-Safe Polymers and Polymer Composites. Final Report, No: DOT/FAA/AR-04/11, Office of Aviation Research, Washington, D.C. 20591, USA, 240p.
- FINSTERWALDER, U., 1932. Die Theorie der Kreiszyklindrischen Schalengewölbe System Zeiss-Dywidag und ihre Anwendung auf die Grossmarkthalle in Budapest. International Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IABSE), Abh, Zürich, 1:127-152.
- FLÜGGE, W., 1960. Stresses in Shells. Springer-Verlag OHG, Berlin, 134p.
- GAAFAR, I., 1954. Hipped Plate Analysis Considering Joint Displacement. Transactions of the ASCE, Paper 2696, 119:743-784.
- GIBSON, R.F., 1994. Principles of Composite Material Mechanics. McGraw-Hill, New York, 421p.
- GIRKMANN, K., 1948. Flachentragwerke. Springer-Verlag OHG, Vienna, pp. 379-380.
- GOLDMAN, R., 2004. Multisided Arrays of Control Points for Multisided Bézier Patches. Computer Aided Geometric Design, 21(3):243-261.
- GRUBER, E., 1932. Berechnung Prismatischer Scheibenwerke. Publication of the International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, 1:280-287.
- GÜVEN, Ş. Y., 1990. Kompozit Malzemeler ve Kullanım Alanları. Isparta Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Isparta, 260p.
- CHEN H., and BISHOP, J., 1997. Delaunay Triangulation for Curved Surfaces. 6th Intl. Meshing Roundtable Proceedings, pp. 115–127.
- HOLAND, I., 1957. Design of Circular Cylindrical Shells. Oslo University Press, Oslo, 253p.
- ISO 5893, 1999. Rubber and Plastics Test Equipment – Tensile, Flexural and Compressive Types (Constant Rate of Traverse) – Description. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 10p.

- JENKINS, R. S., 1947. Theory and Design of Cylindrical Shell Structures. The O. N. Arup Grup of Consulting Engineers, Bulletin 1, London, 75p.
- JONES, R. M., 1999. Mechanics of Composite Materials. 2nd Edition, Taylor and Francis, Philadelphia, PA, 270p.
- LI, K., GAO, X. L., and SUBHASH, G., 2005. Effects of Cell Shape and Cell Wall Thickness Variations on the Elastic Properties of Two-Dimensional Cellular Solids. *International Journal of Solids and Structures*, 42(5-6):1777-1795.
- SHIMADA, K., and GOSSARD, D.C., 1998. Automatic Triangular Mesh Generation of Trimmed Parametric Surfaces for Finite Element Analysis. *Comput. Aided Geom. Design*, 15:199–222.
- KARMAN, T. V., and TSIEN, H.S., 1941. The Buckling of Thin Cylindrical Shells under Axial Compression. *Journal of American Science*, 8:303-312.
- KELKAR, V.S., and SEWELL, R.T., 1987. Fundamentals of the analysis and design of shell structures. Prentice Hall, Inc. New Jersey, 508p.
- PIEGL, L.A., and RICHARD, A.M., 1998. Tessellating Trimmed NURBS Surfaces. *Comput. Aided Design*, 30(1):11–18.
- LUNDGREN, H., 1960. Cylindrical Shells. Cylindrical Roofs, The Danish technical press, The instution of Danish Civil Engineers, Copenhagen, 360p.
- SHUART, M. J., JOHNSTON, N. J., and DEXTER, H. B., 2000. Automated Fabrication Technologies For High Performance Polymer Composites. NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681, USA, 14p.
- MUNEO, H., KENJI, O., and HIDE, S., 2005. Proposal of FEM Implemented with Particle Discretization for Analysis of Failure Phenomena. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53(3):681-703.
- NASA, 2000. Standard Test Methods for Textile Composites. Report 4751, Lockheed Martin Engineering & Sciences Company, Hampton, Virginia, 42p.
- NOVOZHILOV, V. V., 1964. The Theory of Thin Shells. (translated from Russian by Lowe, P. G.), Erven, P., Noordhoff, NV, Groningen, Netherlands, 6(2):189-190.
- PAWLEY, M., 1991. Buckminster Fuller. Taplinger Publishing Company, New York, 192p.
- PIETRASZKIEWICZ, W., 1984. Lagrangian Description Arid Incremental Formulation in the Nonlinear Theory of Thin Shells. *Int J Non-Linear Mech.*, 19(2):115–140.
- RAMASWAMY, G. S., 1968. Design and Construction of Concrete Shell Roofs. McGraw Hill Book Company, Ed 1, USA, 641p.
- ROHWER, K., 1988. Improved Transverse Shear Stiffnesses for Layered Finite Elements. Research report DFVLR-FB 88-32, DFVLR, Institut fur Strukturmechanik, Braunschweig, Germany, 121p.
- SACMA, 1988. Compressive Properties of Oriented Fiber-Resin Composites. SACMA Recommended Method SRM1-88, and SRM 2-88, Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA, 55p.
- SCHORER, H., 1935. Line Load Action on Thin Cylindrical Shells. *Proc. of ASCE*, 61(3):281-316.
- SIMPSON, H., 1958. Design of Folded Plate Roofs. *Journal of Structural Division, Proc. Of ASCE*, 8:1450-1462.
- SNYDER, R., 1980. Buckminster Fuller: An Autobiographical Monologue/Scenario. St. Martin's Press, New York, 218p.

- SÖNMEZ, F. Ö., 2000. Otomotiv Sanayiinde Kompozit Malzeme Kullanımı. Mühendis ve Makine, 39:465-473.
- TARAKÇILAR, A.R., TOPÇU, M., ve TAŞGETİREN, S., 1995. Kompozitler ve Özelliklerini Belirleyen Faktörler. Mühendis ve Makine, 36:322-329.
- USACERL, 1998. Development and Demonstration of Advanced Design Composite Structural Components. Technical Report 98/99, US Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratories, USA, 78p.
- HOLLA, V. D., SHASTRY, K. G., and PRAKASH, B. G., 2003. Offset of Curves on Tessellated Surfaces. Computer-Aided Design, 35(12):1099-1108.
- VLASOV, V.Z., 1939. Handbook für Platten und Schalen. Moskau, 63p.
- WARD, J., 1984. The Artifacts of R. Buckminster Fuller, A Comprehensive Collection of His Designs and Drawings. Four Volumes: Volume One. The Dymaxion Experiment, 1926-1943; Volume Two. Dymaxion Deployment, 1927-1946; Volume Three. The Geodesic Revolution, Part 1, 1947-1959; Volume Four. The Geodesic Revolution, Part 2, 1960-1983, Part 1, Garland Publishing, USA, pp.1947-1959.
- WHITNEY, C. S., ANDERSON, B. G., and BRINBAUM, H., 1959. Reinforced Concrete Folded Plates Construction. Journal of Structural Division, Proc. Of ASCE, ST8, USA, 85:330-338.
- WINTER, G., and PEI, M., 1947. Hipped Plate Construction. Journal of the American Concrete Institute, 43:505-531.
- YITZHAKI, D., 1959. The Design of Prismatic and Cylindrical Shell Roofs. North Holland Publishing Company, Amsterdam, 350p.
- ZUNG, T.K., 2001. Buckminster Fuller. Anthology for a New Millennium, St. Martin's Press, USA, 404p.



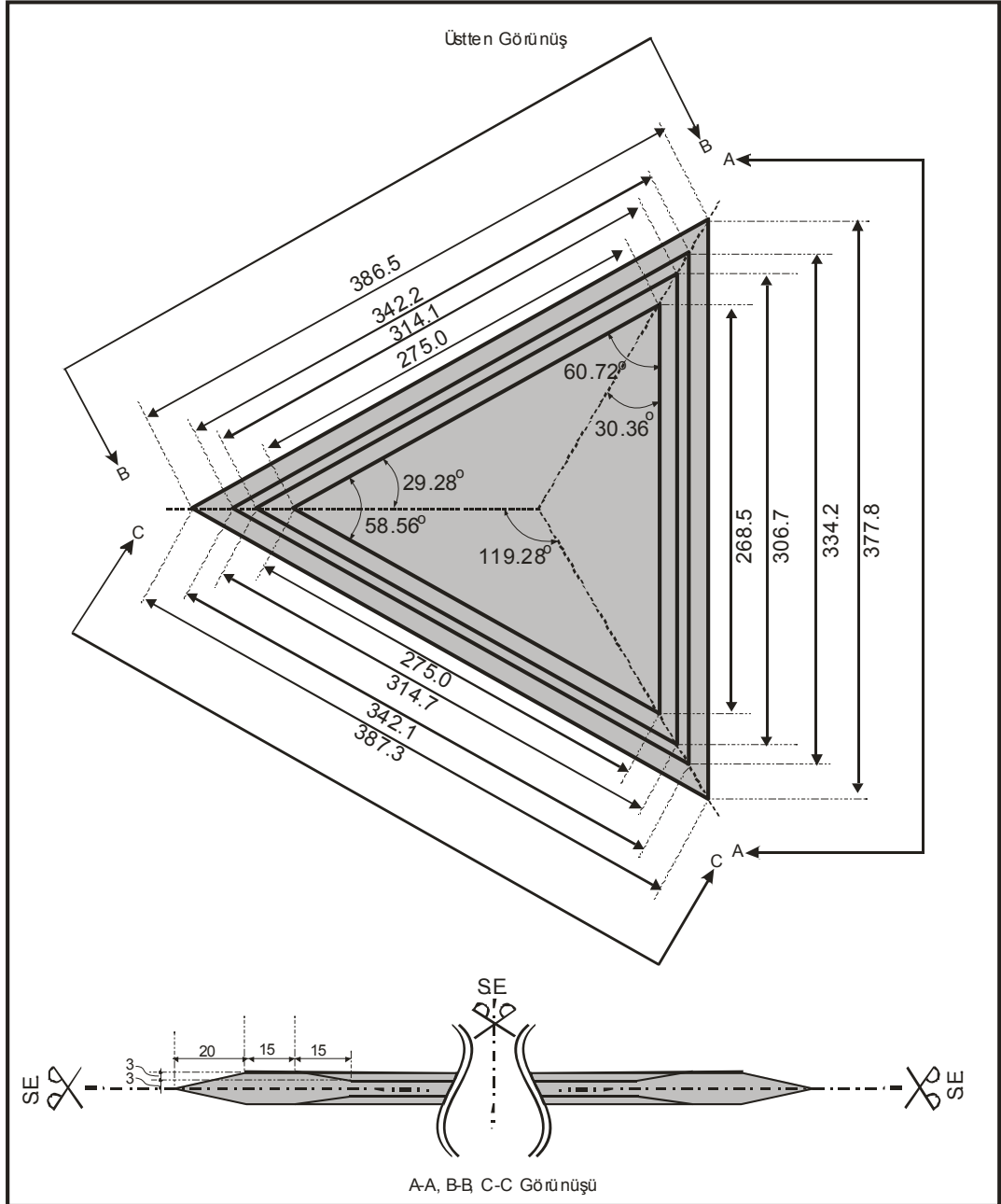
## **ÖZGEÇMİŞ**

1982 yılında Ankara'da doğdu. İlköğretimini ve ortaöğrenimini Ankara'da tamamladı, 2004 yılında Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu, 2004 yılında Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2005 yılında aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı, halen aynı bölümde akademik görevine ve Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir.

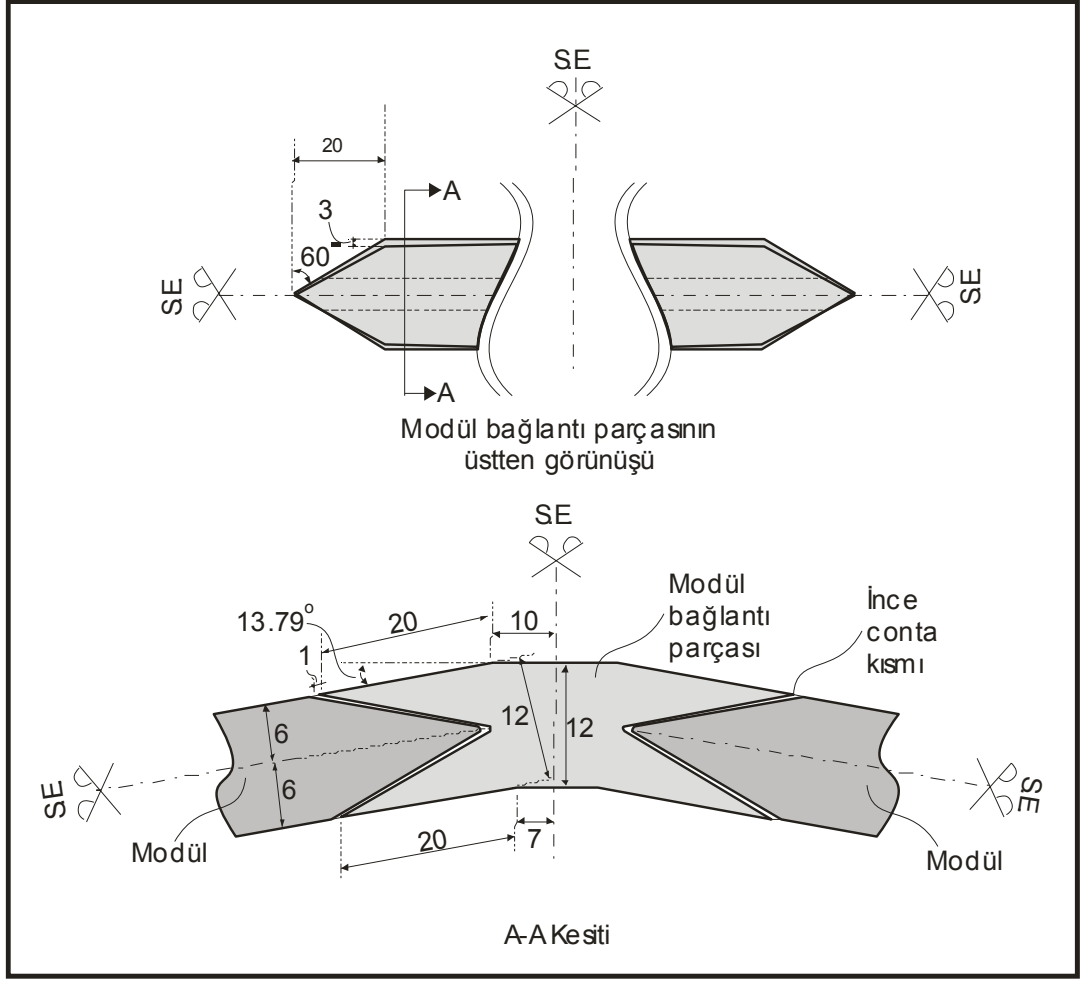
## EKLER

### Ek 1

Şekil 4.3. ve 4.4'de gösterilen yarım küre kabuk formunun altıgen birleşimleri meydana getiren üçgen ve bu üçgenlerin bağlantı detayları aşağıda verilmiştir.



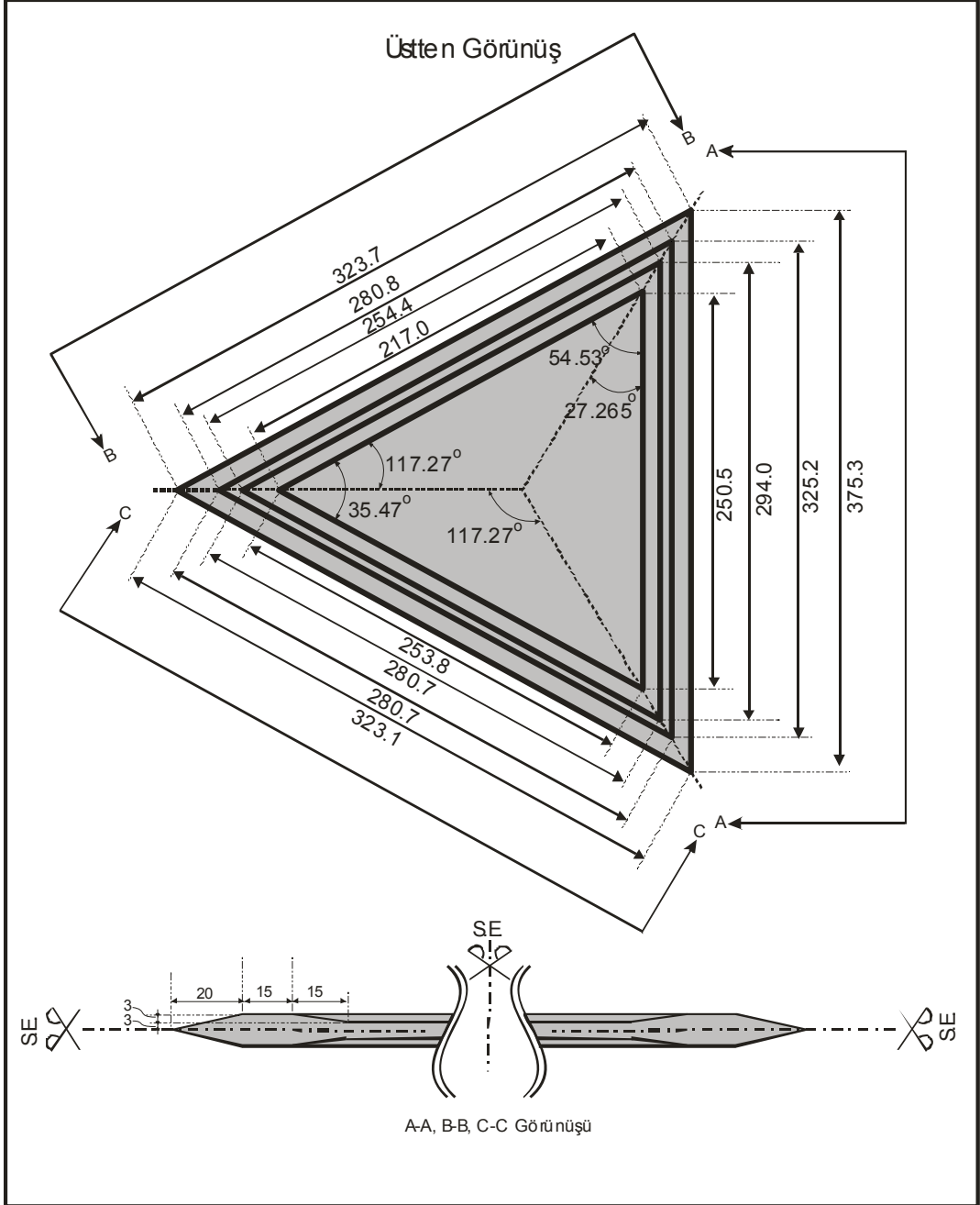
Ek Şekil 1.1. Yarım küre kabuk formunun altıgen birleşimlerini meydana getiren üçgen detayları



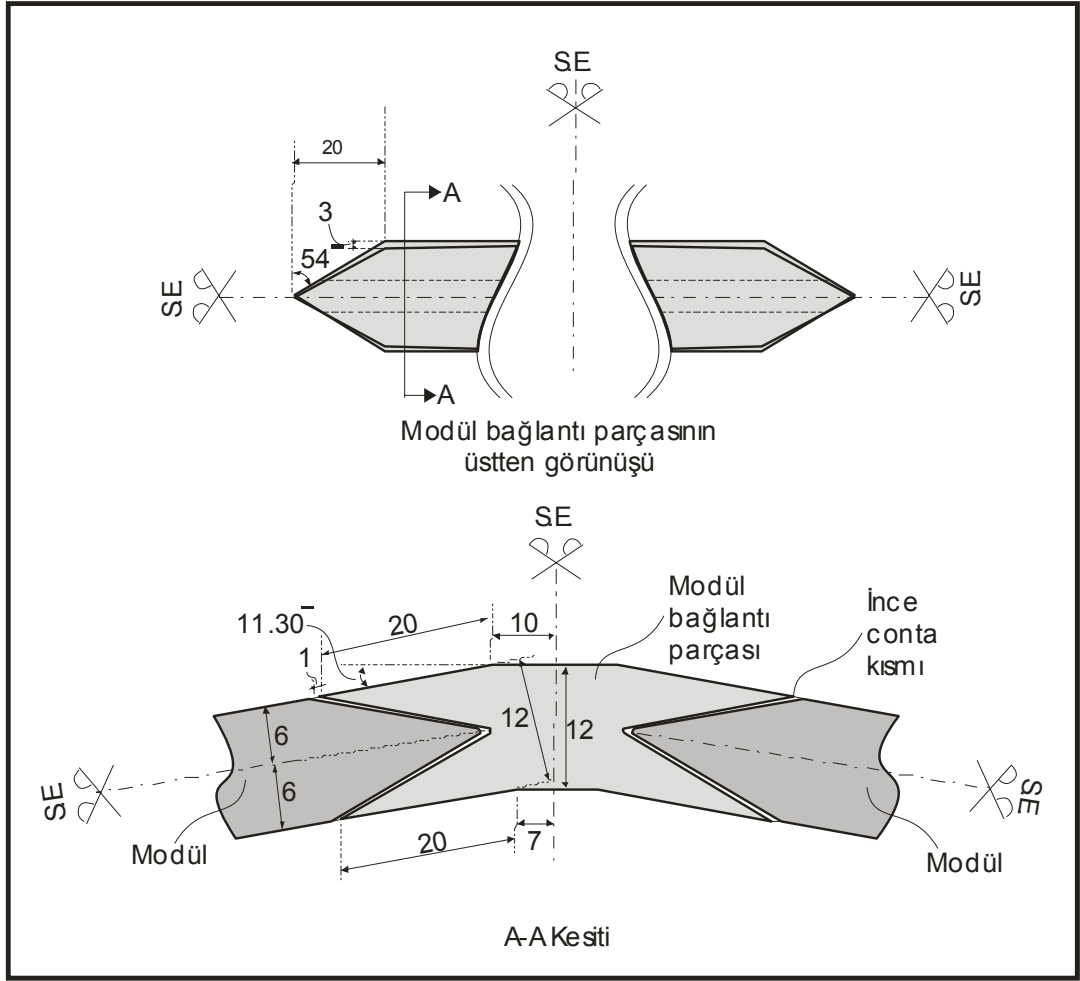
Ek Şekil 1.2. Yarım küre kabuk formunun altıgen birleşimlerini meydana getiren üçgenlerin bağlantı detayları

## Ek 2

Şekil 4.3. ve 4.4.'de gösterilen yarım küre kabuk formunun beşgen birleşimleri meydana getiren üçgen ve bu üçgenlerin bağlantı detayları aşağıda verilmiştir.



Ek Şekil 2.1. Yarım küre kabuk formunun beşgen birleşimlerini meydana getiren üçgen detayları



Ek Şekil 2.2. Yarım küre kabuk formunun beşgen birleşimlerini meydana getiren üçgenlerin bağlantı detayları

## ÖZET

Bu yüksek lisans tez araştırması, kabuk yapı formlarında kullanılacak malzemenin hafifliği, yeterli yük dayanımına sahip olması ve bir yapı sistemi dahilinde kolay uygulanabilmesi gereksinimine bir çözüm sunmak amacıyla, tarafımızdan geliştirilmiş bir kabuk yapı sistemi olan, *Modüler Kabuk Yapıları* (MKY) sistemini tanıtarak, bu çok kapsamlı sistemin inşaat mühendisliğine kazandırılması için gerekli ilk aşama detay bilgilerini içermektedir. MKY sisteminde ileri polimer kimyası teknolojisindeki reçine gelişmelerinden yararlanılarak, ve ön döküm tekniği kullanılarak önceden imal edilmiş, belli geometrideki modüllerin birbirine geçmesi yoluyla, parçacıklı kabuk yapı, değişken pek çok yüzeysel forma sahip olacak tarzda oluşturulabilir. Günümüzde monolitik ve yerinde yapılan (in-situ) kabuk yapılarda kullanılan, betonarme, çelik ve elyaf takviyeli polimerler sistemlerinden pek çok açıdan daha üstün bir yapı sistemi olduğu düşünülen MKY sistemi, genel anlamıyla, uygulamada pratik ve yapıyı hızlı inşa edebilme özelliğinin yanında, malzeme ve yapı sistemi olarak da pek çok teknolojik ilerlemeyi bünyesinde barındırmaktadır.

Bu araştırmayla tanıtılan MKY sisteminde kendi içerisinde bireysel davranan modüller, tüm strüktür göz önünde bulundurulduğunda, bağlantı (geçme) noktalarındaki yük iletimi sayesinde (interlock), tek bir yapı gibi, kabuk yapının şekil fonksiyonunu oluşturur. Modüllerin birbirine geçmedeki (bağlantı detaylarındaki) toleransları sayesinde, her modül, komşu modülle bir açısal bağlantı yapar. Bu tolerans, global strüktürün oluşmasını sağlamaktadır. Bu araştırmayla modüllerin komşu modülle nasıl bir bağlantı yapması gerektiği tartışılarak, conta detayları ve bu toleranslar hakkında bilgiler verilmektedir. Sızdırmazlık contalarının şekil ve pozisyonunun detayları, optimum modül kalınlığının tespiti gibi başlıklarda bu araştırmada tartışılmaktadır. Yapılan maket ve prototip çalışmaları tanıtılmaktadır. Bu araştırma aynı zamanda, bu yeni yapı sisteminin yapı mühendisliği açısından temel alt yapısının nasıl oluşturulabileceğini açıklamakta ve temel tasarım kriterlerinin nasıl belirlenebileceği konusunda detaylar içermektedir. Sistemin bir bütün olarak yük iletmeye mekanizmasının teorik olarak nasıl olduğu standart kabuk

yapıları tasarım prosedürleriyle karşılaştırılarak bu sistem için en uygun çözümün nasıl olacağı detaylarıyla araştırılmıştır.

Tipik yüklemeler altında örnek çözümler verilerek, sistem standart teorik modellerle karşılaştırılmıştır. Katlanmış plaklar ve silindirik kabukların membran ve eğilme teorileri ve diğer mevcut kabuk yapılarının teorik detayları irdelenerek, bu sistemin hangi tasarım prensibine daha yakın olduğu ve muhtemel yapısal analiz yönteminin nasıl olabileceği araştırılarak, bu sistemin temel tasarım prensiplerine yaklaşmaya çalışılmıştır. Ayrıca polimer veya değişik malzemelerin (beton gibi) belli bir şekle sahip olacak tarzda kalıplanması yoluyla prefabrik olarak üretilebilecek olan bu yapı parçaları (modülleri) için gerekli olan muhtemel boyutsal ve şekilsel tasarımları da yapılmıştır. Bu araştırmada hafifliği ve yüksek dayanımından dolayı elyaf takviyeli oligamer malzemeler temel modül üretiminde kullanılacağı kabulüyle, bu malzemelerin mühendislik özellikleri, muhtemel prefabrik üretim yöntemlerinden polimer enjeksiyonlama sisteminin temel detayları da bu çalışmayla sunulmuştur. Ek olarak, bu tez çalışmasıyla önerilen sistemin uygulamaya geçirilebilmesi için gerekli olduğu düşünülen tüm detaylar ve yapı parçalarının bir bütün olarak davranabilmesi için nasıl bir bağlantı yapması gerektiği, enjeksiyonlama üretim için en basit ve ekonomik kalıp tasarımının göz önünde bulundurulması yoluyla bu bağlantıların nasıl olması gerektiği de araştırılmıştır.

Bununla birlikte tasarım parametrelerinin hangi uluslararası standartlara uyması gerektiği de tartışılmaktadır. Bu sistem için uygun malzeme çeşitleri ve üretim metotları konusunda da detaylı bilgi verilmektedir. Bu yeni yapı sisteminin, uygulanabilmesi, tasarım kriterlerinin ve yapısal tasarım metodunun geliştirilebilmesi için gerekli temel parametrelerinin belirlenmesi, bu yayında açıklanan bağlantı detaylarıyla ancak mümkün olabilecektir. Bu yolla, mevcut kabuk yapı sistemlerindeki malzeme ve yapım aşamalarına, teknolojik anlamda modern alternatifler sunularak uygulamada pratiklik kazandırılması hedeflenmektedir.

Sonuç olarak parçacıklı olarak kabuk yapılarının oluşturulmasının, mevcut malzeme teknolojisiyle rahatlıkla mümkün olduğu anlaşılmış olup, bu sistemin

yapısal tasarım prensibi için de mevcut teorik altyapının yeterli olduğu bu tezle anlatılmış, muhtemel teorik yaklaşımlar verilmiş ve tasarım örneklemeleri yapılmıştır.



## SUMMARY

The main objective of this research is to identify the design criteria, fundamental design parameters and structural design theories of the proposed structural system designated as *Modular Shell Structures* (MSS). The MSS system is inspired from the connection details of human and animal tissue cells. When the tissue cells are considered as segments that are connected together and as they are assumed to be joined together with a suitable geometry and connection, the surface of this structural form appears seemingly a shell structure that is enveloped by the independent modules. This system is named as modular shell structures owing to this similarity.

This new shell structural technique having potential to be alternative to overall shell structural systems, in principal, it has in fact better features such as its practicality in application and rapid construction, as well as providing new structural and architectural design alternatives as a structural material and system as a whole. In addition, it introduces the functionality concept to the overall shell structures. MSS with various surface forms can be constructed by connecting the pre-moulded and pre-fabricated modules having certain geometrical shapes. The *oligamer* resins in advanced chemistry that are widely used in production of FRC (Fibber Reinforced Composite) and PMC (Polymer Matrix Composites) will be utilised as a main material in the module production. MSS can provide the load distribution throughout the whole surface of structure as it is described for the general shell structures and if it is required, it provides space for trespassing daylights as it is to be in truss systems. The proposed system offers many new structural and architectural advantages.

The research focuses on covering the following research areas in order to investigating MSS for industrial development in practice as well as it aims to build up the fundamental information required for the structural design and the technology that will be developed for this new system. The content of research program includes: designing the moulds required in the pre-moulding process in which the shapes of certain modules are to be formed, determining the suitable geometrical shapes and dimensions, designing the joint connection details of modules, identifying the load

carrying capacity in the module connection, determining the structural limits, investigating the load carrying capacity of MSS that will be constructed in the computer environments and investigating the shape geometry of modules under typical structural loads.