

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HETEROJEN ÖZELLİKLERE SAHİP YAPIŞTIRICI BAĞLANTILARININ
ELASTİK GERİLME VE BURKULMA ANALİZİ**

MİNE USLU UYSAL

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. UĞUR GÜVEN**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HETEROJEN ÖZELLİKLERE SAHİP YAPIŞTIRICI BAĞLANTILARININ
ELASTİK GERİLME VE BURKULMA ANALİZİ**

Mine USLU UYSAL tarafından hazırlanan tez çalışması 22.06.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

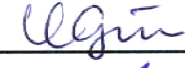
Tez Danışmanı

Prof. Dr. Uğur GÜVEN
Yıldız Teknik Üniversitesi



Jüri Üyeleri

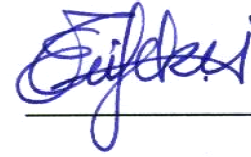
Prof. Dr. Uğur GÜVEN
Yıldız Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. R. Faruk YÜKSELER
İstanbul Kültür Üniversitesi



Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ
İstanbul Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Ata MUĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. İsmail BAYER
Yıldız Teknik Üniversitesi



ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışması, fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemelerden oluşan yapıştırıcı bağlantı dayanımının ve yapıştırıcı tabakada yer alan inklüzyon (inclusion) malzemesinin etkilerinin incelenmesi üzerinedir. Bu çalışmanın ortaya konmasında benden yardımlarını, desteğini, sabrını esirgemeyen çalışma disiplininden ve bilgi birikiminden çok etkilendiğim değerli hocam Prof. Dr. Uğur GÜVEN'ne teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez izleme komitemde bulunan ve gelişme raporlarımı okuyup değerlendirerek tezimin oluşumuna katkı sağlayan hocalarım Prof. Dr. R. Faruk YÜKSELER ve Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ'ye teşekkür ederim.

Yine bütün hayatım boyunca bana destek olan sevgili annem Zekiye USLU ve beni akademik hayata girmem için teşvik eden değerli babam Ahmet USLU'ya sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım. Yaptığım işlerde beni hep yüreklendiren ve yanımda olduğunu hissettiren kardeşim Murat USLU'ya ve tez çalışmam süresince her an yanımda olan tüm sıkıntılarımı paylaştığım sevgili eşim ve değerli meslektaşım Dr. Alper UYSAL'a sonsuz teşekkür ederim.

Haziran, 2015

Mine USLU UYSAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTIMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	13
1.3 Orjinal Katkı	14
BÖLÜM 2	
FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER.....	16
2.1 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Mekanik Özellikleri	16
2.2 FDM'den Yapılan Plakta Malzeme Özelliklerinin Kalınlık Doğrultusunda Değişimi	17
2.2.1 Elastisite Modülünün Kalınlık Doğrultusunda Kuvvet Kanununa Göre Değişimi	17
2.2.2 Elastisite Modülünün Kalınlık Doğrultusunda Üstel Olarak Değişimi. 19	
2.3 Mikromekanik Yaklaşım.....	19
2.3.1 Mori-Tanaka Modeli	20
2.3.2 Tutarlı Model	21
2.3.3 Guth Modeli.....	22
2.3.4 Halpin-Tsai Modeli.....	23
2.3.5 Lewis-Nielsen Modeli	23
2.4 Gözleme Dayalı Yaklaşım.....	24

2.4.1	Kullanılan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Polimerik Malzeme (FDPM) Tanımı.....	24
BÖLÜM 3		
FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ POLİMERİK MALZEMEDEN (FDPM) YAPILAN SANDVIÇ YAPILAR VE TEK BİNDİRME BAĞLANTILARI		28
3.1	FDPM'den Yapılmış Sandviç Yapılarda Burkulma Davranışı	28
3.1.1	Farklı Bağlantı ve Yükler Altında FDPM Sandviç Panel	29
3.1.2	Sonlu Elemanlar Modeli	33
3.1.3	Sayısal Sonuçlar	36
3.1.4	Sonlu Elemanlar Analizinin Doğrulanması.....	44
3.2	FDPM'den Yapılan Tek Bindirme Bağlantılarında Gerilme Davranışı	47
3.2.1	Farklı Sınır Koşulu ve Yükler Altındaki FDPM'den Yapılan Tek Bindirme Bağlantıları.....	48
3.2.2	Sonlu Elemanlar Modeli	49
3.2.3	Sayısal Sonuçlar	51
3.2.4	Sonlu Elemanlar Analizinin Doğrulanması.....	57
BÖLÜM 4		
YAPIŞTIRICI TABAKALARINDA ORTOTROPİK İNKLÜZYON İÇEREN BAĞLANTILARIN BURKULMA ve GERİLME DAVRANIŞLARI		60
4.1	Ortotropik İnküzyon içeren Yapıştırılmış Plak Panelde Burkulma Davranışı.....	61
4.1.1	Kayma Yükü Altında İnküzyon içeren Yapıştırılmış Plak Panel	63
4.1.2	Sonlu Elemanlar Modeli	64
4.1.3	İnküzyon Bölgesi Civarında Delaminasyon Hasarı.....	66
4.1.4	Farklı Yapıştırıcı Kalınlıklarında Cam İnküzyon için Özel Durum İncelemesi.....	67
4.1.5	Sayısal Sonuçlar	68
4.2	Ortotropik İnküzyon içeren Tek Bindirme Bağlantılarının Gerilme Davranışı	76
4.2.1	Düzgün Yayılı Çekme Yükü Altında Ortotropik İnküzyon içeren Tek Bindirme Bağlantıları	77
4.2.2	Sonlu Elemanlar Modeli	79
4.2.3	Tek Bindirme Bağlantılarında İnküzyon Bölgesi Yakınlarında Delaminasyon Hasarı	80
4.2.4	Sayısal Sonuçlar	81
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		90
KAYNAKLAR		93
ÖZGEÇMİŞ		104

SİMGE LİSTESİ

a	Plak uzunluğu
b	Plak genişliği
B	Bulk modülü
C_{ij}	Elastik sabitler matrisi
G	Kayma modülü
h	Plak kalınlığı
n	Hacim oranı üsteli
P	Efektif malzeme özelliği
η_c	Kompozit malzeme yoğunluğu
η_p	Matris malzemesinin yoğunluğu
k_E	Einstein sabiti
v_f	Parçacık hacim yüzdesi
v_m	Maksimum parçacık hacmi
R_a	Yüzey pürüzlülük oranı
ξ	Eklenecek takviye malzemesinin geometrik özelliğine bağlı bir şekil faktörü
E	Elastisite modülü
E_{PAM}	PAM grafit tozunun elastisite modülü
E_{PV}	PV grafit tozunun elastisite modülü
$E_{Polimer}$	Polimerin elastisite modülü
ν	Poisson oranı
ν_{PAM}	PAM grafit tozunun Poisson oranı
ν_{PV}	PV grafit tozunun Poisson oranı
$\nu_{Polimer}$	Polimerin Poisson oranı
V	Düzlem içi kesme kuvveti
N	Düzlem içi normal bası kuvveti
q	Yayıllı yük
d	Noktasal destek çapı
h_s	Silikon genişliği
d_b	Ayar blokların genişliği
k_τ	Kesme burkulma katsayısı
V_{kr}	Kritik kesme burkulma yükü
D_i	Panellerin kendi tarafsız eksenlerine göre eğilme rijitliği
D_o	Panellerin merkezi eksene göre eğilme rijitliği

D_c	Yapıştırıcı tabakanın eğilme rijitliği
D_{sand}	Tüm sandviç yapının eğilme rijitliği
S_{yap}	Yapıştırıcının kayma rijitliği
α	Plak en/boy oranı
σ_o	Çekme gerilmesi
M	Eğilme momenti
U_x	x yönündeki yer değiştirme
U_y	y yönündeki yer değiştirme
σ_y	Soyulma gerilmesi
τ_{xy}	Kayma gerilmesi
σ_{von}	von-Mises gerilmesi
P_{cr}	Delaminasyon içeren yapıştırılmış bağlantının kritik burkulma yükü,
P^*_{cr}	Delaminasyon içermeyen yapıştırılmış bağlantının kritik burkulma yükü,
A_{del}	Delaminasyon alanı
A_{yap}	Yapıştırıcı alanı

KISALTMA LİSTESİ

FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
FDPM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Polimerik Malzeme
FKN	Normal Penaltı Rijitlik Faktörü
PAM	Grafit Tozunun Ticari İsmi, PAM96/98
PV	Grafit Tozunun Ticari İsmi, PV60/65
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SEM	Sonlu Elemanlar Modeli
2D	İki Boyutlu
3D	Üç Boyutlu

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemede mekanik özelliklerin değişimi	16
Şekil 2.2 Üiform kalınlıktaki dikdörtgen bir plağın geometrisi ve koordinatları.....	17
Şekil 2.3 Seramik ve metal malzemelerinden oluşan Fonksiyonel Derecelendirilmiş bir plağın boyutsuz kalınlığı boyunca seramik malzeme oranlarının değişimi	18
Şekil 2.4 İki fazlı malzeme a) parçacıklı mikroyapı b) iskeletsel mikroyapı [105]	20
Şekil 2.5 Grafit tipi PV60/65 a) %3 hacim, b) %6 hacim, c) %9 hacim, d) %12 hacim	26
Şekil 2.6 %3 hacim oranında PV60/65 grafit tozu içeren numune görünümü	26
Şekil 3.1 Farklı yükler altında noktasal desteklenmiş FDPM sandviç panel a) düzlem içi kesme kuvveti V, b) düzlem içi normal bası kuvveti N, c) yayılı yük q.....	30
Şekil 3.2 Noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel a) sınır koşulları ve mesnet tepkileri, b) çeki ve bası dioganelleriyle oluşan membran etkisi	31
Şekil 3.3 Doğrusal desteklenmiş sandviç panel modeli	32
Şekil 3.4 Farklı yükler altında doğrusal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel a) düzlem içi kesme kuvveti V, b) düzlem içi normal bası kuvveti N, c) yayılı yük q	32
Şekil 3.5 Noktasal desteklenmiş FDPM sandviç panel ölçüleri ve sonlu elemanlar modeli	34
Şekil 3.6 Doğrusal desteklenmiş FDPM sandviç panel a) panel ölçüleri, b) bağlantı detayları.....	34
Şekil 3.7 Yapıştırıcı ve yapıştırılan plakalardaki conta ve targe elemanlarının konumları	35
Şekil 3.8 Eleman Tipleri a) Solid 95, b) Conta 174 ve Targe 170.....	36
Şekil 3.9 %3 PAM-PAM için mod şekilleri a) mode 1, b) mode 2, c) mode 3.....	37
Şekil 3.10 Grafit hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel düzlem içi kesme kuvveti altında, V, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV	38
Şekil 3.11 Grafit hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel düzlem içi normal bası kuvveti altında, N, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV	38
Şekil 3.12 Grafit hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel yayılı yük altında, q, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV	39

Şekil 3.13 Grafit hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, doğrusal desteklenmiş FDPDM'den oluşan sandviç panel düzlem içi kesme kuvveti altında, V, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV	40
Şekil 3.14 Grafit hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, doğrusal desteklenmiş FDPDM'den oluşan sandviç panel düzlem içi normal bası kuvveti, N, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV	41
Şekil 3.15 Grafit hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, doğrusal desteklenmiş FDPDM'den oluşan sandviç panel yayılı yük altında, q, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV	42
Şekil 3.16 Grafit dağılım tipinin kritik burkulma yüküne etkisi, düzlem içi kesme kuvveti altında noktasal desteklenmiş plak a) %3 grafit hacmi, b) %6 grafit hacmi, c) %9 grafit hacmi, d) %12 grafit hacmi.....	43
Şekil 3.17 Grafit hacim oranının homojen dağılımda kritik burkulma yüküne etkisi, düzlem içi kesme kuvveti (V) altında noktasal desteklenmiş FDPDM'den oluşan sandviç panel a) PAM-Reçine, b) PV-Reçine, c) PAM-PV-Reçine.....	44
Şekil 3.18 FDPDM'den oluşan sandviç panelin şematik görünümü	44
Şekil 3.19 Düzgün yayılı çekme yükü altında FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısı [56].....	48
Şekil 3.20 FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısının şematik gösterimi.....	49
Şekil 3.21 Eğilme momenti altında FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısı	49
Şekil 3.22 Tek bindirme bağlantısında sonlu elemanlar modeli	50
Şekil 3.23 Kontak Eleman Tipleri, Conta 171 ve Targe 169	50
Şekil 3.24 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, grafit hacim oranının U_x yerdeğiştirmesine etkisi, a) PAM-PAM, b) PV-PV	52
Şekil 3.25 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, grafit hacim oranının U_y yerdeğiştirmesine etkisi, a) PAM-PAM, b) PV-PV	52
Şekil 3.26 Eğilme momenti (M) altındaki FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, grafit hacim oranının U_x yerdeğiştirmesine etkisi, a) PAM-PAM, b) PV-PV	53
Şekil 3.27 Eğilme momenti (M) altındaki FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, grafit hacim oranının U_y yerdeğiştirmesine etkisi, a) PAM-PAM, b) PV-PV	53
Şekil 3.28 Yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilmelerin belirlenmesi için seçilen orta düzlem	53
Şekil 3.29 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, PAM hacim oranının gerilmeler üzerine etkisi, a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})	54
Şekil 3.30 Eğilme momenti (M) altındaki FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, PAM hacim oranının gerilmeler üzerine etkisi, a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})	55
Şekil 3.31 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, PV hacim oranının gerilmeler üzerine etkisi, a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})	56

Şekil 3.32 Eğilme momenti (M) altındaki FDPDM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, PV hacim oranının gerilmeler üzerine etkisi, a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})	57
Şekil 3.33 Yapıştırma tabakası üzerinde normalize edilmiş soyulma gerilmesi (σ_y) dağılımı (16 mm yapıştırma boyu ve 9.81 MPa düzgün yayılı çekme yükü için)	58
Şekil 3.34 Yapıştırma tabakası üzerinde normalize edilmiş kayma gerilmesi (τ_{xy}) dağılımı (16 mm yapıştırma boyu ve 9.81 MPa çekme gerilmesi için).....	58
Şekil 3.35 Yapıştırma tabakası üzerinde normalize edilmiş kayma gerilmesi (τ_{xy}) dağılımı a) Grafit hacminin etkisi, b) Grafik detayı A-A kesiti	59
Şekil 4.1 Yapıştırılmış plak panel geometrisi.....	62
Şekil 4.2 Kayma yüklemesi altında yapıştırılmış plak panel.....	63
Şekil 4.3 Yapıştırıcı tabakasında inklüzyon içeren plak panelin sonlu elemanlar modeli	64
Şekil 4.4 Yapıştırıcı, inklüzyon malzemesi ve yapıştırılan plakalardaki conta ve targe elemanlarının konumları	65
Şekil 4.5 Eleman tipleri, Solid 95, Conta174 and Targe170	66
Şekil 4.6 c/a oranının inklüzyon malzemeleri üzerine etkisi (c/a=0.125, c/a=0.5, c/a=1) a) mod 1, b) mod 2, c) mod 3, d) mod 4, e) mod 5.....	68
Şekil 4.7 c/a oranının burkulma yüküne etkisi, (c/a=0.125, c/a=0.5, c/a=1) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi.....	69
Şekil 4.8 c/a oranının burkulma yüküne etkisi, (c/a=1, c/a=1.5, c/a=2) a) mod 1, b) mod 2, c) mod 3, d) mod 4, e) mod 5.....	70
Şekil 4.9 Inklüzyon malzemesinin burkulma yüküne etkisi, a) mod 1, b) mod 2, c) mod 3, d) mod 4, e) mod 5	71
Şekil 4.10 c/a oranının burkulma yüküne etkisi, (c/a=1, c/a=1.5, c/a=2) a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi.....	72
Şekil 4.11 c/a oranına göre burkulma yüklerindeki değişim, (c/a=1, c/a=1.5, c/a=2) a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi	72
Şekil 4.12 c/a oranına göre burkulma yüklerindeki değişim, (c/a=0.125, c/a=0.5, c/a=1) a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi	73
Şekil 4.13 a/c oranına göre burkulma yüklerindeki değişim, (a/c=0.125, c/a=0.5, c/a=1) a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi	73
Şekil 4.14 Delaminasyon şekline göre değişen kritik burkulma yükü a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi.....	74
Şekil 4.15 Delaminasyon şekline göre değişen kritik burkulma yükü a) $A_{del}/A_{adh}=0.04$, b) $A_{del}/A_{adh}=0.08$	75
Şekil 4.16 Yapıştırma kalınlığının burkulma yüküne etkisi a) inklüzyonsuz durum, b) cam inklüzyon içeren durum	76
Şekil 4.17 Yapıştırıcı tabakasında inklüzyon malzeme içeren tek bindirme bağlantısı...	78
Şekil 4.18 Yapıştırılan malzeme kalınlıkları oranı, t_o/t_i	79
Şekil 4.19 Yapıştırıcı tabakasında inklüzyon içeren tek bindirme bağlantısının sonlu elemanlar modeli.....	79
Şekil 4.20 Eleman Tipleri a) Plane 182 b) Conta 171 ve Targe 169.....	80
Şekil 4.21 Çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_o/t_i oranının U_x yer değiştirmesine etkisi a) 0.5, 0.75, 1, b) 1.25, 1.5, 1.75, 2.....	82

Şekil 4.22 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_o/t_i oranının U_y yer değiştirmesine etkisi a) 0.5, 0.75, 1, b) 1.25, 1.5, 1.75, 2	83
Şekil 4.23 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_o/t_i oranının Soyulma gerilmesi (σ_y) üzerine etkisi a) 0.5, 0.75, 1, b) 1.25, 1.5, 1.75, 2	83
Şekil 4.24 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_o/t_i oranının Kayma gerilmesi (τ_{xy}) üzerine etkisi a) 0.5, 0.75, 1, b) 1.25, 1.5, 1.75, 2	84
Şekil 4.25 Çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_o/t_i oranının von-Mises gerilmesi (σ_{von}) üzerine etkisi a) 0.5, 0.75, 1, b) 1.25, 1.5, 1.75, 2	85
Şekil 4.26 Yapıştırıcı tabakasında Cam-Epoksi inklüzyon içeren tek bindirme geometrisinde, t_o/t_i 'nin bağlantı boyunca oluşan gerilme dağılımlarına etkisi a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})	86
Şekil 4.27 Yapıştırıcı tabakasında Grafit-Epoksi inklüzyon içeren tek bindirme geometrisinde, t_o/t_i 'nin bağlantı boyunca oluşan gerilme dağılımlarına etkisi a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})	87
Şekil 4.28 Yapıştırıcı tabakasında Bor-Epoksi inklüzyon içeren tek bindirme geometrisinde, t_o/t_i 'nin bağlantı boyunca oluşan gerilme dağılımlarına etkisi a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})	87
Şekil 4.29 Delaminasyonlu tek bindirme bağlantısında, yapıştırılan malzeme kalınlığına göre değişen von-Mises gerilmesi a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi	88
Şekil 4.30 Delaminasyonlu tek bindirme bağlantısında, yapıştırılan malzeme kalınlığına göre değişen von-Mises gerilmesi a) $L_{del}/L_{yap}=0.04$, b) $L_{del}/L_{yap}=0.08$	89

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Malzeme özellikleri PAM 96/98 [119], [123].....	25
Çizelge 2.2 Malzeme özellikleri PV 60/65 [119], [123].....	25
Çizelge 2.3 Grafit dağılım yoğunlukları (% alan).....	27
Çizelge 4.1 Yapıştırıcı malzeme özellikleri, Loctite-Hysol 9464 [133].....	61
Çizelge 4.2 Yapıştırılan malzeme özellikleri, Çelik.....	61
Çizelge 4.3 Ortotropik malzeme özellikleri [138], [139].....	62
Çizelge 4.4 Yapıştırılmış plak panel ölçüleri.....	63
Çizelge 4.5 Yapıştırıcı malzeme özellikleri, FM73 [145].....	77
Çizelge 4.6 Yapıştırılan malzeme özellikleri, Titanyum.....	77

HETEROJEN ÖZELLİKLERE SAHİP YAPIŞTIRICI BAĞLANTILARININ ELASTİK GERİLME VE BURKULMA ANALİZİ

Mine USLU UYSAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Uğur GÜVEN

Son yirmi yılda, üstün özellikleri sebebiyle Fonksiyonel Derecelendirilmiş Polimerik Malzemelerin (FDPM) ileri teknoloji gerektiren uzay, havacılık, otomotiv ve askeri alanlarda kullanımının giderek arttığı gözlemlenmektedir. Böylece günümüzde FDPM'den yapılan yapıştırıcı bağlantılarındaki gerilme, burkulma halleri ile delaminasyon (delamination) oluşumlarının mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın modellenip, güvenilir yeni çözümler geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Doktora tezinde incelenen yapıştırıcı bağlantılar, son zamanlarda deneysel olarak geliştirilen yeni bir FDPM modeline dayanmaktadır. Deneysel olarak geliştirilen ve Bölüm 2'de sunulan FDPM modeli, epoksi reçine içerisine PAM 96/98 ve PV 60/65 grafit tozlarının %3, %6, %9 ve %12 hacim oranlarında eklenmesi ve savurma döküm yöntemiyle üretilmesi sonucunda elde edilmiştir. Derecelendirilmiş malzeme yapısı ışık mikroskopuyla incelenmiş ve elastisite modüllerinin belirlenmesinde görüntü işleme programı esas alınmıştır.

Tez çalışmasında, FDPM kullanılarak yeni tasarlanmış plaklardan oluşan sandviç yapıların burkulma davranışları ve yeni tasarlanmış kirişlerden oluşan tek bindirme bağlantıların gerilme davranışları üzerine odaklanılmıştır.

Bölüm 3.1'de düzlem içi kesme kuvveti, normal bası kuvveti ve yayılı yük altındaki, iki farklı bağlantı (noktasal desteklenmiş ve doğrusal desteklenmiş) koşulunda yeni geliştirilmiş FDPM modeline sahip sandviç yapının burkulma davranışı ayrıntılı olarak

incelenmiştir. Yapıştırılmış bağlantının burkulma davranışlarının incelenmesi sonlu elemanlar analizi kullanılarak yapılmıştır. Bu incelemenin temel amacı, kritik burkulma yük kapasitesini arttırmak için en uygun grafit tozu tipi ve hacim oranını belirlemektir.

Belirli bir bindirme uzunluğunda, iki tabakanın birleştirilmesiyle oluşan tek bindirme bağlantısı uygulamada en yaygın kullanılan yapıştırma bağlantı tipidir ve Bölüm 3.2'de yeni oluşturulan FDPM modeli bu bağlantı tipine de uygulanmıştır. Burada yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleri takviye malzemesi olarak grafit tozu kullanılarak iyileştirilmiş olan FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısının düzgün yayılı çekme yükü ve moment yükü altındaki gerilme davranışı incelenmiştir. Grafit türü ve hacim oranının yer değiştirmelere, kayma, soyulma ve von-Mises gerilmelerine etkisi araştırılmıştır.

Yapılan bu tez çalışmasında, yapıştırıcı bağlantılarında daha gerçekçi analizler yapılması için yapıştırıcı tabakanın heterojen özellikte olduğu gerçeği göz önüne alınmıştır. Heterojen yapıştırıcı tabaka, şimdiye kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak, içerisinde ortotropik inklüzyon (inclusion) yer alan homojen bir yapıştırıcı tabakası olarak tanımlanmıştır. Yapıştırıcı tabakasında inklüzyon bulunan kayma yüküne maruz yapıştırılmış plak bağlantıları ile düzgün yayılı çekme yüküne maruz inklüzyonlu tek bindirme bağlantıları Bölüm 4'te incelenmiştir.

Literatürde şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, yapıştırılmış plaklarda heterojen yapışkan tabakanın bağlantı stabilitesine etkisinin, özellikle de kayma yükü altındaki bağlantılar için yeterince incelenmediği görülmektedir. Bu eksiklik dikkate alınarak Bölüm 4.1'de, ortotropik inklüzyon içeren kayma yüküne maruz yapıştırılmış plak bağlantısı ele alınmıştır. Bağlantı boyunca tek bir yapışkan malzeme kullanılmış ve ortasında ortotropik inklüzyon yer almıştır. Bağlantıdaki yapıştırılan plaklar ise homojen izotrop özelliğe sahiptir. Inklüzyon bölgesi daha genel sonuçlar elde edebilmek için eliptik olarak seçilmiştir. Eliptik geometrinin (c/a) ve inklüzyon malzemesinin burkulma yükü üzerine etkileri incelenmiştir. Yapıştırılmış bağlantılarda, ortotropik özelliğe sahip üç farklı inklüzyon malzemesi, cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi olarak seçilmiştir. Yapıştırılmış plakların burkulma yükleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Aynı zamanda, analizlerde inklüzyon yakınlarında delaminasyon olasılığı da göz önüne alınmıştır. Delaminasyon şekli ve büyüklüğünün kritik burkulma yüküne etkisi ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Bölüm 4.2'de yapıştırıcı tabakalarında ortotropik inklüzyon içeren tek bindirme bağlantıların düzgün yayılı çekme yükü altındaki gerilme davranışları da analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada, yapışkan tabakalarında yine cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi olmak üzere üç farklı ortotropik inklüzyon içeren yapıştırıcı bağlantılarında, meydana gelen gerilmeler, inklüzyonun etkileri ve sebep oldukları delaminasyonlar incelenmiştir. Seçilen inklüzyon malzemesinin gerilme ve yer değiştirmeler üzerine etkileri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve analiz sonuçları literatürde ulaşılan sayısal sonuçlar ile karşılaştırılarak burada kullanılan modelin geçerliliği doğrulanmıştır.

Bu çalışmada yapılan tüm incelemeler sonunda sandviç bağlantılarda, PV 60/65 grafit tozunun reçine ile daha uyumlu olduğu, en yüksek kritik burkulma yükünün tüm yükleme koşullarında PV 60/65 sandviç panellerde ve %12 hacim oranında elde edildiği

görülmüştür. Benzer şekilde PV 60/65 grafit tozu ilave edilmiş tek bindirme bağlantılarında dayanımlarının PAM 96/98 grafit tozu ilave edilmiş bağlantılara göre daha fazla olduğu görülmüştür.

İnklüzyon içeren bağlantılarda yapılan incelemeler sonucunda, burkulma yük değerleri inklüzyon geometrisinin şekli dairesinden, farklı c/a oranlarına sahip eliptik şekle dönüştüğünde değişmiştir. Ayrıca, burkulma yükünü en kötü etkileyen delaminasyon şekli de c/a'nın 1 olduğu durumda gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları malzeme açısından incelendiğinde, burkulma yükleri en yüksek değerini bor-epoksi inklüzyon, en düşük değerini cam-epoksi inklüzyon için almıştır. Homojen izotrop yapıştırıcı tabakasına sahip plak panelin klasik burkulma yükünün, inklüzyon içeren plak panelin burkulma yükünden daima fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemeler (FDPM), Yapıştırıcı bağlantıları, Sandviç yapılar, Burkulma, Delaminasyon, Sonlu elemanlar analizi

**ELASTIC STRESS AND BUCKLING ANALYSIS OF ADHESIVELY BONDED
JOINTS WITH HETEROGENEOUS PROPERTIES**

Mine USLU UYSAL

Department of Mechanical Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Uğur GÜVEN

In the last two decades, it is observed that the usage of Functional Graded Polimeric Materials (FGPMs) has gradually increased in aerospace, aviation, automotive, and military areas required the advanced technologies due to their unique features. Therefore, nowadays, it is in need of modeling of the buckling behaviour, tensile strength, and delamination of the adhesively bonded joint designed from FGPMs as real as possible and developing new reliable solutions.

The adhesively bonded joints investigated in this Ph.D. Dissertation are based on a new FGPMs model developed experimentally in recent years. The experimentally developed FGPMs model presented in Section 2 was obtained by adding PAM 96/98 and PV 60/65 graphite powders to the epoxy resin in the volume ratios of 3%, 6%, 9%, and 12% and by using centrifugal casting method. The structure of functionally graded material was investigated by light microscope and the elasticity modulus of adherents were predicted based on the image processing program.

In this Ph.D. Dissertation, it is focused on the buckling behaviours of sandwich structures formed by new designed FGPM plates and on the tensile behaviours of single lap joints formed new designed beams.

In Section 3.1, the buckling behaviours of new designed FGPM sandwich plates subjected to in-plane shear force, in-plane normal compression force, and out-of-plane distributed load were investigated in detail in case of two connection concepts (point support concept and linear support concept). The investigation of the buckling behaviours of the bonded joints were performed by using finite element analysis. **The**

main objective of this investigation is to determine a rational graphite powder type/volume ratio to increase the critical buckling load capacity.

Single lap joint formed by joining of two layers at certain lap length is a adhesively bonded type used commonly in applications and in Section 3.2, a new designed FGPM model was also applied to this adhesively bonded type. In Section 3.2, the stress behaviours of single lap joint subjected to tensile load and moment were investigated. This single lap joint was formed by FGPMs whose mechanical properties were improved by using graphite powder as reinforcement material. The effects of graphite type and volume ratio on the the displacements, shear stresses, peel stresses, and von-Mises stresses were examined.

In this Ph.D. Dissertation, it is considered that the adhesive layer is heterogeneous to perform more realistic analyses in adhesively bonded joints. The heterogeneous adhesive layer was modelled as a homogeneous adhesive layer having orthotropic inclusion different from previous studies. The adhesively bonded plates having inclusion under shear loading and single lap joints having inclusion under tensile load were investigated in Section 4.

In the previous studies up to now in literature, the effect of the heterogeneous adhesive layer of the bonded plates on the bonded stability have not been investigated, in particular for the sandwich structures under in plane shear loading. Due to considering this lack of knowledge, in Section 4.1, the adhesively bonded plate having orthotropic inclusion under shear loading was examined. Through the bond length, one adhesive material was used and an orthotropic inclusion was located in the middle of it. In the adhesively bonded joint, the adherent plates have homogeneous isotropic material properties. The inclusion region was selected as elliptical to obtain more general results. The effects of elliptical geometry (c/a) and inclusion material on the buckling load were investigated. Three different orthotropic inclusion materials were chosen as glass/epoxy, graphite/epoxy, and boron/epoxy in the adhesively bonded joints. The buckling loads were analyzed by using finite element method. Besides, the possibility of delamination in vicinity of the inclusion was considered in the analyses. The effects of the delamination shape and magnitude on the critical buckling load were presented in detail.

In Section 4.2, the stress behaviours of the single lap joint having orthotropic inclusion in the adhesive layer under tensile load were also analyzed. In these analyses, the stress distributions, inclusion effects, and delaminations were investigated in the adhesive joints consisting once again three different orthotropic inclusion materials as glass/epoxy, graphite/epoxy, and boron/epoxy in the adhesive layers. The effects of selected inclusion materials on the stresses and displacements were analyzed by finite element method and the analyses results were validated by comparing the numerical results in literature.

According to the investigations performed in this Ph.D. Dissertation it was observed that PV 60/65 graphite powder was more compatible with resin and the maximum critical buckling load was obtained in PV 60/65 sandwich plates by using 12% volume ratio under all loading types at sandwich structures. Similarly, it was seen that the

strength of the single lap joint reinforced PV 60/65 graphite powder was higher than that of the single lap joint reinforced PAM 96/98 graphite powder.

In consequence of the investigations performed adhesively bonded joints having inclusion, the buckling loads were affected when the inclusion geometry was changed from a circle to different elliptical shapes with an aspect ratio of c/a . Moreover, the delamination shape which worst affected the critical buckling load was observed in case of c/a of 1. When the results were evaluated in terms of material, the maximum buckling loads were obtained for the boron/epoxy inclusion case and the minimum buckling loads were determined for glass/epoxy inclusion case.

Keywords: Funtional graded polimeric material (FGPM), Adhesively bonded joint, Sandwich structure, Buckling, Delamination, Finite element analysis

1.1 Literatür Özeti

Bu tez çalışmasında, esas olarak fonksiyonel derecelendirilmiş yapıştırıcı bağlantıları ele alınmıştır. İki farklı malzemedan meydana gelen, kademeli bir mikroyapıya sahip, mekaniksel ve fiziksel özellikleri sürekli olarak değişen malzemeler, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) olarak tanımlanır [1],[2]. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, farklı malzemelerin üstün özelliklerini birleştirme düşüncesiyle malzeme teknolojisinde doğmuş bir fikirdir. FDM'lerde iki farklı malzemenin, tek bir yapıda uyumlu şekilde çalışabilmesi için malzemeler arası geçişler düzgün ve sürekli bir değişim içerisindedir. Bu sayede ana malzemenin yapı özellikleri, sabit sayısal değerler olarak değil, fonksiyonlar ile ifade edilmektedir. FDM kavram olarak ilk defa Ulusal Havacılık Laboratuvarı'ndan Koizumi ve arkadaşları tarafından ısı bariyer oluşturmak amacıyla Sendai, Japonya'da önerilmiştir [3], [4].

Günümüzde bu malzemelerin geliştirilmesine yönelik çalışmaların artması ile paralel olarak polimer malzemelerin kullanıldığı alanlarda FDM tercihi giderek artmaktadır. Polimer malzemeler, çeşitli mühendislik alanlarında hafif olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri ve kolay üretilmeleri gibi özelliklerinden dolayı sıkça tercih edilirler. Ancak polimer malzemeler metal ve seramik malzemelere göre daha düşük elastisite modülü ve dayanıma sahiptirler. Düşük dayanıma sahip polimer malzemelerin mekanik özellikleri, takviye malzemesi ilave edilerek arttırabilir [5]-[9]. Polimer malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesiyle, şimdiye kadar bilinen malzeme özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip malzeme elde etmek, birçok çalışmanın ana

gayesidir [10]-[15]. Malzeme özelliklerini geliştirmek için kademeli bir mikro yapı oluşturmak, yani fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzeme (FDPM) üretmek, oldukça etkin bir yöntemdir. FDPM'deki mikro yapı değişimi malzemeyi, homojen malzemedan ve geleneksel kompozit malzemedan farklı kılar. FDPM içerisinde farklı işlemlere sahip farklı mikro yapı fazları vardır ve FDPM'nin genel yapısı, bu farklı fazlardan dolayı derecelendirilmiş özellik gösterir. Bir fazdan diğer faza malzeme özellikleri düzgün ve sürekli bir değişim içerisinde olduğundan, ara yüzey problemleri ortadan kalkar. Bu derecelendirilmiş malzemeler, dayanıklılık gerektiren uygulamalarda, homojen izotrop ve kompozit malzemelere göre birçok üstünlüğe sahiptir [16], [17]. Polimer malzemelerde de mikro yapıdaki derecelendirme, ağırlık, tokluk, yüzey sertliği, soyulma direnci ve darbe direnci gibi önemli malzeme özelliklerinde en uygun birleşimi sağlamak için yapılır. Fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemeler, epoksi reçine içerisine çeşitli takviye malzemeleri örneğin, karbon fiber [18]-[20], silikon karbit [21], [22], cam [23] ve poliüretan [24] ilave edilerek üretilebilirler. Bu fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemeler, üstün mekanik, ısı, elektrik ve manyetik özelliklere sahiptir. Örneğin, Kaushik vd. [25] çalışmalarında, elektromekanik sensörlerde kullanılmak üzere, epoksi reçine içerisine %5 ile %25 grafit tozu ilave edilerek basınçlı döküm yöntemiyle, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretmişler ve yeni oluşturdukları FDPM'nin mekanik ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen malzemenin çekme dayanımının ve elastisite modülünün, takviye malzemesi hacim oranı ile arttığını belirtmişlerdir. Yasmin vd. [26], çoklu sızdırmazlık yapısına sahip gemi gövdesinde kullanılan kabuklar için, epoksi reçine içerisine %2.5 ve %5 hacim oranlarında grafit tozu ilave ederek yeni bir malzeme üretmişlerdir. Kullanılan grafit tozu hacim oranının, üretilen yeni malzemenin viskoelastik ve ısı özelliklerine üzerine etkisini incelemişlerdir.

Bafekrpour vd. [27], yaptıkları deneysel çalışmada, fenolik reçine içerisine karbon fiber ilave ederek hazırlanmış malzeme üzerinde toz metalurjisi ve basınçlı döküm yöntemini birlikte kullanarak FDPM'den meydana gelen kiriş üretmişlerdir. FDPM'den yapılan kirişteki yerdeğiştirme değerlerini ve normal gerilme davranışını, üç farklı sınır koşulu altında (basit mesnet-basit mesnet, ankastre mesnet-ankastre mesnet, ankastre mesnet-serbest uç) ve iki farklı yükleme durumu için (tekil yük-yayıllı yük)

incelemişlerdir. Kullandıkları takviye malzemesi olan karbonun hacim oranın, FDPM'den meydana gelen kirişteki yerdeğiştirme ve normal gerilme üzerine etkilerini incelemişlerdir. Rafiee vd. [28] takviye malzemesi olarak grafen kullandıkları deneysel çalışmalarında epoksi/grafen kompozit kirişleri incelemişlerdir. Yanlızca %0.1 ağırlık oranındaki grafen ilavesinin kritik burkulma yükünü %52 arttırdığını saptamışlardır.

Polimerik malzemelerden meydana gelen yapıştırma bağlantıları hem yapı hem de malzeme mühendisliğinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Havacılık, otomobil, biyomedikal gibi birçok endüstriyel alanda mühendislere hafif ve dayanıklı bağlantı tasarımı imkânı verir [29]. Bunun yanında, polimerik malzemelerin derecelendirilmesi ile meydana gelen FDPM'lerden oluşan yapıştırılmış bağlantılarla, uzay ve havacılık endüstrisinde [18], [21] (uçak, mekik gövdelerinde yer alan tabakalı bağlantılarda), kara ve deniz taşımacılığında [26] (otomotiv ve gemi iskeletlerindeki birleşim yerlerinde), elektronik ve bilgisayar alanında [25] (manyetik depolama birimlerinin yüzeylerinde, elektromekanik sensörlerde) ve tıp alanında (biyopolimerlerden oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş ara tabakaların kullanıldığı kalça, omuz ve diz eklemlerinde) karşılaşılabılır [22].

Metallerin birleştirilmesinde civata, perçin ve değişik kaynak teknikleri kullanılmasına rağmen, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde civata, perçin ve kaynak tekniklerinin kullanılması malzeme dayanımını önemli ölçüde azaltır. Dolayısıyla fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılan bağlantılarda, yapıştırma teknolojisinin geliştirilmesi önem taşır.

Adams vd. [30] yapıştırma bağlantılarında gerilme dağılımlarının diğer geleneksel bağlantı tiplerine; örneğin civata ya da perçin bağlantılarına göre daha düzgün olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum, yük taşıyan küçük alanlarda çalışmaya imkân verir. En yaygın olarak kullanılan yapıştırma geometrileri, sandviç ve tek bindirme bağlantı geometrileridir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM)'den oluşmuş sandviç yapılar ve onların analizleri üzerine yapılan çalışmalar [31]-[34] literatürde yer almaktadır. Genel olarak, kompozit bir sandviç yapı, bir çekirdek ve onu çevreleyen izotropik ya da anizotropik malzemeden yapılmış en az iki tabakadan oluşmaktadır [35]. Sandviç yapıda tabakalar

film yapıştırıcı tabaka yardımıyla birleştirilirler. Yapıştırılan tabakalar aksel yükleri taşımak için kullanılırken, yapıştırıcı tabaka kayma yüklerini taşımada önemli rol oynar. Sandviç yapıda kullanılan malzemeler çeşitlilik gösterebilir, tipik olarak yapıştırılan tabakalar alüminyum alaşımları, titanyum, yüksek mukavemetli çelikler, ya da çok katmanlı kompozit plakalar olabilir [36], [37]. Ancak, FDPM'ler düzlem gerilmelerine karşı daha uygun olduğu için bu malzemelerin yerini alır.

Düzlem gerilmelerin yüksek olduğu durumlarda, yapıştırılan malzemedede akma, dayanım ve stabilitede azalma meydana gelebilir [38]. Bu yüzden sandviç yapıda yapıştırılan tabakanın malzemesinin seçimi oldukça önemlidir. Uygun malzemedenden meydana gelmiş sandviç yapılar yüksek sertlik ve çok yönlü tasarım özellikleri, uygun ağırlık ve dayanım özelliklerine sahip olduklarından, birçok uygulama alanında tercih edilir. Fakat sandviç yapılar sahip oldukları düşük hasar toleransları ve yapıştırıcı hataları sonucu oluşan delaminasyon bölgelerinden dolayı dezavantajlıdır. Sandviç yapıda delaminasyon hataları, kayma gerilmeleri ve normal gerilmelerin birlikte yarattığı artık gerilmelerden dolayı oluşabilir. Sandviç kompozit yapılarda hata tahmini homojen izotrop malzemedenden meydana gelmiş yapı ile karşılaştırıldığında oldukça karmaşık ve zordur [37], [39]. Sandviç yapı incelemelerinde dikkatle ele alınacak birçok ayrıntı vardır ve bir sandviç yapının tasarımı her durum için hata yüklerinin ve muhtemel hata modlarının tanımlanması ile başlar [40].

En yaygın hata modları, yapıştırılan malzemedeki gerilme ve akma hataları ve en önemlileri arasında da burkulma hataları yer alır. Sandviç panelin oluşturulmasında yapının rijitliği ve burkulma davranışları göz önüne alınmalıdır. Genellikle dayanım hataları yerel düzeyde iken, her bir katman kendi hata moduna sahiptir [36]. Burkulma ile meydana gelen kalıcı şekil değişimleri polimerik malzemedenden yapılmış sandviç bağlantılar için [41], [42] incelenmiştir. Ayrıca, bu konuda yarı analitik bir metot geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır [43]. Söz konusu literatürde görüldüğü gibi, pek çok araştırmacı farklı malzeme modelleri, yük ve sınır koşulları altında polimerik sandviç plakaları incelemiştir.

Kesme yükünden kaynaklanan kayma gerilmesi altında homojen izotrop cam sandviç yapıların burkulma davranışlarını inceleyen ilginç bir deneysel çalışma literatürde mevcuttur [44], [45].

Hem etkin hem de basit bir bağlantı çeşidi olan tek bindirme bağlantıları üzerine yapılan çalışmalarla literatürde sıklıkla karşılaşılır. Bu bağlantıların analizlerinde, genel olarak bağlantıdaki yapıştırıcı tabaka özellikleri homojen izotrop kabul edilmiştir. Bu kabul doğrultusunda bağlantı dayanımı, kesme ve soyulma gerilmelerinin dağılımı hesaplanır. Ancak, daha etkin, daha sağlam ve hafif bağlantıların geliştirilebilmesi için, bağlantıların mümkün olduğunca gerçeğe yakın halleri dikkate alınmalıdır [46]. Literatürde, yapışkan bağlantılar için birçok metot önerilmiştir [47]-[53].

Adams [47] kompozit malzemede tek bindirme bağlantı şeklini analitik ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışmasında, çeşitli yükleme durumları için bağlantı dayanımını tahmin etmeye çalışmıştır. Adams vd. [48] yapıştırıcı bağlantılarında yapılacak geometrik değişikliklerin gerilme dağılımları üzerindeki etkisini sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelemiştir.

Adams [49] çalışmasında, yapışma yüzeyinin değiştirilmesiyle yük transferinin düzenli bir şekilde yapılabileceğini ve böylece gerilme yoğunluklarını azaltarak bağlantı dayanımının arttırılabileceğini belirtmiştir. Bağlantı dayanımını ve tabaka üzerine etki eden yükün tabakalar arası nasıl taşındığını araştırmıştır. Bunun yanında, tabaka içindeki zayıf bölgenin bozulması ile erken bozulmanın nasıl oluştuğunu çalışmasında detaylı bir şekilde anlatmıştır. Adams vd. [50]'nin yapışmayı etkileyen parametrelerin yapışma mukavemeti üzerine etkileri deneysel olarak inceleyen çalışması bu alanda yapılan önemli çalışmalar arasında yerini alır.

Tek bindirme bağlantısı için iki farklı model önerilir, yapıştırılan malzemede oluşan şekil değiştirmelere göre biri bir boyutlu çubuk yaklaşımı diğeri ise bir boyutlu kiriş yaklaşımıdır. Her iki modelde de yapıştırılan malzemedeki kayma şekil değiştirmeleri, aksenal yöndeki şekil değiştirmelerle karşılaştırıldığında küçük olması sebebiyle ihmal edilmiştir. Yalnız ileride bu durumun ihmal edilmediği çalışma Tsai vd. [51] tarafından yapılmıştır.

Bir boyutlu çubuk yaklaşımında da, model yapıştırılan malzemenin kalınlığı boyunca aksel şekil değiştirmelerinin sabit kaldığı ve yapıştırılan malzemede oluşan basit kayma şekil değiştirmesini de içeren bir çubuk gibi modellenir. Bu yöntem tek tesirli bindirme bağlantı mekaniğinin ve ilgili parametrelerin incelendiğı en kolay yoldur [52].

Bir boyutlu kiriş yaklaşımında ise, ilk olarak Goland ve Reissner [53] çözümlerinde yer alan yapıştırılan malzemeler kiriş gibi modellenmiştir. Yapıştırılan malzemedeki yanal ve kayma şekil değişimleri yapıştırıcı tabakasındaki şekil değiştirmelerle karşılaştırıldığında önemsizdir. Bununla birlikte yapıştırılan malzemedeki yanal ve kayma şekil değişimleri ihmal edilebilecek kadar önemsiz değilse analizde her iki bileşenin de dikkate alınması gerekir. Bu durum ise iki boyutlu analizin yapılmasını zorunlu kılar. İki boyutlu elastik analiz oldukça komplekstir. Bunun yerine, yapıştırıcı malzemedeki kayma şekil değiştirmelerini de içeren bir boyutlu kiriş analizi önerilir. Yapıştırılan malzemedeki kayma şekil değişimleri sadece yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımlarından etkilenip, soyulma gerilmelerinden etkilenmeyeceğinden, yapıştırıcıdaki gerilme analizi, kayma gerilmelerinin belirlenmesi ile sınırlı olacaktır [51].

Sawa ve Uchida [54], tek bindirme bağlantılarında ara yüzeydeki kayma ve soyulma gerilmeleri üzerine yapıştırıcı tabakası kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak ara yüzeyde serbest uçlara yakın bölgede oluşan gerilmelerin yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla arttığını görmüşlerdir. Bu ara yüzeyde oluşan gerilmelerin yapıştırıcı kalınlığının belirlenmesinde önemli rol oynadığını belirtmişlerdir.

Ciba [55] çalışmasında, kesme kuvvetinin, yapıştırıcı kalınlığı arttıkça azaldığını belirlemiştir. Çalışmasında, yapıştırıcı ile malzeme arasındaki bağ kuvvetleri, adhezyon kuvvetleri, yapıştırıcının kendi içerisindeki bağ kuvvetlerinden, kohezyon kuvvetlerinden, daha fazladır. Sıcak yapıştırıcı olarak kullanılan epoksi ile yapılan deneysel çalışmasında 0.1-0.5 mm yapıştırma boşluğu arasında kesme kuvvetinde düşme gözlenmiştir. Çok ince yapıştırma kalınlıklarında ise yapıştırıcının bütün yüzeylerle teması mümkün olmayabilir. Bunun için yapıştırma bağlantılarında yapıştırma alanının bütünüyle kullanıp kullanılmadığı göz önüne alınmalıdır.

Basitleştirilmiş tek bindirme bağlantı modelinin klasik elastisite teorisi kullanılarak yapılan çözümü Shiun-Chuan Her [56] tarafından ele alınmıştır. İncelenen çalışmada üç önemli kabul yapılmıştır. İlki, yapışkandaki kayma gerilmesi yapışkan kalınlığı boyunca değişmemektedir. İkincisi, yapıştırılan malzemelerdeki aksenal gerilmeler malzeme kalınlıkları boyunca değişmemektedir. Üçüncüsü, yapışkan ve yapıştırılan malzemeler lineer elastiktir ve bağlantı ucundaki eksantrik yüklemekten kaynaklanan moment ihmal edilmiştir. Bu kabullerle yapılan analitik çözüm ve parametrik inceleme çalışmalarında verilmiştir.

Literatürde yer alan [47]-[56]'daki çalışmalar yapışkan malzemenin özelliklerinin araştırıldığı çalışmalara öncülük etmiştir.

Bermejo [57] çalışmasında, yapışkan bağlantı kuvvetini doğru olarak tahmin edebilmeyi amaçlamıştır. Bunun için yaptığı deneysel çalışmasında, yapışkanla ince tabakalar birbirlerine yapıştırılmıştır. Tabakalar arasındaki bir yapışkanın, yığın malzeme şeklindeki yapıştırıcıyla karşılaştırıldığında farklı davranması beklenmektedir. Yükleme altında, yapışkan tabakadaki hata bölgesi büyüklüğü, genellikle tabakanın kalınlığından daha büyük olduğunu saptamıştır. Aynı zamanda yaptığı deneylerle, yapıştırıcı bağlantılarında özellikle kesme ve soyulma yüklemeleri birlikte uygulandığında delaminasyonların sıkça görüldüğünü göstermiştir.

Khalili vd. [58] yaptıkları bu çalışmada, kullanılan polimer kompozit malzemenin ısı ve mekanik özelliklerinin, kompozitin içine kil (nanoclay) ilave edilerek etkin bir şekilde iyileştirilebileceğini kanıtlamışlardır. Yapılan çalışmada, statik ve dinamik yükleme altında tek bindirme geometrisinde yer alan kil ilave edilmiş yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tayini üzerinde durulmuştur. Epoksi reçineye %1, %3 ve %5 oranlarında kil ilave edilmiştir. Kil parçaları reçine içinde karıştırıcı aygıtla karıştırılmış ve kil parçaları ultrasonik cihaz kullanılarak dağıtılmıştır. Yapıştırılacak cam-elyaf kompozit malzeme üretilmiş ve yapışkan bağlantının özellikleri incelenmiştir. Güçlendirilmiş yapışkanın kesme yükü altındaki gerilme özellikleri incelenmiştir. Aynı zamanda bağlantı yeri Charpy darbe testine maruz bırakılmıştır. %1 kil içeren yapışkan bağlantının maksimum gerilme kuvveti gösterdiği ve %3 kil içeren bağlantının ise en yüksek Charpy darbe enerjisi değerine sahip olduğu görülmüştür.

Chen vd. [59] yaptıkları çalışmada, yapışkanda normal gerilme ve soyulma gerilmesinden ziyade yanal kayma gerilmesi üzerinde durulması gerektiğini savunmuşlardır. Böylece, yapışkanın kayma gerilmesinin doğru olarak bilinmesi zorunludur. Bu çalışma, üniform olmayan kayma gerilme dağılımlarının azaltılması ve yerel eğilmeye maruz kalan numunenin soyulma direncine karşı en uygun geometrisinin belirlenmesine yönelik bir araştırmadır.

Castagnetti vd. [60] yaptıkları çalışmada, üniform gerilme dağılımlarına karşı ince yapışkan tabakaların mekanik özelliklerinin ölçülmesini, çalışma koşulları altındaki yapışkan davranışının bilinmesi açısından önemli olduğunu belirtmişlerdir. İnce tabakalı ucuca yapıştırılmış bağlantılar ve burulma yükü etkisi, genellikle yeterli üniform kesme gerilmesinin olduğu bölgelerdeki yapıştırıcının davranışını belirlemek için kullanılmıştır. Aynı geometrideki aksenal yük uygulamaları, bağlantının güçlü yoğunluklu yapışkanla yapıştırılmamasından dolayı üniform olmayan gerilme dağılımlarının oluşmasını sağlamaktadır. Bu gerilme yoğunluğu, yapışkanın ve yapıştırılan malzemenin farklı rijitlikte olmasından, üniform gerilme altındaki yapışkanın test edilmesinde tehlike yaratmaktadır. Yapılan bu çalışmada aksenal gerilme, kesme gerilmesi ve burulma altındaki gerilme dağılımları etkisindeki bağlantı geometrisi incelenmektedir.

Yapıştırıcı bağlantıları eğilmeye de maruz kalabilirler. Liu ve Sawa [61] eğilme momentine maruz farklı yapıştırılan malzemeler kullanılarak yapıştırılmış tek bindirme bağlantısında elastisite teorisini kullanarak düzlem şekil değiştirme durumu için gerilme analizi yapmışlardır. Bu çalışmalarının sonucunda yapıştırılan malzemelerin elastisite modülü arttıkça bağlantı dayanımında artışı gözlemlemişlerdir.

Yapıştırıcı olarak epoksi reçine kullanılan çalışmada [62] maksimum moment taşıma kapasitesi, yapıştırma kalınlığı 0.05-0.15 mm olan bağlantılarda elde edilmiştir. Yapıştırma kalınlığı yükseldikçe moment taşıma kapasitesi azalmıştır. Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırılacak yüzeylerin çok parlak olmaması gerektiği, çok parlak yüzeylerde pürüzlülüğün kama etkisinin ortadan kalktığı ve yüzey pürüzlülüğünün $R_a=0,8-3,2$ μm aralığında olması gerektiği bu çalışmada belirtilmiştir.

Ichikawa vd. [63] yaptıkları çalışmada basamak tipi bağlantı yöntemiyle yapıştırılmış farklı malzemelerin moment altındaki gerilme dağılımlarını üç boyutlu sonlu elemanlar

yöntemi kullanarak analiz etmişler ve yapıştırma metodunu optimize edebilmek için bazı faktörlerin etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar yapışkan ara yüzeyinde oluşan maksimum gerilme ve Elastisite modülü değerlerini bulmuşlardır. Bu çalışmada yapıştırma kalınlığı, kademe numaralarının artmasıyla düşmektedir. Ayrıca bağlantı gerilmesi, ara yüzey gerilme dağılımları elde edilerek de bulunmuştur. Sonlu elemanlar metodunun hesabını doğrulamak için deneylerle bağlantı gerilmeleri ve arayüzey gerilmeleri ölçülmüştür. Sayısal hesapların, deneysel sonuçlar ile örtüştüğü görülmüştür. Farklı malzemelerin yapıştırılmasındaki bağlantı gerilmesinin, benzer malzemelerin yapıştırılmasıyla oluşan bağlantı gerilmesinden daha küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Magalha vd. [64] yaptıkları bu çalışmada, tek bindirme kompozit bağlantıların iki boyutlu sonlu elemanlar metodu ile analizini sunmuştur. Katı modellemede, izometrik sekiz düğüm noktası ile uyumlu altı ara yüzey düğüm noktası seçilmiştir. Sonlu elemanlar ara yüzeyi yapışkanla yapıştırılan yüzey arasına ve yapışkanın farklı yönlü katmanları arasına uygulanmıştır. Ara yüzeylerde çalışmanın amacı, geleneksel sonlu elemanlar metodu ile belirlenememiş olan ara yüzey ile farklı malzemeler arasındaki gerilme dağılımlarını elde etmektir. Normal, kesme ve soyulma gerilmeleri, malzemenin lineer elastik, bağlantı geometrisinin ise lineer olmadığı durum için analiz edilerek bağlanan ara yüzey boyunca hesaplanmıştır. Sonuçlar, yapıştırma uzunluğunun yanında, yapıştırma kalınlığı boyunca da önemli gerilme değişmelerinin olduğunu gösterir. Bu gerilme yoğunluğunun tek katlı kompozit malzemede meydana getirebileceği hasarlar ayrıca tartışılmıştır.

Kim vd. [65], yaptıkları çalışmada tek bindirme kompozit bağlantıların hata tahmini için bir yöntem sunmuşlardır. Sunulan bu yöntemde hem yapıştırıcı, hem de bağlantı hattı hataları göz önüne alınmıştır. Yapıştırıcının elastik-plastik modeli ve delaminasyon hata ölçütü sunulan yöntemde kullanılmıştır. Yapışkan bağlantılarda, hata modu ve bağlantı dayanımları sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Sayısal araştırma sonuçları temel alındığında, uygun bağlantı koşulları bulunmuş ve yeni bağlantı dayanım arttırma teknikleri önerilmiştir. Önerilen tekniğin bağlantı dayanımını arttırmada önemli bir etkisi olduğu deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Fessel vd. [66] yaptıkları çalışmada, kesme kuvveti altındaki yapıştırılmış metal ve kompozit bağlantıları ele almışlardır. Çalışmalarında, kesme kuvvetinden kaynaklanan kayma gerilmesi değerlerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak saptamışlardır.

Kwon vd. [67] öngerilme içeren yapışkanla bağlanmış kompozit malzemedeki gerilme değerlerini deneysel olarak ölçmüşlerdir. Yapıştırma kuvvetinin artmasının başlangıç yapıştırma uzunluğuna dikkate değer bir şekilde bağlı olduğu fakat malzemenin genişliğine az bir oranda bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Örneğin; yapıştırma kuvvet direnci bağın üst üste gelme boyutu ile doğru orantılı olarak artmamıştır. Daha yüksek eğilme rijitliğine sahip modellerde belli bir şekilde yapışma zorlanması meydana gelmiştir.

Goglio vd. [68]'nin gerçekleştirdikleri bu çalışma, yapışkan bağlantılarda elastik gerilmenin ve yapışkan özelliklerinin incelendiği birçok çalışmaya öncülük etmiştir. Yapışkan bağlantıları üzerine yapılan incelemelerde, temel amaç ara yüzey gerilme yoğunluklarının en uygun geometri koşullarıyla azaltılmasıdır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, yapıştırılan malzemeye yiv açılması ya da yapışkan kusturulması gibi çeşitli geometrik detaylarla ilgili problemlerin çözümüne yeni bir yaklaşım getirmişlerdir.

You vd. [69] yapıştırılmış alüminyum bağlantılarda, yapıştırılan ara yüzey boyunca yapışkan boşluklarındaki gerilme dağılımlarını sonlu elemanlar metodu kullanarak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar metodunun sonuçları göstermektedir ki, bağlantının en son yüklemesindeki yapıştırma boşluğunun etkisi, boşluk boyunun artması kadar küçülür. Bu durum yapıştırma uzunluğu 12 mm'den daha az olduğu zamanda yapılan, deney sonuçlarıyla desteklenmiştir.

Literatürde, birçok metot önerilmiştir [1]-[69], fakat hiçbiri yapıştırılmış bağlantıdaki yapıştırıcı tabaka üzerinde üniform gerilme dağılımını ve dolayısıyla üstün bağlantı dayanımını elde edememiştir. Bağlantı dayanımı ancak, yapıştırılan malzemenin geometrisi modifiye edilerek, yapışkan geometrisi değiştirilerek, birden fazla yapıştırıcı kullanılarak ya da fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) kullanılarak arttırabilir.

Birden fazla yapıştırıcı kullanımı ile yapıştırıcı bağlantısının mekanik özellikleri arttırabilir. Bu teknikte, rijit ve güçlü yapıştırıcı yapışkan bağlantının ortasında yer alırken, esnek ve sünek yapıştırıcı bağlantının sonunda yer alır [70]-[73]. Bu durum,

bağlantıdaki gerilme dağılımının daha düzgün olmasını ve dolayısıyla bağlantı dayanımının tek bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış yapıdan daha yüksek olmasını sağlar [72], [74]-[78]. Bu yaklaşım teorik olarak çokça ele alınmasına rağmen, bağlantı dayanımının dikkate değer bir şekilde arttığını gösteren deneysel çalışmalar sınırlı sayıdadır.

Fitton ve Broughton [72], yapıştırıcıdaki elastisite modülü değişiminin, gerilme yoğunluğu, özellikle de soyulma gerilmesi yoğunluğunu azalttığını hem teorik hem de deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Ayrıca çalışma, değişken elastisite modülünün bağlantı dayanımını arttırdığını ve hata modunu değiştirdiğini de gösterir.

Silva ve Adams [79] metal ile kompozit yapıştırıcı bağlantılarını iki çeşit yapışkan kullanarak hem teorik hemde deneysel olarak incelemişlerdir. Özellikle ısı genleşme katsayıları farklı yapıştırıcı malzemelerinde, bağlantı dayanımında ciddi artışlar meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Marques ve da Silva [80], da Silva ve Lopes [81], Marques vd. [82] birden fazla yapıştırıcı kullanma tekniğinin, tek başına gevrek bir yapıştırıcı bağlantısıyla kıyaslandığında bağlantı dayanımının her zaman fazla olduğunu belirtmişlerdir. Eğer sünek yapıştırıcı, gevrek yapıştırıcı bağlantısından daha düşük dayanıma sahipse, birden fazla yapıştırıcı kullanma tekniği tercih edilebilir ve bu durumda bağlantı dayanımı tek bir yapıştırıcı uygulanmış durumdan daha fazladır.

Bu birden fazla yapıştırıcı kullanma tekniği, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tekniğinin kabaca bir uyarlamasıdır. Yapıştırıcı bağlantılarda yer alan yapıştırıcı tabakaların, homojen izotrop, heterojen ya da fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme özelliklerine sahip olabilecekleri bilinen bir gerçektir. Son yıllarda, yapıştırıcı tabakanın fonksiyonel derecelendirilmiş özelliğe sahip olduğu ilginç yeni çalışmalar yapılmıştır.

Carbas vd. [83] yapıştırıcı tabakanın düzgün bir gerilme dağılımına sahip olabilmesi ve derecelendirilmiş özellik kazanabilmesi için teknolojik bir süreçten geçmesi gerektiğini öne sürmüştür. Bu süreç, düşük ve yüksek sıcaklıklarda ardı ardına yapılan kütleme işlemine dayanır. Farklı derecelerdeki sıcaklıklarda yapılan kütleme işleminin yapışkan tabakaya dereceli bir rijitlik kazandırdığı daha önceki çalışmalarda da vurgulanmıştır [84], [85].

İdeal bir derecelendirilmiş yapıştırıcı bağlantısı, bağlantı boyunca yapışkan özelliklerini modifiye ederek, uniform gerilme dağılımını sağlamalıdır. Ganesh ve Choo [86] ve Boss vd. [87] tek bindirme bağlantısında, yapıştırılan malzemeyi fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme olarak seçmişler ve meydana gelen düzgün gerilme dağılımı sebebiyle bağlantı dayanımında %20 artış sağlamışlardır.

Ayrıca fonksiyonel derecelendirilmiş yapıştırıcı tabaka için kuvvet serileri dağılımına dayanan basit bir analitik çözüm yapılmış ve bu çözüm sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmıştır [85].

Fonksiyonel derecelendirilmiş yapıştırıcı tabakanın malzeme özelliklerinin belirlenmesi önemli bir konudur. Bu konuda derecelendirilmiş yapıştırıcı malzemenin sahip olduğu elastisite modülünün belirlenmesinde, Ravichandran ve Barasom [88] çalışmalarında lineer bir fonksiyon kullanırken, Erdogan ve Wu [89] ve Shim vd. [90] üstel bir fonksiyon kullanmışlardır. Nimje ve Panigrahi [91] ise T yapışkan bağlantı şeklini benimseyen çalışmalarında, yapıştırıcı malzeme özelliğini, hem lineer hem de üstel fonksiyon kullanarak tanımlamıştır. Bu çalışmalarda, yapıştırıcı malzemenin Poisson oranı, birçok çalışmada olduğu gibi [92] sabit kabul edilmiştir.

Yapıştırıcı bağlantıların birleştirilmesi önemli ölçüde dikkat gerektiren bir işittir. İmalat sırasında yapıştırılacak numunelerdeki yüzey hataları, yapıştırma sırasında yapıştırıcı bölgeye sıçrayan talaş çapak gibi istenmeyen maddeler yapışma kalitesini azaltır. Yapıştırılmış plak bağlantılarını inceleyen çalışmalar, bu tür kusurların bağlantı hatası ve delaminasyon başlangıçlarına sebep olacağını belirtmişlerdir. Sandviç yapılarda çekirdek ve plak arasındaki ayrılmalar, hava boşlukları, çekirdek içerisindeki inklüzyonlar ve yapışma boşlukları delaminasyona sebep olabilir [93].

Bununla birlikte, delaminasyon lamine kompozitlerde meydana gelen en önemli problemdir, yapı içindeki delaminasyon dayanımı büyük ölçüde azaltır. Delaminasyon içeren kompozit laminelerin davranışlarının tahmini için model geliştirilmesi son derece önemlidir. Moura vd. [94] kompozit katmanlarda yer alan delaminasyon öğelerini, üç boyutlu (3D) solid elemanlarla bağlantılı bir arayüzey olarak tanımlamışlardır. Çalışmalarında, delaminasyon ilerlemesi kırılma mekaniğine dayalı bir hasar modeli olarak modellenmiştir. Bu hasar modelinin detaylarının verildiği çalışma ve

delaminasyon ögesi için kullanılan sonlu elemanlar arayüzeyinin ayrıntıları diğer çalışmalarında [95], [96] yer alır. Literatürde yer alan [97], [98] çalışmalarda sonlu elemanlar metodu, delaminasyon içeren kompozit plakaların burkulma davranışlarını incelemek amacıyla kullanılmıştır. Hwang and Liu [97] farklı büyüklükte, birden çok delaminasyon için iki boyutlu (2D) model geliştirmiş, Kyoung vd. [98] farklı şekillerdeki delaminasyonlar için üç boyutlu (3D) modelleme yapmıştır. Kim ve Kedward [99] eliptik delaminasyona sahip lamine plakta, kritik burkulma yükünü tahmin etmek için analitik bir model geliştirmişlerdir. Chirica vd. [100] ankastre mesnetlenmiş eliptik delaminasyon içeren plakta, delaminasyonun burkulma davranışı üzerine etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır.

1.2 Tezin Amacı

Polimerik malzemelerden oluşan yapıştırıcı bağlantılarının kullanımı, hafiflik ve aynı zamanda yüksek dayanım gerektiren havacılık, otomobil ve biomedikal gibi birçok endüstriyel alanda giderek artmıştır. Bunun yanında son yirmi yılda endüstrilerdeki gelişmeler ve artan rekabet dolayısıyla, polimerik malzemelerin geliştirilmesi için, derecelendirme yapılarak daha üstün mekanik, ısıl, elektrik ve manyetik özelliklere sahip FDPM'ler üretilmiştir. Bu FDPM'lerden oluşan yapıştırıcı bağlantılarıyla, uçak ve mekik gövdelerinde yer alan tabakalı bağlantılarda [18], [21] otomobil/gemi iskeletlerindeki birleşim yerlerinde [26], manyetik depolama birimlerinin yüzeylerinde, elektromekanik sensörlerde [25], olmak üzere uzay ve havacılık endüstrisinde, kara ve deniz taşımacılığında, elektronik ve bilgisayar gibi birçok alanda karşılaşılmaktadır.

Bu tez çalışması, son zamanlarda deneysel olarak geliştirilen mekanik, elektrik ve manyetik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanarak yapılmış olan FDPM modelinin yapıştırıcı bağlantılarında kullanımını ele almaktadır. FDPM modeli epoksi reçine içerisine PAM 96/98 ve PV 60/65 grafit tozlarının %3, %6, %9 ve %12 hacim oranında ilave edilmesi ve savurma döküm yöntemiyle üretilmesi sonucu elde edilmiştir.

Bu doktora tezinde, yeni üretilen FDPM kullanılarak tasarlanmış plaklardan oluşan sandviç yapıların burkulma davranışları incelenmiştir. Ayrıca, yeni tasarlanmış kirişlerden oluşan tek bindirme bağlantılarının gerilme davranışları üzerine yapılan

incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, yapıştırılmış FDPM araştırmalarına katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

Ayrıca, yapıştırıcı bağlantıları üzerine yapılan çalışmalar arasında, heterojen özellikte yapıştırıcı tabakaları [83]-[85] ele alınmış, yapıştırıcı tabakadaki elastisite modülünün değişiminin bağlantıdaki gerilme yoğunluklarına [72], bağlantı dayanımına [80] etkileri incelenmiştir.

Yapıştırılmış bağlantılar üzerine yapılan çalışmalarda kesin sonuçlar elde etmek, yapışma tam ve eksiksiz yapılamadığından dolayı zordur. İmalat sırasında yapıştırılacak numunelerdeki yüzey hataları, yapıştırma esnasında oluşan hava kabarcıkları, yapıştırıcının önerilen sıcaklık ve süre koşullarında kullanılamaması, yapışma kalitesini azaltır. Yapıştırılmış bağlantıları inceleyen çalışmalar, bu tür kusurların bağlantı hatası ve delaminasyon başlangıçlarına sebep olacağını belirtmiştir.

Bu sebeple, sunulan doktora tez çalışmasında böyle kusurların dikkate alınması ve daha gerçekçi analizler yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, yapışkan tabaka heterojen özellikte, içerisinde ortotropik inklüzyon malzemesi bulunan homojen bir yapıştırıcı tabaka olarak modellenmiştir. Bağlantı dayanımına inklüzyon malzemesinin/geometrisinin etkisi incelenmiş ve inklüzyon yakınlarında delaminasyon olasılığı ele alınmıştır. Bağlantı dayanımını azaltan bu kusurların incelemesi sonucunda, yapıştırıcı tabakanın heterojen yapıda olduğu gerçeğinin literatürde yapılan araştırmalarda ele alınması gereken önemli bir unsur olduğu vurgulanmıştır.

1.3 Orjinal Katkı

Bu çalışmada, deneysel olarak üretilmiş yeni FDPM'lerin yapıştırıcı bağlantılarında kullanımı ilk kez ele alınmıştır. FDPM'lerin modellenmesi amacıyla, malzeme yapıları ışık mikroskopuyla incelenmiş ve elastisite modüllerinin belirlenmesinde görüntü işleme programı ve Halpin-Tsai denklemleri kullanılmıştır.

Daha önce literatürde yer almayan bu FDPM modeline bağlı kalarak oluşturulan sandviç bağlantılar, düzlem içi kesme kuvveti, normal bası kuvveti ve yayılı yük altında, iki farklı bağlantı (noktasal desteklenmiş ve doğrusal desteklenmiş) koşulunda incelenmiştir. Bu incelemenin literatüre temel katkısı, FDPM'den oluşan sandviç yapıda

kritik burkulma yük kapasitesini arttırmak için en uygun grafit tozu tipi/hacim oranı ve bağlantı koşulunun belirlenmesidir.

Yeni oluşturulan FDPM modeli düzgün yayılı çekme yükü ve eğilme momenti altındaki tek bindirme bağlantılarına da uygulanmış, bağlantılarda kayma, soyulma ve von-Mises gerilme dağılımları belirlenmiştir. Yapılan incelemede, oldukça yaygın kullanıma sahip tek bindirme bağlantılarına yeni geliştirilen FDPM modeli uygulanarak, yapıştırılmış FDPM incelemelerine katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

Ayrıca, bu tez çalışmasında, literatürde çoğu zaman homojen yapıda kabul edilen yapıştırıcı tabakanın, heterojen yapıya sahip olduğu gerçeğine dikkat çekilmiştir. Çalışmada heterojen yapıştırıcı tabaka, içerisinde ortotropik inklüzyon malzemesi bulunan homojen bir tabaka olarak modellenmiştir.

Heterojen yapışkan tabakanın bağlantı stabilitesine etkisini incelemek amacıyla, kayma yüküne maruz yapıştırılmış bir plak bağlantısı ele alınmıştır. Yapıştırıcı tabakasında cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi olmak üzere üç farklı inklüzyon malzemesi içeren yapıştırılmış plaklar, homojen izotrop özellikte seçilmiş ve inklüzyon bölgesinin şekli daha genel sonuçlar elde edebilmek için elips kabul edilmiştir. Elips geometrisinin ve inklüzyon malzemesinin burkulma yükünde önemli değişikliklere sebep olduğu tespit edilerek, heterojen yapıştırıcı tabakasının etkilerine dikkat çekilmiştir. Bunun yanında, inklüzyon yakınlarında delaminasyon olasılığı da ele alınmış ve delaminasyon şekli ile büyüklüğünün kritik burkulma yüküne etkisi incelenmiştir.

Ayrıca, inklüzyon içeren düzgün yayılı çekme yükü altındaki tek bindirme bağlantıları da bu tez çalışmasında ele alınmıştır. Bu tip bağlantılarda meydana gelen gerilmelere, inklüzyon malzemesinin ve yapıştırılan malzeme kalınlığının etkileri incelenmiş, yine inklüzyon bölgesi yakınlarında delaminasyon olasılığı göz önüne alınmıştır.

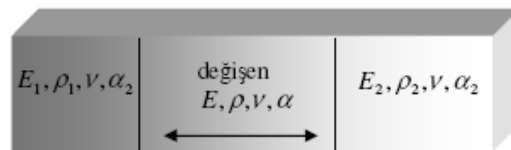
Yapılan bu tez çalışması, yeni geliştirilmiş FDPM modelinin yapıştırıcı bağlantılara uygulanmasını ve bağlantı dayanımlarının incelenmesini kapsamaktadır. Aynı zamanda sunulan tez çalışması ile yapıştırıcı tabakasında inklüzyon bulunan bağlantıların incelenmesi konularında da çalışmalar yapılarak literatürdeki eksikliğin giderilmesine katkı sağlanmaktadır.

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER

Havacılık, uzay, savunma ve otomotiv endüstrilerindeki gelişmeler ve artan rekabet dolayısıyla, hafif ve aynı zamanda yüksek dayanıma sahip malzemelere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Bu ihtiyaç nedeniyle, mekanik özellikleri geleneksel kompozitlere göre daha üstün olan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin (FDM) üretimi yaygınlaşmıştır. Bölüm 2'de fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mekanik özellikleri ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan modeller verilmiştir. Ayrıca, bu tez çalışmasında kullanılan, son zamanlarda deneysel olarak geliştirilen yeni FDPM modelinin mekanik özelliklerin belirlenmesi ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

2.1 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Mekanik Özellikleri

FDM'lere uygulanan birçok derecelendirme çeşidi vardır. Bunlara kimyasal bileşim, hacim, parçaçık yüzdesi ve parçaçık büyüklüğü derecelendirmeleri tek boyutta yapılan derecelendirmelere örnek verilebilir. Ayrıca, kısıtlı olmakla birlikte iki ve üç boyutlu derecelendirmeler de yapılabilmektedir. Tüm bu derecelendirmeler malzemenin Elastisite modülü, yoğunluk, Poisson oranı, ısı iletkenlik, sertlik ve direnç gibi mekanik özelliklerini değiştirir [101].



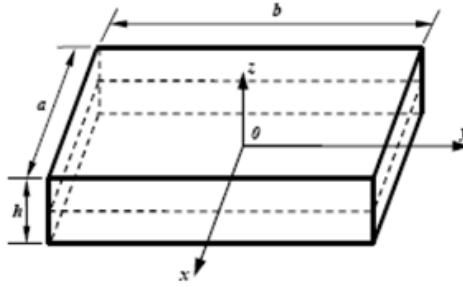
Şekil 2.1 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemede mekanik özelliklerin değişimi

Sonuç olarak FDM'lerde mekanik özellikler Şekil 2.1'de görüldüğü gibi kademeli olarak değişir ve bu mekanik özelliklerin belirlenmesi oldukça önemlidir.

2.2 FDM'den Yapılan Plakta Malzeme Özelliklerinin Kalınlık Doğrultusunda Değişimi

Bu bölümde, FDM'den oluşan plağın malzeme özelliklerinin sürekli değişimini tanımlayan çeşitli fonksiyonlar ele alınmış ve bunlardan bazıları incelenmiştir.

Şekil 2.2'de uzunluğu a , genişliği b ve üniform kalınlığı h olan fonksiyonel derecelendirilmiş bir plağın geometrisi sunulmuştur. Plak geometrisi ve boyutları x,y,z kartezyen koordinat sistemine göre tanımlanmıştır. Eksenler plak kenarlarına paralel ve orjin plağın geometrik merkezindedir. Malzeme bileşiminin, üst yüzeyden itibaren kalınlık doğrultusunda değiştiği ve plak üst yüzeyinin $z=h/2$, alt yüzeyinin $z=-h/2$ olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 2.2 Üniform kalınlıktaki dikdörtgen bir plağın geometrisi ve koordinatları

2.2.1 Elastisite Modülünün Kalınlık Doğrultusunda Kuvvet Kanununa Göre Değişimi

FDM'de efektif (etkin) malzeme özellikleri Reddy'in çalışmasında [102] belirtildiği gibi, bir kuvvet kanunu formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P(z) = P_{UL}V_U + P_L \quad (2.1)$$

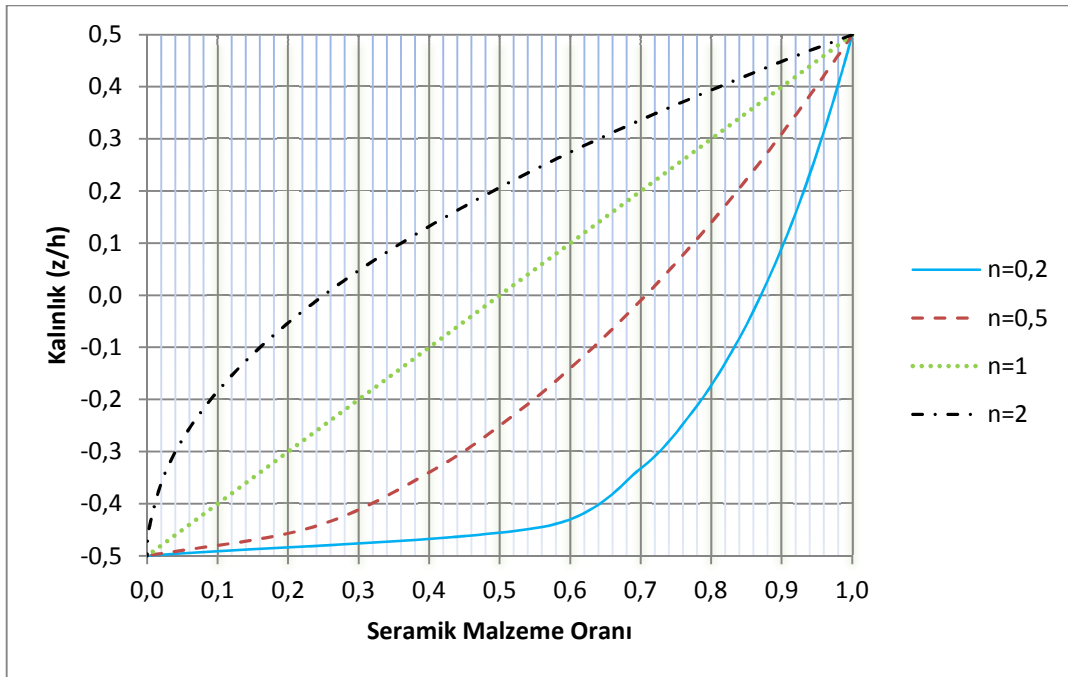
$$P_{UL} = P_U - P_L \quad (2.2)$$

$$V_U = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^n \quad (2.3)$$

$$P(z) = (P_U - P_L) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^n + P_L \quad (2.4)$$

Burada P, efektif malzeme özelliği olmak üzere P_L ve P_U sırasıyla ele alınan özelliğin plak alt ve üst yüzelerindeki değerleridir. Hacim oranın değişimi V_U , basit bir kuvvet kanunu olarak tanımlanmaktadır. Hacim oranı üsteli n, plak kalınlığı boyunca malzeme değişim profilini göstermektedir ve bileşim malzemelerinin optimum dağılımını elde etmek amacıyla değiştirilebilir, 0

Örneğin, Reddy'in çalışmasında [102] belirtildiği gibi, FDM'den yapılan bir plağın yapısının seramik-metal bileşimi şeklinde olduğu kabul edilirse, malzeme yapısı kalınlık boyunca malzeme değişim profilini gösteren n katsayısına bağlı olarak değişir. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi seçilen n değeri sıfır ile bir arasında iken malzeme seramik yoğunlukta olacağından FDM'den oluşan plak seramik malzemeye daha yakın davranır. Seçilen n değeri bire eşit olduğunda kalınlık boyunca malzeme değişimi doğrusal olacak, n değeri arttıkça ve 1'den yüksek değerlere ulaştıkça FDM özellikleri metalin malzeme özelliklerine yakın olacaktır [102].



Şekil 2.3 Seramik ve metal malzemelerinden oluşan Fonksiyonel Derecelendirilmiş bir plağın boyutsuz kalınlığı boyunca seramik malzeme oranlarının değişimi

2.2.2 Elastisite Modülünün Kalınlık Doğrultusunda Üstel Olarak Değişimi

FDM'lerde, malzeme özelliklerinin değişimini ifade etmek için kullanılan yaklaşımlardan bir tanesi de üstel olarak değişim yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda malzemenin elastik özelliklerinin,

$$C_{ij} = (C_{ij})^0 e^{\lambda z} \quad (2.5)$$

şeklinde değiştiği kabul edilmektedir. Burada $(C_{ij})^0$, plağın orta eksenindeki ($z=0$) elastik özelliğidir. Birçok araştırmacı tarafından ısıl ve mekanik yüklemeler altındaki FDM problemlerinin analitik çözümünde malzeme özelliklerinin sürekli değişimi üstel fonksiyonlarla tanımlanmıştır. Üstel değişimin aşağıdaki gibi tanımlandığı çalışmalar mevcuttur [89-91,103,104].

$$E(z) = E_U e^{-\delta(1-2\frac{z}{h})} \quad (2.6)$$

Burada δ ,

$$\delta = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{E_U}{E_L}\right) \quad (2.7)$$

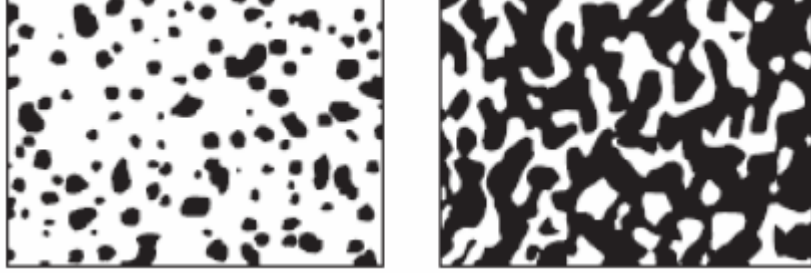
olarak tanımlıdır. Üstel değişimin analitik çözümü kolaylaştırdığı görülmüştür [103]. Zhong ve Shang [104] piezoelektrik üzerine yaptıkları çalışmada, derecelendirilmiş malzemedan yapılmış kenarlarından basit mesnetle desteklenmiş plaktaki mekanik ve elektiriksel özelliklerin değişimini, denklem 2.6'da verilen üstel fonksiyon şeklinde kabul etmiştir.

2.3 Mikromekanik Yaklaşım

Mikromekanik analiz ile malzeme bileşenlerinin birbirleriyle olan etkileşim özelliklerinden yararlanarak malzemenin tamamının davranışı hakkında fikir edinilebilir. Ayrıca mikromekanik yaklaşım homojen olmayan bir malzeme yapısının, anizotropik özellikleri belirlenebilen homojen bir yapı şeklinde modellenmesine imkân sağlar. Kompozit malzemelerde etkin (effective) modüllerin hesaplanabilmesi için birçok mikromekanik yaklaşım geliştirilmiştir.

Elastik matris yapısını güçlendirmek amacı ile küresel takviye bileşenlerinin malzeme içinde rastgele bir şekilde dağıldığı kompozit malzemelerde, iskeletsel mikro yapıya

sahip bölgede etkin malzeme özellikleri tutarlı model ile belirlenebilir. Parçacıklı mikroyapıya sahip bölgede ise etkin malzeme özellikleri Mori-Tanaka modeli ile belirlenebilir [105]. Şekil 2.4'te parçacıklı mikroyapı ve iskeletsel mikroyapı görülmektedir.



Şekil 2.4 İki fazlı malzeme a) parçacıklı mikroyapı b) iskeletsel mikroyapı [105]

2.3.1 Mori-Tanaka Modeli

Mori-Tanaka modeli, iyi tanımlanmış sürekli matris ve süreksiz parçacıklı faza sahip derecelendirilmiş mikro yapı bölgesinde uygulanabilir. Genellikle takviye malzemesi olarak kullanılan küresel parçacıkların boyutları, şekilleri ve yapıdaki dağılımları hakkında çok hassas bir bilgiye sahip olunmadığından etkin modülün hesaplanmasında takviye bileşenine ait hacim oranı dağılımından yararlanır.

Bulk modülü (B) (hacimsel elastisite modülü) ve kayma modülü (G) arasında, Lamé sabiti λ ile tanımlanan,

$$\lambda = B - \frac{2}{3}G \quad (2.8)$$

bağıntısı vardır. Bir noktadaki efektif kütle yoğunluğu "Karışım Kanunu" ile aşağıdaki gibi verilir.

$$p = p_1V_1 + p_2V_2 \quad (2.9)$$

Burada matris faz, 1 indisi ile ve küresel parçacıklı takviye fazı ise 2 indisi ile gösterilir. Ayrıca, V_1, V_2 hacim oranlarını ifade eder ve $V_1+V_2=1$ eşitliği geçerlidir.

İzotrop özellikteki matris malzemesi içinde rasgele dağılıma sahip olan yine izotrop özellikte parçacıkların olduğu plağa uygulanan Mori-Tanaka modeli ile elde edilen etkin Bulk modülü B ve kayma modülü G aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\frac{B-B_1}{B_2-B_1} = V_2 / \left(1 + (1 - V_2) \frac{B_2-B_1}{B_1+(4/3)G_1} \right) \quad (2.10)$$

$$\frac{G-G_1}{G_2-G_1} = V_2 / \left(1 + (1 - V_2) \frac{G_2-G_1}{G_1+f_1} \right) \quad (2.11)$$

Burada, B_1 , G_1 ve V_1 matris fazın ve B_2 , G_2 ve V_2 parçacıklı fazın olmak üzere, sırasıyla, Bulk modülü kayma modülü ve hacim oranına karşılık gelmektedir. Burada f_1 ,

$$f_1 = G_1(9B_1 + 8G_1) / 6(B_1 + 2G_1) \quad (2.12)$$

Şeklindedir. Matris fazına ve takviye fazına ait Bulk modülü ve kayma modülü tanımları aşağıdaki gibi verilir:

$$B_1 = \frac{E_1}{3(1-2\nu_1)} \quad (2.13)$$

$$B_2 = \frac{E_2}{3(1-2\nu_2)} \quad (2.14)$$

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1-\nu_1)} \quad (2.15)$$

$$G_2 = \frac{E_2}{2(1-\nu_2)} \quad (2.16)$$

Sonuç olarak, Mori-Tanaka modeline göre değişen Elastisite modülü ve Poisson oranının efektif değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E = \frac{9BG}{3B+G} \quad (2.17)$$

$$\nu = \frac{3B-2G}{2(3B+G)} \quad (2.18)$$

2.3.2 Tutarlı Model

Bu model, iskeletsel mikro yapıya sahip kompozit malzemelerde etkin modülün belirlenmesi için tercih edilir. Etkin modülün hesaplanmasında aşağıdaki bağıntılar kullanılır:

$$\delta / B = V_1 / (B - B_2) + V_2 / (B - B_1) \quad (2.19)$$

$$\xi / G = V_1 / (G - G_2) + V_2 / (G - G_1) \quad (2.20)$$

burada,

$$\delta = 3 - 5\xi = B / (B + 4G / 3) \quad (2.21)$$

olarak tanımlıdır. Denklem 2.19, B değerini bulmak için çözüldüğünde G cinsinden aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$B = 1 / (V_1/(B_1 + 4G/3) + V_2/(B_2 + 4G/3)) - 4G / 3 \quad (2.22)$$

Burada G, aşağıdaki denklemin çözümünden elde edilir.

$$[V_1B_2 / (B_1 + 4G / 3) + V_2B_2 / (B_2 + 4G / 3)] + 5[V_1G_2 / (G - G_2) + V_2G_1 / G - G_1 + 2 = 0 \quad (2.23)$$

Hesaplamalardan da anlaşılacağı gibi efektif modülün hesaplanmasında tutarlı model Mori-Tanaka modeline göre daha karmaşık ve daha az tercih edilen bir yöntemdir.

2.3.3 Guth Modeli

Kompozit malzeme modelinin mekanik özelliklerinin saptanmasında en eski teori, matris içerisinde rijit parçacık yoğunluğunu Einstein denklemlerini kullanılarak ele alan Guth modelidir ve denklemleri aşağıda verilmiştir [106]:

$$\eta_c = \eta_p(1 + k_E v_f) \quad (2.24)$$

Burada, η_c ve η_p sırasıyla kompozit ve matrisin yoğunluklarıdır. k_E , Einstein sabitidir ve küresel geometrideki parçacıklar için 2.5 alınır [107]. v_f ise parçacık hacim yüzdesidir. Bu yaklaşıma benzer bir yaklaşımla, kompozit malzemenin elastisite modülünün hesaplanması yapılabilir.

$$E_c = E_p(1 + k_E v_f) \quad (2.25)$$

Burada, E_c ve E_p sırasıyla kompozit malzemenin ve matrisin elastisite modülüdür. Guth modelindeki Einstein denklemleri, küresel olmayan parçacık takviyeleri için aşağıdaki gibi modifiye edilebilir.

$$E_c = E_p \left[1 + 0.67\alpha v_f + 1.62(\alpha v_f)^2 \right] \quad (2.26)$$

Burada, α , parçacık uzunluğunun parçacık kalınlığına oranıdır. Guth modeli ve verilen denklemler düşük yoğunluklu parçacık ilaveleri için geçerlidir [106].

2.3.4 Halpin-Tsai Modeli

Halpin-Tsai [108] modeli düzgün dağılıma sahip olmayan takviye parçacıklı polimer malzemeler için uygun bir modeldir [109,110]. Halpin Tsai denklemleri Kerner denklemlerinin genel halidir [111].

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{(1+\xi\eta v_f)}{(1-\eta v_f)} \quad (2.27)$$

burada ξ eklenen takviye malzemesinin geometrik özelliğine bağlı bir şekil faktörüdür. η parametresinin belirlenmesi için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$\eta = \frac{(E_f/E_p - 1)}{(E_f/E_p + \xi)} \quad (2.28)$$

Denklemlerde, E_c , E_p ve E_f sırasıyla kompozit malzeme, matris ve takviye malzemesinin elastisite modülü ve v_f takviye malzemesinin hacim yüzdesidir. Sunulan tez çalışmasında, FDPM plakların elastisite modüllerinin belirlenmesinde, Halpin-Tsai modelinden yararlanılmıştır. Ayrıntılar bölüm 2.4.1'de verilmiştir.

2.3.5 Lewis-Nielsen Modeli

Lewis ve Nielsen [111] Halpin-Tsai denklemlerini, maksimum takviye malzemesi hacmini göz önünde bulundurarak tekrar düzenlemiş aşağıdaki denklemleri sunmuşlardır.

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{(1+\xi\eta v_f)}{(1-\psi\eta v_f)} \quad (2.29)$$

Burada

$$\psi = 1 - v_f \frac{(1-v_m)}{v_m^2} \quad (2.30)$$

v_m , maksimum partikül hacim oranıdır.

Lewis-Nielsen modelinde, daha küçük v_m oranlarında, sonuçlar ani bir değişimle artar. Fakat v_m değeri 1'e eşit olduğunda Lewis-Nielsen Modeli Halpin Tsai modeliyle birebir aynı hali alır [112].

2.4 Gözleme Dayalı Yaklaşım

Malzemenin elastisite modülü ve çekme dayanımını güçlendirme amacı ile üretilmiş olan FDM'lerin mekanik özelliklerini belirlemek için gözleme dayalı yaklaşımlardan faydalanılabilir [113]. Örneğin, Choe vd. [114], epoksi reçine içerisine takviye malzemesi ilave edilerek oluşturulmuş fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemenin elastisite modülünü belirlemek için gerekli olan takviye malzemesinin bölgesel hacim yüzdesini taramalı elektro mikroskop yardımıyla belirlemişlerdir.

Doerner ve Nix [115] ve Oliver ve Pharr [116] yine elektro mikroskop yardımıyla elde ettikleri takviye elemanı hacim yüzdesini ve mikrosertlik verilerini temel alan denklemleri kullanarak, yeni ürettikleri FDPM için elastisite modülü hesabı yapmışlardır. Bafekrpour vd. [117] çalışmalarında, fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozit yapıyı basınçlı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Elde ettikleri numuneleri, derecelendirme doğrultusunda kesmişler, zımparalamışlar/parlatmışlar ve optik mikroskop yardımıyla takviye elemanının yüzde oranını saptamışlardır. Sağlanan verileri, çekme deneyine tabi tuttıkları FDPM numunenin, elastisite modülünü bulmakta kullanmışlardır. Tsotra ve Friedrich [118] epoksi reçine içerisine karbon fiber ilave ederek, derecelendirme yöntemiyle yeni bir fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme üretmiş ve malzemenin elektrik iletkenliğini belirlemede, yine mikroskop üzerinden alınan verilere dayanan gözleme dayalı bir yaklaşım kullanmıştır.

Bu tez çalışmasında da, gözleme dayalı bir yaklaşım kullanılmıştır. Deneysel yöntemle geliştirilmiş yeni FDPM modelinin mekanik özelliklerinin saptanması, mikroskop ve mikroskopa bağlı görüntü işleme cihazı yardımıyla yapılmıştır.

2.4.1 Kullanılan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Polimerik Malzeme (FDPM) Tanımı

Çalışmada kullanılan ve literatürde [119]-[122] yer alan FDPM, ticari isimleri PAM96/98 ve PV60/65 olan grafit tozları ilave edilmiş epoksi reçineden meydana gelen polimer esaslı bir malzemedir. Grafit tozları, Çek Cumhuriyeti'nde Koh-I Noor adlı firmada üretilmiş ve malzeme özellikleri Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'de verilmiştir. Polimer matris bileşeni olarak seçilen epoksi reçine, Z₁ ile kürlenmiş Epidian 6 adlı bir malzemedir ve Polonya'da Organika Sarzyna adlı kimyasal firmasında üretilmiştir [121].

Çizelge 2.1 Malzeme özellikleri PAM 96/98 [119], [123]

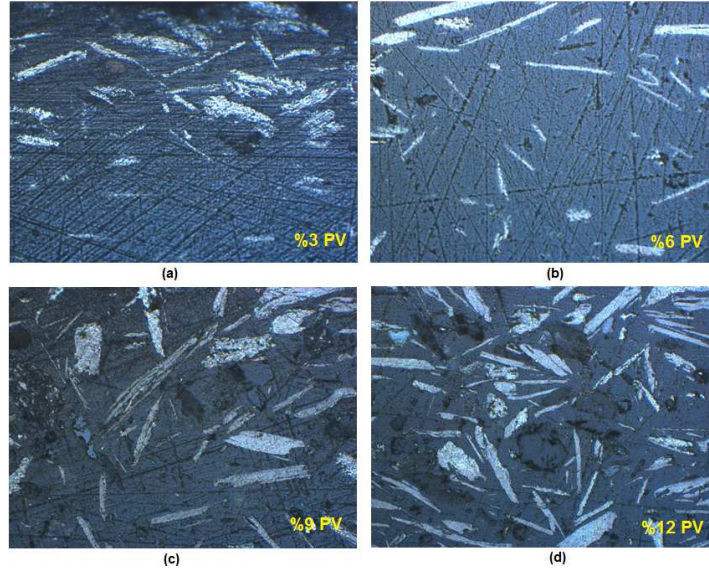
Grafit Tipi	PAM 96/98
Yoğunluk	2.40 g/cm ³
Karbon oranı (%)	%97.0
Sodyum karbonat oranı (%)	%3.0
Sülfür oranı (%)	%0.00
Nem oranı (%)	%0.20
Tanecik boyut aralığı	%d10 = 6.23 µm
	%d50 = 16.38 µm
	%d90 = 36.94 µm
Seçilmiş yüzeydeki tane boyut analizi	0.510 m ² /g

Çizelge 2.2 Malzeme özellikleri PV 60/65 [119], [123]

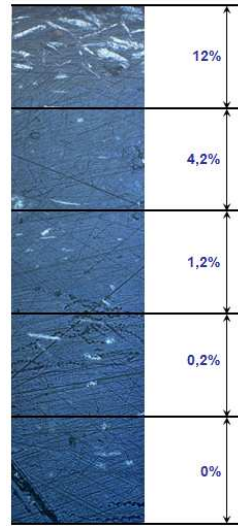
Grafit Tipi	PV 60/65
Yoğunluk	2.19 g/cm ³
Karbon oranı (%)	%63.9
Sodyum karbonat oranı (%)	%36.1
Sülfür oranı (%)	%0.03
Nem oranı (%)	%0.42
Tanecik boyut aralığı	%d10 = 7.31 µm
	% d50= 34.14 µm
	% d90= 77.10 µm
Seçilmiş yüzeydeki tane boyut analizi	0.419 m ² /g

Seçilen grafit tozları, %3, %6, %9 ve %12 hacim oranlarında epoksi reçine içerisine ilave edilmiş ve polimer malzemelerde derecelendirme işlemi için en etkin yöntemlerden biri olan savurma döküm yöntemi karışım malzemesine uygulanmıştır. Elde edilen malzemeler ışık mikroskobu ile kolay gözlemlenmesi için zımparalanmış (2400 µm boyutlarına sahip zımpara kâğıdıyla), parlatılmış ve dağlanmış (saf etil asetatla, üretim yeri Poch firması, Polonya). Daha sonra, tüm malzeme numuneleri, Axiovision yazılımına sahip 200X büyütme özelliğine sahip, Lecia (MEF4A) ışık mikroskobu ile

gözlemlenmiştir. Şekil 2.5'te %3, %6, %9 ve %12 hacim oranlarında PV60/65 grafit tozu içeren FDPM görüntüleri belli bir bölge için verilmiştir.



Şekil 2.5 Grafit tipi PV60/65 a) %3 hacim, b) %6 hacim, c) %9 hacim, d) %12 hacim Kullanılan savurma döküm yöntemi sonucunda elde edilen fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemenin (FDPM) genel yapısı ise örnek olarak Şekil 2.6'da %3 PV60/65 grafit tozu ilave edilmiş malzeme için verilmiştir.



Şekil 2.6 %3 hacim oranında PV60/65 grafit tozu içeren numune görünümü FDPM içerisindeki grafit yapısı incelenerek, grafit alan yüzdesi Lecia QWIN görüntü analiz cihazı kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 2.3'te dıştan içe doğru sırasıyla, I, II, III, IV ve V. bölge ve bu bölgelerdeki grafit alan yoğunlukları yüzde olarak verilmiştir.

Çizelge 2.3 Grafit dağılım yoğunlukları (% alan)

Malzeme	I	II	III	V	V
%3 PAM	2.1	1.8	1.6	1.1	1.0
%3 PV	12.0	4.2	1.2	0.2	0.0
%6 PAM	2.5	2.2	1.9	0.8	0.0
%6 PV	7.8	5.6	3.6	2.0	0.3
%9 PAM	1.7	0.95	0.69	0.3	0.0
%9 PV	10.9	6.7	6.2	2.3	0.2
%12 PAM	2.6	3.3	3.0	1.8	0.3
%12 PV	22.1	19.2	17.0	10.0	5.0

PAM96/98 ve PV60/65 grafit tozları kullanılarak üretilen yeni malzemeler, literatürde elektrik alanında [124], manyetik alanda [125], [126] meydana gelen problemlerde, kaplama direncini arttırmaya yönelik [127] çalışmalarda kullanılmıştır.

Tez çalışmasında sunulan malzeme modelinde, her beş bölge için elastisite modülü hesaplanması gerekir. Bunun için, takviye parçacıkları içeren polimer malzemelerin elastisite modüllerinin hesaplanmasında literatürde birkaç malzeme modeli önerilmiş ve modellerin ayrıntıları Bölüm 2.3'te anlatılmıştır. Halpin-Tsai modeli düzgün dağılıma sahip olmayan takviye parçacıklı polimer malzemeler için kullanılan uygun bir modeldir ve bu çalışmada kullanılmıştır. Sonuç olarak, yeni üretilen FDPM'nin elastisite modülünün hesaplanmasında, Halpin-Tsai denklemleri malzeme modeline aşağıdaki gibi uyarlanmıştır.

$$\frac{E_{kompozit}}{E_{polimer}} = \frac{1 + \xi \eta \nu_f}{1 - \eta \nu_f} \quad (2.31)$$

Burada, ξ eklenen takviye malzemesinin geometrik özelliğine bağlı bir şekil faktörüdür ve kullanılan grafit tozu şekli yapraksı olduğundan 5.1 olarak alınabilir [111].

η parametresinin belirlenmesi için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$\eta = \frac{E_{grafit} / E_{polimer} - 1}{E_{grafit} / E_{polimer} + \xi} \quad (2.32)$$

Her beş bölgenin elastisite modüllerinin belirlenmesi için denklem 2.31-2.32 ve Çizelge 2.3'ten yararlanılmıştır. Hesaplamalarda, E_{PAM} , E_{PV} ve $E_{Polimer}$ sırasıyla 1000 GPa, 1020 GPa ve 3.24 GPa ve Poisson oranları ν_{PAM} , ν_{PV} ve $\nu_{Polimer}$ sırasıyla 0.261, 0.272 ve 0.25 alınmıştır.

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ POLİMERİK MALZEMEDEN (FDPM) YAPILAN SANDVIÇ YAPILAR VE TEK BİNDİRME BAĞLANTILARI

Son yirmi yılda, polimerik malzemelerde derecelendirme yapılarak daha üstün mekanik, ısı, elektrik ve manyetik özelliklere sahip FDPM'ler üretilmiştir. FDPM'lerden oluşan yapıştırıcı bağlantılarıyla, uzay ve havacılık endüstrisinde [18], 21] (uçak ve mekik gövdelerinde yer alan tabakalı bağlantılarda), kara ve deniz taşımacılığında [26] (otomobil/gemi iskeletlerindeki birleşim yerlerinde) elektronik ve bilgisayar alanı [25] (manyetik depolama birimlerinin yüzeylerinde, elektromekanik sensörlerde) gibi birçok endüstriyel alanda karşılaşılmaktadır. Bu alanlarda FDPM'ler genellikle kiriş, kabuk veya plak elemanı olarak kullanılırlar. Bu nedenle, FDPM yapı elemanlarından meydana gelen farklı yükleme koşullarına ve farklı geometrilere sahip yapıştırıcı bağlantılarının davranışlarının incelenmesi önem taşımaktadır.

Bölüm 3'te FDPM kullanılarak yeni tasarlanmış plaklardan oluşan yapıştırılmış sandviç yapıların burkulma davranışları ile yeni tasarlanmış kirişlerden oluşan tek bindirmeli bağlantıların gerilme davranışları incelenmiştir. FDPM'den yapılmış yapıştırılmış bağlantıların yükleme ve sınır koşullarına bağlı olarak verdiği farklı sonuçlara kullanılan grafit tipi ve grafit hacim oranının etkileri araştırılmıştır.

3.1 FDPM'den Yapılmış Sandviç Yapılarda Burkulma Davranışı

Bölüm 3.1'de, takviye malzemesi olarak grafit tozu kullanılarak mekanik özellikleri iyileştirilmiş sandviç panelin burkulma davranışı incelenmiştir. Sandviç yapıyı oluşturan

fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemeden (FDPM) paneller, epoksi reçine içerisine PAM96/98 ve PV60/65 grafit tozlarının %3, %6, %9 ve %12 hacim oranlarında eklenmesi ve savurma döküm yöntemiyle üretilmesi sonucunda elde edilmiştir. Derecelendirilmiş malzeme yapısı ve grafit dağılımı ışık mikroskopuyla incelenmiş ve elastisite modüllerinin belirlenmesinde görüntü işleme programı baz alınmıştır, bu konu ile ilgili ayrıntılar Bölüm 2.4.1'de verilmiştir

Bu bölümde [44], [45] nolu çalışmalardaki gibi düzlem içi kesme kuvveti, normal bası kuvveti ve yayılı yüke maruz sandviç bir yapı ele alınmıştır. Ancak, sandviç yapıdaki panellerin FDPM olduğu kabul edilmiş ve paneller son zamanlarda geliştirilen yeni bir FDPM [119] kullanılarak modellenmiştir. FDPM kullanılarak yeni tasarlanmış plaklardan oluşan sandviç yapının elastik bölgedeki burkulma davranışları üzerine odaklanılmıştır. Burkulma davranışlarının tahmini detaylı sonlu elemanlar analizi kullanılarak yapılmıştır. İncelemenin temel amacı, kritik burkulma yük kapasitesini arttırmak için en uygun grafit tozu tipi ve hacim oranı belirlemektir.

FDPM'den oluşan panellerden meydana gelen yapıştırılmış sandviç bağlantının yük aktarımını sağlaması için iki farklı bağlantı koşulu incelenmiştir. Bunlar, noktasal desteklenmiş bağlantı ve doğrusal desteklenmiş bağlantı koşullarıdır. Noktasal desteklenmiş bağlantı koşulunda, sandviç yapı dört köşesinden civata ile bağlanmıştır. Doğrusal desteklenmiş bağlantı koşulunda ise, sandviç yapı iki kısa kenarından bir altyapıya yapıştırıcı ile bağlanmıştır. Her iki bağlantı koşulu ile ilgili ayrıntılar Bölüm 3.1.1'de sunulmuştur.

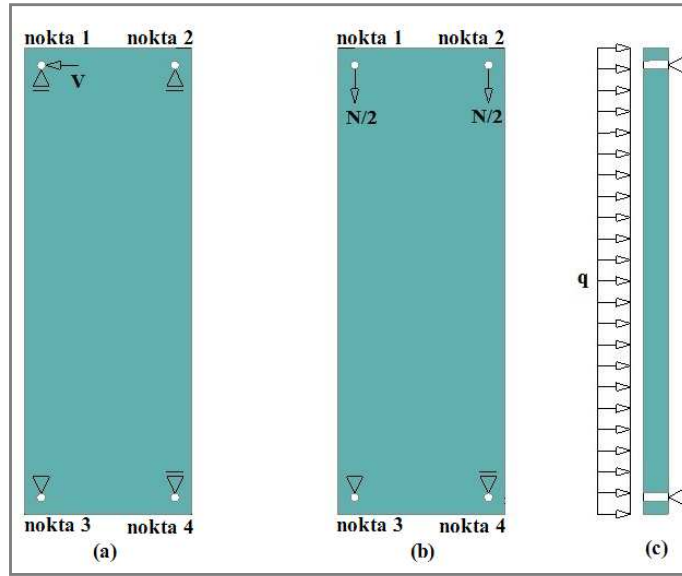
3.1.1 Farklı Bağlantı ve Yükler Altında FDPM Sandviç Panel

Bu çalışmada ele alınan sandviç panel yapısı, homojen izotrop bir yapıştırıcı tabaka ile birbirlerine yapıştırılmış iki FDPM'den oluşan tabakadan meydana gelir. Sandviç panel alt ve üst kenarlarından desteklenmiş ve düzlem içi kesme kuvveti, V , düzlem içi normal bası kuvveti, N , ve yayılı yük, q 'ya maruz bırakılmıştır. Literatürde, düzlem içi kesme kuvvetine maruz ve iki taraftan mesnetlenmiş FDPM'den plaklar hakkında fazla çalışma bulunmamaktadır. Burkulma ve kesme yükünden kaynaklanan kayma gerilmesi altında meydana gelen burkulma hakkındaki çalışmalar yoğunlukla, ince plak teorisine dayalı dört tarafı mesnetlenmiş plak ve sandviç plaklar üzerinedir.

Tez çalışmasında, sandviç plağın mesnetlenmesi ve yüklenmesi açısından detaylı bir inceleme yapılmıştır. Sandviç plakta iki farklı yapısal bağlantı kullanılmıştır.

- Noktasal destek kavramı: Sandviç panel alt ve üst kenarlarına yakın dört adet civata ile tutturulmuştur, sandviç panelin bu şekilde mesnetlenmesi literatürdeki çalışmalarda da yerini alır [128], [129].
- Doğrusal destek kavramı: Sandviç panel alt ve üst kenarı boyunca doğrusal bir kanala, silikon yardımıyla oturtulmuştur. 'Doğrusal destek sistemi, panelin en az iki karşılıklı kenarının ana yapıya doğrusal bir şekilde bağlanmasıdır' tanımlanması literatürde [128] yerini alır ve araştırmacılar [130]-[132], doğrusal destek bağlantı sistemini çalışmalarında kullanmışlardır.

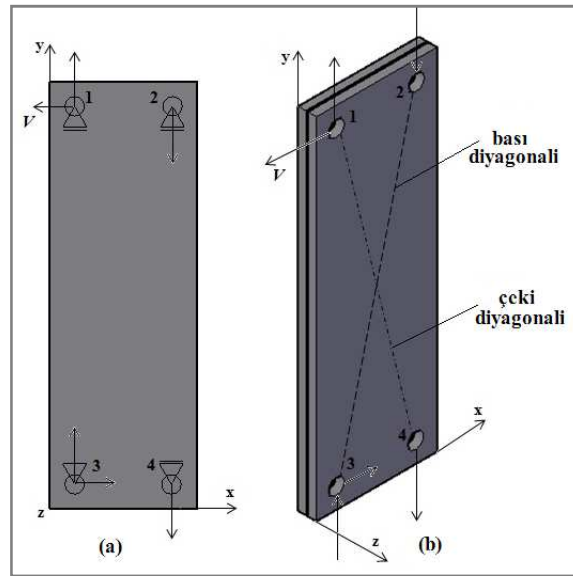
Noktasal desteklenmiş FDPM'den yapılan sandviç panel üç farklı yükleme altında Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Farklı yükler altında noktasal desteklenmiş FDPM sandviç panel a) düzlem içi kesme kuvveti V , b) düzlem içi normal bası kuvveti N , c) yayılı yük q

Şekil 3.1a'da görüldüğü gibi, düzlem içi kesme kuvveti V , 1 no'lu destek noktasına etki eder. Bu kuvvet, 2 ve 3 no'lu destek noktalarında mesnet tepki kuvvetlerini oluşturarak, bu destek noktaları arasında bası diagoneli oluşmasına yol açar. Böylece, sandviç yapıda oluşan bası diagoneli, düzlem dışı burkulmaya sebep olacaktır.

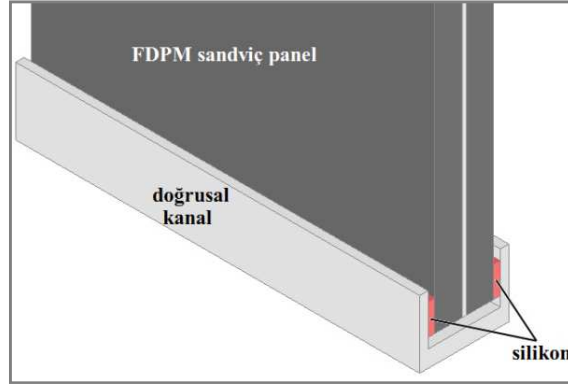
Noktasal desteklenmiş sistemde yalnızca 3 no'lu destek sabit mesnettir, tüm yönlerde hareket edemez ve dönemez. 1, 2 ve 4 no'lu destek noktalarındaki mesnetler ise kayıcı mesnettir, y ve z yönünde hareket edemezler x ve y ekseninde dönemezler. Düzlem içi kesme kuvveti V , 1 no'lu noktaya -x yönünde etki ettiğinde, 1 ve 4 no'lu mesnetler arasında da çeki diyagoneli meydana gelir. Bu çeki ve bası dioganelleri, noktasal desteklenmiş sandviç panele membran etkisi kazandırır ve yapının rijitliğini artırır. Bu durum Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Noktasal desteklenmiş FDPMDen oluşan sandviç panel a) sınır koşulları ve mesnet tepkileri, b) çeki ve bası dioganelleriyle oluşan membran etkisi

Şekil 3.1b'de görüldüğü gibi, düzlem içi normal bası kuvveti N , 1 ve 2 no'lu noktalara -y yönünde uygulanır ve buna karşı oluşan mesnet tepkileri 3 ve 4 no'lu destek noktalarında oluşur. Düzlem dışı yayılı yük ise sandviç panele dik doğrultuda etkir, rijit bağlantılar sebebiyle dönmeye izin verilmez, bundan dolayı mesnet tepkileri meydana gelir (Şekil 3.1c).

Bu tez çalışmasında kullanılan ikinci bağlantı koşulu ise, sandviç panelin iki kısa kenarı boyunca doğrusal bir kanala silikon yardımıyla oturtulduğu doğrusal destektir. Şekil 3.3'te sandviç panelin doğrusal kanal ile silikon yardımıyla desteklendiği model görülmektedir.

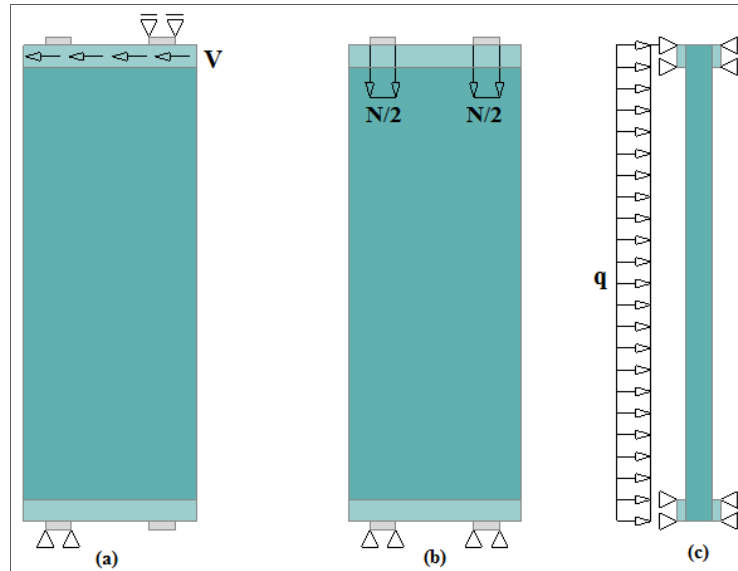


Şekil 3.3 Doğrusal desteklenmiş sandviç panel modeli

Doğrusal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel modelinde üç farklı yükleme durumu Şekil 3.4'te verilmiştir.

Düzlem içi kesme kuvveti V , sandviç panelin üst kenarında yer alan silikonda oluşur ve buna karşılık oluşan tepki kuvvetleri sistemi dengeler (Şekil 3.4a).

Normal bası kuvveti N , düşey yönde Şekil 3.4b'de görüldüğü gibi üst ayar bloklarına uygulanmıştır. Bu yüklemeye karşı alt ayar bloklarında oluşan tepki kuvvetleri sistemi dengede tutar. Doğrusal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panelin yanal yüzeyine dik uygulanan yayılı yük ise Şekil 3.4c'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Farklı yükler altında doğrusal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel
a) düzlem içi kesme kuvveti V , b) düzlem içi normal bası kuvveti N , c) yayılı yük q

Sonuç olarak hem noktasal desteklenmiş plak hem de doğrusal desteklenmiş sandviç panel için sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Modellere düzlem içi kesme kuvveti

(V), normal bası kuvveti (N) ve yayılı yük (q) uygulanmış, sandviç panelin burkulma davranışları incelenmiştir.

Tüm FDPM plaklarda, kalınlık boyunca kayma deformasyonlarını da hesaba katan Mindlin-Reissner teorisi kullanılmıştır. Ayrıca sandviç panel modellenirken klasik varsayımlar kullanılmıştır. Örneğin, FDPM'den oluşan plaklar başlangıçta doğru eksenli olup herhangi bir geometrik kusur içermezler. Kullanılan yapıştırıcı tabaka kalınlığı sabittir. Yapıştırıcı malzemeler, kayma modülleri sıcaklık ve yükleme süresine bağlı değişen visko-elastik malzemeler olmakla birlikte, bu çalışmada kullanılan yapıştırıcı malzemenin lineer-elastik, homojen ve izotrop özellik taşıdığı kabul edilmiştir.

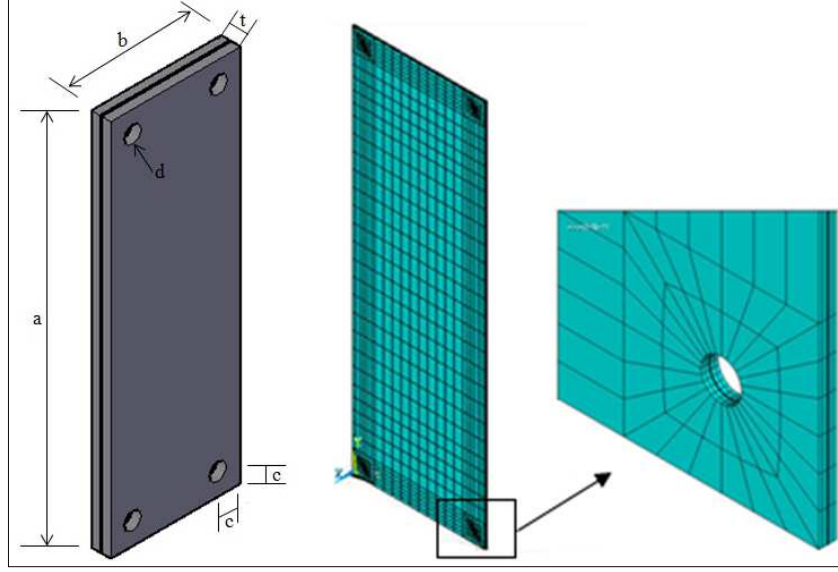
Loctite firması tarafından üretilen Elastisite Modülü 1.78 GPa ve Poisson oranı 0.376 olan Hysol 9464 [133] adlı yapıştırıcı FDPM'den yapılan plakların yapıştırılması için seçilmiştir. Sayısal hesaplamalarda, uygulanan düzlem içi kesme yükü $V=1\text{kN}$ alınmıştır. Kullanılan sonlu elemanlar yazılımı ANSYS® 13.0 [134] sınır değerlerinin çıkartılması için birden fazla metot önerir. Bunlar arasında, Block Lancos metodu çalışmada ilk üç sınır değerinin çıkartılmasında kullanılmıştır. Analizlerde yayılı yük değeri, q, ise sandviç panel üzerine basınç olarak 1 kN/m^2 uygulanmıştır.

Çalışmada, üç tip sandviç panel modellenmiştir. Bunlardan ilki PAM96/98-PAM96/98 plak çifti, ikincisi PV60/65-PV60/65 plak çifti ve üçüncüsü ise PAM96/98-PV60/65 grafit tozu ilave edilerek oluşturulmuş FDPM'den meydana gelen plak çiftidir.

3.1.2 Sonlu Elemanlar Modeli

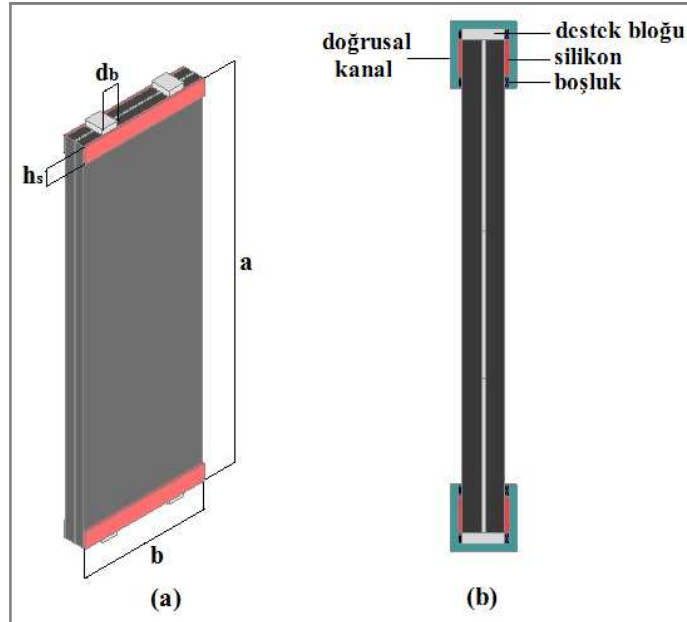
Noktasal ve doğrusal desteklenmiş, FDPM'den oluşan sandviç panelin burkulma davranışı ve burkulma yüklerini belirlemek amacıyla ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

Noktasal desteklenmiş sandviç panelin ölçüleri ve modelin sonlu elemanlara ayrılmış hali Şekil 3.5'te verilmiştir. FDPM'den oluşan sandviç panelin yüksekliği $a=350\text{ cm}$, genişliği $b=120\text{ cm}$ 'dir. Sandviç yapının kalınlığı ise, plakların kalınlığı 8 mm ve yapışkanın kalınlığı 1.52 mm olmak üzere, toplam kalınlık $t=17.52\text{ mm}$ 'dir. Noktasal destek yerleri köşelerden 10 cm (c) uzaklıkta ve $d=4.2\text{ cm}$ çapındadır.



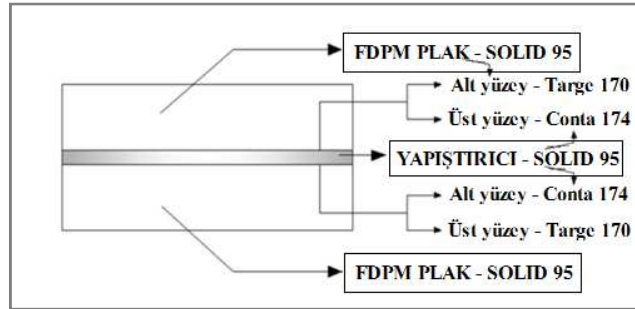
Şekil 3.5 Noktasal desteklenmiş FDPM sandviç panel ölçüleri ve sonlu elemanlar modeli

Şekil 3.6a'da doğrusal desteklenmiş FDPM sandviç panelin boyutları verilmiştir. Sandviç panel noktasal desteklenmiş durum ile aynı boyutlara sahip yüksekliği $a=350\text{cm}$, genişliği $b=120\text{ cm}$ ve kalınlığı $t=17.52\text{ mm}$ ölçülerindedir. Doğrusal desteklenmiş panelin, doğrusal bir kanala macun (silikon) yardımıyla bağlantısı ile ilgili detaylar Şekil 3.6b'de verilmiştir. Burada silikon kalınlığı 9.5 mm , silikon genişliği $h_s=40\text{ mm}$ 'dir. Bağlantıdaki ayar blokların genişliği $d_b=100\text{ mm}$ ve aralarındaki mesafe 24 cm 'dir.



Şekil 3.6 Doğrusal desteklenmiş FDPM sandviç panel a) panel ölçüleri, b) bağlantı detayları

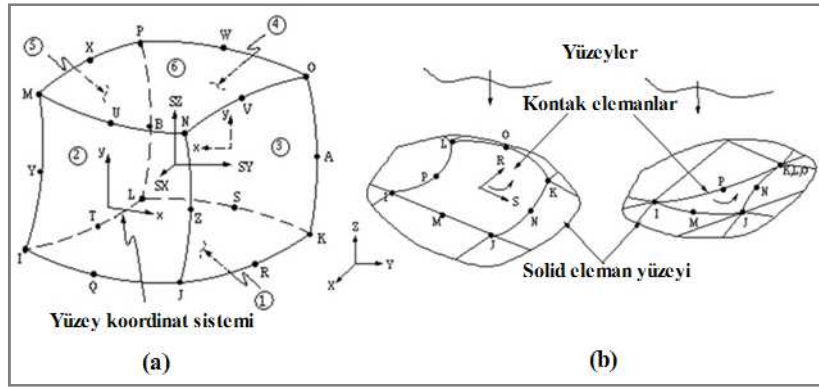
Sonlu elemanlar analizinde yer alan sonlu elemanlara bölme (meshleme) işleminde plak kalınlıkları ikiye bölünmüş ve kritik yerlerdeki örneğin; deliklerdeki mesh boyutları dikkatle seçilmiştir. Mesh boyutları seçiminde, solid elemanda, elemanın kenar uzunlukları oranı 1/20'den küçük olmamalı ve eleman kenarları arasındaki açı 70°'den az olmamalı gibi literatürde verilen önermeler [135] dikkate alınmıştır. Bunun sonucunda en uygun mesh boyutu ve mesh kombinasyonu modele uygulanmıştır. Ayrıca, yapıştırıcı tabaka kalınlığı dolaylarındaki mesh yoğunluğu dikkatle ele alınmıştır. SOLID 95 elemanı yapıştırıcı tabakayı ve yapıştırılan plakları modellemek için seçilmiştir. Bu modellemede, yapıştırıcı ve yapıştırılan tabakalar arasında kontak çiftleri (conta ve targe elemanlar) yer alır. Bunlar temas yüzeylerinde yer alması gereken yüzey kontak elemanlarıdır ve konumları Şekil 3.7'de verilmiştir. Kontak çiftlerinde kullanılan 'CONTA 174' ve 'TARGE 170' elemanları düğüm noktalarına (nodlara) göre daha gerçekçi sonuçlar sağlayan Gauss noktalarını kullanırlar ve bu elemanların yer aldığı yerlerde düğüm noktaları arasında kuvvet iletimi değil, Gauss noktaları arasında temas basınç iletimi gerçekleşir [134].



Şekil 3.7 Yapıştırıcı ve yapıştırılan plakalardaki conta ve targe elemanlarının konumları

Kontak çifti elemanlarının yüzeylere yerleştirilmesinde, CONTA 174 elemanın daha fazla deforme olacak yüzeye yerleştirilmesi gerektiği hususu dikkate alınmıştır ve böylece yapıştırıcının alt ve üst tabakasına yerleştirilmiştir. CONTA 174, üç boyutlu sekiz noda sahip bir elemandır ve yapısı Şekil 3.8'de görülebilir. TARGE 170 adlı eleman ise CONTA 174 elemanlarıyla temasta olacak şekilde yapıştırılan plakların yüzeylerine yerleştirilir. Penaltı metodu, kontak algoritması olarak seçilmiştir. Penaltı fonksiyonlarının yer değiştirme tabanlı bir çözüm sunduğu, kontak rijitliği ve penetrasyonun (iç içe geçme) incelenmesinin bu model için önemli olduğu dikkate alınmıştır. Modelde temas olan yerlerde uygun yakınsamalar için doğru penetrasyon

değerlerinin alınması gerekir ve bu penetrasyon değerleri olabildiğince küçük olmalıdır. Bu durum ise sonlu elemanlar programında, kontak rijitliğini arttırmak suretiyle mümkündür. ANSYS yazılımında kontak rijitliğinin artmasını sağlayan, normal penaltı rijitlik faktörü FKN değeri 1 olarak tanımlanmıştır. Fakat, bu FKN değeri değiştirilerek kabul edilebilir bir penetrasyon ve optimum bir yakınsama elde edilinceye kadar analiz tekrar edilmelidir. Moura vd. [94] sonlu elemanlar analizinde, iyi bir performans elde etmek için FKN değerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiğini vurgulamışlardır ve çalışmalarında 10^7 N/mm³ değerini tavsiye etmişlerdir. Yapılan tez çalışmada FKN değeri 10^7 N/mm³ olarak alınmıştır. İki temas yüzeyi arasında ayrılmaya ve kaymaya izin verilmemiş ve Ansys "bonded always" komutu yardımıyla target ve conta yüzeyler arası boşluklar giderilmiştir.



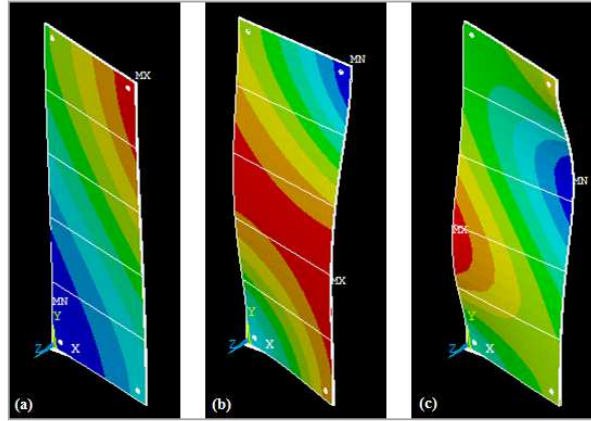
Şekil 3.8 Eleman Tipleri a) Solid 95, b) Conta 174 ve Targe 170

3.1.3 Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde, hem noktasal desteklenmiş hem de doğrusal desteklenmiş FDPm'den oluşan sandviç panelin burkulma davranışı, üç farklı yükleme tipi için incelenmiştir. Bu yükleme tipleri, düzlem içi kesme kuvveti (V), düzlem içi normal bası kuvveti (N) ve yayılı yük (q)'dır. Çalışmada analiz edilen üç tip sandviç panel yapısı vardır ve bunlar PAM-PAM plak çifti, PV-PV plak çifti ve iki yapıştırılmış plak malzemesi de farklı olan PAM-PV plak çiftidir. Sonlu elemanlar analizi, bu plak çiftlerinde kesme kuvvetinden kaynaklanan burkulma ve deformasyon incelenmesi için kullanılmıştır.

Analiz sonucunda, maksimum yerdeğiştirmeler Şekil 3.9'da %3 PAM-PAM sandviç panelin ilk üç modu için verilmiştir. Şekil 3.9c'de -z yönünde (mavi bölge) ve +z yönünde çökme (kırmızı bölge) olduğu görülmektedir. Sandviç panelde maksimum çökme

her zaman aynı yerde oluşmaz, serbest kenarlar boyunca yükleme miktarına göre yerdeğişir. Diğer grafit tipleri ve hacim oranları için burkulma mod şekilleri benzerdir.

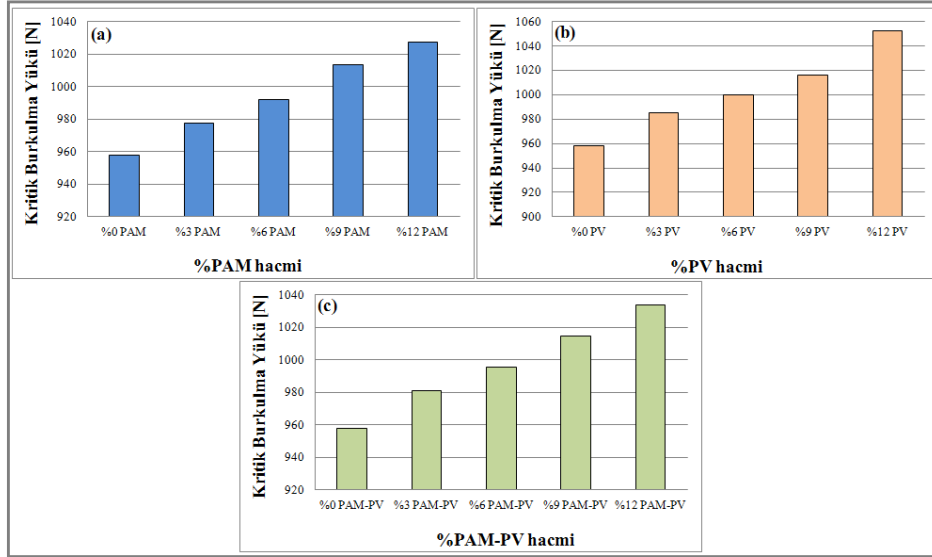


Şekil 3.9 %3 PAM-PAM için mod şekilleri a) mode 1, b) mode 2, c) mode 3

Elastik burkulma analizi, FDPM'den oluşan sandviç panellerin kritik burkulma yüklerinin tahmini için modellere uygulanmıştır ve burkulma yüküne grafit türü/hacim oranı ve grafit dağılıma şeklinin etkileri Şekil 3.10-3.18'de verilmiştir.

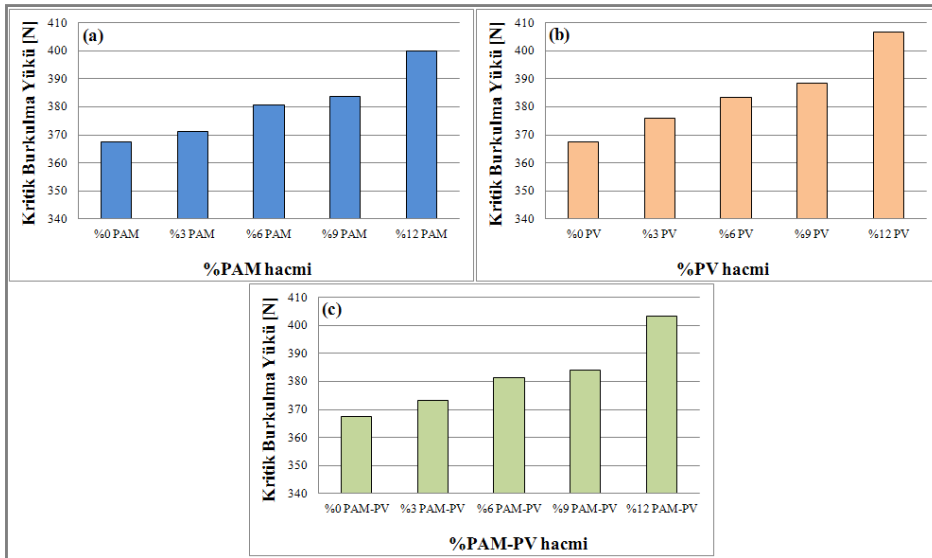
Şekil 3.10'da, görüldüğü gibi kritik burkulma yükleri, farklı grafit tozu hacim oranlarına sahip (%3, %6, %9, %12) ve hiç grafit tozu eklenmemiş (%0) sandviç panel için karşılaştırılmıştır. Kritik burkulma yükü ne PAM ne de PV grafit tozu eklenmemiş olan ve %0 PAM ve %0 PV olarak tanımlanan sandviç panelde 958.07 N'dur. Bu değer, %12 grafit tozu ilave edilmiş PAM-PAM sandviç panel için 1027.2 N ve %12 hacim oranında PV-PV sandviç panel için 1054.02 N'dur. %12 PAM-PV sandviç panelde ise kritik burkulma yükü değeri %12 PAM-PAM ve %12 PV-PV arasındadır ve değeri 1033.6 N'dur.

Düzlem içi kesme yükü (V), altında noktasal desteklenmiş FDPM sandviç panel için, PAM grafit tozu hacim oranı %3'den %12'ye çıkartıldığında, kritik burkulma yükü %5.07 artmıştır. Bu artış PV-PV panel için %6.80 iken, PAM-PV panel için %5.33'tür. En yüksek kritik burkulma yükü, PV-PV plak çifti için saptanmıştır ve bu sonuç, PV grafit tozunun reçine ile daha uyumlu olduğunu ve burkulmaya karşı daha iyi yanıt verdiğini göstermiştir.



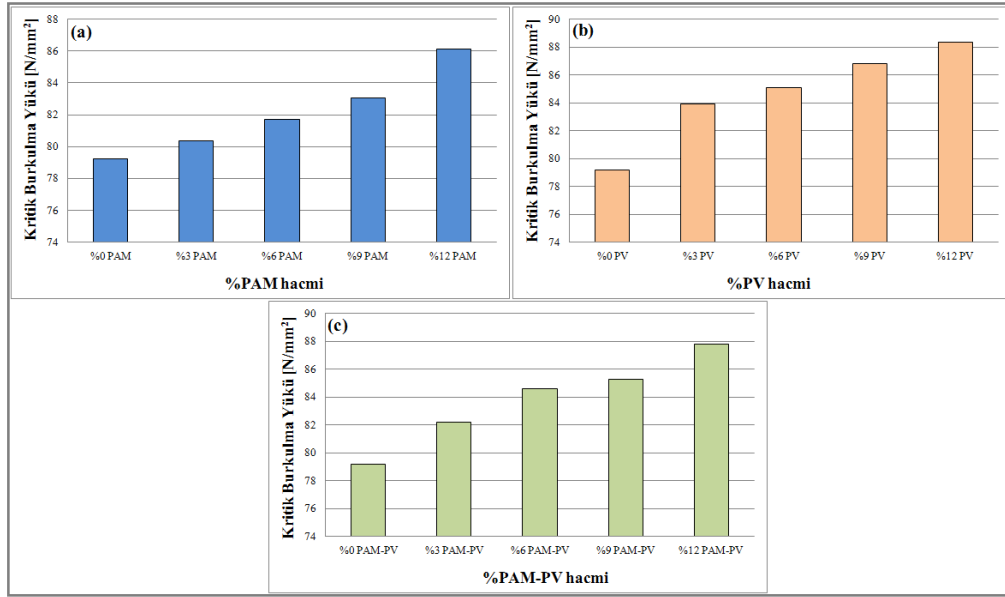
Şekil 3.10 Grafite hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel düzlem içi kesme kuvveti altında, V, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV

Noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç paneller, düzlem içi normal bası kuvveti (N) ile yüklendiğinde oluşan kritik burkulma yük değerleri Şekil 3.11'de verilmiştir. Grafite hacim oranı %9'dan %12'ye arttırıldığında, PAM-PAM sandviç panelde kritik burkulma yükü %4.21 artarken PV-PV panelde %4.71 artmıştır. Bu artışlar, grafite tozunun fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemenin mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur.



Şekil 3.11 Grafite hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel düzlem içi normal bası kuvveti altında, N, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV

Yüksek elastisite modüllü grafit tozu eklenmiş sandviç panellerin mekanik özellikleri, nispeten daha düşük elastisite modüllü grafit tozu eklenmiş sandviç panellerden daha üstündür. Şekil 3.12'de noktasal desteklenmiş ve yayılı yük (q) altında sandviç panellerin kritik burkulma yükleri verilmiştir. Yayılı yük sebebiyle oluşan kritik burkulma yüklerinin, grafit tozu ekleyerek yapılan fonksiyonel derecelendirmeden fazla etkilenmediği görülür.



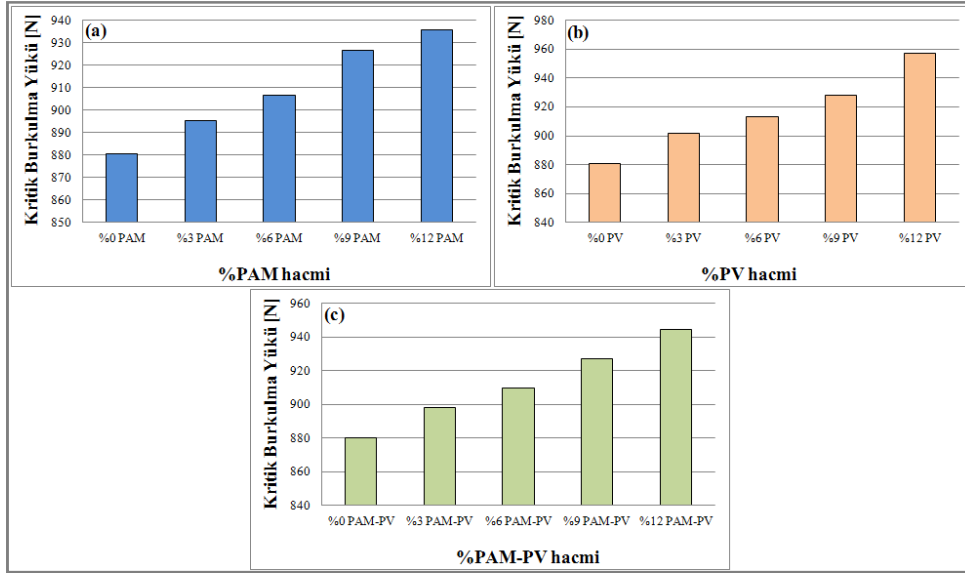
Şekil 3.12 Grafit hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel yayılı yük altında, q, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV

Şekil 3.13'de düzlem içi kesme kuvveti (V) altında doğrusal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panelin kritik burkulma yüklerinin grafit tipi ve hacmine göre değişimi verilmiştir. Şekil 3.13 ve Şekil 3.10 karşılaştırıldığında, doğrusal desteklenen sandviç paneldeki burkulma yük değerlerinin noktasal desteklenmiş sandviç panelden daha düşük olduğu görülür.

Noktasal desteklenmiş sandviç panelde, mesnetler için açılan delikler panel direncini azaltmasına rağmen, bu noktasal destek sisteminde panelde çeki ve bası diyagonelleri oluşmuştur. Bu diyagoneller sandviç panele bir rijitlik etkisi sağlamıştır. Bu etki noktasal desteklenmiş sandviç panelin, düzlem içi küçük yerdeğiştirmelere ve yüksek kritik burkulma yüklerine sahip olmasını sağlamıştır.

Doğrusal desteklenmiş sandviç panelde ise, sabitlemede kullanılan silikonun sahip olduğu yüksek deformasyon tüm sandviç yapının deformasyonunu önemli derecede

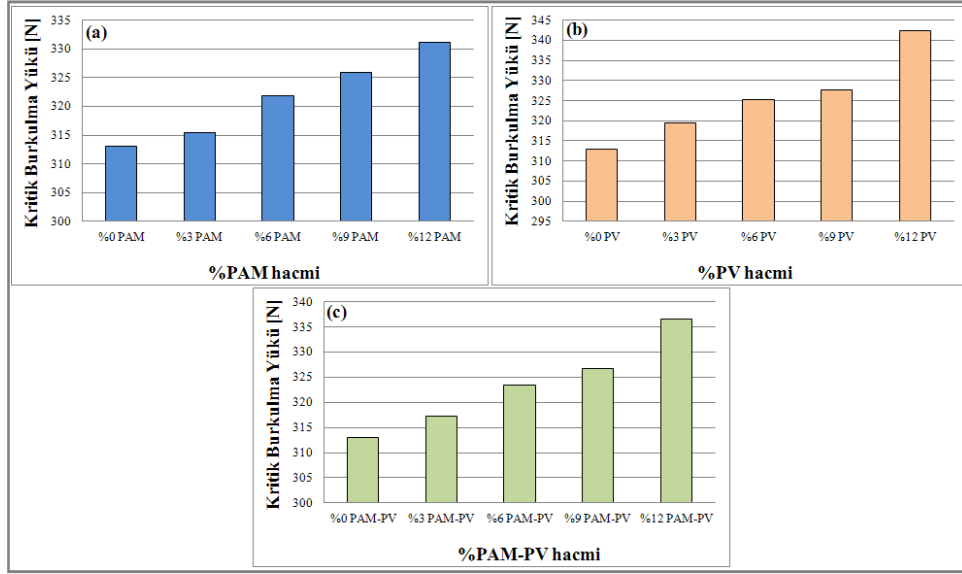
etkiler. Böylece, doğrusal desteklenmiş sandviç paneller yüksek deformasyonlar ve burkulmaya karşı düşük direnç gösterirler. Yüksek deformasyonlara ve düşük kritik burkulma yüklerine sahip doğrusal desteklenmiş sandviç paneller, düzlem içi kesme kuvveti transferi için sınırlı bir potansiyele sahiptir.



Şekil 3.13 Grafite hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, doğrusal desteklenmiş FDPMDen oluşan sandviç panel düzlem içi kesme kuvveti altında, V, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV

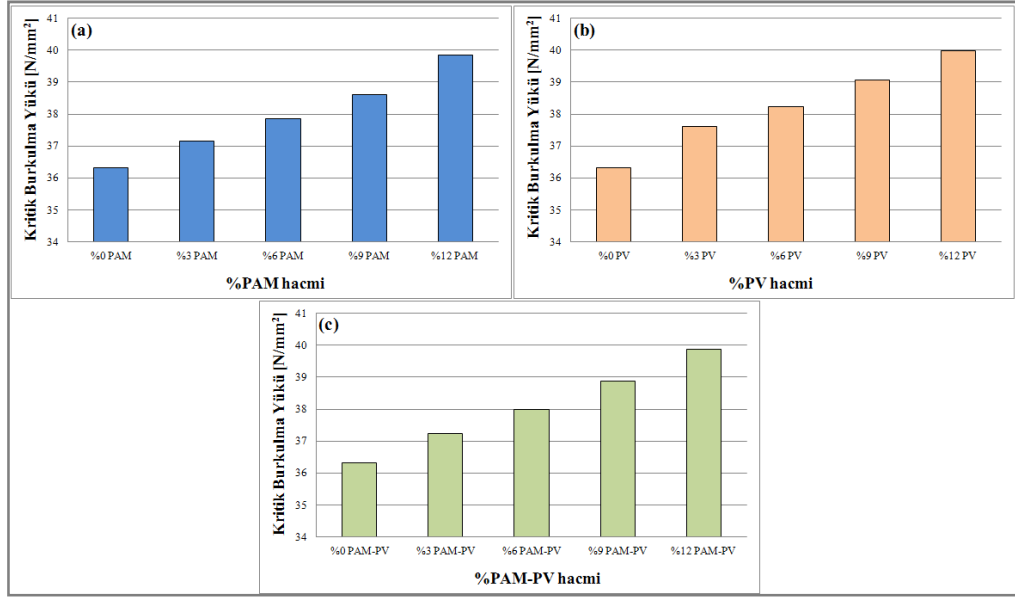
Şekil 3.14'de düzlem içi normal bası kuvveti (N) altında doğrusal desteklenmiş FDPMDen yapılan sandviç panelde oluşan kritik burkulma yükleri verilmiştir. Bu burkulma yükleri, hiç grafite tozu ilave edilmemiş sandviç panellerin burkulma yükü ile karşılaştırılmıştır. %12 PAM-PAM sandviç panelin kritik burkulma yükü hiç grafite tozu eklenmemiş panelin kritik burkulma yükünden %5.78 fazladır. Bu artış %12 PV-PV için %9.40 ve %12 PAM-PV için %7.53'dür.

Sayısal sonuçlarda görüldüğü gibi, PAM-PV sandviç panelin burkulma değerleri her hacim oranı için PAM-PAM ve PV-PV sandviç panellerin burkulma değerlerinin arasında yer alır. Analiz sonuçları, epoksi reçine içerisine grafite tozu eklenerek ve derecelendirme yapılarak oluşturulan yeni sandviç panellerin dayanımlarının, grafite tozu ilave edilmemiş sandviç panelden yüksek olduğunu göstermiştir. Bununla beraber kritik burkulma yük değerlerinin ilave edilen grafite tozu hacmi arttıkça arttığı görülmüştür. Bu sonuçlar, ilave edilen grafite tozlarının reçine ile uyumlu olduğu ve mekanik özelliklerinin gelişmesine yardımcı olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 3.14 Grafit hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, doğrusal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel düzlem içi normal bası kuvveti, N, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV

Analizlerle yapılan incelemeler sonucunda, panelin burkulma dayanımının panelin malzeme yapısına, yükleme ve bağlantı koşullarına bağlı olduğu görülür. Uygulanan yükler, grafit tozunun derecelendirme doğrultusu dikkate alınarak seçilmelidir. Örneğin, Yayılı yük (q) altındaki doğrusal desteklenmiş FDPM sandviç panelin kritik burkulma yükleri derecelendirme özelliğinden fazla etkilenmemiştir. Şekil 3.15'te görüldüğü gibi PAM-PAM, PV-PV ve PAM-PV plak çiftlerinin kritik burkulma değerleri birbirlerine yakındır.



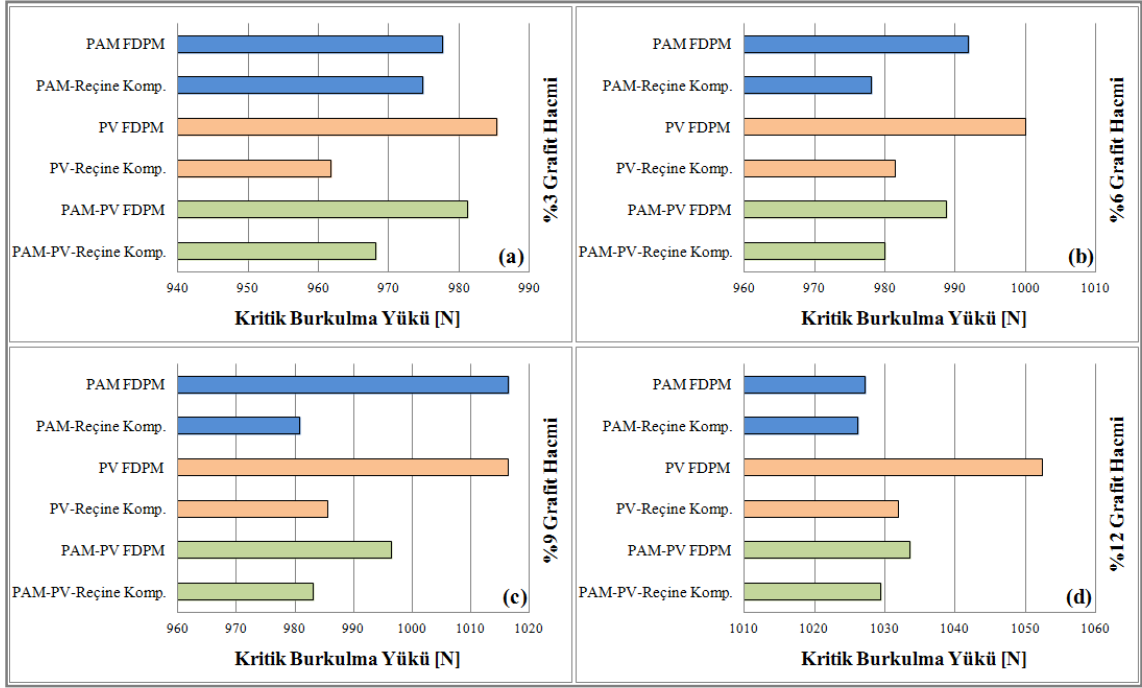
Şekil 3.15 Grafit hacim oranının kritik burkulma yüküne etkisi, doğrusal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel yayılı yük altında, a) PAM-PAM, b) PV-PV, c) PAM-PV

Şekil 3.16'da grafit tozlarının reçine içerisine homojen dağılımları ile fonksiyonel derecelendirilmiş olarak dağılımları durumundaki kritik burkulma yükleri verilmiştir. Karşılaştırma düzlem içi kesme kuvveti (V) altında noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel için yapılmıştır.

Homojen dağılıma sahip sandviç paneller, PAM-reçine kompozit, PV-reçine kompozit ve PAM-PV-reçine kompozit olarak adlandırılmıştır.

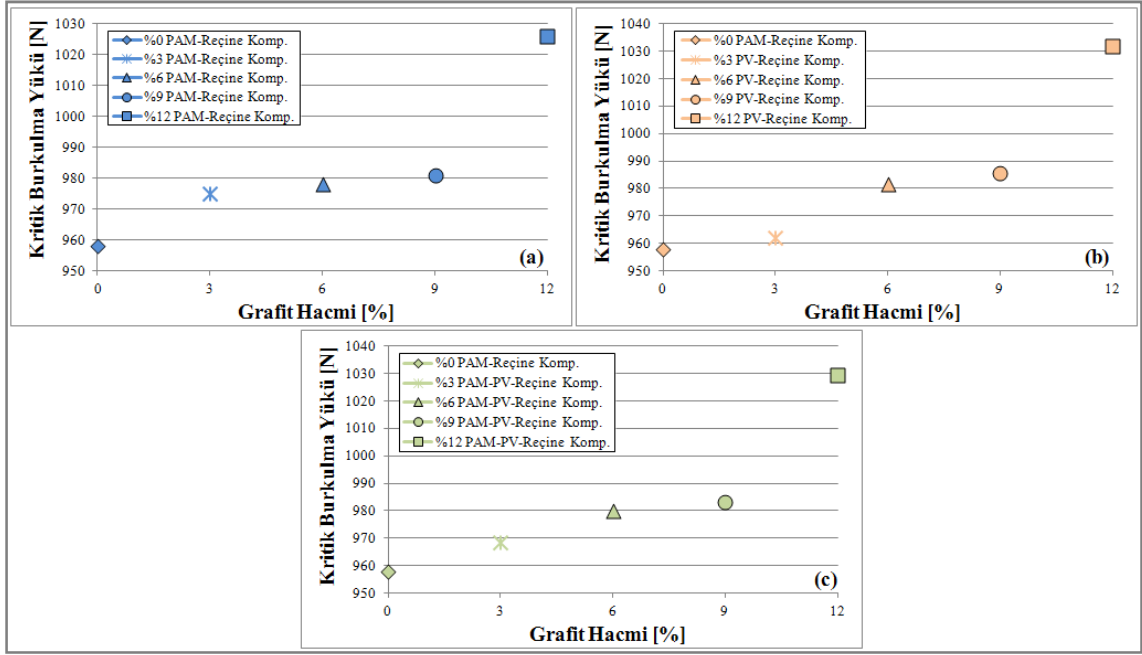
Fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç panellerin kritik burkulma yükleri tüm grafit türleri ve hacim oranlarında, homojen dağılıma sahip sandviç panelin kritik burkulma değerlerinden yüksektir. %6 PAM grafit tozunun fonksiyonel derecelendirilmiş olarak dağıldığı sandviç paneldeki kritik burkulma yükü, homojen dağılmış paneldeki kritik burkulma yükünden %1.41 daha yüksektir. Bu değer, PV-PV sandviç panel için %1.90 ve PAM-PV sandviç panel için % 0.89 olarak hesaplanmıştır.

En yüksek kritik burkulma yükü fonksiyonel derecelendirilmiş dağılıma sahip olan %12 PV-PV sandviç panel için elde edilirken, en küçük kritik burkulma değeri homojen dağılıma sahip %3 PV-reçine kompozit için elde edilmiştir. Sonuç olarak, tüm grafit tiplerinde ve hacim oranlarında, fonksiyonel derecelendirilmiş dağılımla elde edilen sandviç panellerde kritik burkulma yüklerinin, homojen dağılıma göre daha yüksek olduğu görülür.



Şekil 3.16 Grafit dağılım tipinin kritik burkulma yüküne etkisi, düzlem içi kesme kuvveti altında noktasal desteklenmiş plak a) %3 grafit hacmi, b) %6 grafit hacmi, c) %9 grafit hacmi, d) %12 grafit hacmi

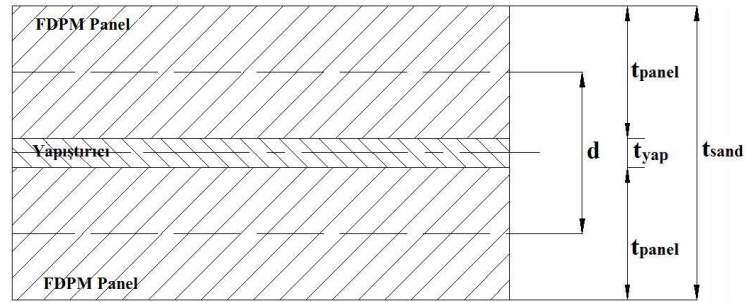
Homojen dağılıma sahip sandviç panellerin kritik burkulma yükleri, hiç grafit tozu ilave edilmemiş sandviç panellerin kritik burkulma yükü ile Şekil 3.17'de karşılaştırılmıştır. Homojen dağılımlı sandviç panellerde, grafit hacim oranı arttıkça kritik burkulma yükü de artar. Kritik burkulma yükleri, grafit tozunun hacim oranı %3, %6 ve %9 olarak arttığında belli bir miktarda artmış olmasına rağmen, %12 hacim oranında önemli ölçüde bir artış göstermiştir. Bu durum Şekil 3.17'de görülmektedir. %12 PAM-reçine kompozit sandviç paneldeki burkulma yükleri, hiç grafit tozu eklenmemiş panelin kritik burkulma yükünden %7.1 daha fazladır. Bu artış, %12 PV için %7.71 ve % PAM-PV için %7.45'dir (Şekil 3.17b ve 3.17c).



Şekil 3.17 Grafit hacim oranının homojen dağılımda kritik burkulma yüküne etkisi, düzlem içi kesme kuvveti (V) altında noktasal desteklenmiş FDPM'den oluşan sandviç panel a) PAM-Reçine, b) PV-Reçine, c) PAM-PV-Reçine

3.1.4 Sonlu Elemanlar Analizinin Doğrulanması

Yapılan sonlu elemanlar analizinin doğrulanması, klasik sandviç teorisi dikkate alınarak yapılmıştır. Böylece, düzlem içi kesme kuvveti altındaki sandviç panelin, kesme burkulma kaysayısı k_t ve kritik kesme burkulma yükü V_{kr} belirlenebilir. Literatürde de [44], [136] belirtildiği gibi, Kuenzi vd. [137] düzlem içi kesme kuvvetine maruz, basit ve ankastre mesnetli dikdörtgen izotropik sandviç panel için burkulma problemini çözmüşlerdir. Kuenzi vd [137]'nin sunduğu çözüm tez çalışmasındaki FDPM'den oluşan sandviç panele uyarlanmıştır. Şekil 3.18'de tez çalışmasında yer alan FDPM'den oluşan sandviç panelin ölçüleri görülmektedir.



Şekil 3.18 FDPM'den oluşan sandviç panelin şematik görünümü

Kuenzi'nin ifadeleri bu çalışmada ele alınan düzlem içi kesme kuvveti altındaki FDPM'den oluşan sandviç panele uygulandığında, aşağıdaki denge denklemi elde edilir:

$$\frac{D_i}{S_{yap}} \Delta^3 w - \frac{D_{sand}}{D_o + D_c} \Delta^2 w = 2V \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \left(\frac{\Delta w}{S_{yap}} - \frac{1}{D_o + D_c} \right) \quad (3.1)$$

burada D_i , FDPM'den oluşan plakların kendi tarafsız eksenlerindeki eğilme rijitliğidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır: (Sandviç yapı kalınlıkları t_{panel} olarak tanımlanmış iki adet FDPM panelden meydana gelir).

$$D_i = \frac{Et_{panel}^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{Et_{panel}^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{Et_{panel}^3}{6(1-\nu^2)} \quad (3.2)$$

ve D_o , FDPM'den oluşan sandviç panelin merkezi eksendeki eğilme rijitliğidir, D_o 'tanımı aşağıda verilmiştir:

$$D_o = \frac{Et_{sand}d^2}{2(1-\nu^2)} \quad (3.3)$$

d , panellerin merkezi eksenleri arasındaki mesafedir ve

$$d = \frac{t_{panel}}{2} + \frac{t_{panel}}{2} + t_{yap} \quad (3.4)$$

olarak belirlenir.

Denklem 3.1'de yer alan D_c , yapıştırıcı tabakanın eğilme rijitliğidir:

$$D_c = \frac{E_{yap}t_{yap}^3}{12(1-\nu_{yap}^2)} \quad (3.5)$$

D_{sand} , ise tüm sandviç yapının eğilme rijitliğidir:

$$D_{sand} = D_i + D_o + D_c \quad (3.6)$$

S_{yap} , yapıştırıcının kayma rijitliğidir ve tanımı aşağıda verilmiştir.

$$S_{yap} = \frac{G_{yap}d^2}{t_{yap}} \quad (3.7)$$

Kuenzi vd [120]'nin çözümünde, sandviç panel için kritik kesme burkulma yükü $V_{kr,sand}$ aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$V_{kr,sand} = \frac{\pi^2 D_{sand}}{b^2} k_{\tau,sand} \quad (3.8)$$

Burada yer alan, Kuenzi [120] tarafından tanımlanmış kesme burkulma katsayısı $k_{\tau,sand}$, plağın boyutlarının oranına α ($=a/b$) ve yapıştırıcının kayma rijitliğine bağlıdır.

Basit mesnetlenmiş sandviç panel için bu kesme burkulma katsayısı $k_{\tau,sand}$,

$$k_{\tau,sand} = \frac{\frac{16}{3} + \frac{4}{\alpha^2}}{1 + \frac{\pi^2 D_{sand}}{b^2 S_{yap}} \left(\frac{13}{3} + \frac{3}{\alpha^2} \right)} \quad (3.9)$$

Benzer olarak ankastre mesnetlenmiş sandviç panel için ise bu değer,

$$k_{\tau,sand} = \frac{9 + \frac{17}{3\alpha^2}}{1 + \frac{\pi^2 D_{sand}}{b^2 S_{yap}} \left(\frac{23}{3} + \frac{13}{3\alpha^2} \right)} \quad (3.10)$$

olarak verilmiştir.

Kesme burkulma katsayısı, $k_{\tau,sand}$ denklem 3.9 ve 3.10 yardımıyla, noktasal desteklenmiş sandviç panel ve doğrusal desteklenmiş sandviç panel için ayrı ayrı hesaplanmış ve denklem 3.8 'de kullanılmıştır. FDPM'den oluşan plakların elastisite modülleri her beş bölge için denklem 2.31 ve 2.32 ve Çizelge 2.3 kullanılarak hesaplanmıştır. FDPM'den oluşan plağın elastisite modülünü basit bir şekilde ele almak için bu beş değer aritmetik ortalaması alınmıştır. Analitik hesaplamalar, yüksek kritik burkulma yüklerine sahip %12 PAM-PAM ve % 12PV-PV panel çiftleri için yapılmıştır.

Sonlu elemanlar sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırıldığında, %12 PV-PV sandviç panel için kritik burkulma yükleri arasındaki fark noktasal desteklenmiş panel için %6.32, doğrusal desteklenmiş panel için %5.75 dir. Bu farkları %12 PAM-PAM sandviç panel için noktasal desteklenmiş durumda %3.77 ve doğrusal desteklenmiş durumda %3.40'dır.

Diğer bir doğrulama için, tez çalışmasında kullanılan sonlu elemanlar modeli, literatürde [44] deneysel çalışması yapılan cam sandviç panele uygulanmıştır. Deneysel çalışmada, kritik burkulma yüklerindeki düzlem içi yerdeğiştirme, u , değerleri noktasal desteklenmiş cam sandviç panelde 6.90 mm ve doğrusal desteklenmiş panelde 48.62 mm olarak hesaplanmıştır [44]. Bu değerler, tez çalışmadaki sonlu elemanlar modeli cam sandviç panele uygulandığında ise noktasal desteklenmiş panelde 6.19, doğrusal desteklenmiş panelde 46.43 mm olarak hesaplanmıştır. Böylece, sonlu elemanlar

modeli hem noktasal desteklenmiş hem de doğrusal desteklenmiş sandviç panel için doğrulanmıştır.

3.2 FDPM'den Yapılan Tek Bindirme Bağlantılarında Gerilme Davranışı

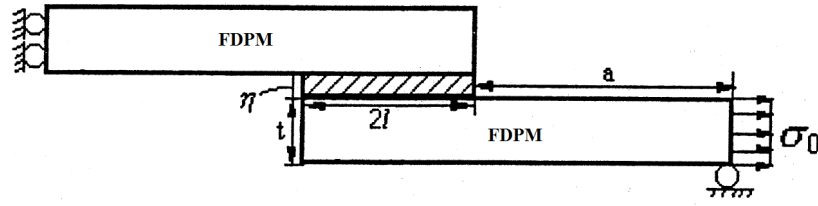
Belirli bir bindirme uzunluğunda, iki tabakanın birleştirilmesiyle oluşan tek bindirme bağlantısı, pratikte en yaygın kullanılan yapıştırma bağlantı tipidir. Bağlantı güvenliği ve bağlantının uzun süreli kullanımı için, tek bindirme bağlantılarında hassas bir gerilme analizinin yapılması gerekir. Literatürde, tek bindirme bağlantısında kullanılan polimerik malzemenin içerisine kil ve grafit ilave ederek mekanik özelliklerin ve bağlantı dayanımının arttırabileceğini belirten [58], [25], çeşitli yükleme durumları için bağlantı dayanımını tahmin etmeye çalışan [48] ve tek bindirme bağlantılarında yapıştırıcı tabakasındaki kayma ve soyulma gerilmelerinin incelenmesi gerektiğini vurgulayan çalışmalar [54] mevcuttur.

Bölüm 3.2'de, yeni tasarlanmış FDPM'den oluşan tek bindirme bağlantısının gerilme davranışları üzerine odaklanılmıştır. Bunun için literatürde yer alan [56] çalışmadaki, düzgün yayılı çekme yüküne maruz tek bindirme bağlantı geometrisi ele alınmıştır. Fakat bağlantıdaki yapıştırılan kirişlerin FDPM'den meydana geldiği kabul edilmiştir. Kirişler, son zamanlarda geliştirilen ve Bölüm 2.4.1'de tanımlanmış yeni bir FDPM kullanılarak modellenmiştir. Yapıştırılan kirişleri oluşturan FDPM, epoksi reçine içerisine PAM 96/98 ve PV 60/65 grafit tozlarının %3, %6, %9 ve %12 hacim oranlarında eklenmesi sonucunda elde edilmiştir. Düzgün yayılı çekme yükü ve eğilme momentine maruz bağlantıda, grafit tipinin ve grafit hacim oranının maksimum kesme, soyulma ve von-Mises gerilmeleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Ayrıca, PAM 96/98 ve PV 60/65 grafit tozu ilave edilmiş tek bindirme bağlantılarında meydana gelen yerdeğişirmeler her hacim oranı için belirlenmiş ve grafikler halinde sunulmuştur. Tek bindirme bağlantısında, yapıştırıcının orta tabakasından meydana gelen tüm gerilme dağılımları düzgün yayılı çekme yükü ve eğilme momenti altındaki bağlantılar için incelenmiştir.

3.2.1 Farklı Sınır Koşulu ve Yükler Altındaki FDPM'den Yapılan Tek Bindirme Bağlantıları

Bu bölümde, düzgün yayılı çekme yükü ve eğilme momentine maruz PAM 96/98 ve PV 60/65 grafit tozu ilavesiyle meydana gelen yeni FDPM'den yapılan tek bindirme bağlantısı incelenmiştir. FDPM'den yapılan tek bindirme bağlantısının düzgün yayılı çekme yükü altındaki geometrisi [56] no'lu çalışmadaki gibi ele alınmış ve Şekil 3.19'da gösterilmiştir.

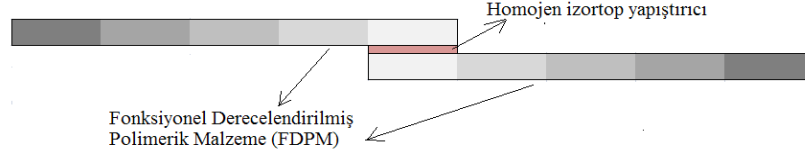


Şekil 3.19 Düzgün yayılı çekme yükü altında FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısı [56]

Şekil 3.19'da verilen tek bindirme bağlantı geometrisinde [56], yapıştırıcı bağlantı boyu $2l=16\text{mm}$, $a=32\text{ mm}$, kalınlıklar sırasıyla, yapıştırıcı kalınlığı $\eta=0.32\text{ mm}$, alt ve üst yapıştırılan malzeme kalınlığı $t=1.6\text{ mm}$ 'dir. Sayısal hesaplamalarda, uygulanan düzgün yayılı çekme yükün şiddeti literatürdeki [56] gibi $\sigma_0=9.81\text{ MPa}$ alınmıştır.

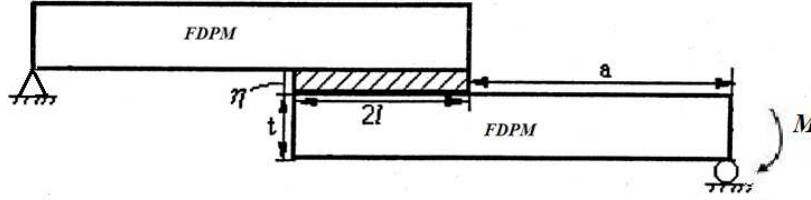
Tek bindirme bağlantısı modellenirken klasik varsayımlar kullanılmıştır. Örneğin, FDPM'den yapılmış kirişler başlangıçta doğru eksenli olup, herhangi bir geometrik kusur içermezler. Kullanılan yapıştırıcı malzeme lineer, elastik, homojen ve izotrop malzemedir aynı zamanda yapıştırıcı tabaka kalınlığı sabittir.

Loctite firması tarafından üretilen Elastisite Modülü 1.78 GPa ve Poisson oranı 0.376 olan Hysol 9464 [133] adlı yapıştırıcı FDPM'den yapılan kirişlerin yapıştırılması için seçilmiştir. Tek bindirme bağlantısındaki homojen izotrop yapıştırıcı, yapıştırılan FDPM'nin aksenal doğrultuda dereceli olduğu şematik olarak Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Yapıştırılan FDPM'lerin elastisite modülleri Bölüm 2.4.1'de belirtildiği gibi hesaplanmıştır.



Şekil 3.20 FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısının şematik gösterimi

Bir diğer yükleme durumu ise eğilme momentidir. Analizlerde, eğilme moment değeri $M=9.81$ Nmm olarak seçilmiştir. Eğilme momenti uygulanmış FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısının sınır koşulları ve geometrisi Şekil 3.21'de verilmiştir. Bağlantı geometrisinde yer alan uzunluk ve kalınlık değerleri Şekil 3.19'da verilen değerlerle aynıdır.

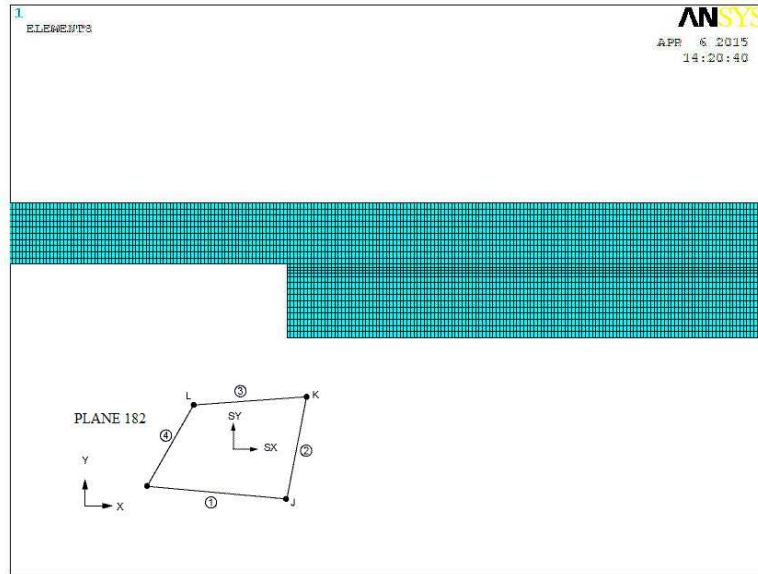


Şekil 3.21 Eğilme momenti altında FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısı

Bu bölümde yer alan çalışmada, iki tip tek bindirme bağlantısı modellenmiştir. Bu modellerden ilki PAM96/98-PAM96/98 grafit tozu ilave edilmiş malzemeden meydana gelen kirişlerden oluşurken, diğeri ise PV60/65-PV60/65 grafit tozu ilave edilmiş kirişlerden oluşmuştur.

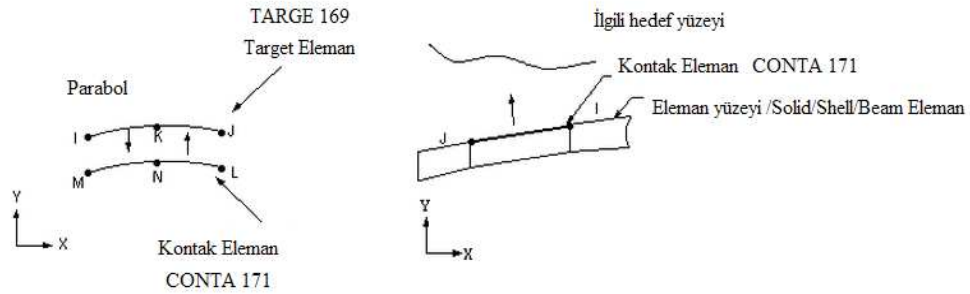
3.2.2 Sonlu Elemanlar Modeli

Düzgün yayılı çekme yükü ve eğilme momenti etkisi altındaki FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantılarında gerilmeleri ve gerilme dağılımlarını belirlemek amacıyla ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde yer alan sonlu elemanlara bölme (meshleme) işlemi sırasında, yapıstırıcı bağlantı yerlerindeki mesh boyutları dikkatle seçilmiştir. Bunun sonucunda en uygun mesh boyutu ve mesh kombinasyonu modele uygulanmıştır. PLANE 182 elemanı yapıstırıcı tabakayı ve yapıstırılan malzemeleri modellemek için seçilmiştir. PLANE 182 iki boyutlu, katı modeller için kullanılan, 4 nodlu bir elemandır ve yapısı Şekil 3.22'de mesh detayı ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.22 Tek bindirme bağlantısında sonlu elemanlar modeli

Bu modellemede, yapıştırıcı ve yapıştırılan tabakalar arasında kontak çiftleri (conta ve targe elemanlar) yer alır, bunlar temas yüzeylerinde yer alması gereken yüzey kontak elemanlarıdır. Kontak çiftlerinde kullanılan "CONTA 171" ve "TARGE 169" elemanları Şekil 3.23'de gösterilmiştir.



Şekil 3.23 Kontak Eleman Tipleri, Conta 171 ve Targe 169

Kontak çifti elemanların yüzeylere yerleştirilmesinde, CONTA 171 elemanı daha fazla deformasyona uğrayacak olan yapıştırıcının alt ve üst tabakasına yerleştirilmiştir. CONTA 171, 2D (iki boyutlu) ve iki noda sahip bir elemandır. TARGE 169 ise CONTA 171 elemanlarıyla temasta olacak şekilde yapıştırılan plakların yüzeylerine yerleştirilir. Yapıştırıcı bağlantı analizlerinde, kontak rijitliğinin ve penetrasyonun kontrolü, normal penaltı rijitlik faktörünün (FKN) değerini kontrollü şekilde ayarlayarak sağlanmıştır.

3.2.3 Sayısal Sonuçlar

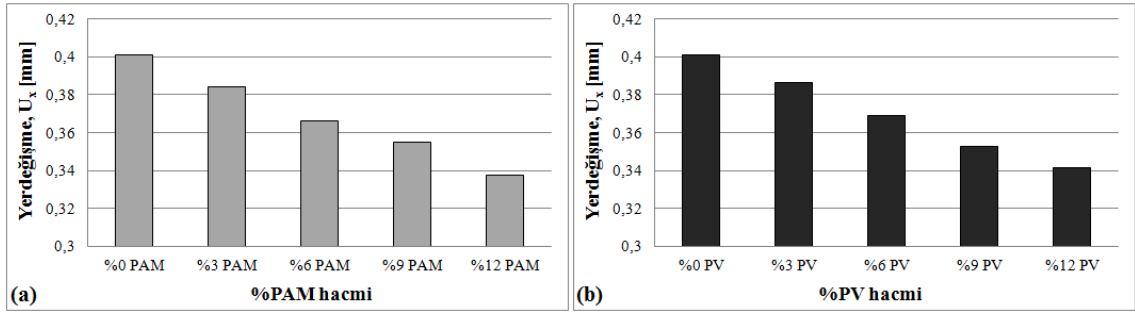
Bu b3l3mde, hem d3zg3n yayılı çekme y3k3ne hem de eğilme momentine maruz FDPm'den yapılmış tek bindirme bağlantısının gerilme davranışı incelenmiştir. Çalışmada analiz edilen iki tip tek bindirme yapısı vardır. Bunlar PAM-PAM grafit tozu içeren kirişlerlerden ve PV-PV grafit tozu içeren kirişlerden meydana gelen bağlantılardır. Bu bağlantı çiftlerinde çekme kuvvetinden ve eğilme momentinden kaynaklanan yerdeğiştirmelerin ve gerilmelerin incelenmesi için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır.

Tek bindirme bağlantılarında maksimum yerdeğiştirmeler (U_x ve U_y) her zaman aynı yerde oluşmaz, kenarlar boyunca, bağlantıdaki grafit tipleri ve grafit hacim miktarına g3re değişir.

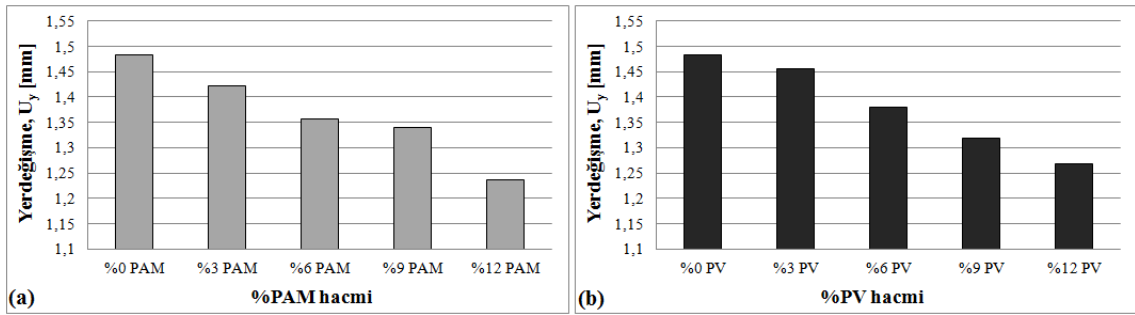
FDPm'den yapılmış tek bindirme bağlantılarının maksimum yerdeğiştirme değerlerinin tahmini için sonlu elemanlar analizi modellere uygulanmıştır. Meydana gelen yer değiştirmelere grafit t3r3 ve grafit hacim oranı etkileri Şekil 3.24 ve Şekil 3.27'de verilmiştir.

Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te, g3r3ld3ę3 gibi maksimum U_x ve U_y yerdeğiştirme değerleri, farklı grafit tozu hacim oranlarına sahip (%3, %6, %9, %12) ve hiç grafit tozu eklenmemiş (%0) tek bindirme bağlantıları için karşılaştırılmıştır. U_y yerdeğiştirme değeri ne PAM ne de PV grafit tozu eklenmemiş olan ve %0 PAM ve %0 PV olarak tanımlanan tek bindirme bağlantısında 1.48 mm'dir. Bu değer, %12 grafit tozu ilave edilmiş PAM-PAM tek bindirme bağlantısı için 1.23 mm ve %12 hacim oranında PV-PV tek bindirme bağlantısı için 1.26 mm'dir.

D3zg3n yayılı çekme y3k3 altındaki FDPm'den yapılan tek bindirme bağlantısında, PAM grafit tozu hacim oranı %3'den %12'ye çıkartıldığında, maksimum U_y yerdeğiştirme değeri %15 ve U_x yerdeğiştirmesi %13.70 azalmıştır. Bu azalış, PV-PV tek bindirme bağlantısı için U_y yerdeğiştirme değerinde %14.80 ve U_x yerdeğiştirmesinde %13.23'd3r. Yerdeğiştirme değerlerindeki bu azalmalar, grafit tozunun fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemedan yapılmış yapıştırıcı bağlantılarının dayanımı 3zerinde 3nemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur.



Şekil 3.24 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, grafit hacim oranının U_x yerdediştirmesine etkisi, a) PAM-PAM, b) PV-PV

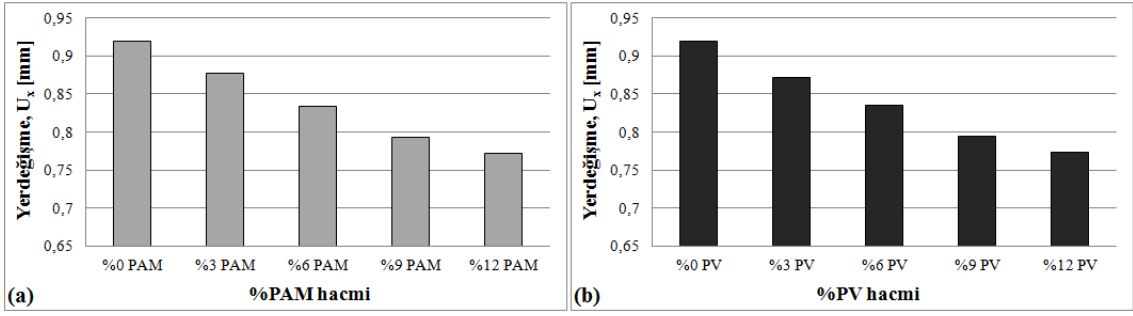


Şekil 3.25 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, grafit hacim oranının U_y yerdediştirmesine etkisi, a) PAM-PAM, b) PV-PV

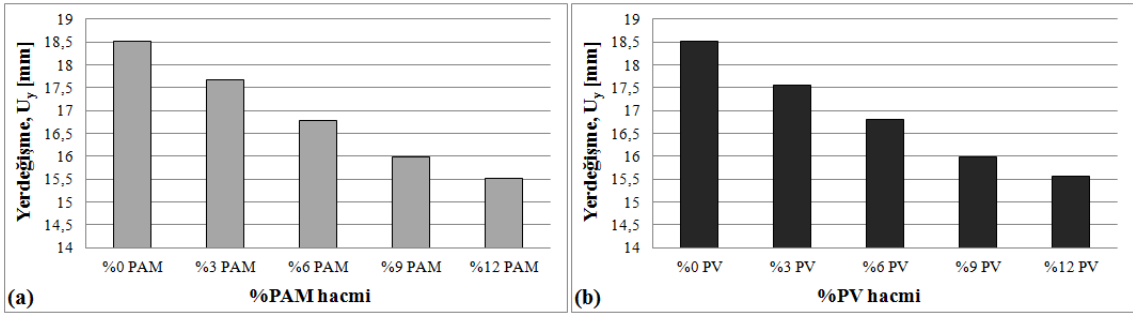
FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantılarına, eğilme momenti uygulandığında oluşan maksimum yerdediştirmeler Şekil 3.26 ve Şekil 3.27'de verilmiştir. Eğilme momenti sebebiyle oluşan maksimum U_y ve U_x yer dedeğiştirme değerlerinin, grafit tozu eklenmemiş tek bindirme bağlantılarına göre daha az olduğu görülür. Şekil 3.27'de PAM ve PV grafit tozu ilave edilmemiş bağlantının U_y yerdediştirmesi 18.5 mm iken bu yer dedeğiştirme değeri %12 hacim oranında grafit tozu ilave edilmiş bağlantılarda yaklaşık 15.5 mm'dir.

Eğilme momenti etkisiyle oluşan maksimum çökme, U_y , değerleri hiç grafit tozu ilave edilmemiş bağlantıların U_y değerleri ile karşılaştırılmıştır. %3 PAM-PAM tek bindirme bağlantısının maksimum çökme değeri, hiç grafit tozu eklenmemiş bağlantının maksimum çökme değerinden %4.7 azdır. Bu azalma miktarı %3 PV-PV için %5.4 civarındadır.

Şekil 3.25 ve Şekil 3.27 karşılaştırıldığında, çekme gerilmesi altındaki tek bindirme bağlantısında maksimum çökme değerinin, U_y , eğilme momenti etkisi altındaki tek bindirme bağlantısından daha düşük olduğu görülür.

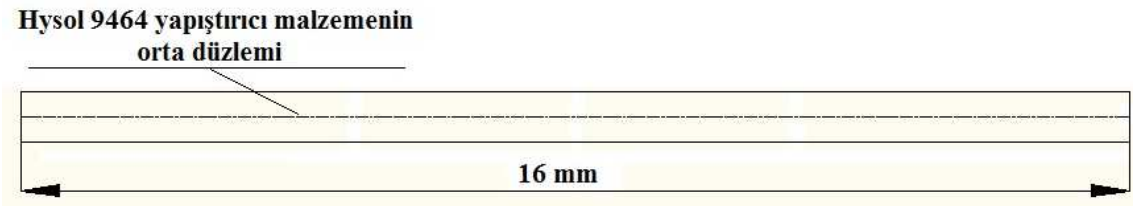


Şekil 3.26 Eğilme momenti (M) altındaki FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, grafit hacim oranının U_x yerdeğiştirmesine etkisi, a) PAM-PAM, b) PV-PV



Şekil 3.27 Eğilme momenti (M) altındaki FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, grafit hacim oranının U_y yerdeğiştirmesine etkisi, a) PAM-PAM, b) PV-PV

Yapıştırıcı tabaka üzerinde oluşan gerilme analiz sonuçları, bağlantı dayanımının ve birleştirilmiş geometrinin kopma davranışının incelenmesi açısından önemlidir. Şekil 3.28'de görülen yapıştırıcı malzemenin orta düzleminde meydana gelen maksimum soyulma (σ_y), kayma (τ_{xy}) ve von-Mises (σ_{von}) gerilme değerleri sonlu elemanlar analizi sonucunda belirlenmiştir.



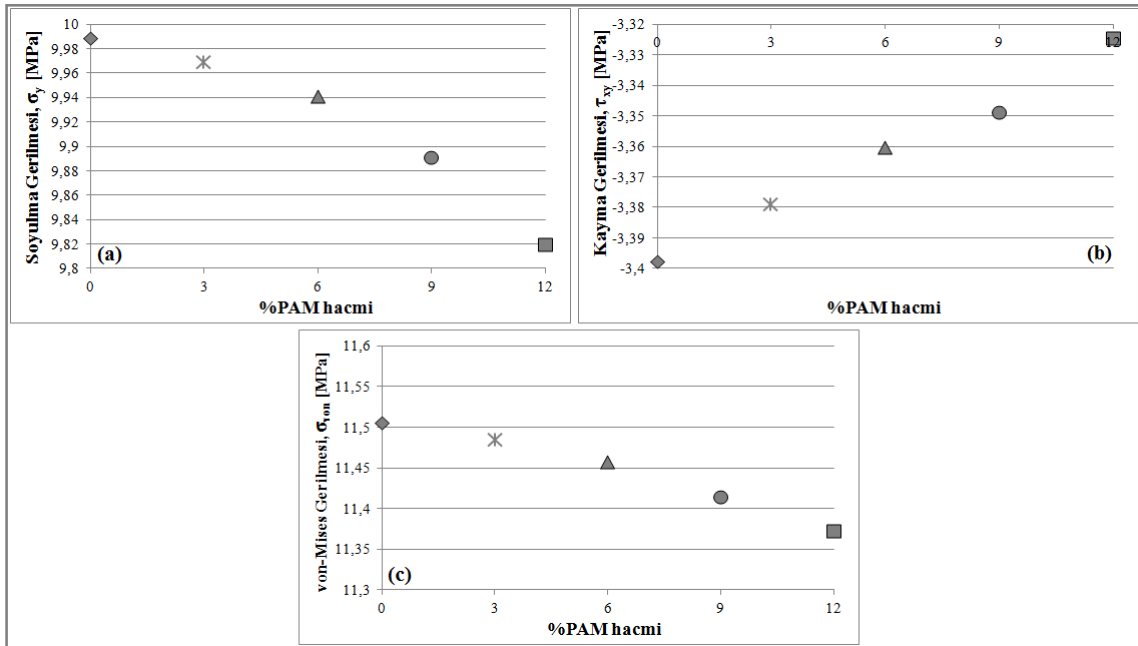
Şekil 3.28 Yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilmelerin belirlenmesi için seçilen orta düzlem

Şekil 3.29 - Şekil 3.32'de yapıştırıcı üzerinde meydana gelen gerilmelere, eklenen grafit türü ve hacim oranının etkisi, düzgün yayılı çekme yüküne ve eğilme momentine maruz FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısı için verilmiştir.

Düzgün yayılı çekme yüküne maruz FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında yapıştırıcı üzerinde meydana gelen gerilmeler, hiç grafik tozu ilave edilmemiş tek

bindirme bağlantısının gerilme değerleri ile Şekil 3.29'da karşılaştırılmıştır. %12 PAM-PAM tek bindirme bağlantısı için von-Mises gerilmesi 11.372 MPa iken, grafit tozu ilave edilmemiş bağlantıda bu değer 11.505 MPa'dır. Soyulma gerilmeleri ise %12 PAM-PAM için 9.819 MPa, grafit tozu içermeyen bağlantı için ise dayanım daha az ve bu değer daha yüksek olan 9.988 MPa'dır.

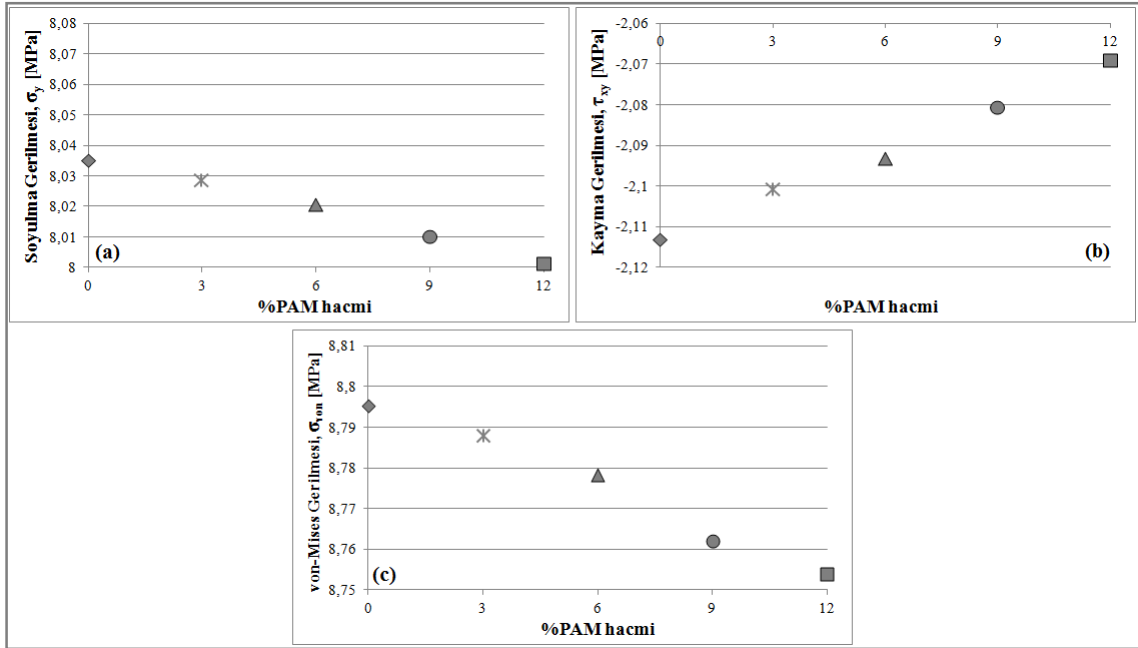
Kayma gerilmesi değerleri açısından ele alındığında ise en yüksek kayma gerilmelerinin grafit tozu ilave edilmemiş bağlantıda oluşması ve negatif yönde 3.397 MPa değerinde oluşu, kayma gerilmelerinin meydana getireceği ayrılma davranışının görülme ihtimali en yüksek bağlantının grafit tozu eklenmemiş bağlantı olduğunu gösterir. Negatif yöndeki gerilme değerleri kayma gerilmesinin yönünü tayin etmektedir. %12 PAM-PAM bağlantısının kayma gerilme değeri ise, grafit tozu içermeyen bağlantıdan daha düşük ve negatif yönde 3.324 MPa'dır.



Şekil 3.29 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, PAM hacim oranının gerilmeler üzerine etkisi, a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})

Eğilme momenti etkisi altında, PAM grafit tozu ilave edilmiş tek bindirme bağlantılarında yapışkan üzerindeki maksimum gerilmelerin, grafit hacim oranından nasıl etkilendiği Şekil 3.30'da verilmiştir. Grafit hacim oranı %3, %6, %9 ve %12 olarak

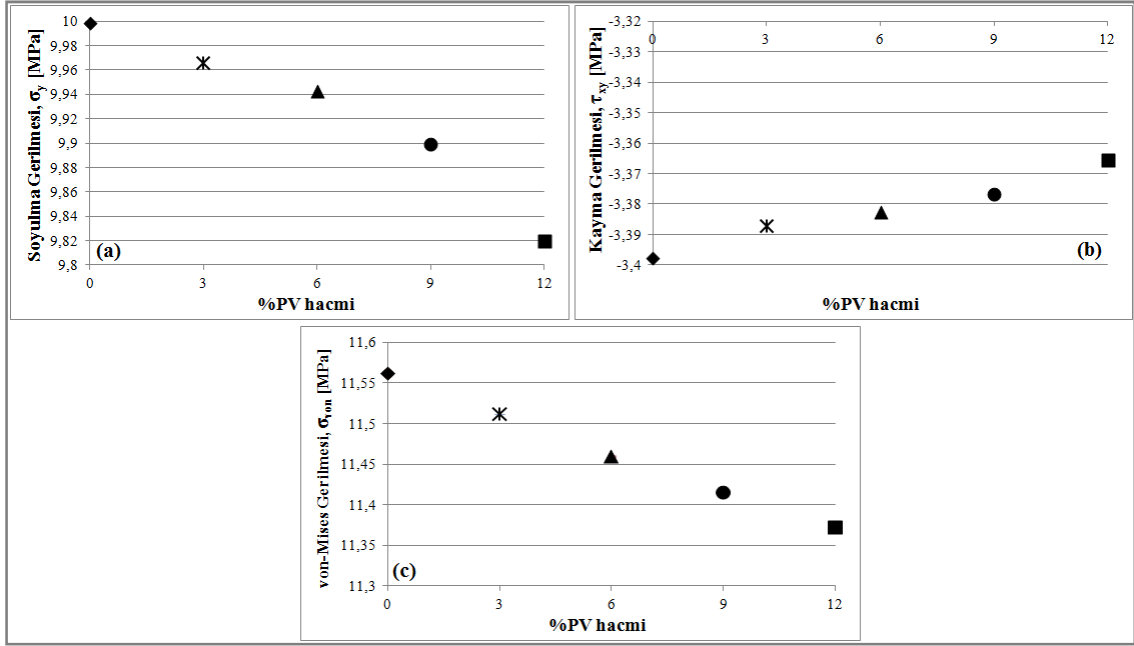
arttığında, bağlantıdaki von-Mises (σ_{von}) ve soyulma gerilmeleri (σ_y) yani bağlantı dayanımı artmıştır (Şekil 3.30a ve 3.30c).



Şekil 3.30 Eğilme momenti (M) altındaki FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, PAM hacim oranının gerilmeler üzerine etkisi, a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})

Çekme kuvveti altında, PV grafit tozu ilave edilmiş tek bindirme bağlantıları, grafit tozu ilave edilmemiş bağlantı ile Şekil 3.31'de karşılaştırılmıştır. Kayma gerilmeleri en kötü bağlantı tipi olan, %0 ile belirtilen grafit ilavesiz bağlantıda -3.39 MPa ve en iyi bağlantı dayanımına sahip %12 PV-PV bağlantıda -3.36 MPa'dır bu azalma Şekil 3.31b'de görülmektedir.

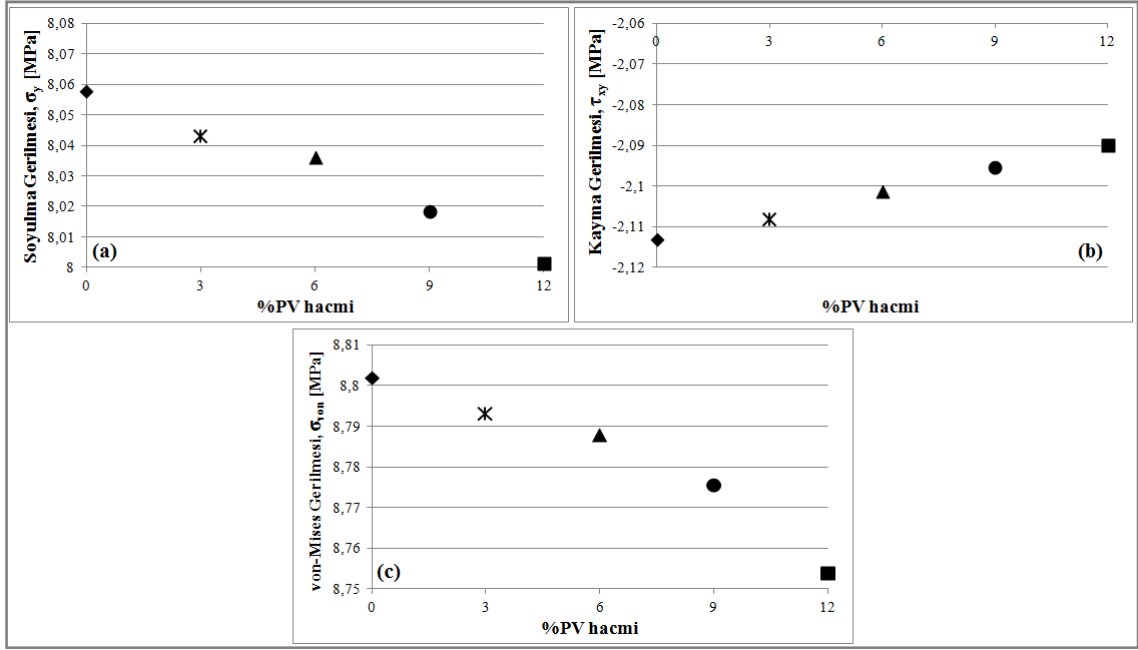
Ayrıca von-Mises gerilme değerleri, Şekil 3.31a ve Şekil 3.29a'da karşılaştırıldığında %12 PAM-PAM için 11.372 MPa ve %12PV-PV için 11.360 MPa'dır. Bu sonuçlar, ilave edilen PV grafit tozlarının, PAM grafit tozlarına göre reçine ile uyumlu olduğu ve bağlantı dayanımının gelişmesine yardımcı olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 3.31 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, PV hacim oranının gerilmeler üzerine etkisi, a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})

Şekil 3.32'de moment yükü altında, PV grafit tozu içeren tek bindirme bağlantılarının, yapıştırıcı orta düzleminde meydana gelen gerilmeler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Von-Mises gerilme değerleri %3 PV bağlantısında 8.79 MPa değerinde iken grafit hacim oranının %12'ye çıkartılması ile 8.54 MPa değerine düşmüştür.

Tüm yükleme koşulları için elde edilen analiz sonuçları, epoksi reçine içerisine grafit tozu eklenerek ve derecelendirme yapılarak oluşturulan yeni FDPM'den yapılan tek bindirme bağlantılarının dayanımlarının, grafit tozu ilave edilmemiş tek bindirme bağlantısından yüksek olduğunu göstermiştir. Gerilme değerleri ele alındığında, en yüksek değerler, yani en kötü bağlantı dayanımı, %0 ile gösterilen grafit tozu ilave edilmemiş bağlantı tipinde görülmektedir. Bununla beraber gerilme değerlerinin ilave edilen grafit tozu hacmi arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, ilave edilen grafit tozlarının reçinenin mekanik özelliklerinin gelişmesine yardımcı olduğunu ve dayanımı arttırdığını ortaya koymuştur.



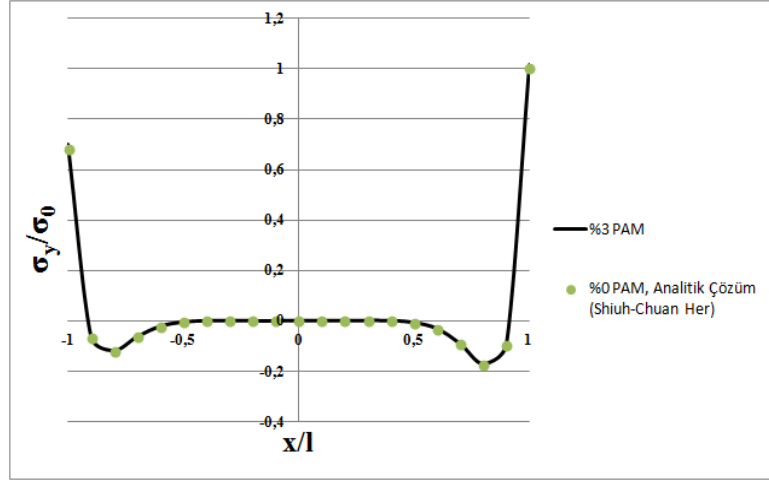
Şekil 3.32 Eğilme momenti (M) altındaki FDPM'den yapılmış tek bindirme bağlantısında, PV hacim oranının gerilmeler üzerine etkisi, a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})

3.2.4 Sonlu Elemanlar Analizinin Doğrulanması

Yapılan sonlu elemanlar analizini doğrulamak için, yapıştırıcı orta tabakası üzerinde meydana gelen gerilmeler literatürdeki analitik çözümle [56] karşılaştırılmıştır. Bunun için, homojen izotrop malzeme olan hiç grafit eklenmemiş ve %0 PAM olarak belirtilmiş reçinenin mekanik özellikleri analitik çözümde kullanılmıştır.

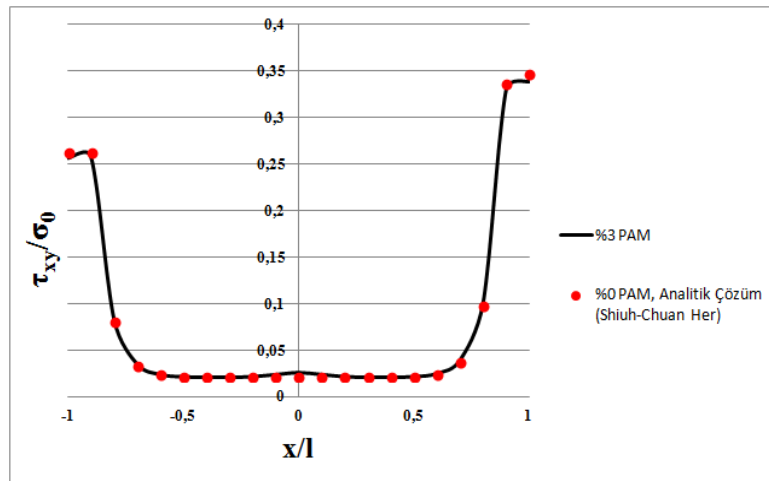
Sonlu elemanlar ve analitik çözüm sonuçları incelendiğinde, en kritik noktaların bindirmenin serbest uçlarındaki iki nokta olduğu görülür. Yapıştırma tabakasında oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırabilmek için yapıştırıcı orta düzleminden alınan gerilme dağılımları (σ_y, τ_{xy}) uygulanan düzgün yayılı çekme yüküne bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Benzer şekilde x koordinatı da, bindirme uzunluğuna ($l=16\text{mm}$) bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır.

Homojen izotrop reçine (%0 PAM) için yapılan analitik çözümden elde edilen soyulma gerilmesi dağılımları, en düşük hacim olan, %3 PAM içeren tekli bağlantıdaki soyulma gerilmeleri dağılımı ile Şekil 3.33'te karşılaştırılmıştır.



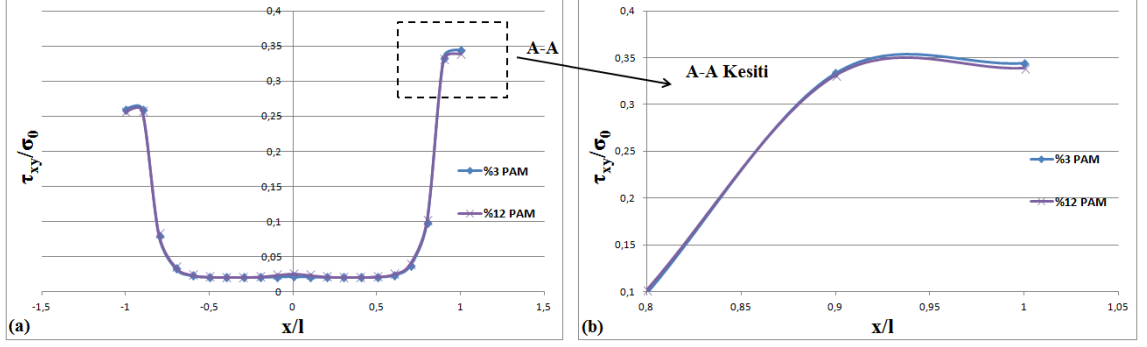
Şekil 3.33 Yapıştırma tabakası üzerinde normalize edilmiş soyulma gerilmesi (σ_y) dağılımı (16 mm yapıştırma boyu ve 9.81 MPa düzgün yayılı çekme yükü için)

Şekil 3.34'te ise analitik yöntemle hesaplanan kayma gerilmesi dağılımları, %3 PAM grafit tozu ilave edilerek ve fonksiyonel derecelendirilmiş polimerik malzemeden meydana gelen tek bindirme bağlantısındaki yapıştırıcı orta tabakasındaki kayma gerilmeleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan sonlu elemanlar analizine ve analitik çözüme ait soyulma ve kayma gerilme dağılımlarının benzer olduğu Şekil 3.33 ve 3.34'te görülmektedir. Ayrıca, Bölüm 3.2.3 belirtildiği gibi, yapıştırılan malzemeye %3 grafit tozu ilave edilmesi ve derecelendirme yapılmasının, kayma gerilmesini azaltarak, dayanımı arttırdığı Şekil 3.34'te görülmektedir.



Şekil 3.34 Yapıştırma tabakası üzerinde normalize edilmiş kayma gerilmesi (τ_{xy}) dağılımı (16 mm yapıştırma boyu ve 9.81 MPa çekme gerilmesi için)

Şekil 3.34'te belirtildiği gibi, grafit ilave edilmesi ve grafit hacim oranındaki artış, yapıştırıcı üzerindeki kayma gerilmesini azaltmaya yönelik bir etki meydana getirir. Bu durumun daha ayrıntılı belirtilmesi için yapıştırma tabakası üzerinden alınan kayma gerilmeleri dağılımları %3 PAM ve %12 PAM için Şekil 3.35'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.35 Yapıştırma tabakası üzerinde normalize edilmiş kayma gerilmesi (τ_{xy}) dağılımı
a) Grafit hacminin etkisi, b) Grafik detayı A-A kesiti

YAPIŞTIRICI TABAKALARINDA ORTOTROPİK İNKLÜZYON İÇEREN BAĞLANTILARIN BURKULMA ve GERİLME DAVRANIŞLARI

Son yıllarda, yapıştırıcı bağlantıları üzerine yapılan çalışmalar arasında, heterojen ve FDM özelliklerine sahip yapıştırıcı tabakalarla ilgili çalışmalar ilgi çekmektedir. Fitton ve Broughton [72], yapıştırıcı tabakadaki elastisite modülü değişiminin, bağlantıdaki gerilme yoğunluklarına etkilerini incelemiştir. Marques ve da Silva [80] yapıştırıcı tabakadaki değişken elastisite modülünün bağlantı dayanımı değiştirdiğini göstermiştir. Carbas vd. [83]-[85] yapıştırıcı tabakanın fonksiyonel derecelendirilmiş özelliğe sahip olduğu ilginç çalışmalar yapmışlardır.

Bu doktora tez çalışmasında da, yapıştırıcı bağlantılarında daha gerçekçi analizler yapılması için yapıştırıcı tabakanın heterojen özellikte olduğu gerçeği göz önüne alınmıştır. Heterojen yapıştırıcı tabaka, içerisinde ortotropik inklüzyon (inclusion) yer alan homojen bir yapıştırıcı tabaka olarak tanımlanmıştır. Heterojen yapışkan tabakanın bağlantı stabilitesine etkilerinin incelenmesi için, kayma yüküne maruz yapıştırılmış bir plak bağlantısı ele alınmıştır. Yapıştırıcı tabakasında ortotropik özellikte cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi olmak üzere üç farklı inklüzyon malzemesi içeren yapıştırılmış plaklar, homojen izotrop özellikte seçilmiştir. Bununla birlikte, inklüzyon bölgesinin şekli daha genel sonuçlar elde edebilmek için elips kabul edilmiştir. Elips geometrisinin ve inklüzyon malzemesinin burkulma yüküne etkileri incelenmiş, inklüzyon civarında delaminasyon olasılığı dikkate alınmıştır.

Ayrıca aynı ortotropik inklüzyon malzemelerini içeren yapışkan tabakaya sahip, düzgün yayılı çekme yükü altındaki tek bindirme bağlantıları da bu bölümde ele alınmıştır. Bu tip bağlantılarda meydana gelen gerilmelere, inklüzyon malzemesinin ve yapıştırılan malzeme kalınlığının etkileri incelenmiş, burada da inklüzyon bölgesi yakınlarında delaminasyon olasılığı göz önüne alınmıştır

4.1 Ortotropik Inklüzyon İçeren Yapıştırılmış Plak Panelde Burkulma Davranışı

Literatürde şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, yapıştırılmış plaklarda heterojen yapışkan tabakanın bağlantı stabilitesine etkisinin, özellikle de kayma yükü altındaki bağlantılar için yeterince incelenmediği görülmektedir. Bu eksiklik dikkate alınarak ortotropik inklüzyon içeren kayma yüküne maruz yapıştırılmış plak bağlantısı ele alınmıştır. Bu çalışmada yer alan yapıştırılmış plak panelde, yapıştırıcı malzeme Loctite tarafından üretilen Hysol 9464 [133] adlı yapıştırıcıdır ve özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Yapıştırılan plak malzemeleri ise homojen izotrop özellik taşıyan St37 çeliğidir ve malzeme özellikleri Çizelge 4.2’de yer almaktadır. Yapıştırıcı tabakasında yer alan inklüzyon malzemesi olarak mekanik özellikleri Çizelge 4.3’te verilen ortotropik malzeme özelliklerine sahip cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi seçilmiştir.

Çizelge 4.1 Yapıştırıcı malzeme özellikleri, Loctite-Hysol 9464 [133]

<i>E [GPa]</i>	1.78
<i>v</i>	0.376

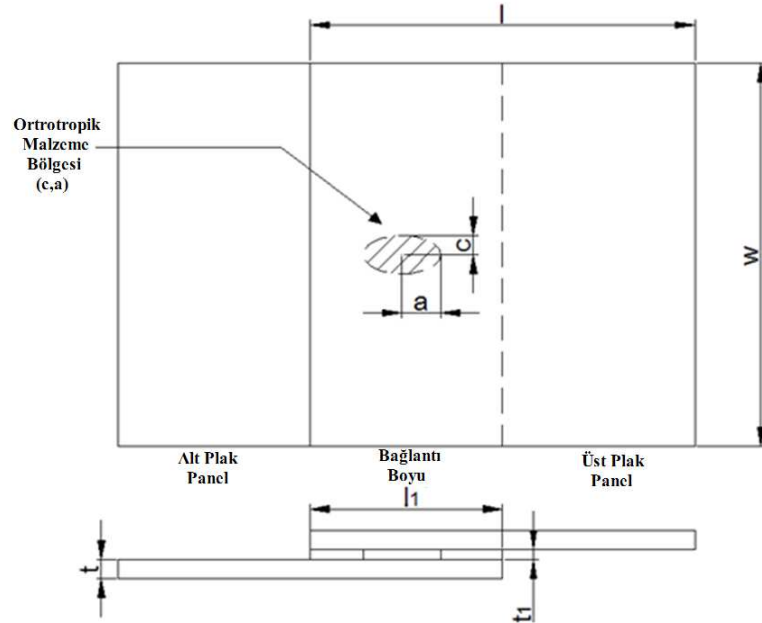
Çizelge 4.2 Yapıştırılan malzeme özellikleri, Çelik

<i>E [GPa]</i>	210
<i>v</i>	0.3

Çizelge 4.3 Ortotropik malzeme özellikleri [138], [139]

Malzeme özellikleri	Cam-Epoksi	Grafit-Epoksi	Bor-Epoksi
E_x [GPa]	38.60	127.50	207.00
E_y [GPa]	8.27	9.00	18.63
E_z [GPa]	8.27	4.80	18.63
$G_{xy} = G_{xz}$ [GPa]	4.14	4.80	4.50
G_{yz} [GPa]	4.00	2.55	3.45
$\nu_{xy} = \nu_{xz}$	0.25	0.28	0.27
ν_{yz}	0.27	0.41	0.35

Ele alınan bağlantıda, yapıştırıcı tabakasında yer alan inklüzyon geometrisi daha genel sonuçlar elde edebilmek amacıyla elips seçilmiştir. Elipsin c/a oranı 0.125–0.5–1–1.5–2 olarak değişmektedir. Toplamda beş farklı inklüzyon geometrisi ele alınmıştır. Buna ek olarak, tez çalışması içerisinde inklüzyon içermeyen yapıştırıcı tabakası $c/a=0$ olarak tanımlanmıştır. c/a değerinin 0'a eşit olması çizgisel boyutta bir inklüzyonun varolduğu anlamını taşımamaktadır. Inklüzyon içeren yapıştırılmış plak panelin geometrisi ve ölçüleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Yapıştırılmış plak panel geometrisi

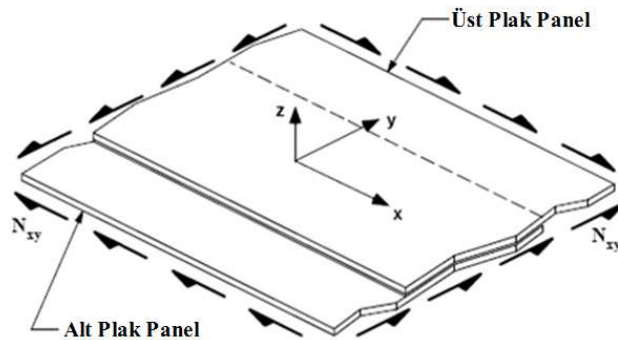
Yapıştırılmış plak panelde yapıştırma bağlantısı uzunluğu, l_1 , 50 cm'dir. Yapıştırılan plaklar 0.5 cm ve yapıştırıcı tabaka 0.25 cm kalınlığındadır. Çizelge 4.4'de yapıştırılmış plak panele ait tüm ölçüler verilmiştir.

Çizelge 4.4 Yapıştırılmış plak panel ölçüleri

Panel ölçüleri	Boyutlar [cm]
Bağlantı boyu, l_1	50
Plak kalınlığı, t	0.5
Plak genişliği, w	100
Plak boyu, l	100
Yapıştırıcı kalınlığı, t_1	0.25
Elipsin büyük eksen, a	20

4.1.1 Kayma Yükü Altında İnküzyon İçeren Yapıştırılmış Plak Panel

Kayma yükü altındaki yapıştırılmış plak panelin şematik gösterimi Şekil 4.2'de yer almaktadır. Sonlu elemanlarda kayma yüklemesinin plağa nasıl uygulanması gerektiği hakkındaki detaylar için, Alinia'nın çalışmasından [140] faydalanılmıştır. Alinia bu çalışmada yaklaşık 1200 adet destekli ve desteksiz plak bağlantısını kayma yüküne maruz bırakarak, burkulma yüklerini sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin etmiştir. Plaklarda destek sayısını azaltarak, kritik burkulma yüklerindeki maksimum artışı hesaplamayı amaçlayan bu çalışmadaki, sonlu elemanlar analiz sonuçlarını ilgili teorik sonuçlarla karşılaştırarak doğrulamıştır [140].

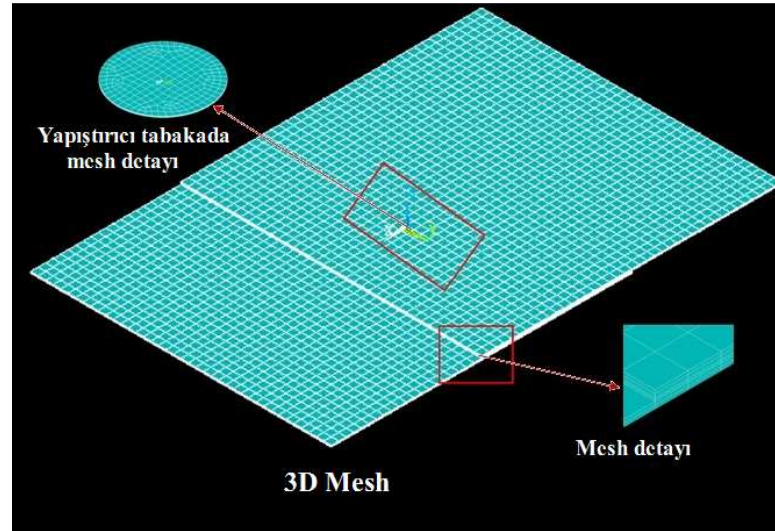


Şekil 4.2 Kayma yüklemesi altında yapıştırılmış plak panel

Sunulan doktora tez çalışmasında ele alınan modelde, tüm plaklarda kalınlık boyunca kayma deformasyonlarını da hesaba katan Mindlin-Reissner teorisi kullanılmıştır. Ayrıca, yapıştırılmış panel modellenirken klasik varsayımlar kullanılmıştır. Örneğin, yapıştırılan plaklar başlangıçta doğru eksenli olup, herhangi bir geometrik kusur içermemektedir. Yapıştırılan plak malzemesi, homojen izotrop malzemedir. Panelde yer alan yapıştırıcı tabaka sabit kalınlıktadır. Sonlu elemanlar analizinde uygulanan kayma yükü 1 N'dur, yapılan analizde ilk beş sınır değerinin çıkartılmasında, Block Lanczos [141] metodu kullanılmıştır.

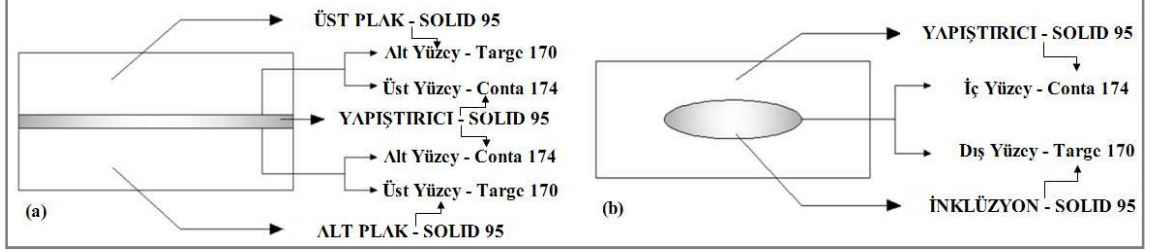
4.1.2 Sonlu Elemanlar Modeli

Yapıştırılmış plak panelin incelenmesinde ANSYS® 13.0 [134] sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Şekil 4.3'te yapıştırılmış bağlantının üç boyutlu sonlu elemanlar modeli (3D-SEM), verilmiştir. Sonlu elemanlar modellemesinde yapıştırılan plaklar, yapıştırıcı tabaka ve inklüzyon malzemesi için, üç boyutlu ve 20 noda sahip SOLID 95 elemanı seçilmiştir. Ayrıca, yüzey kontak elemanları olan CONTA 174 ve TARGE 170 temas meydana gelen yüzeylere yerleştirilmiştir.



Şekil 4.3 Yapıştırıcı tabakasında inklüzyon içeren plak panelin sonlu elemanlar modeli Modelde iki farklı temas yüzeyi bulunmaktadır, bunlardan ilki yapıştırılan plak ile yapıştırıcı tabaka arasında, diğeri ise yapıştırıcı tabaka ve eliptik inklüzyon malzemesi arasındadır. Sonlu elemanlar modeli solid ve kontak elemanlara dayanarak yapılmış, böylece temas problemi, iki yüzeye de ait arayüzey modeliyle ele alınmıştır. Kontak

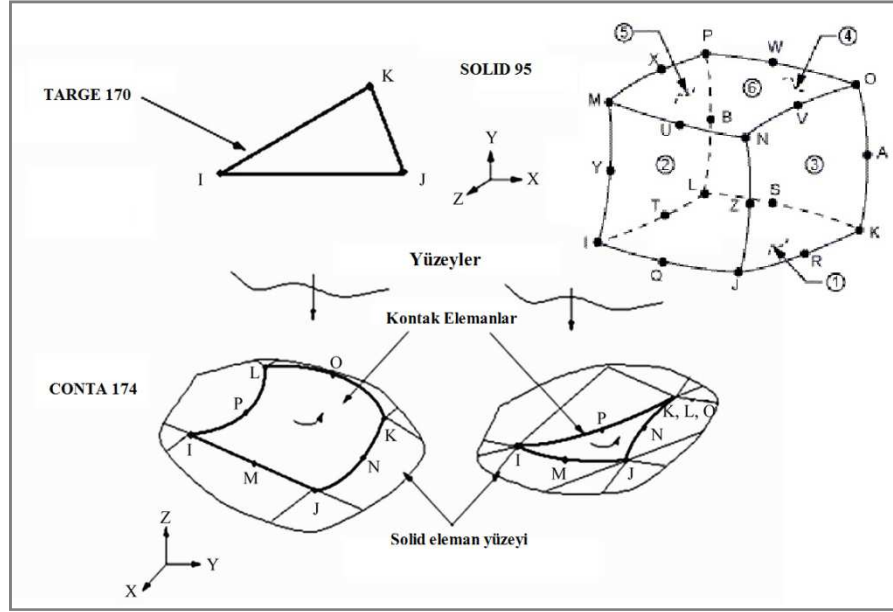
elemanlar düğüm noktalarına göre daha gerçekçi sonuçlar sağlayan Gauss noktalarını kullanırlar ve bu elemanların yer aldığı yerlerde düğüm noktaları arasında kuvvet iletimi değil, Gauss noktaları arasında temas basıncı iletimi gerçekleşir [134].



Şekil 4.4 Yapıştırıcı, inklüzyon malzemesi ve yapıştırılan plakalardaki conta ve targe elemanlarının konumları

CONTA174 elemanı, üç boyutlu ve sekiz noda sahip bir elemandır ve yapıştırıcı tabakanın alt ve üst yüzeyinde yer alır. TARGE170, elemanı ise yapıştırılan plak yüzeylerinde yer alır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te kontak elemanların özellikleri ve yerleşimlerine ait detaylar verilmiştir. Yapılan bu yerleşimde kontak elemanın daha fazla deforme olacak yüzeye yerleştirilmesi gerektiği göz önüne alınmıştır. Temas algoritması olarak Penaltı metodu seçilmiştir. Penaltı fonksiyonu yer değiştirme tabanlı bir çözümdür ve modelin her Gauss noktası elemana yaylar ekleyerek yüzey temasını yönetir. Bu durum kontak rijitliği ve penetrasyon durumlarının incelenmesini gerektirir. Temas olan yerlerde yakınsama doğrudan penetrasyon miktarı ile bağlantılıdır. Uygun çözüm için, penetrasyon oldukça küçük alınmalıdır, bu ise mümkün olduğu kadar kontak rijitliğini arttırmak suretiyle elde edilebilir. ANSYS'de kontak rijitliği, normal penaltı rijitlik faktörü (FKN, normal penalty stiffness factor) arttığında artar, FKN değeri ANSYS'de 1 olarak tanımlanmıştır ve sonlu elemanlar analizi FKN değeri değiştirilerek, optimum yakınsama ve kabul edilebilir bir penetrasyon elde edinceye kadar tekrarlanır. Moura vd. [94] sonlu elemanlar analizinde, iyi bir performans elde etmek için FKN değerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiğini vurgulamışlardır ve çalışmalarında 10^7 N/mm³ değerini tavsiye etmişlerdir. Bu çalışmada da FKN değeri 10^7 N/mm³ alınmıştır.

Modelde, temas yüzeylerinin davranışlarını tanımlarken, ANSYS'de yer alan "bonded always" seçeneği ile kontak ve target yüzeyleri boşluksuz birbirine bağlanır ayrıca temas yüzeyleri arasında açılmaya ve kaymaya müsaade edilmez.



Şekil 4.5 Eleman tipleri, Solid 95, Conta174 and Targe170

Bu çalışmada, incelenen parametlerden biri inklüzyon malzemesidir, sırasıyla cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi seçilmiştir. Diğer değişken parametre ise eliptik inklüzyon bölgesindeki c/a oranıdır ve elipsin c/a oranı 0.125–0.5–1–1.5–2 olarak değişmektedir. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli, hiç inklüzyon içermeyen ($c/a=0$) kayma yüküne maruz yapıştırılmış plak paneli üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanarak inceleyen Kim ve Kedward'ın [142] çalışmasında elde ettiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4.1.3 İnküzyon Bölgesi Civarında Delaminasyon Hasarı

Bu bölümde amaç, yapıştırıcı tabakasında ortotropik bir inklüzyon içeren yapıştırılmış plak bağlantısında, inklüzyon bölge yakınlarında oluşabilecek delaminasyonun etkilerini incelemektir. Bunun için solid ve kontak elemanlardan meydana gelen üç boyutlu model geliştirilmiştir. Temas problemi delaminasyon alanı ile yapıştırıcı arasında ele alınmıştır. Tez çalışmasında yer alan sonlu elemanlar modeli, malzeme hasar problemi göz önüne alınarak yapılmamıştır bu sebeple, delaminasyon alanı büyüklüğü, [143] no'lu çalışmada da ele alındığı gibi, sabit kalır ve ilerlemez.

Delaminasyon büyüklüğü, delaminasyon alanının, tüm yapıştırıcı alanına oranı (A_{del}/A_{yap}) olarak tanımlanmıştır ve delaminasyon büyüklüğü olarak 0.04 ve 0.08 değerleri seçilmiştir.

Delaminasyonun şekli ve yönü beş farklı c/a oranı için belirlenmiş ve c/a 'nın değerleri 0.125-0.5-1(daire)-1.5-2 olarak seçilmiştir. Bu eliptik delaminasyon seçimi, diğer delaminasyon seçimlerine göre daha gerçekçi bir yaklaşım sunar [143].

Şekil 4.5'te görülen özel kontak çifti elemanları, CONTA174 ve TARGE170, yalnızca non-linear analizde çalışırlar ve non-linear analiz penetrasyona karşı bir kısıtlama içerir. Delaminasyon alanında, arayüzelere yerleştirilen conta ve targe elemanlar, bu iç yüzeylere karşılık gelen solid 95 elemanlarıyla eşleşirler ve bu alanda bulunan elemanlar arasındaki temas koşulları çeşitli parametreler yoluyla tanımlanır. Öncelikle, kabul edilen bir penetrasyon değeri için, başlangıç penetrasyonu değerinin alt ve üst limitlerinin tanımlanması gerekir. Eğer penetrasyon bu limitler dışındaysa, gerçek analize başlanmadan önce bu durum minimize edilmeye çalışılır. Non-linear analizin, burkulma davranışlarını incelerken bazı dezavantajları vardır, bu da kritik burkulma yükünü direk olarak vermemesidir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, non-linear analiz ve sınırdeğer burkulma analizi birlikte yapılır. Önce non-linear analiz yapılır ve ardından sınırdeğer burkulma analizi yapılarak direk kritik burkulma yükleri hesaplanır. Böylece bilgisayarda daha az analiz zamanı ve görüntü üzerinden veri tespitine daha az çaba sarfedilerek burkulma yükleri belirlenir. Boyutsuz kritik burkulma yükü burada P_{cr}/P^*_{cr} olarak ifade edilir. P_{cr} delaminasyon içeren yapıştırılmış bağlantının kritik burkulma yükü, P^*_{cr} ise delaminasyonsuz yapıştırılmış bağlantının kritik burkulma yüküdür. Delaminasyon etkilerinin sonuçları Bölüm 4.1.5 Sayısal Sonuçlar'da verilmiştir.

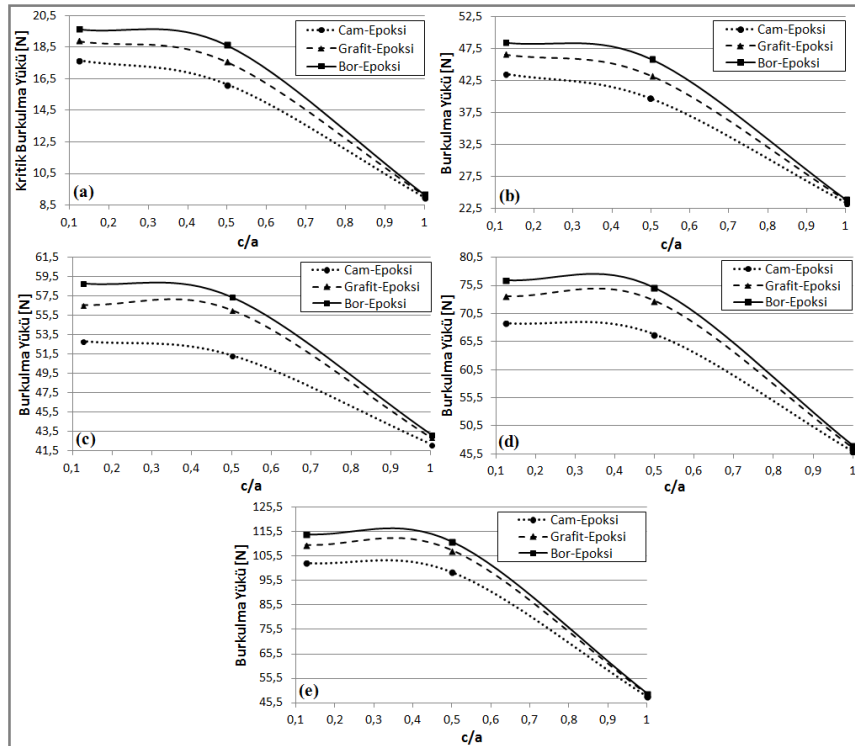
4.1.4 Farklı Yapıştırıcı Kalınlıklarında Cam İnküzyon için Özel Durum İncelemesi

Bu bölümde, inküzyon malzemesi cam malzeme seçilmiş ve farklı yapıştırma kalınlıklarında incelenmiştir. Cam malzemenin Elastisite modülü 70 GPa ve Poisson oranı 0.23 olarak alınmıştır [44]. Çalışmada, Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi, yapıştırıcı kalınlığı sabit ve 0.25 cm olarak alınmıştır [143]. Fakat burada, yapışkan tabaka kalınlığının (t_a) burkulma yüküne etkisini incelemek amacıyla, t_a değerleri 0.125, 0.1875, 0.25, 0.3125 ve 0.5 cm olmak üzere beş farklı şekilde alınmıştır. Cam inküzyon şekli c/a değerinin 1 olduğu yani daire şekline sahip olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca yapıştırma kalınlığının etkisi inküzyon içermeyen yapıştırılmış bağlantı içinde beş farklı durumda incelenmiş ve karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir.

4.1.5 Sayısal Sonuçlar

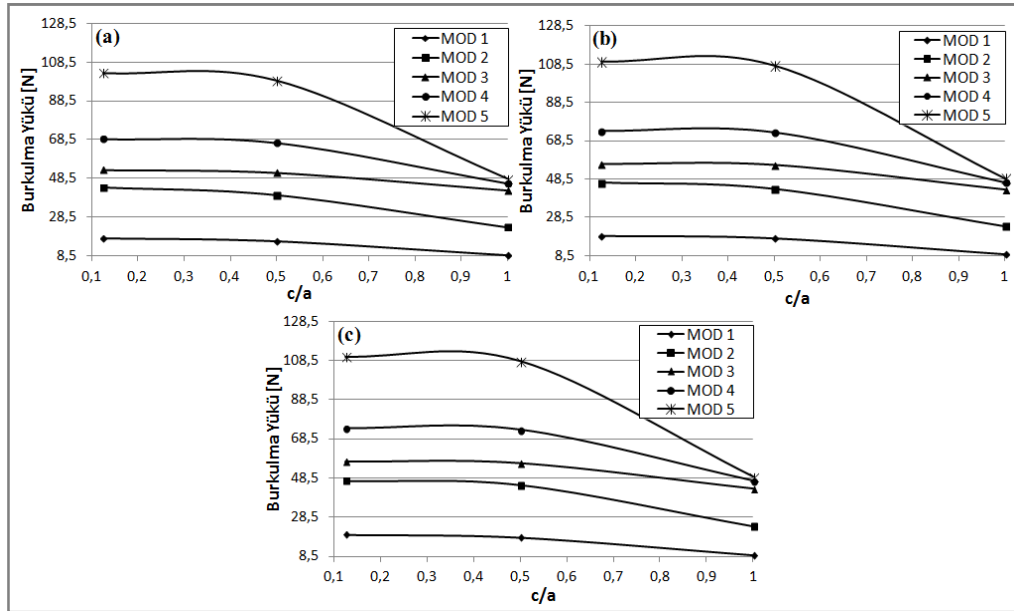
Seçilen farklı inklüzyon malzemelerinin ve farklı inklüzyon geometrilerinin, burkulma yüküne etkisi Şekil 4.6-4.13'te verilmiştir.

Şekil 4.6'da inklüzyon malzemelerin burkulma yüküne etkileri ilk beş mod için verilmiştir. Burada, c/a oranı 0.125, 0.5 ve 1 olarak alınmış ve burkulma yükünün c/a oranına ,yani inklüzyon geometrisine, büyük ölçüde bağlı olduğu görülmüştür. Burkulma yükleri inklüzyon malzemeleri açısından incelendiğinde, burkulma yükleri arasındaki maksimum fark, c/a değerinin 0.5'e eşit olduğu eliptik inklüzyon için görülmüştür. c/a değerleri 1 ile 0.5 arasında iken, burkulma yükleri artma eğilimindedir, bu eğilim c/a değeri 0.5 ile 0.125 iken büyük ölçüde azalır. Örneğin, cam-epoksi durumunda, maksimum kritik burkulma yükü c/a 1'den 0.5 değerine geldiğinde %79.45 artarken, bu değer c/a 'nın 0.5'den 0.125'e geldiği durumda yalnızca %9.45 artmıştır. Bu durum Şekil 4.6'da görülebilir. Genel olarak, tüm inklüzyon malzemelerinde burkulma yükleri c/a değeri azaldıkça artmaktadır. Inklüzyon malzemeleri kendi aralarında karşılaştırıldığında, maksimum kritik burkulma yükü, bor epoksi ve c/a nın 0.125 değeri için elde edilir.



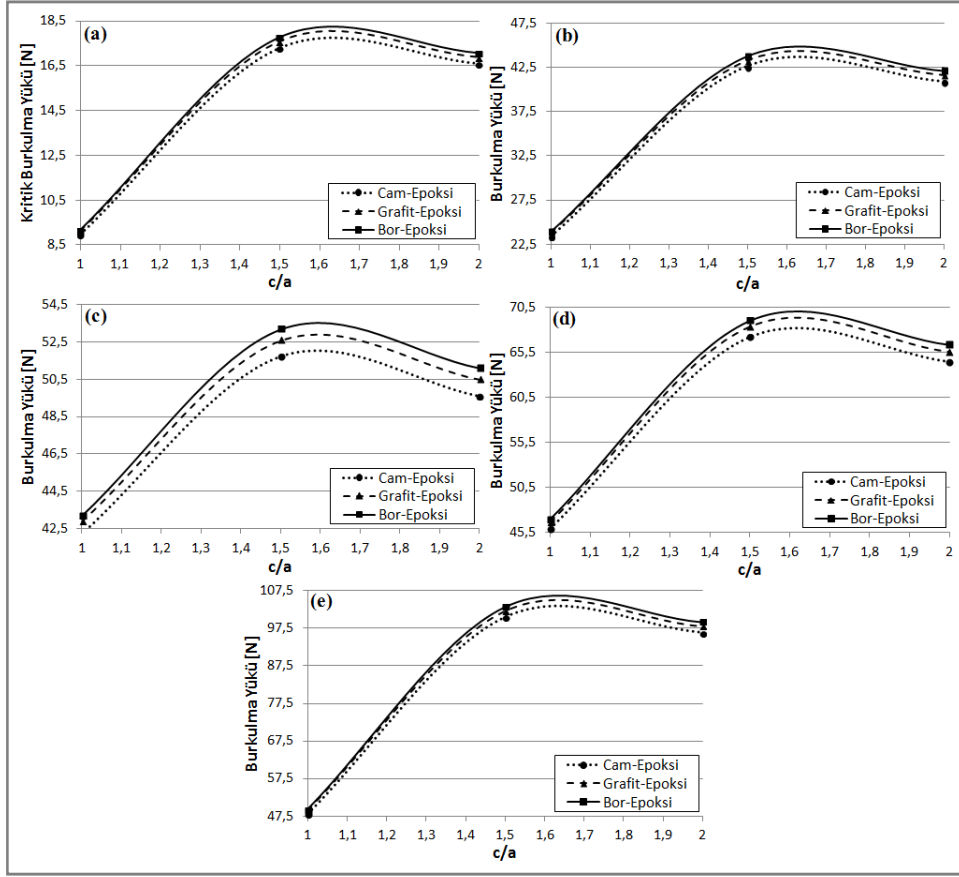
Şekil 4.6 c/a oranının inklüzyon malzemeleri üzerine etkisi ($c/a=0.125$, $c/a=0.5$, $c/a=1$) a) mod 1, b) mod 2, c) mod 3, d) mod 4, e) mod 5

Şekil 4.7'de, c/a oranına bağlı olarak burkulma yüklerinin değişimi, ilk beş mod için görülebilir. Burkulma yükü, tüm inklüzyon malzemeler için, c/a oranı 0.125'den 0.5'e geldiğinde düşük miktarda azalma gösterir. En keskin azalış ise c/a oranının 0.5'den 1 değerine ulaştığı aralıkta meydana gelir. Örneğin, mod 5 durumunda, burkulma yük değerlerinin yaklaşık iki kat azaldığı görülebilir. Tüm inklüzyon durumlarında, burkulma yüklerinde mod sayısı 1'den 5'e değiştiğinde, mod 3 hariç, keskin düşüşler gözlenir. Örneğin, inklüzyon malzemesi grafit-epoksi seçildiğinde, mod 3'te burkulma yükleri sırasıyla c/a 1 için 42.9 N, c/a 0.5 için 56 N ve c/a 0.125 için 56.6 N iken bu değerler mod 5 için c/a 1 iken 48.9 N, c/a 0.5 iken 107.9 ve c/a 0.125 iken 110 N'dur.



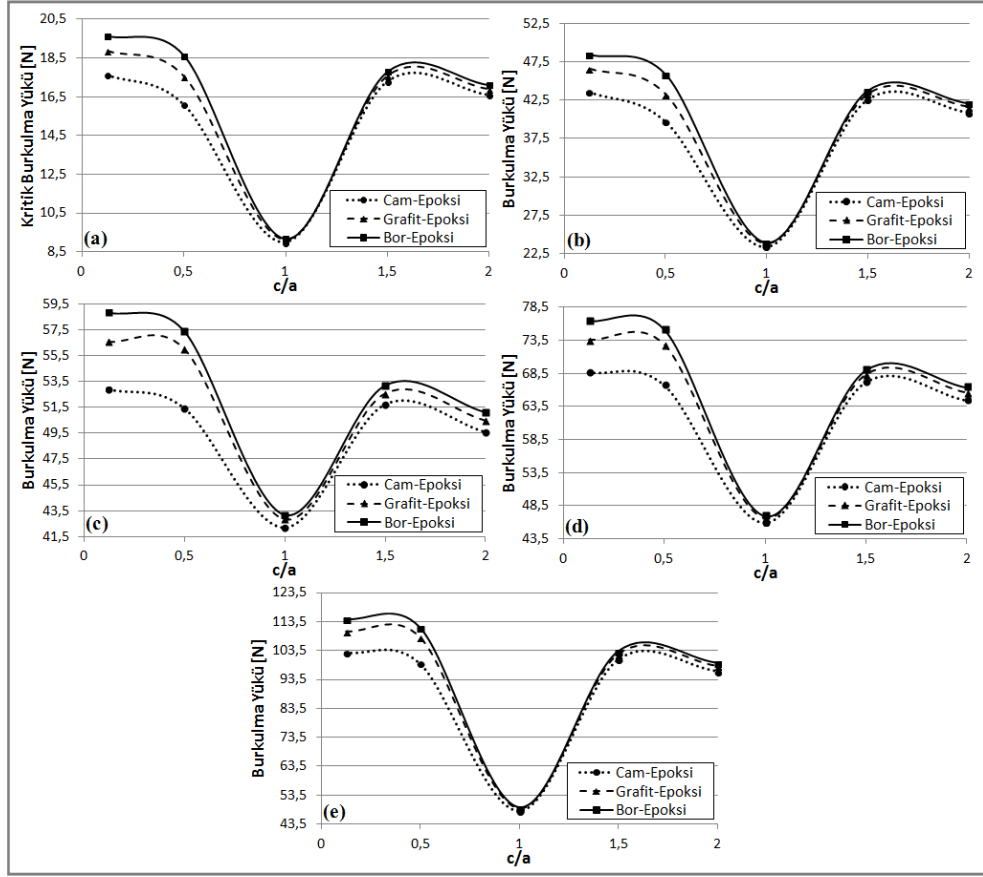
Şekil 4.7 c/a oranının burkulma yüküne etkisi, (a) $c/a=0.125$, $c/a=0.5$, $c/a=1$ cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi

Şekil 4.8'de c/a oranı 1, 1.5 ve 2 olarak alınmış ve inklüzyon malzemesinin burkulma yüküne etkisi tüm modlar için incelenmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, mod 3'te burkulma yük eğrileri arasındaki farklılıklar diğer modlara göre daha belirgindir. Ayrıca, inklüzyon malzemesinin etkisi, c/a değerinin 1.5 olduğu durumda açıkça görülmektedir. Genel olarak, analiz sonucunda elde edilen burkulma yüklerinin, c/a değeri 1 ile 1.5 arasında iken yüksek oranda arttığı ve c/a değeri 1.5 ile 2 arasında iken ise az miktarda azaldığı görülür. Her mod değeri için, maksimum burkulma yüküne, inklüzyon malzemesi bor-epoksi seçildiğinde ulaşılır ve bu durum Şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.8 c/a oranının burkulma yüküne etkisi, ($c/a=1$, $c/a=1.5$, $c/a=2$) a) mod 1, b) mod 2, c) mod 3, d) mod 4, e) mod 5

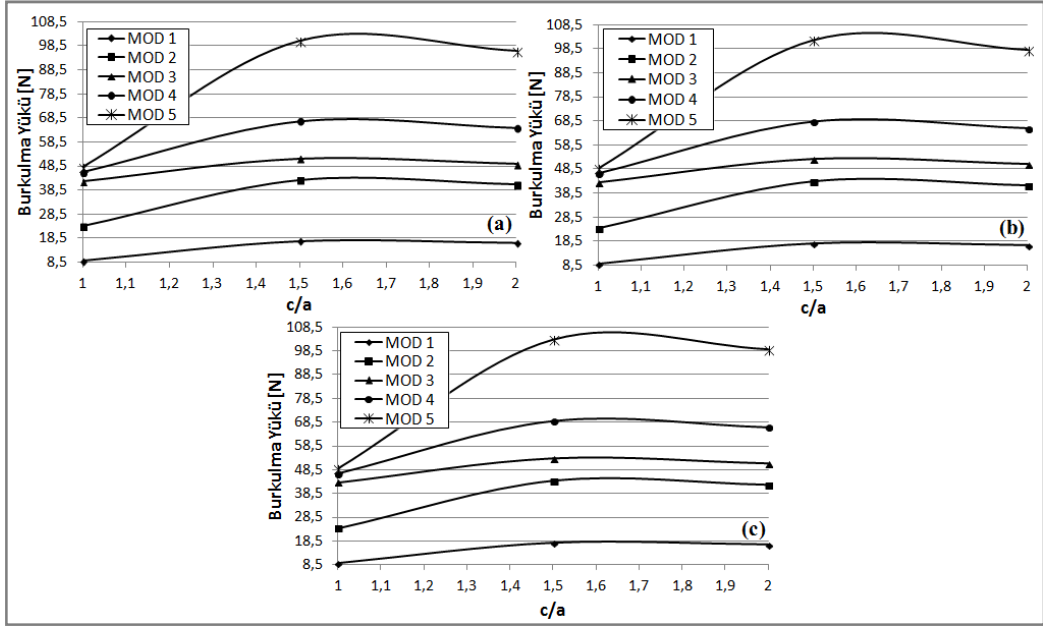
Şekil 4.9'da, daha önce Şekil 4.6 ve Şekil 4.8'de parça parça verilmiş olan burkulma yüklerinin c/a oranlarına karşı değişimleri, tüm modlar için toplu halde verilmiştir



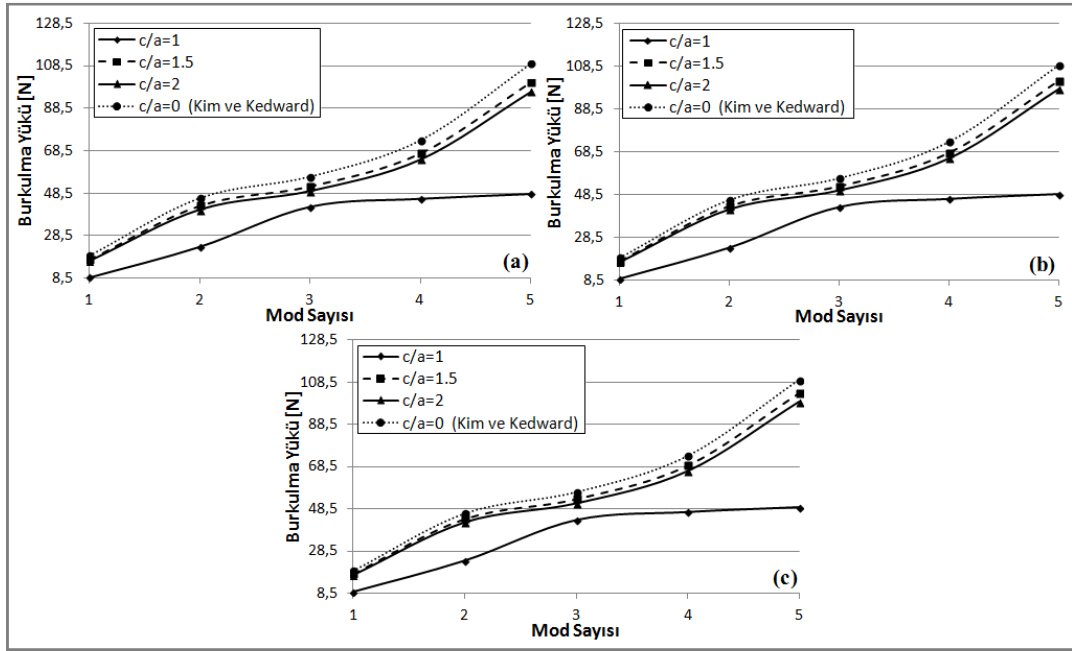
Şekil 4.9 İnklüzyon malzemesinin burkulma yüküne etkisi, a) mod 1, b) mod 2, c) mod 3, d) mod 4, e) mod 5

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, mod 5 hariç, her bir mod için burkulma yükleri, c/a oranı 1.5'ten 2'ye arttığında fazla değişmemektedir. Buna karşılık, burkulma yüklerindeki artış eğilimi, c/a 'nın 1'den 1.5'e arttığı durumlarda görülmektedir, bu artış eğilimi yüksek modlarda daha belirgindir. Örneğin, c/a oranı 1'den 1.5'e arttığında mod 5'te, burkulma yükleri sırasıyla cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi için % 108.7, %109 ve % 109.8 artarken, bu artış değerleri mod 1 için %92.6, %92.8 ve %93.7'dir.

Bilindiği gibi, c/a oranı arttığında inklüzyon alanı da artar. Şekil 4.11'de inklüzyonun daire olduğu durumda, $c/a=1$, burkulma yüklerinin eğilimi, inklüzyon şeklinin eliptik olduğu durumlara göre oldukça farklıdır. Bu fark tüm inklüzyon malzemeleri için görülmektedir.



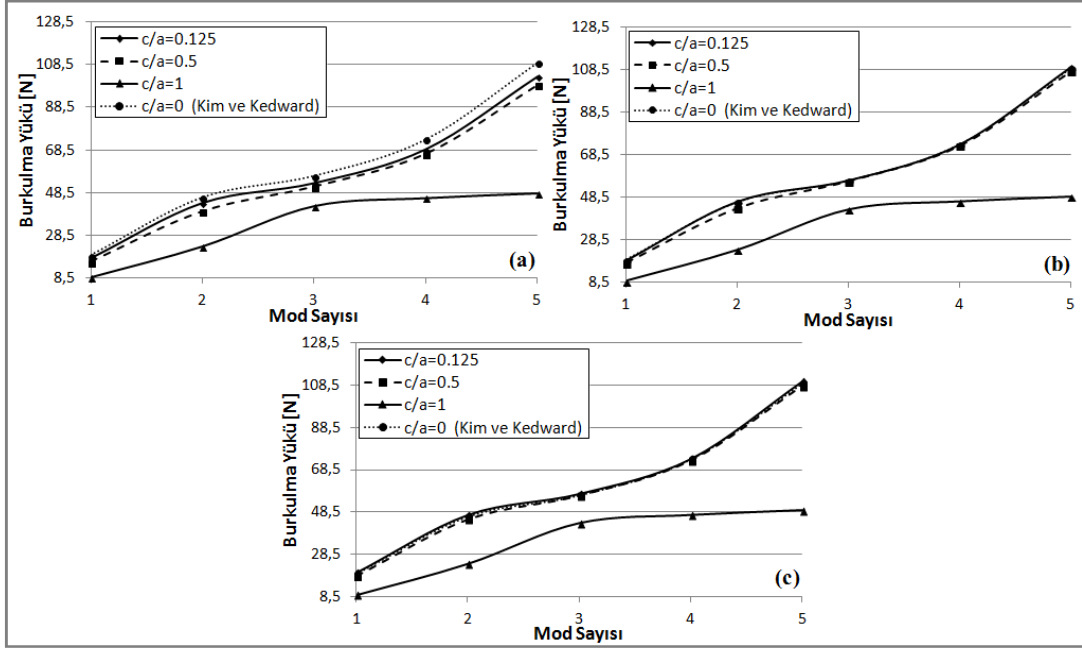
Şekil 4.10 c/a oranının burkulma yüküne etkisi, (a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi



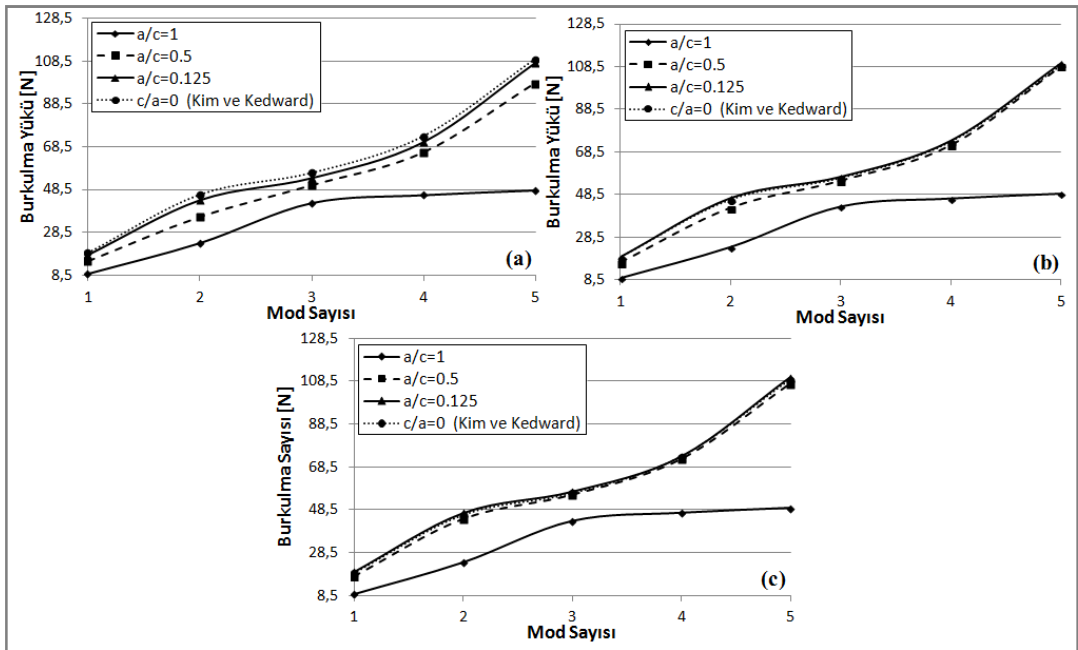
Şekil 4.11 c/a oranına göre burkulma yüklerindeki değişim, (a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te burkulma yüklerinin inklüzyon geometrisine bağlı olarak değiştiği görülebilir. Şekil 4.13'te a/c oranının burkulma yüküne etkisinin incelendiği durumda, inklüzyon geometrisi elipsin büyük ekseninin c , değeri 20 cm olarak alınmıştır. Inklüzyon malzemesinin eliptik şekli a/c ve c/a değeri 0.125 olarak incelendiğindeki burkulma yükü değerleri, hiç inklüzyon içermeyen homojen izotrop

yapıştırılmış literatürdeki [142] plak panel sonuçlarıyla uyumludur, bu durum oluşturulan model ve yapılan analizin doğru olduğunu belirtmektedir.



Şekil 4.12 c/a oranına göre burkulma yüklerindeki değişim, (c/a=0.125, c/a=0.5, c/a=1) a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi

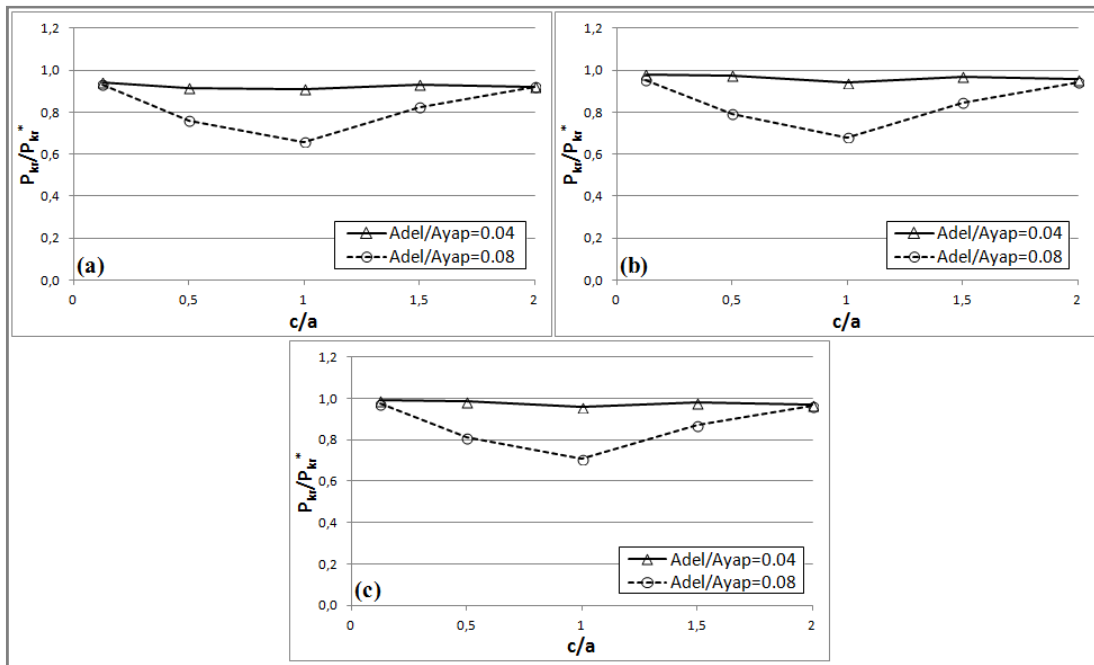


Şekil 4.13 a/c oranına göre burkulma yüklerindeki değişim, (a/c=0.125, c/a=0.5, c/a=1) a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te kayma yüküne maruz, ortotropik inklüzyon içeren yapıştırılmış plak panelin burkulma yüklerine delaminasyonun etkisi gösterilmiştir.

Delaminasyonun şekil ve büyüklük detayları Bölüm 4.1.3'te verilmiştir. Boyutsuz kritik burkulma yükü P_{cr}/P_{cr}^* şeklinde ifade edilmiştir. Burada P_{cr} delaminasyonlu bağlantının kritik burkulma yükü ile P_{cr}^* delaminasyonsuz bağlantının kritik burkulma yüküdür.

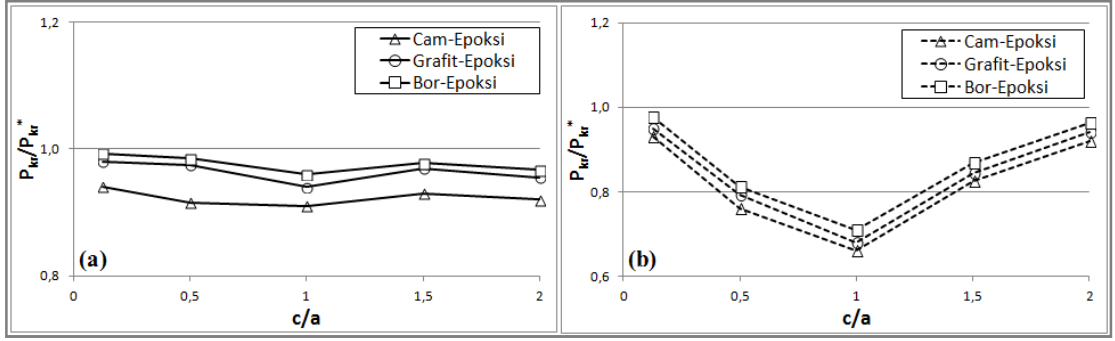
Tüm inklüzyon tipleri için delaminasyon büyüklüğünün (A_{del}/A_{yap}) 0.04 değerinden 0.08 değerine artması, kritik burkulma yükünü önemli ölçüde değiştirir, bu durum Şekil 4.14'te görülebilir. Ayrıca bir diğer önemli sonuç da, delaminasyonun şeklinin kritik burkulma yüküne etkisidir. Yapıştırılmış plak panelde kritik burkulma yüklerindeki değişim incelendiğinde, delaminasyon etkisinin elips şeklinde delaminasyonlarda daire şeklindeki delaminasyona oranla daha az olduğu görülür. En kötü delaminasyon etkisi c/a nın 1 olduğu daire şeklindeki delaminasyonda görülür.



Şekil 4.14 Delaminasyon şekline göre değişen kritik burkulma yükü a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi

Toplam yapıştırıcı alanın %4'üne ($A_{del}/A_{yap}=0.04$) eşit bir alana sahip olan küçük bir delaminasyonda, c/a (delaminasyon şeklinin) değişiminin, burkulma yüküne etkisi de küçüktür (Şekil 4.15a). Ancak, delaminasyon büyüklüğü %8'e ($A_{del}/A_{adh}=0.08$) eşit olduğunda, c/a 'ın değişiminin kritik burkulma yüküne etkisi oldukça fazladır. Örneğin, cam-epoksi inklüzyonda delaminasyon büyüklüğü %8 ve delaminasyon şekli daire iken ($c/a=1$), kritik burkulma yükündeki azalmalar %50'den fazladır. Bu azalma c/a 0.125 değerinde iken yalnızca %7.5'dir. (Şekil 4.15b). Ayrıca, delaminasyonun en büyük

etkisinin görüldüğü %8 delaminasyon büyüklüğü ve c/a nın 1 olduğu durumda, kritik burkulma yükleri sırasıyla grafit epoksi için %47, bor-epoksi için %40 azalmıştır.



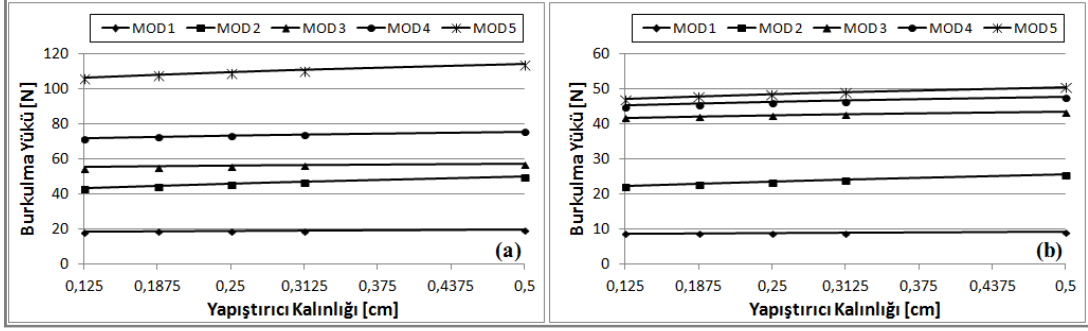
Şekil 4.15 Delaminasyon şekline göre değişen kritik burkulma yükü a) $A_{del}/A_{adh}=0.04$, b) $A_{del}/A_{adh}=0.08$

Bu tez çalışmasında, yapıştırıcı tabakasında inklüzyon içeren yapıştırılmış plak paneldeki, delaminasyon için kabul edilen kriterler delaminasyon büyüklüğü ve şeklidir. Burada delaminasyon büyümesi yoktur. Delaminasyondaki büyüme, ilerlemeli hata modeli ile hesaba katılabilir ve daha kapsamlı sonlu elemanlar analizi gerektirir. Bu karmaşık analizlerin çeşitli aşamalarında örn. hasar kriterleri, malzeme özellikleri indirme modeli vb. birçok kabul yapılmalıdır, bunlar sonuçların belirsizliğini arttırır.

Şekil 4.16'da, yapıştırma kalınlığının burkulma yüküne etkisi, cam inklüzyon içeren bağlantı için ve inklüzyon içermeyen bağlantı için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Cam inklüzyon özellikleri ve yapıştırma kalınlığı ile ilgili detaylar Bölüm 4.1.4'te sunulmuştur. Inklüzyon içermeyen yapıştırıcı bağlantısında, elde edilen burkulma yükleri bütün modlarda, yapıştırıcı kalınlığı arttıkça artar. Benzer eğilimler, Loctite yapıştırıcının daha kalın yapışkan tabakalarda yüksek bir dayanım sergilediği literatür çalışmasında da [144] elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan yapıştırıcı malzemesi, literatürde yer alan çalışmadaki [144] Loctite yapıştırıcıya benzer özelliklere sahiptir.

Şekil 4.16a'da, yapıştırıcı tabakasında inklüzyon içermeyen bağlantı için, yapıştırma kalınlığı 0.125'den 0.5cm'ye arttırıldığında, burkulma yükündeki artışın mod 1 için %5.04 mod 5 için %7.29 olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi cam inklüzyon içeren bağlantıların burkulma yükü, inklüzyon içermeyen bağlantıların burkulma yükünden daha azdır.

Ayrıca, cam inklüzyon durum için, artan mod numaralarında (mod 3, mod 4 ve mod 5) mod davranışları arasındaki farklılıklar kaybolur. Yapıştırıcı kalınlığının burkulma yüklerine etkileri, yüksek modlarda cam inklüzyon bağlantısında, inklüzyon içermeyen bağlantıya göre daha azdır.



Şekil 4.16 Yapıştırma kalınlığının burkulma yüküne etkisi a) inklüzyonsuz durum, b) cam inklüzyon içeren durum

4.2 Ortotropik inklüzyon içeren Tek Bindirme Bağlantılarının Gerilme Davranışı

Bölüm 4.2'de, yapıştırıcı tabakalarında ortotropik inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarının düzgün yayılı çekme yükü altındaki gerilme davranışları analiz edilmiştir. Bu analizlerde, yapıştırıcı tabakanın heterojen özellikte olduğu göz önüne alınarak daha gerçekçi bir yaklaşımda bulunulmuştur. Bu bölümde, literatürde yer alan [145] çalışmadaki, düzgün yayılı çekme yüküne maruz tek bindirme bağlantı geometrisi ele alınmıştır. Fakat bağlantıda, heterojen yapıştırıcı tabaka, içerisinde ortotropik inklüzyon yeralan homojen bir yapıştırıcı tabakası olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmada, bağlantıların yapışkan tabakalarında yine cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi olmak üzere üç farklı ortotropik inklüzyon malzemesi yer almaktadır. Seçilen inklüzyon malzemesinin, bağlantılarda meydana gelen gerilmeler ve yer değiştirmeler üzerine etkileri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, bu tip bağlantılarda meydana gelen gerilme ve yer değiştirmelere, inklüzyon malzemesinin yanısıra, yapıştırılan malzeme kalınlığının etkileri de incelenmiş ve inklüzyon bölgesi yakınlarında delaminasyon olasılığı göz önüne alınmıştır.

4.2.1 Düzgün Yayılı Çekme Yüğü Altında Ortotropik İnküzyon İçeren Tek Bindirme Bağlantıları

Bu bölümde ele alınan yapıştırılmış tek bindirme bağlantılarında, yapıştırıcı malzeme epoksi bazlı FM73 [145] adlı yapıştırıcıdır. Çizelge 4.5'te yapıştırıcı özellikleri verilmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak homojen izotrop özellik taşıyan titanyum seçilmiş ve malzeme özellikleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. Yapıştırıcı tabakasında yer alan inküzyon malzemeleri ise mekanik özellikleri daha önce Çizelge 4.3'te verilen cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi olarak seçilmiştir.

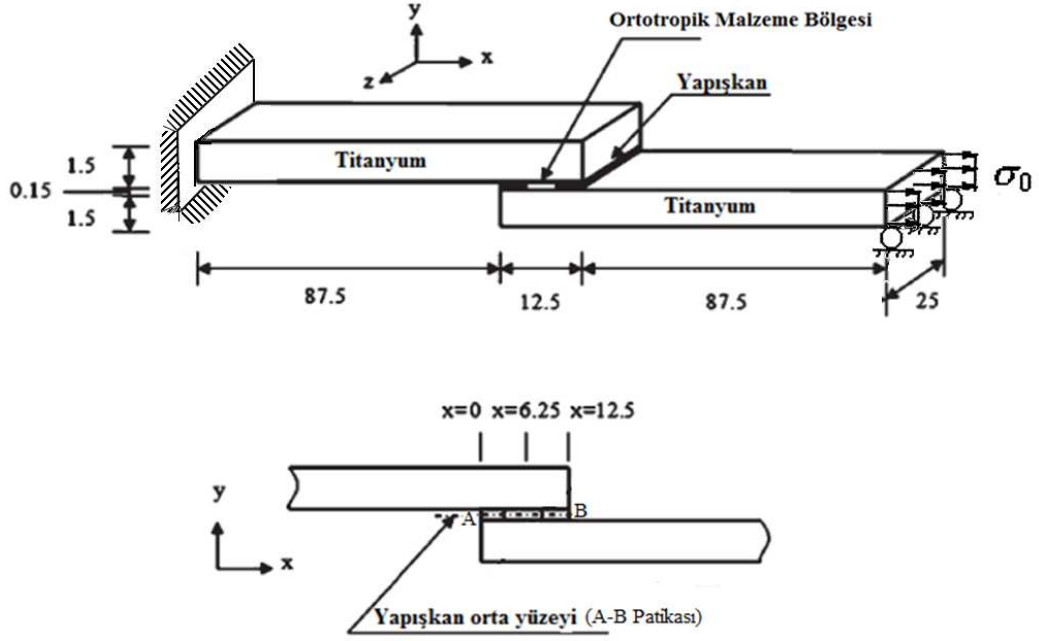
Çizelge 4.5 Yapıştırıcı malzeme özellikleri, FM73 [145]

<i>E [GPa]</i>	1.1
<i>v</i>	0.44

Çizelge 4.6 Yapıştırılan malzeme özellikleri, Titanyum

<i>E [GPa]</i>	116
<i>v</i>	0.33

Yapıştırıcı tabakasında ortotropik inküzyon içeren tek bindirme bağlantısının geometrisi ve ölçüleri Şekil 4.17'de verilmiştir. Yapıştırıcı tabakasında yer alan inküzyon bölgesi, karşılaştırma yapabilmek amacıyla literatürle [145] benzer şekilde, bağlantı boyunun %50'si kadar (6.25 mm) bir uzunluğa sahiptir. Toplamda üç farklı inküzyon malzemesi ele alınmıştır. Buna ek olarak, inküzyon içermeyen yapıştırıcı tabakası, epoksi olarak tanımlanmış ve tüm analiz sonuçları epoksi bağlantı durumu ile karşılaştırılmıştır.



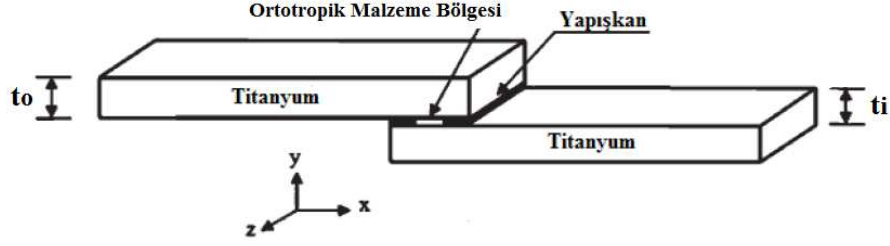
Şekil 4.17 Yapıştırıcı tabakasında inklüzyon malzeme içeren tek bindirme bağlantısı

Yapıştırıcı tabakasında inklüzyon içeren, bir ucu ankastre mesnetlenmiş tek bindirme bağlantısına uygulanan düzgün yayılı çekme yükün şiddeti 120 MPa'dır. Sonlu elemanlarda, düzgün yayılı çekme yükünün bağlantıya nasıl uygulanması gerektiği ve ele alınan bağlantı geometrisi için uygulanan yük değeri hakkındaki detaylar için Hua vd.'nin [145] çalışmasından faydalanılmıştır.

Tek bindirme bağlantısı modellenirken klasik varsayımlar kullanılmıştır, buna göre yapıştırılan malzeme doğru eksenli olup, herhangi bir geometrik kusur içermemektedir. Yapıştırılan malzeme lineer, elastik, homojen ve izotrop olup aynı zamanda malzeme kalınlığı sabittir.

Bu bölümde yapışkan tabakanın içerdiği inklüzyon malzemesinin ve yapıştırılan malzeme kalınlık oranının, bağlantılarında oluşan gerilmeler ve yerdeğıştirmeler üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada inklüzyon malzemesine göre, dört tip tek bindirme bağlantısı modellenmiştir. Bunlardan ilki inklüzyon içermeyen ve epoksi olarak adlandırılan bağlantı, diğerleri ise inklüzyon malzemesi olarak ortotropik özellikteki cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi içeren bağlantılardır.

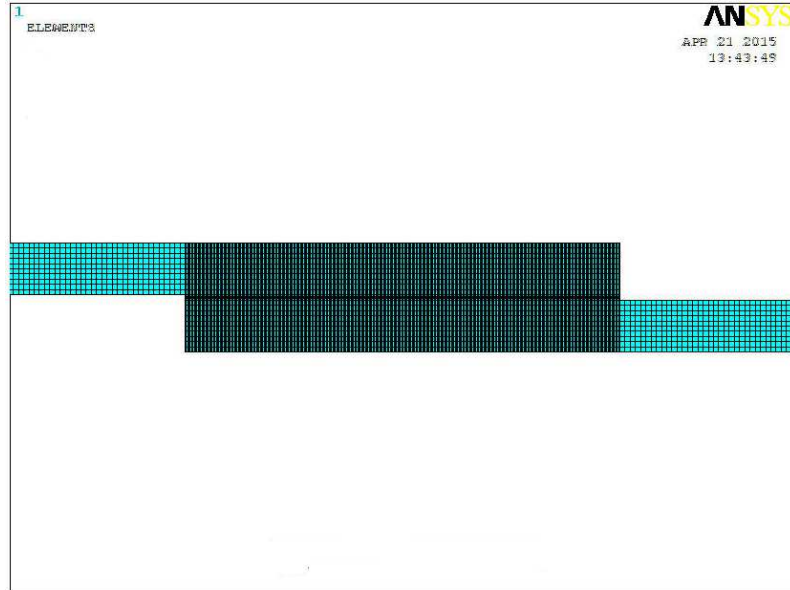
Yapıştırılan malzeme kalınlıkları ise Şekil 4.18'de gösterilmiştir. t_o üstteki malzeme kalınlığı, t_i alttaki malzeme kalınlığı olarak tanımlanmış, t_o/t_i 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 ve 2 olmak üzere toplam 7 farklı kalınlık oranı ele alınmıştır.



Şekil 4.18 Yapıştırılan malzeme kalınlıkları oranı, t_o/t_i

4.2.2 Sonlu Elemanlar Modeli

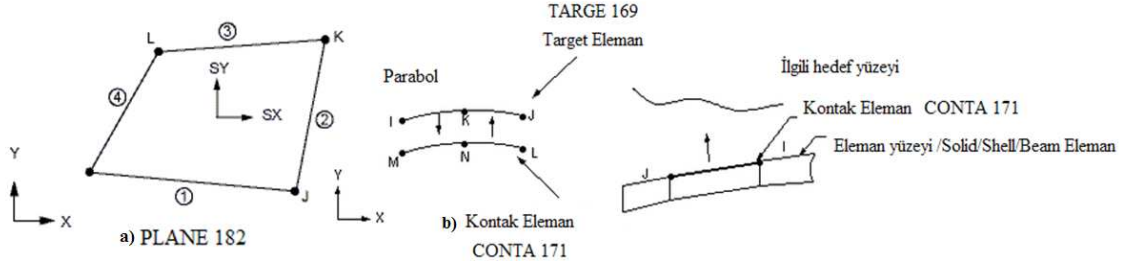
Düzgün yayılı çekme yükü altındaki, yapışkan tabakalarında inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında oluşan gerilmeleri ve gerilme dağılımlarını belirlemek amacıyla ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlara bölme (mesh) işlemi sırasında inklüzyon bölgesi ve yapıştırıcı bağlantı yerlerindeki mesh boyutları ve mesh kombinasyonu dikkatle seçilmiştir. Şekil 4.19'da bağlantının sonlu elemanlar modeli ve mesh detayı verilmiştir. İki boyutlu katı modeller uygun olan ve 4 noda sahip PLANE 182 elemanı modellemede kullanılmıştır.



Şekil 4.19 Yapıştırıcı tabakasında inklüzyon içeren tek bindirme bağlantısının sonlu elemanlar modeli

Ele alınan modelde, iki çeşit temas yüzeyi bulunmaktadır. Bunlardan ilki, yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı tabaka arasında yer alan temas yüzeyi, diğeri ise inklüzyon malzemesi ve yapıştırıcı arasında yer alan temas yüzeyidir. Bu temas yüzeylerinde yer alması gereken yüzey kontak elemanları CONTA 171 ve TARGE 169 olarak seçilmiş ve

yüzeyle yerleştirilmiştir. Kullanılan PLANE 182 ve kontak çiftlerini meydana getiren CONTA 171 ve TARGE 169 elemanları Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Bağlantı analizinde, penetrasyon ve kontak rijitliğinin kontrolü, FKN değerinin, yani normal penaltı rijitlik faktörünün, ayarlanmasıyla sağlanmıştır.



Şekil 4.20 Eleman Tipleri a) Plane 182 b) Conta 171 ve Targe 169

4.2.3 Tek Bindirme Bağlantılarında İnküzyon Bölgesi Yakınlarında Delaminasyon Hasarı

Tek bindirme bağlantılarında yapıştırıcı tabaka içerisindeki inküzyonlar, delaminasyona sebep olabilir. Bu bölümde, bağlantıda delaminasyon oluşma ihtimali ve delaminasyonun bağlantı dayanımına etkileri sonlu elemanlar analizi yardımıyla incelenmiştir. CONTA 171 ve TARGE 169 kontak elemanlarını içeren modelde, temas problemi delaminasyon alanı ile yapıştırıcı arasında ele alınmıştır. Bu tez çalışmasında yapılan sonlu elemanlar modeli, daha önce de belirtildiği gibi, malzeme hasar problemi göz önüne alınarak yapılmamıştır, bu sebeple de delaminasyon büyüklüğü sabit kalır ve ilerlemez.

Delaminasyon büyüklüğü, delaminasyon uzunluğunun yapıştırıcı boyuna oranı (L_{del}/L_{yap}) olarak tanımlanmıştır ve delaminasyon büyüklüğü olarak 0.04 ve 0.08 değerleri seçilmiştir.

CONTA 171 ve TARGE 169 elemanlarının yerleştirildikleri yüzeyler arasındaki temas koşulları çeşitli parametreler yardımıyla tanımlanır. Kabul edilen penetrasyon değeri için alt ve üst limitler belirlenir ve eğer penetrasyon bu limitlerin dışına çıktıysa gerçek analize başlamadan önce bu değer minimize edilmeye çalışılır. Delaminasyon içeren bağlantıların boyutsuz von-Mises gerilmesi burada $\sigma_{von}/\sigma_{von}^*$ olarak ifade edilir. σ_{von} delaminasyon içeren tek bindirme bağlantısının maksimum von-Mises gerilme değeri,

σ_{von}^* ise delaminasyonsuz tek bindirme bağlantısının maksimum von-Mises gerilme değeridir. Delaminasyon etkilerinin sonuçları Bölüm 4.2.4 Sayısal Sonuçlar'da verilmiştir.

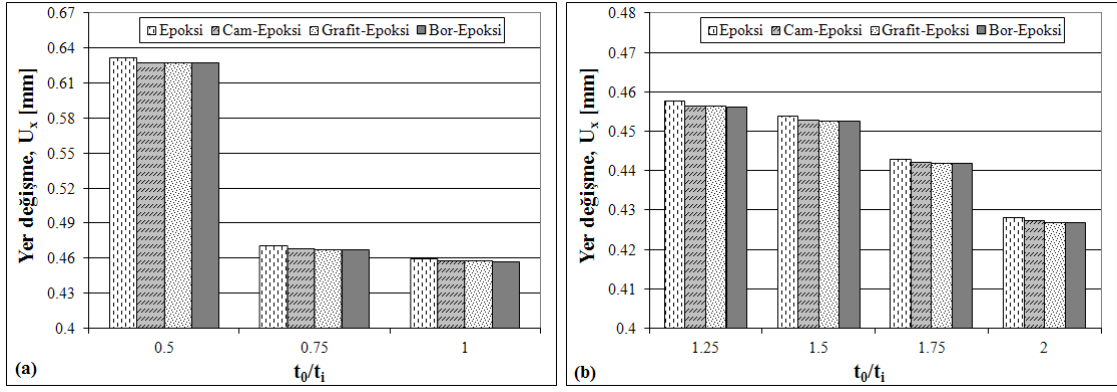
4.2.4 Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde, düzgün yayılı çekme yüküne maruz inklüzyon içeren tek bindirme bağlantısının maksimum yerdeğiştirme ve gerilme değerleri incelenmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizinde düzgün yayılı çekme yükünün şiddeti $\sigma_0=120$ MPa olarak uygulanmıştır [145] ve analiz cevabı zamanla değişen yük etkisi olmadan hesaplanmıştır.

Sonlu elemanlar analizi sonucunda, tek bindirme bağlantılarında yer alan inklüzyon malzemesinin ve yapıştırılan malzeme kalınlığının, bağlantıda meydana gelen maksimum yer değiştirme değerlerine (U_x ve U_y) etkileri Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de verilmiştir.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de, görüldüğü gibi maksimum U_x ve U_y yerdeğiştirme değerleri, hiç inklüzyon içermeyen epoksi ve üç farklı inklüzyon malzemesi (cam-epoksi, grafit-epoksi ve bor-epoksi) içeren bağlantılar için karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, t_0 üstteki malzeme kalınlığı, t_i alttaki malzeme kalınlığı olmak üzere, $t_0/t_i=0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75$ ve 2 kalınlık oranına sahip tek bindirme bağlantıları için yapılmıştır.

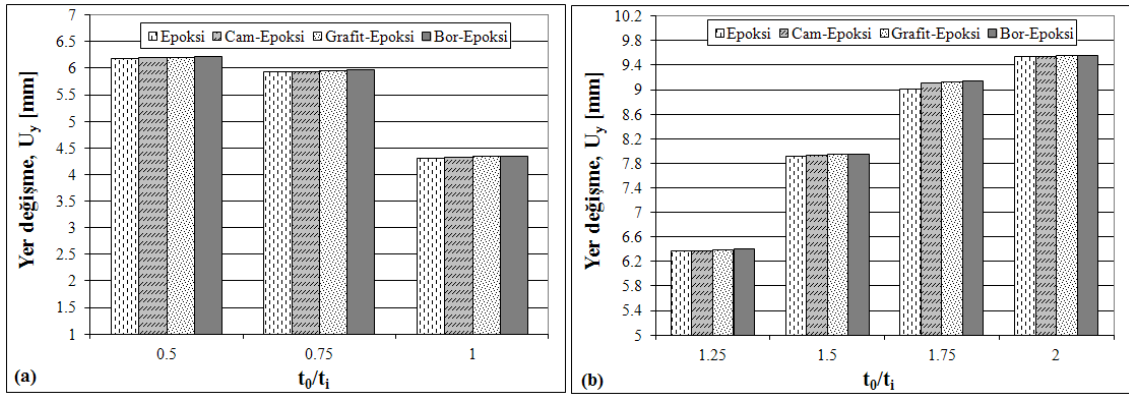
U_x yerdeğiştirme değeri inklüzyon bulunmayan ve epoksi olarak tanımlanan t_0/t_i değerinin 0.5 olduğu tek bindirme bağlantısında 0.631 mm değerindedir. Bu değer, t_0/t_i 0.75'e eşit olduğunda %34.2 azalmıştır. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi maksimum U_x yerdeğiştirme değeri, t_0/t_i değeri arttıkça azalmaktadır. Aynı zamanda U_x yer değiştirme değerleri, tüm t_0/t_i oranlarında inklüzyon malzemesi içeren bağlantılarda, içermeyen bağlantıya göre daha düşüktür.



Şekil 4.21 Çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_0/t_i oranının U_x yer değiştirmesine etkisi a) 0.5, 0.75, 1, b) 1.25, 1.5, 1.75, 2

Düzgün yayılı çekme yükü altındaki tek bindirme bağlantısında, epoksi durum için yapıştırılan malzemelerin kalınlık oranları birbirine eşit iken ($t_0/t_i = 1$) maksimum U_y yerdeğiştirme değeri 4.3 mm'dir. Şekil 4.22a'da tek bindirme bağlantısında t_0/t_i oranının 1'den küçük olduğu durumlar için meydana gelen U_y değerleri, Şekil 4.22b'de ise t_0/t_i oranının 1'den büyük olduğu durumlar için meydana gelen U_y değerleri verilmiştir. Buna göre bağlantıda oluşan maksimum U_y yerdeğiştirme değeri t_0/t_i oranı 1 değerinden uzaklaştıkça artmaktadır. Kalınlık oranları 1 değerinden uzaklaştıkça bağlantıda 4.3 mm değerinden fazla U_y yerdeğiştirmelerinin oluştuğu Şekil 4.22'de görülmektedir.

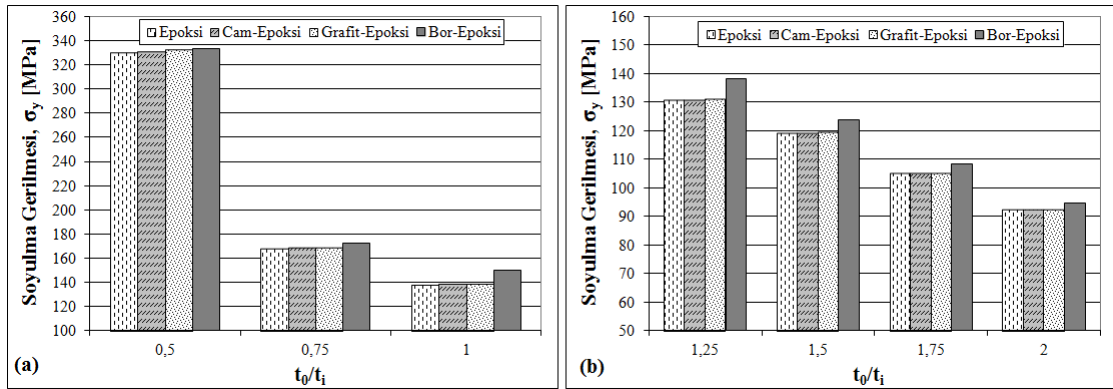
Bağlantıda oluşan maksimum U_y yerdeğiştirme değerlerindeki artışa, inklüzyon malzemesinin etkisi de Şekil 4.22'de görülmektedir. Yerdeğiştirme değerlerindeki bu artışlar, yapıştırıcı bağlantılarında inklüzyon malzemesinin ve yapıştırma kalınlık oranının bağlantılarının dayanımı üzerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur.



Şekil 4.22 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_0/t_i oranının U_y yer değiştirmesine etkisi
a) 0.5, 0.75, 1, b) 1.25, 1.5, 1.75, 2

Şekil 4.23-4.25'te yapıştırıcı tabaka içerisindeki inklüzyon malzemesinin ve yapıştırılan malzeme kalınlığının, tüm bağlantıda oluşan maksimum soyulma (σ_y), kayma (τ_{xy}) ve von-Mises (σ_{von}) gerilme değerleri üzerine etkileri incelenmiştir.

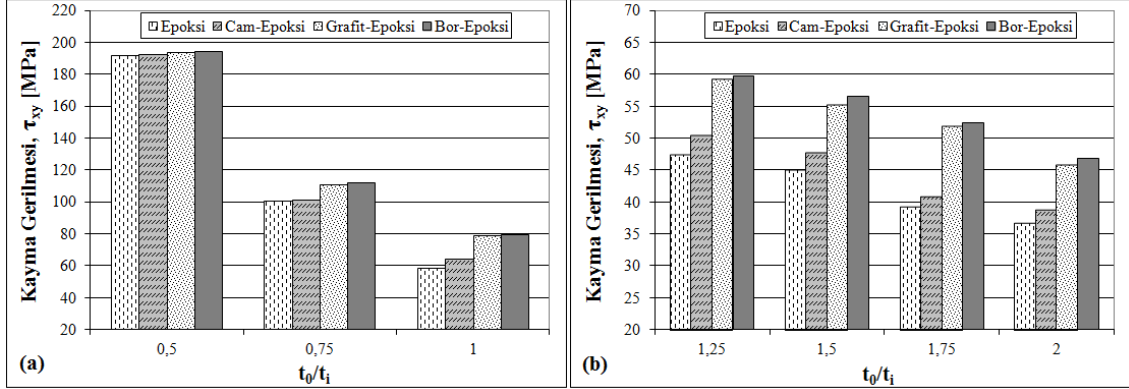
Şekil 4.23'te yayılı yüke maruz tek bindirme bağlantıda meydana gelen maksimum soyulma gerilmeleri (σ_y) verilmiştir. Şekil 4.23'te görüldüğü gibi, maksimum soyulma gerilmesi (σ_y), t_0/t_i oranı 0.5 iken en büyük değerini alır ve t_0/t_i oranı arttıkça azalma eğilimi gösterir, t_0/t_i 2 değerini aldığı anda ise en küçük değerini alır.



Şekil 4.23 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_0/t_i oranının Soyulma gerilmesi (σ_y) üzerine etkisi
a) 0.5, 0.75, 1, b) 1.25, 1.5, 1.75, 2

Yapıştırıcı bağlantısı, kayma gerilmesi değerleri açısından ele alındığında, en yüksek kayma gerilmelerinin bor-epoksi inklüzyon malzemesi içeren bağlantıda olduğu Şekil 4.24'de görülmektedir. Cam-epoksi inklüzyon içeren bağlantıda oluşan kayma gerilmesi ise diğer inklüzyon tipleriyle karşılaştırıldığında en düşük olandır. Ayrıca Şekil 4.24'de

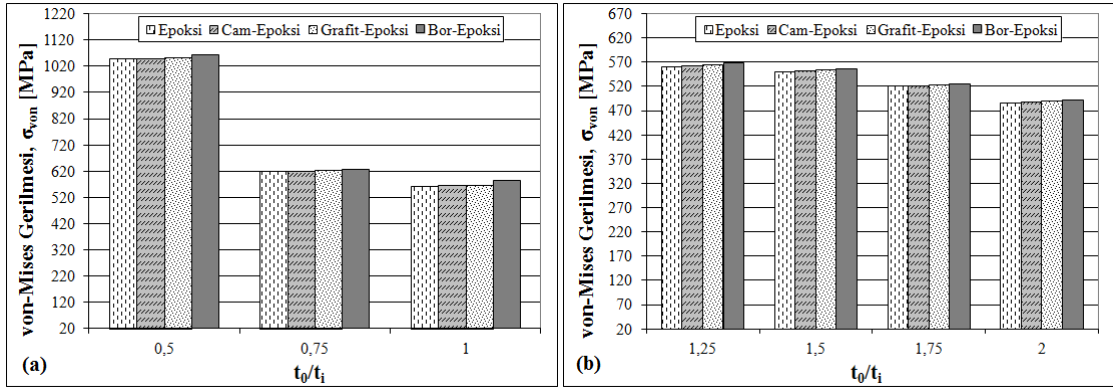
tüm t_o/t_i oranlarında, inklüzyon içeren bağlantılardaki kayma gerilmelerinin, inklüzyon içermeyen bağlantıdaki kayma gerilmelerinden yüksek olduğu görülür. Bu durum, yapışkan bağlantıda kayma gerilmesinin meydana getireceği ayrılma davranışının görülme ihtimalinin inklüzyon içeren yapışkan bağlantıda daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.24 Düzgün yayılı çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_o/t_i oranının Kayma gerilmesi (τ_{xy}) üzerine etkisi

a) 0,5, 0,75, 1, b) 1,25, 1,5, 1,75, 2

Şekil 4.25'te düzgün yayılı çekme yükü altındaki, inklüzyon malzemesi içeren tek bindirme bağlantılarında meydana gelen Von-Mises gerilmeleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tüm yapıştırılan malzeme kalınlık oranları (t_o/t_i) için elde edilen analiz sonuçları, epoksi reçine içerisine inklüzyon malzemesi yerleştirilerek heterojen yapıda oluşturulan yapışkan tabakalı tek bindirme bağlantı dayanımlarının, inklüzyon içermeyen tek bindirme bağlantısında düşük olduğunu göstermiştir. Örneğin, Von-Mises gerilmesi t_o/t_i 'nin 0,5 olduğu inklüzyon içermeyen epoksi bağlantısında 1050,2 MPa değerinde iken, yapıştırıcı tabakasında bor-inklüzyon içeren bağlantıda 1063,6 MPa değerindedir. Gerilme değerleri ele alındığında, en yüksek değerler yani en kötü bağlantı dayanımı, bor-epoksi içeren bağlantı tipinde görülmektedir. Bununla beraber en düşük gerilme değerleri ise cam epoksi içeren bağlantı tipinde görülmektedir.

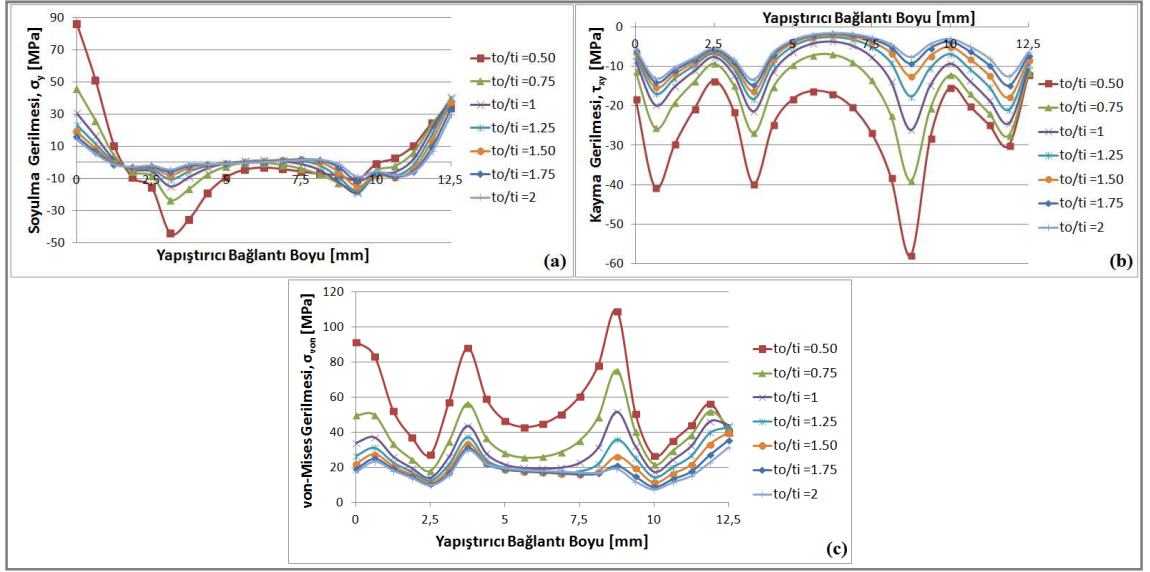


Şekil 4.25 Çekme yükü altındaki, inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında t_0/t_i oranının von-Mises gerilmesi (σ_{von}) üzerine etkisi a) 0,5, 0,75, 1, b) 1,25, 1,5, 1,75, 2

Şekil 4.17'de görülen inklüzyonlu yapıştırıcı tabakanın orta düzleminde (A-B patikasında) meydana gelen soyulma (σ_y), kayma (τ_{xy}) ve von-Mises (σ_{von}) gerilme dağılımlarının belirlenmesi, bağlantı dayanımının ve birleştirilmiş geometrinin ayrılma davranışının incelenmesi açısından önemlidir. Bu nedenle, Şekil 4.26-4.28'de yapıştırıcı üzerinde meydana gelen gerilme dağılımları, yapıştırıcı tabaka içerisindeki inklüzyon malzemesinin ve yapıştırılan malzeme kalınlığının etkileri de dikkate alınarak incelenmiştir.

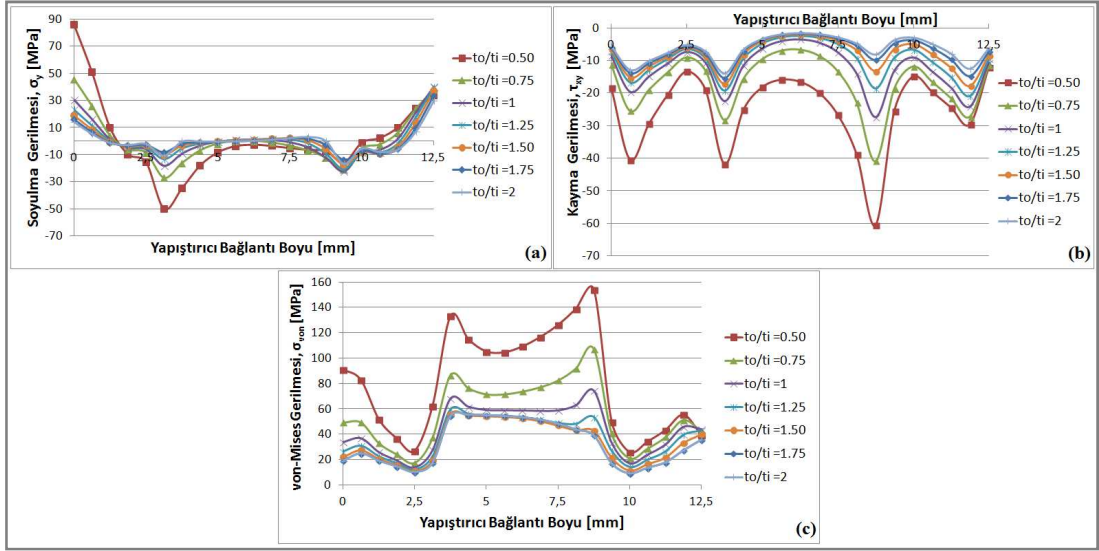
Şekil 4.26'da cam inklüzyon içeren düzgün yayılı çekme yüküne maruz tek bindirme bağlantısının, yapıştırıcı tabaka orta düzleminde oluşan gerilme dağılımları verilmiştir. Soyulma gerilmelerinin maksimum noktaları, A-B patikası boyunca her t_0/t_i oranı için patikanın başladığı A noktasıdır. Ayrıca, soyulma gerilmesi eğrileri üzerindeki büyük sıçramalar, inklüzyon geometrisinin başlangıç ve bitiş yerlerinde (A noktası $x=0$ olmak üzere, $x=3.125$ mm ve $x=9.375$ mm) meydana gelir.

Şekil 4.26a incelendiğinde, inklüzyonun bulunduğu bölgede soyulma gerilmesi değerlerinin negatif olduğu görülmektedir. Bu durum, o bölgelerde meydana gelen soyulma gerilmelerinin yön değiştirdiğini göstermektedir. Yapıştırıcı tabaka içerisinde inklüzyonun varlığı etkin bir şekilde tüm inklüzyon tiplerinde bağlantı dayanımını azaltmaktadır. Yapıştırılan malzeme kalınlığını oranı t_0/t_i arttıkça, yani tek bindirme bağlantısında düzgün yayılı çekme yükü uygulanan malzemenin kalınlığı (t_i , alt malzeme kalınlığı) azaldıkça, soyulma gerilmeleri de azalmıştır.



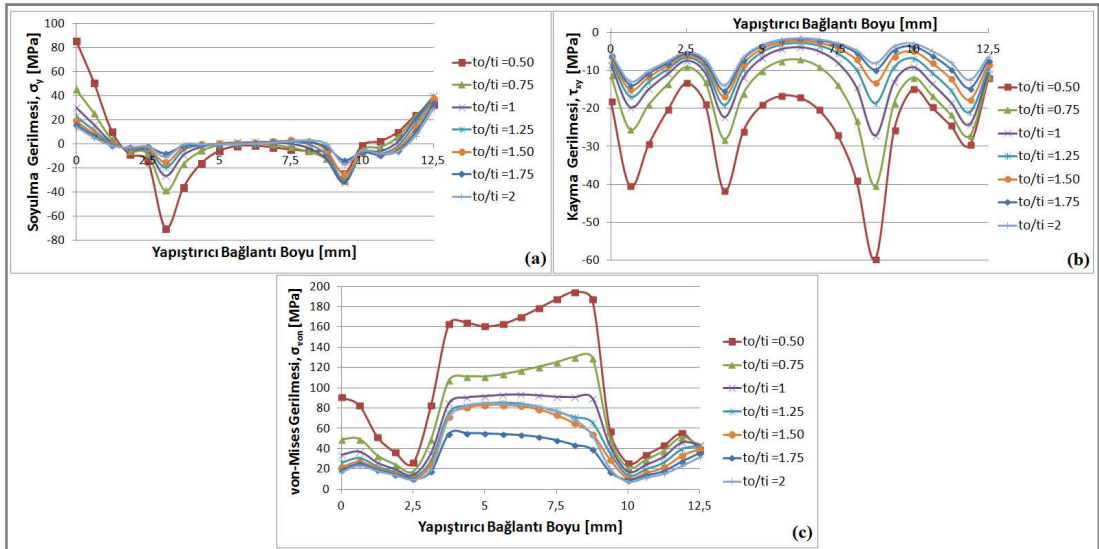
Şekil 4.26 Yapıştırıcı tabakasında Cam-Epoksi inklüzyon içeren tek bindirme geometrisinde, t_0/t_i 'nin bağlantı boyunca oluşan gerilme dağılımlarına etkisi a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})

Grafit inklüzyona sahip tek bindirme bağlantısının yapıştırma bölgesi üzerinden alınan gerilme dağılımları Şekil 4.27'de verilmektedir. Şekil 4.27b'de görüldüğü gibi, kayma gerilmesindeki en büyük değişim t_0/t_i oranının 0.5 değerinden 0.75 değerine artmasıyla meydana gelmiştir. Kayma gerilmeleri incelendiğinde, kayma gerilmelerinin negatif değerden başladıkları görülmektedir. Bu durum, patikanın başlangıç noktası olan A noktasında kayma gerilmelerinin yönünün negatif olduğunu gösterir. Kayma gerilmeleri, tüm t_0/t_i oranlarında inklüzyon bölgesinin bitimine denk gelen bölgede (A noktası $x=0$ olmak üzere, $x=9.375$ 'de) maksimum değere ulaşmaktadır. Yapışkan tabakada meydana gelen kayma gerilmesi yığılmaları, tüm inklüzyon malzemelerinde, inklüzyon bölgesinin başladığı yerde daha az iken, inklüzyon bölgesinin bittiği yerde daha fazladır. Bu durum, düzgün yayılı çekme yükü altındaki bağlantının, ayrılmaya başladığı yerin inklüzyon bölgesinin bitimi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.27 Yapıştırıcı tabakasında Grafit-Epoksi inklüzyon içeren tek bindirme geometrisinde, t_o/t_i 'nin bağlantı boyunca oluşan gerilme dağılımlarına etkisi a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})

Şekil 4.28'de bor-epoksi inklüzyon malzemesi içeren bağlantıda A-B patikası üzerindeki soyulma, kayma ve von mises gerilme dağılımları ile gerilmelerin maksimum değerleri görülmektedir. Yapışkan tabaka üzerindeki von-Mises gerilmesi en yüksek değerini t_o/t_i oranının 0.5 olduğunda almıştır. Bu durum kayma ve soyulma gerilmelerinde de benzerdir. Bağlantı dayanımının en az olduğu bağlantı, t_o/t_i değerinin 0.5'e eşit olduğu bağlantıdır. Gerilme değerleri, t_o/t_i değeri arttıkça ,yani bağlantıdaki yapıştırılan alt malzemenin kalınlığı, azaldıkça azalır.

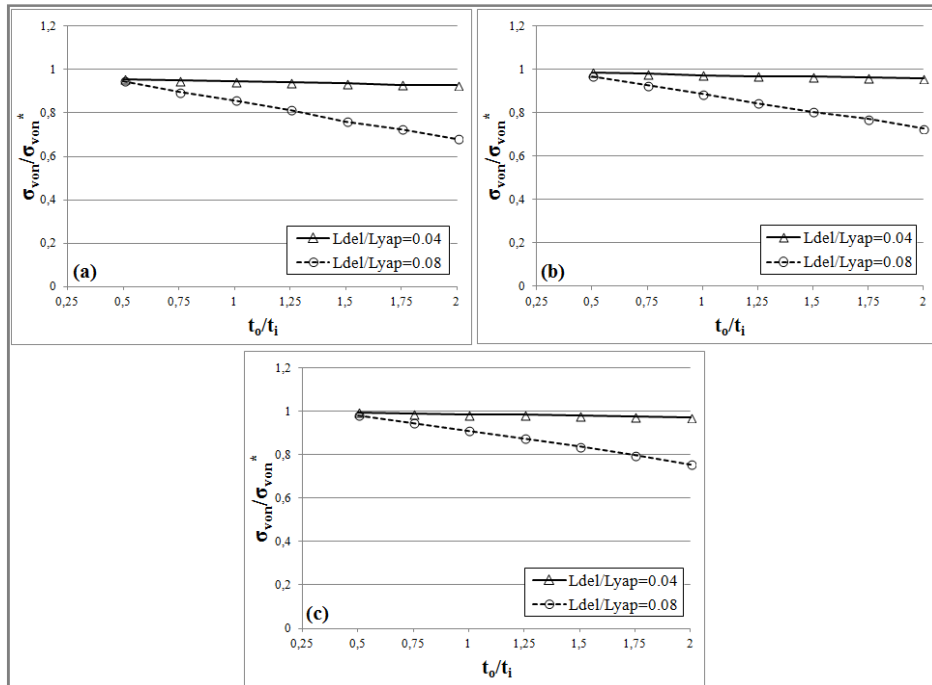


Şekil 4.28 Yapıştırıcı tabakasında Bor-Epoksi inklüzyon içeren tek bindirme geometrisinde, t_o/t_i 'nin bağlantı boyunca oluşan gerilme dağılımlarına etkisi a) Soyulma gerilmesi (σ_y), b) Kayma gerilmesi (τ_{xy}), c) von-Mises gerilmesi (σ_{von})

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da inklüzyon içeren tek bindirme bağlantılarında delaminasyon etkisi incelenmiştir. Delaminasyonun şekil ve büyüklük detayları Bölüm 4.2.3'te verilmiştir. Bu tez çalışmasında, delaminasyon incelemesi, delaminasyon büyüklüğü ve yapıştırılan malzeme kalınlık oranı dikkate alınarak yapılmıştır. Ele alınan incelemede delaminasyon büyümesi yoktur.

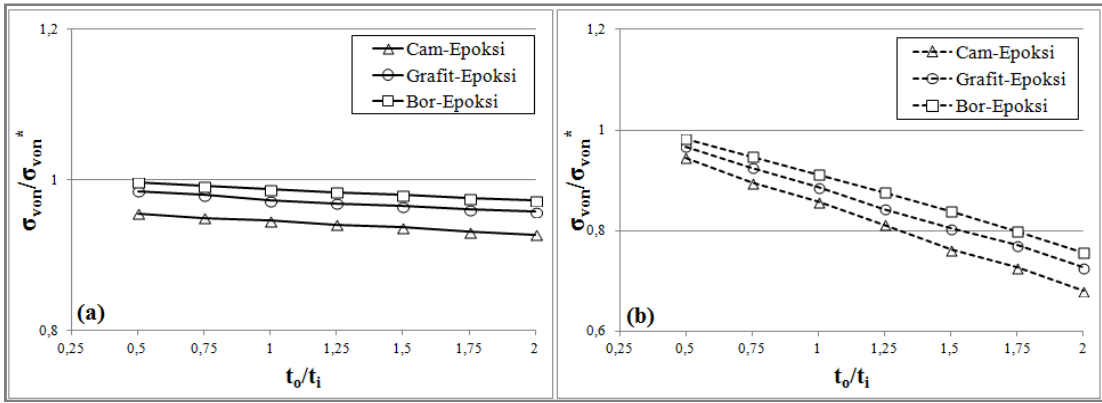
Bağlantıda meydana gelen, maksimum boyutsuz von-Mises gerilmesi $\sigma_{von}/\sigma_{von}^*$ şeklinde ifade edilmiştir. Burada σ_{von} delaminasyonlu bağlantının maksimum von-Mises gerilme değeri iken σ_{von}^* ise delaminasyonsuz bağlantının maksimum von-Mises gerilme değeridir.

Tüm inklüzyon tipleri için delaminasyon büyüklüğünün (L_{del}/L_{yap}) 0.04 değerinden 0.08 değerine artması, maksimum von-Mises gerilme değerini önemli ölçüde değiştirir, bu durum Şekil 4.29'da görülebilir. Ayrıca bir diğer önemli sonuç, yapıştırılan bağlantının kalınlık oranının von-Mises gerilmesine etkisidir. Yapıştırılmış tek bindirme bağlantısında delaminasyon etkisi incelendiğinde, maksimum von-Mises gerilme değişiminin t_o/t_i değeri arttıkça arttığı görülür. En kötü delaminasyon etkisi t_o/t_i oranının 2 olduğu durumda görülmektedir.



Şekil 4.29 Delaminasyonlu tek bindirme bağlantısında, yapıştırılan malzeme kalınlığına göre değişen von-Mises gerilmesi a) cam-epoksi, b) grafit-epoksi, c) bor-epoksi

Şekil 4.30a'da görüldüğü gibi, toplam yapıştırıcı bölge uzunluğunun %4'üne ($L_{del}/L_{yap}=0.04$) eşit bir uzunluğa sahip olan küçük bir delaminasyonda, t_o/t_i , yapıştırılan malzeme kalınlığı oranı, değişiminin bağlantı dayanımına etkisi de küçüktür. Ancak, delaminasyon büyüklüğü %8'e ($L_{del}/L_{yap}=0.08$) eşit olduğunda, t_o/t_i 'nin değişiminin bağlantı dayanımına etkisi oldukça fazladır. Örneğin, cam-epoksi inklüzyonda delaminasyon büyüklüğü %8 ve yapıştırılan malzeme kalınlığı oranı 2 iken, maksimum von-Mises gerilmesindeki azalma, delaminasyon içermeyen bağlantıya göre, %45'den fazladır. Bu azalma t_o/t_i oranı 0.5 değerinde iken yalnızca %5.8'dir (Şekil 4.30b). Ayrıca, delaminasyonun en büyük etkisinin görüldüğü %8 delaminasyon büyüklüğü ve t_o/t_i oranının 2 olduğu durumda, von-Mises gerilmesi sırasıyla, delaminasyonsuz bağlantıya göre, grafit epoksi için %37, bor-epoksi için %32 azalmıştır.



Şekil 4.30 Delaminasyonlu tek bindirme bağlantısında, yapıştırılan malzeme kalınlığına göre değişen von-Mises gerilmesi a) $L_{del}/L_{yap}=0.04$, b) $L_{del}/L_{yap}=0.08$

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında, heterojen yapıştırıcı bağlantılarının davranışları iki şekilde modellenerek incelenmiştir. İlk olarak, yapıştırılan malzemelerde son zamanlarda deneysel olarak geliştirilmiş FDPM modeli kullanılmış, ikinci olarak ise, bağlantıda yer alan yapıştırıcı tabaka, ortotropik inklüzyon içeren homojen bir tabaka olarak modellenmiştir.

FDPM'den oluşan yapıştırıcı bağlantılarla, üstün mekanik, ısıl, elektrik ve manyetik özelliklerinin yanında hafif ve dayanıklı olmalarından dolayı, uzay ve havacılık endüstrisinde [18], [21] (uçak ve mekik gövdelerinde yer alan tabakalı bağlantılarda), kara ve deniz taşımacılığında [26] (otomobil/gemi iskeletlerindeki birleşim yerlerinde) elektronik ve bilgisayar [25] (manyetik depolama birimlerinin yüzeylerinde, elektromekanik sensörlerde) alanlarında karşılaşırlar. Farklı yükler ve farklı bağlantı geometrisine sahip FDPM'den yapılan yapıştırıcı bağlantıları ile ilgili çalışmalara literatürde az rastlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında ilk olarak, son zamanlarda deneysel olarak geliştirilmiş bir FDPM modeli yapıştırıcı bağlantılarına uygulanmış olup, sandviç plak panel için elde edilen anlamlı bulgular aşağıdadır:

- Noktasal desteklenmiş sandviç panelde meydana gelen kritik burkulma yüklerinin doğrusal desteklenmiş sandviç panelden daha yüksek olduğu görülmüştür. Noktasal desteklenmiş sandviç panellerde, mesnetler için açılan

delikler panel direncini azaltmasına rağmen, panelde çeki ve bası diyagonelleri oluşturarak sandviç panele bir rijitlik etkisi sağlamıştır.

- En yüksek kritik burkulma yükü, PV60/65-PV60/65 grafit tozu ilave edilmiş sandviç panel için saptanmıştır ve bu sonuç, PV60/65 grafit tozunun, PAM 96/98 grafit tozuna göre reçine ile daha uyumlu olduğunu ve burkulmaya karşı daha iyi yanıt verdiğini göstermiştir.
- Tüm analiz sonuçları grafit hacminin artmasıyla kritik burkulma yüklerinin de arttığını göstermiştir. Maksimum kritik burkulma yükü, %12 hacim oranında PV60/65 grafit tozu içeren sandviç plak panelde meydana gelmiştir.
- Savurma döküm yöntemiyle yapılan derecelendirme işlemi her zaman homojen hale göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Tek bindirme bağlantıları için ise, aşağıdaki anlamlı bulgular elde edilmiştir.

- Yapışkan tabaka üzerinde, yüksek kayma gerilme yığılmaları, yapışkanın ayrılmaya başladığı bağlantı boyunun uç noktalarına yakın bölgelerde görülmüştür.
- Yapışkan tabaka üzerinde soyulma gerilmeleri değerleri, kayma gerilmeleri değerlerinden yüksektir. Bu durum, düzgün yayılı çekme yükü altındaki tek bindirme geometrisinin ayrılmasında soyulma gerilmesinin daha etkin olduğunu göstermiştir.
- PV60/65 ve PAM 96/98 grafit tozları için, artan hacim oranlarında (%3, %6 , %9 ve %12) tek bindirme bağlantı dayanımının da arttığı görülmüştür.
- En iyi bağlantı dayanımı ise %12 hacim oranında PV60/65 grafit tozu içeren tek bindirme bağlantısında görülmüştür. Bu durum, PV60/65 grafit tozunun, PAM 96/98 grafit tozuna göre reçine ile daha uyumlu olduğunu göstermiştir.
- Grafit tozları ilavesi ile reçinenin mekanik özelliklerinin iyileştiği ve bağlantı dayanımının arttığı yapılan bu çalışma ile doğrulanmıştır.

Bu tez çalışmasında ikinci olarak, yapıştırıcı tabakasında ortotropik eliptik inklüzyon bulunan kayma yüküne maruz yapıştırılmış plak bağlantıları ile düzgün yayılı çekme

yüküne maruz tek bindirme bağlantıları incelenerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- En düşük kritik burkulma yükü, c/a değeri 1 iken elde edilmiştir. Bunun yanında, burkulma yükünü en kötü etkileyen delaminasyon şekli de c/a 'ın 1 olduğu durumda gözlenmiştir. Burkulma yükleri c/a değerinin birin altında ve birin üstünde olduğu durumlarda, daire geometrisine göre daha yüksek değerler almıştır. Ayrıca, burkulma yüklerinin davranışlarının, inklüzyon geometrisinin şekli daireden, farklı c/a oranlarına sahip eliptik şekle dönüştüğünde değiştiği gözlemlenmiştir.
- Analiz sonuçları malzeme açısından incelendiğinde, burkulma yükleri en yüksek değerini bor-epoksi inklüzyon, en düşük değerini cam-epoksi inklüzyon için almıştır.
- Homojen izotrop yapıştırıcı tabakasına sahip plak panelin klasik burkulma yükü, inklüzyon içeren plak panelin burkulma yükünden daha yüksektir. Aslında, hesaplanan kritik burkulma yükleri, klasik burkulma yük değerlerine ulaşamamıştır. Bu nedenle, homojen izotrop yapıştırıcı ile bağlanmış plak paneller, burkulma yükü hesabı açısından dikkatle ele alınmalıdır.
- Tek bindirmeli bağlantılarda, t_o/t_i değerinin 0.5 olduğu durumda yapıştırıcı tabaka üzerinde, en yüksek soyulma, kayma ve von-Mises gerilme değerleri gözlemlenmiştir. Bu durum, yapıştırıcı bağlantıda en düşük bağlantı dayanımının t_o/t_i 'nin 0.5 değerinde olduğunu göstermektedir.
- Tek bindirmeli bağlantılar malzeme açısından incelendiğinde, gerilmeler en yüksek değerini bor-epoksi inklüzyon, en düşük değerini cam-epoksi inklüzyon için almıştır.

Yapılan bu tez çalışmasında, son zamanlarda deneysel olarak üretilmiş olan FDPDM'den yapılan yapıştırıcı bağlantılarındaki gerilme, burkulma halleri ile delaminasyon oluşumları gerçeğe oldukça yakın modellenmiş ve güvenilir çözümler sunulmuştur. Bu doktora tez çalışmasının, bundan sonraki yapıştırılmış FDPDM araştırmalarına yararlı bir klavuz olacağı umulmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Hull, D. ve Clyne, T.W., (1996). An Introduction to Composite Materials, Second Edition, Cambridge University Press, 133-138 England.
- [2] Hirai, T., (2006). Functional Gradient Materials Science and Technology, Materials Science and Technology, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- [3] Yamanouchi, M., Koizumi, M., Hirai, T. ve Shiota, I., (1990). "Proceedings of the First Int. Symposium on Functionally Gradient Materials", Functionally Gradient Materials Forum, Sendai, Japan, 169-173.
- [4] Koizumi, M., (1993). "The Concept of FGM", Derleyen: Holt, J.B., Koizumi, M., Hirai, T. ve Munir, Z.A., Functionally Gradient Materials, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, 34:3-9.
- [5] McGarry, F.J., (1994). "Polymer Composites", Annual Review of Material Science, 24:63-82.
- [6] Kolakowski, Z. ve Kubiak, T., (2005). "Load-Carrying Capacity of Thin-Walled Composite Structures", Composite Structures, 67:417-426.
- [7] Ochelski, S. ve Gotowicki, P., (2009). "Experimental Assessment of Energy Absorption Capability of Carbon-Epoxy and Glass-Epoxy Composites", Composite Structures, 87:215-224.
- [8] Stabik, J., Suchoń, Ł., Rojek, M. ve Szczepanik, M., (2009). "Investigation of Processing Properties of Polyamide Filled with Hard Coal", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 33:142-149.
- [9] Jordan, J., Jacop, K.I., Tannenbaum, R., Sharaf, M.A. ve Jasiuk, I., (2005). "Experimental Trends in Polymer Nanocomposites- A Review", Material Science and Engineering A, 393:1-11.
- [10] Kulawik, J., Guzdek, P., Szwagierczak, D. ve Stoch, A., (2010). "Dielectric and Magnetic Properties of Bulk and Layered Tape Cast $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Ta}_{1/2})\text{O}_3$ Composites", Composite Structures, 92:2153-2158.
- [11] Ulrich, M., Caze, C. Ve Laroche, P., (1998). "Morphological Studies of Glass-Micro Bead-Filled Polyamide 6.6-Polypropylene Blends", Journal of Applied Polymer Science, 67:201-208.

- [12] Liang, J.Z., Li, R.K.Y. ve Tjong, S.C., (1998). "Morphology and Tensile Properties of Glass Bead Filled Low Density Polyethylene Composites: Material Properties", *Polymer Testing*, 16:529-548.
- [13] Li, R.K.Y., Liang, J.Z. ve Tjong, S.C., (1998). "Morphology and Dynamic Mechanical Properties of Glass Beads Filled Low Density Polyethylene Composite", *Journal Material Processing Technology*, 79:59-65.
- [14] Childs, T.H.C. ve Tontowi, A.E., (2001). "Selective Laser Sintering of Crystalline and a Glass-Filled Crystalline Polymer: Experiments and Simulations", *Journal of Engineering Manufacture*, 215:1481-1495.
- [15] Lee, J. ve Yee, A.F., (2001). "Inorganic Particle Toughening I: Micro-Mechanical Deformations in the Fracture of Glass Bead Filled Epoxies", *Polymer*, 42:577-588.
- [16] Krumova, K., Klingshirn, C., Haupt, F. ve Friedrich, K., (2001). "Microhardness Studies on Functionally Graded Polymer Composites", *Composites Science and Technology*, 61:557-563.
- [17] Li, J. ve Xiao, P., (2001). "Joining Ceramic to Metal using a Powder Metallurgy Method for High Temperature Applications", *Journal of Material Science*, 36:1383-1387.
- [18] Klingshirn, C., Koizumi, M., Haupt, F., Giertzs, H. ve Friedrich, K., (2000). "Structure and Wear of Centrifuged Epoxyresin/Carbon Fiber Functionally Graded Material", *Journal of Materials Science Letters*, 19:263-266.
- [19] Lee, N.J., Jang, J., Park, M. ve Choe, C.R., (1997). "Characterization of Functionally Gradient Epoxy/Carbon Fibre Composite Prepared under Centrifugal Force", *Journal of Materials Science* 32:2013-2020.
- [20] Tsoira, P. ve Friedrich, K., (2003). "Electrical and Mechanical Properties of Functionally Graded Epoxy-Resin/Carbon Fibre Composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34:75-82.
- [21] Hashmi, S.A.R. ve Dwivedi, U.K., (2009). "SiC Dispersed Polysulphide Epoxy Resin Based Functionally Graded Material", *Polymer Composites*, 30:162-168.
- [22] Krumova, M., Klingshirn, C., Haupt, F. ve Friedrich, K., (2001). "Microhardness Studies on Functionally Graded Polymer Composites", *Composites Science and Technology*, 61:557-563.
- [23] Kirugulige, M.S. ve Tippur, H.V., (2006). "Mixed-Mode Dynamic Crack Growth in Functionally Graded Glass-Filled Epoxy", *Experimental Mechanics*, 46:269-281.
- [24] Liu, X.Q., Wang, Y.S. ve Zhu, J.H., (2004). "Epoxy Resin/Polyurethane Functionally Graded Material Prepared by Microwave Irradiation", *Journal of Applied Polymer Science*, 94:994-999.
- [25] Kaushik, A., Singh, P. ve Jyoti, (2010). "Mechanical and Electrical Conductivity Study on Epoxy/Graphite Composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29:1038-1044.

- [26] Yasmin, A. ve Daniel, I.M., (2004). "Mechanical and Thermal Properties of Graphite Platelet/Epoxy Composites", *Polymer*, 45:8211-8219.
- [27] Bafekrpour, E., Yang, C., Natali, M. ve Fox, B., (2013). "Functionally Graded Carbon Nanofiber/Phenolic Nanocomposites and their Mechanical Properties", *Composite Part A*, 54:124-134.
- [28] Rafiee, M.A., Rafiee, J., Yu, Z.Z. ve Koratkar, N., (2009). "Buckling Resistant Graphene Nanocomposites", *Applied Physics Letters* 95: 223103.
- [29] Wen, B., Wu, G. ve Yu, J., (2004). "A Flat Polymeric Gradient Material: Preparation, Structure and Property", *Polymer*, 45:3359-3365.
- [30] Adams, R.D., (2005). *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [31] Sobhy, M., (2013). "Buckling and Free Vibration of Exponentially Graded Sandwich Plates Resting on Elastic Foundations under Various Boundary Conditions", *Composite Structures*, 99:76-87.
- [32] Alipour, M.M. ve Shariyat, M., (2013). "Analytical Zigzag Elasticity Transient and Forced Dynamic Stress and Displacement Response Predicted of Annular FGM Sandwich Plates", *Composite Structures*, 106:426-445.
- [33] Loja, M.A.R., Soares, C.M.M. ve Barbosa, J.I., (2013). "Analysis of Functionally Graded Sandwich Plate Structures with Piezoelectric Skins, Using B-Spline Finite Strip Method", *Composite Structure*, 96:606-615.
- [34] Zenkour, A.M. ve Sobhy, M., (2010). "Thermal Buckling of Various Types of FGM Sandwich Plates", *Composite Structures*, 93:93-102.
- [35] Noor, A.K. ve Burton, W.S., (1990). "Assessment of Computational Models for Multilayered Anisotropic Plates", *Composite Structures*, 14:233-265.
- [36] Kassapoglou, C., (2010). *Design and Analysis of Composite Structures with Applications to Aerospace Structure*, John Wiley & Sons, UK, 275-309.
- [37] Paik, J.K., Thayamballi, A.K. ve Kim, G.S., (1999). "The Strength Characteristics of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels", *Thin-Walled Structures*, 35:205-231.
- [38] Petras, A. ve Sutcliffe, M.P.F., (2000). "Indentation Failure Analysis of Sandwich Beams", *Composite Structure*, 50:311-318.
- [39] Abrate, S., (2008). "Functionally Graded Plates Behave Like Homogeneous Plates", *Composite Part B: Engineering*, 39:151-158.
- [40] Nguyen, V.H., Nguyen, T.K., Thai, H.T. ve Vo, T.P., (2014). "A New Inverse Trigonometric Shear Deformation Theory for Isotropic and Functional Graded Sandwich Plates", *Composite Part B: Engineering*, 66:233-246.
- [41] Teter, A. ve Kolakowski, Z., (2005). "Buckling of Thin-Walled Composite Structures with Intermediate Stiffeners", *Composite Structures*, 69:421-428.

- [42] Teter, A. ve Kolakowski, Z., (2013). "Coupled Dynamic Buckling of Thin-Walled Composite Columns with Open Cross-Section", *Composite Structures*, 95:28-34.
- [43] Kolakowski, Z. ve Mania, R.J., (2013). "Semi-Analytical Method Versus the FEM for Analysis of the Local Post-Buckling of Thin-Walled Composite Structures", *Composite Structures*, 97:99-106.
- [44] Mocibob, D., (2008). *Glass Panel under Shear Loading-Use of Glass Envelopes in Building Stabilization*, Doktora Tezi, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, İsviçre.
- [45] Mocibob, D. ve Bellis, J., (2010). "Coupled Experimental and Numerical Investigation of Structural Glass Panels with Small Slenderness Subjected to Locally Introduced Axial Compression", *Engineering Structures*, 32:753-761.
- [46] da Silva, L.F.M., Öchsner, A. ve Adams, R.D., (2011). *Handbook of Adhesion Technology*, Springer, Berlin.
- [47] Adams, R.D., Atkins, R.W., Harris, J.A. ve Kinloch, A.J., (1989). "Stress Analysis and Failure Properties of Carbon-Fibre-Reinforced-Plastic/Steel Double-Lap Joints", *Journal of Adhesion*, 20:29-53.
- [48] Adams, R.D. ve Haris, J.A., (1987). "The Influence of Local Geometry on the Strength of Adhesive Joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 7(2):69-80.
- [49] Adams, R.D., (1990). "The Nondestructive Evaluation of Bonded Structures", *Construction and Building Materials*, 4(1):3-8.
- [50] Adams, R.D. ve Drinkwater, B.W., (1997). "Nondestructive Testing of Adhesively-Bonded Joints", *NDT & E International*, 30(2):93-98.
- [51] Tsai, M.Y., Oplinger, D.W. ve Morton, J., (1998). "Improved Theoretical Solutions for Adhesive Lap Joints", *International Journal of Solids Structures*, 35(12):1163-1185.
- [52] Volkersen, O., (1938). "Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschnitten", *Luftfahrtforschung*, 15:41-47.
- [53] Goland, M. ve Reissner, E., (1944). "The Stresses in Cemented Joints", *Journal of Applied Mechanics*, 11:A17-A27.
- [54] Sawa, T. ve Uchida, H., (1997). "A Two Dimensional Stress Analysis and Strength Evaluation of Hand Adhesive Butt Joints Subjected to Tensile Loads", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 11:811-833.
- [55] Ciba, (1999). *Ciba User's Guide to Adhesive, Surface Preparation and Pretreatment*, Ciba Specialty Chemicals, İsviçre.
- [56] Her, S.C., (1999). "Stress Analysis of Adhesively-Bonded Lap Joints", *Composite Structures*, 47:673-678.
- [57] Bermejo, S.J.C., (2009). "Tearing/Debonding as a Test for Characterization of Cohesive Laws in Adhesives", 3rd International Conference on Advanced

- Computational Engineering and Experimenting, 22-23 Haziran 2009, Roma, İtalya.
- [58] Khalili, M.R. ve Tavakolian, M., (2009). "Mechanical Properties of Nanoclay Reinforced Epoxy Adhesive in Bonded Joint for Composite Material", 3rd International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, 22-23 Haziran 2009, Roma, İtalya.
- [59] Chen, B. ve Tong, L., (2009). "Optimum Configuration of Adhesively Bonded Thick Adherend Lap Shear Specimen", 3rd International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, 22-23 Haziran 2009, Roma, İtalya.
- [60] Castagnetti, D., Spaggiari, A. ve Dragoni, E., (2009). "Robust Shape Optimization of the Tubular Butt Joint for Characterizing Thin Adhesive Layers under Uniform Direct and Shear Stresses", 3rd International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, 22-23 Haziran 2009, Roma, İtalya.
- [61] Liu, J. ve Sawa, T., (2000). "Stress Analysis and Strength Evaluation of Single Lap Band Adhesive of Dissimilar Adherends Subjected to External Bending Moment", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14:67-92.
- [62] Lee, S.J. ve Lee, D.G., (1996). "Development of Fatigue Failure Modal For The Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint Under Dynamic Torsional Loading", *Journal of Adhesion*, 56:157-169.
- [63] Ichikawa, K., Shin, Y. ve Sawa, T., (2009). "A Three- Dimensional Finite Element Stress Analysis and Strength Prediction of Stepped-Lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherends Subjected to Bending Moments", 3rd International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, 22-23 Haziran 2009, Roma, İtalya.
- [64] Magalhaes, A.G., de Moura, M.F.S.F. ve Gonçalves, J.P.M., (2005). "Evaluation of Stress Concentration Effects in Single-Lap Bonded Joints of Laminate Composite Materials", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25:313-319.
- [65] Kim, K.S. Yi, Y.M., Cho, G.R. ve Kim, C.G., (2007). "Failure Prediction and Strength Improvement of Uni-Directional Composite Single Lap Bonded Joints", *Composite Structures*, 82(4):513-520.
- [66] Fessel, G., Broughton, J.G., Fellows, N.A., Durodola, J.F. ve Hutchinson, A.R., (2006). "Evaluation of Different Lap-Shear Joint Geometries for Automotive Applications", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27:574-583.
- [67] Kwon, H. ve Kim, H., (2006). "Buckling and Debond Growth of Partial Debonds in Adhesively Bonded Composite Splice Joints.", *Composite Structures*, 79(4):590-598.
- [68] Goglio, L. ve Rossetto, M., (2009). "Stress Intensity Factor in Bonded Joints: Influence of the Geometry", 3rd International Conference on Advanced

- Computational Engineering and Experimenting, 22-23 Haziran 2009, Roma, İtalya.
- [69] You, M., Yan, Z.M., Zheng, X.L., Yu, H.Z. ve Li, Z., (2007). "A Numerical and Experimental Study of Gap Length on Adhesively Bonded Aluminum Double-Lap Joint", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27:696-702.
- [70] Banea, M.D. ve da Silva L.F.M., (2009). "Adhesively Bonded Joints in Composite Materials: An Overview", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 223:1-18.
- [71] Panigrahi, S.K. ve Pradhan, B., (2009). "Through the Width Delamination Damage Propagation Characteristics in Single Lap Laminated FRP Composite Joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29:114-124.
- [72] Fitton, M.D. ve Broughton, J.G., (2005). "Variable Modulus Adhesives: An Approach to Optimised Joint Performance", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25:329-336.
- [73] da Silva, L.F.M. ve Lopes, M.J.C.Q., (2009). "Joint Strength Optimization by the Mixed-Adhesive Technique", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29:509-514.
- [74] Srinivas, S., (1975). "NASA Technical Note", NASA TND-7855.
- [75] Patrick, R.L., (1976). *Treatise on Adhesion and Adhesives Structural Adhesives with Emphasis on Aerospace Applications*, Marcel Dekker Inc., New York.
- [76] Pires, I., Quintino, L., Durodola, J.F. ve Beevers, A., (2003). "Performance of Bi-Adhesive Bonded Aluminium Lap Joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23:215-223.
- [77] Temiz, S., (2006). "Application of Bi-Adhesive in Double-Strap Joints Subjected to Bending Moment", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20:1547-1560.
- [78] Bouiadjra, B.B., Fekirini, H., Belhouari, M., Boutabout, B. ve Serier, B., (2007). "Fracture Energy for Repaired Cracks with Bonded Composite Patch having Two Adhesive Bands in Aircraft Structures", *Computational Materials Science*, 40:20-26.
- [79] da Silva, L.F.M. ve Adams, R.D., (2007). "Adhesive Joints at High and Low Temperatures using Similar and Dissimilar Adherends and Dual Adhesives", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27:216-226.
- [80] Marques, E.A.S. ve da Silva, L.F.M., (2008). "Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches", *Journal of Adhesion*, 84:917-936.
- [81] da Silva, L.F.M. ve Lopes, M.J.C.Q., (2009). "Joint Strength Optimization by the Mixed-Adhesive Technique", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29:509-514.

- [82] Marques, E.A.S., Magalhães, D.N.M. ve da Silva, L.F.M., (2011). "Experimental Study of Silicone-Epoxy Dual Adhesive Joints for High Temperature Aerospace Applications", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 42:471-477.
- [83] Carbas, R.J.C., Marques, E.A.S., da Silva, L.F.M. ve Lopes, A.M., (2014). "Effect of Cure Temperature on the Glass Transition Temperature and Mechanical Properties of epoxy Adhesives", *The Journal of Adhesion*, 90(1):104-119.
- [84] Carbas, R.J.C., da Silva, L.F.M., Marques, E.A.S. ve Lopes, A.M., (2013). "Effect of Post-Cure on the glass Transition Temperature and Mechanical Properties Epoxy Adhesives", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(23):2542-2557.
- [85] Carbas, R.J.C., da Silva, L.F.M., Madureira M.L. ve Critchlow G.W., (2014). "Modelling of Functionally Graded Adhesive Joints", *The Journal of Adhesion*, 90(8):698-716.
- [86] Ganesh, V.K. ve Choo, T.S., (2002). "Modulus Graded Composite Adherends for Single-Lap Bonded Joints", *Journal of Composite Materials*, 36:1757-1767.
- [87] Boss, J.N., Ganesh, V.K. ve Lim, C.T., (2003). "Modulus Grading Versus Geometrical Grading of Composite Adherends in Single-Lap Bonded Joints", *Composite Structure*, 62:113-121.
- [88] Chandran, K.S.R. ve Barasom, I., (2003). "Determination of Stress Intensity Factor Solutions for Cracks in Finite-Width Functionally Graded Materials", *International Journal of Fracture*, 121:183-203.
- [89] Erdogan, F. ve Wu, B.H., (1997). "The Surface Crack Problem for a Plate with Functionally Graded Properties", *Journal of Applied Mechanics*, 64:449-456.
- [90] Shim, D.J., Paulino, G.H. ve Dodds, R.H., (2006). "Effects of Material Gradation on K-Dominance of Fracture Specimens", *Engineering Fracture Mechanics*, 73:643-648.
- [91] Nimje, S.V. ve Panigrahi, S.K., (2014). "Numerical Simulation for Stress and Failure of Functionally Graded Adhesively Bonded Tee Joint of Laminated FRP Composite Plates", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 48:139-149.
- [92] Stapleton, S.E., Waas, A.M. ve Arnold, S.M., (2012). "Functionally Graded Adhesives for Composite Joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 35:36-49.
- [93] Tsouvalis, N.G. ve Garganidis, G.S., (2011). "Buckling Strength Parametric Study of Composite Laminated Plates with Delaminations", *Ships and Offshore Structures*, 6:93-104.
- [94] de Moura, M.F.S.F., Gonçalves, J.P.M., Marques, A.T. ve de Castro, P.M.S.T., (2000). "Prediction of Compressive Strength of Carbon-Epoxy Laminates Containing Delamination by Using a Mixed-Mode Damage Model", *Composite Structures*, 50:151-157.

- [95] Gonçalves, J.P.M., de Moura, M.F.S.F., de Castro, P.M.S.T. ve Marques, A.T., (2000). "Interface Element Including Point-to-Surface Constraints for Three-Dimensional Problems with Damage Propagation", *Engineering Computations*, 17:28-47.
- [96] de Moura, M.F.S.F., Gonçalves, J.P.M., Marques, A.T. ve de Castro, P.M.S.T., (1997). "Modeling Compression Failure after Low Velocity Impact on Laminated Composites Using Interface Elements", *Journal of Composite Materials*, 31:1462-1479.
- [97] Hwang, S.F. ve Liu, G.H., (2001). "Buckling Behavior of Composite Laminates with Multiple Delaminations under Uniaxial Compression", *Composite Structures*, 53:235-243.
- [98] Kyoung, W.M., Kim, C.G. ve Hong, C.S., (1999). "Buckling and Postbuckling Behavior of Composite Cross-Ply Laminates with Multiple Delaminations", *Composite Structures*, 43:257-274.
- [99] Kim, H. ve Kedward, K.T., (1999), "A Method for Modeling the Local and Global Buckling of Delaminated Composite Plates", *Composite Structures*, 44:43-53.
- [100] Chirica, I., Beznea, E.F., Chirica, R., Boazu, D. ve Chirica, A., (2007). "Buckling Behaviour of the Delaminated Ship Hull Panels", 12th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, 2-6 Eylül 2007, Varna, Bulgaria.
- [101] Butcher, R.J., Rousseau, C.E. ve Tippur, H.V., (1999). "A Functionally Graded Particulate Composite: Preparation, Measurements and Failure Analysis", *Acta Materialia*, 47(1):269-268.
- [102] Reddy, J.N., (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*, Second Edition, CRC Press LLC, Boca Raton.
- [103] Alla, M.N., (2003). "Reduction of Thermal Stresses by Developing Two-Dimensional Functionally Graded Materials", *International Journal of Solids and Structures*, 40(26):7339-7356.
- [104] Zhong, Z., Shang, E.T., (2003). "Three Dimensional Exact Analysis of a Simply Supported Functionally Gradient Piezoelectric Plate", *International Journal of Solids and Structures*, 40(20):5335-5352.
- [105] Vel, S.S. ve Batra, R.C., (2003). "Three-Dimensional Analysis of Transient Thermal Stresses in Functionally Graded Plates", *International Journal of Solids and Structures*, 40(25):7181-7196.
- [106] Ahmed, S. ve Jones, F.R., (1990). "A Review of Particulate Reinforcement Therories for Polymer Composites", *Journal of Materials Science*, 25(12):4933-4942.
- [107] Brown, G.M. ve Ellyin, F., (2005). "Assessing the Predictive Capability of Two-Phase Models for the Mechanical Behaviour of Alumina/Epoxy Nanocomposite", *Journal of Applied Polymer Science*, 98(2):869-879.

- [108] Halpin, J.C. ve Kardos, J.L., (1976). "The Halpin-Tsai Equations: A Review", *Polymer Engineering & Science*, 16(5):344-352.
- [109] Tucker, C., Charles, L. ve Liang, E., (1999). "Stiffness Predictions for Unidirectional Short-Fiber Composites: Review and Evaluation", *Composite Science and Technology*, 59:655-671.
- [110] Fornes, T.D. ve Paul, D.R., (2003). "Modeling Properties of Nylon 6/Clay Nanocomposites Using Composite Theories", *Polymer*, 44:4993-5013.
- [111] Nielsen, L.E. ve Landel, R.F., (1994). *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. Marcel Dekker Inc., New York.
- [112] Wu, Y., Jia, Q., Yu, D. ve Zhang, L., (2004). "Modelling Young's Modulus of Rubber-Clay Nanocomposite using Composite Theories", *Polymer Testing*, 23:903-909.
- [113] Lee, N.J., Jang, J., Park, M. ve Choe, C.R., (1997). "Characterization of Functionally Gradient Epoxy/Carbon Fibre Composite Prepared under Centrifugal Force", *Journal of Materials Science*, 32:2013-2020.
- [114] Choe, R.C., Klingshirn, C., ve Friedrich, K., (2002). "Functionally Graded Polymer Composite Simulation of Fiber Distribution", *Macromolecular Research*, 10(4):236-239.
- [115] Doerner, M.F. ve Nix, W.D., (1986). "A Method for Interpreting the Data from Dept-Sensing Indentation Instruments", *Journal of Material Research*, 1(4):601-609.
- [116] Oliver, W.C. ve Pharr, G.M., (1992). "An Improvement Techique for Determining Hardness and Elastic Modulus using Load and Displacement Sensing Intentation Experiments", *Journal of Material Research*, 7(6):1564-1583.
- [117] Bafekrpour, E., Simon, G.P., Habsuda, J., Naebe, M., Yang, C. ve Fox, B., (2012). "Fabrication and Characterization of Functionally Graded Synthetic Graphite/Phenolic Nanocomposites", *Materials Science and Engineering: A*, 545:123-131.
- [118] Tsotra, P. ve Friedrich, K., (2004). " Short Carbon Fibers Reinforced Epoxy Resin/Polyaniline Blends Their Electrical and Mechanical Properties.", *Composite Science and Technology* 64:2385-2391.
- [119] Uslu, M., (2010). *Polymeric Matrix Composite Materials Reinforced by Graphite*, Yüksek Lisans Tezi, Silesian University of Technology, Polonya.
- [120] Uslu, M. ve Kremzer, M., (2011). "Characteristics of Graphite Distributions in Polymeric Functionally Gradient Materials FGMs Manufactured by the Centrifugal Casting Method", *International Journal of Arts and Science*, 4(2):1-9.
- [121] Stabik, J., Szczepanik, M., Dybowska, A. ve Suchon, Ł., (2010). "Electrical Properties of Polymeric Gradient Materials Based on Epoxy Resin Filled with

- Hard Coal”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 38:53-56.
- [122] Stabik, J., Dybowska, A. ve Chomiak, M., (2010). “Polymer Composites Filled with Powders as Polymer Graded Materials”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 43:153-161.
- [123] KOH-I-NOOR, Safety Data Sheets of Graphite, Czech Republic.
- [124] Szczepanik, M., Stabik, J., Łazarczyk, M. ve Dybowska, A., (2009). “Influence of Graphite on Electrical Properties of Polymeric Composites”, Archives of Materials Science and Engineering, 37:37-44.
- [125] Stabik, J., Dybowska, A., Pluszynski, J., Szczepanik, M. ve Suchon, Ł., (2010). “Magnetic Induction of Polymer Composites Filled with Ferrite Powders”, Archives of Materials Science and Engineering, 41:13-20.
- [126] Stabik, J., Chomiak, M., Dybowska, A., Suchon, Ł. ve Mrowiec, K., (2012). “Chosen Manufacture Methods of Polymeric Graded Materials with Electrical and Magnetic Properties Gradation”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 54:218-226.
- [127] Stabik, J. ve Chomiak, M., (2013). “Wear Resistance of Epoxy-Hard Coal Composites”, Archives of Materials Science and Engineering, 64:168-174.
- [128] Laufs, W. ve Luible, A., (2003). Introduction on Use of Glass in Modern Buildings, Rapport ICOM 462, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).
- [129] Maniatis, I., (2006). Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-Plane Loads, Doktora Tezi, Münih Teknik Üniversitesi, Münih, Almanya.
- [130] Blandini, L., (2005). Structural Use of Adhesives in Glass Shells, Doktora Tezi, Stuttgart Üniversitesi, Stuttgart, Almanya.
- [131] Wellershoff, F. ve Sedlacek, G., (2005). "Glued Connections for New Steel Glass Structures", Proceedings of Glass Processing Days, Haziran 2005, Tampere, Finland.
- [132] Weller, B. ve Thomas, S., (2007). "Designing of Bonded Joints in Glass Structures", Proceedings of Glass Processing Days, Kasım 2007, Tampere, Finland.
- [133] Loctite, (2008). Loctite Epoxy Catalogue, Technical Data Sheet Hysol Products, CT, USA.
- [134] ANSYS, General Purpose Finite Element Software (Version 13.0).
- [135] Jiang, X., Kolstein, M.H. ve Bijlaard, F.S.K., (2014). "Experimental and Numerical Study on Mechanical Behavior of an Adhesively-Bonded Joint of FRP-Steel Composite Bridge under Shear Loading", Composite Structure, 108:387-399.

- [136] Amadio, C. ve Bedon, C., (2013). "An Equivalent Thickness for Buckling Verification of Laminated Glass Panels under In-Plane Shear Loads", *Journal of Civil Engineering Science*, 2:108-123.
- [137] Kuenzi, E.W., Ericksen, W.S. ve Zahn, J.J., (1975). *Shear Stability of Flat Panels of Sandwich Construction*, Armed Services Technical Information Agency, Virginia, USA.
- [138] Tony, L. ve Steven, G.P., (1999). *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*, Kluwe Academic Publishers, USA.
- [139] Pradhan, B. ve Panda, S.K., (2006). "Effect of Material Anisotropy and Curing Stresses on Interface Delamination Propagation Characteristics in Multiply Laminated FRP Composites", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 128:383-392.
- [140] Alinia, M.M., (2008). "A Study into Optimization of Stiffeners in Plates Subjected to Shear Loading", *Thin Walled Structure*, 43:845-860.
- [141] Lanczos, C., (1950). "An Iteration Method for The Solution of The Eigenvalue Problem of Linear Differential and Integral Perators ", *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 45:255-282.
- [142] Kim, H. ve Kedward, T., (2001). "Stress Analysis of Adhesively-bonded Joints Under In-plane Shear Loading", *Journal of Adhesion*, 76(1):1-36.
- [143] Tsouvalis, N.G., ve Garganidis, G.S., (2011). "Buckling Strength Parametric Study of Composite Laminated Plates with Delaminations", *Ships Offshore Structure*, 6:93-104.
- [144] Tomblin, J., Seneviratne, W., Kim, H. ve Lee, J., (2003). "Characterization of In-Plane, Shear-Loaded Adhesive Lap Joints: Experiments and Analysis", U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Office of Aviation Research, 22-25.
- [145] Hua, Y., Gu, L. ve Michael T., (2012). "Three-Dimensional Modeling of Carbon/Epoxy to Titanium Single-Lap Joints with Variable Adhesive Recess Length", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 38:25-30.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mine USLU UYSAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 2 Ocak 1983/ Eskişehir
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mineuslu@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Pamukkale Üniversitesi	2010
Lisans	Makine Mühendisliği	Pamukkale Üniversitesi	2005
Lise	Fen Bilimleri	Yunus Emre Lisesi	2001

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2009-Devam Ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

Uluslararası Hakemli dergilerde yayımlanan SCI, SCI Expanded kapsamındaki makaleler

1. **Uslu Uysal M.**, Güven U., Bonded Plate Having Orthotropic Inclusion in Adhesive Layer under in Plane Shear Loading, The Journal of Adhesion, 2015. (Baskıda, Doktora tezinden üretilmiştir,)
2. **Uslu Uysal M.**, Güven U., Buckling of Functional Graded Polymeric Sandwich Panel under Different Load Cases, Composite Structures, Vol.121, pp.182-196, 2015. (Doktora tezinden üretilmiştir)
3. **Uslu M.**, Kremzer M., Buckling Behaviour of Short Cylindrical Functionally Gradient Polymeric Materials. Acta Physica Polonica A, 2015. (Baskıda)
4. Canyurt O.E., Meran C., **Uslu M.**, Strength Estimation of Adhesively Bonded Tongue and Groove Joint of Thick Composite Materials Using Genetic Algorithm Approach. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol 30(5), pp.281-287, 2010.

Diğer Uluslararası Hakemli Dergilerde yayımlanan makaleler

1. **Uslu M.** Numerical Modeling of Functional Graded TiB coating in Nanoindentation on Determination of Mechanical Properties. Materials Today Proceedings, 2015. (Baskıda)
2. **Uslu Uysal M.** Investigation of Thermal and Mechanical Loading on Functional Graded Material Plates. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, Vol. 7(11), pp.1219-1225, 2013.
3. **Uslu M.** Finite Element Analysis of Stresses on Substrates Coated with Single-Layered and Multi-Layered. Academic Journal of Science, Vol. 1(3), pp.1-6, 2012.
4. Canyurt O.E., Meran C., **Uslu M.**, The Effect of Design on Adhesive Joints of Thick Composite Sandwich Structures, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 31(2), pp. 301-305, 2008.

Bildiri

1. **Uslu Uysal M.**, Güven U., Buckling Behaviours of Functionally Graded Polymeric Thin-Walled Hemispherical Shells. International Conference on Advances in Composite Materials and Structures. 13-15 Nisan 2015, İstanbul. (Bildiri özeti)
2. **Uslu, M.**, Finite Element Analysis of Adhesively Bonded Tongue and Groove Geometry of Thick Composite Structures. MMMse 2011, Vol. 3, pp. 166-170, 19-22 Temmuz 2011, Orlando, Florida, USA.
3. **Uslu M.**, Kremzer M., Characteristics of Graphite Distributions in Polymeric Functionally Gradient Materials FGMs Manufactured by the Centrifugal Casting Method, Conference of International Journal of Arts & Sciences, pp.1-9, Kasım, 2010, Gottenheim Germany.

Proje

1. “Kırılma ve çatlak ilerleme analiz sistemi (Fcpas) Aşama 1”, TÜBİTAK 108M283 numaralı proje, 01/02/2011-01/07/2011, Araştırmacı.
2. “Statik ve Dinamik yüklemeye maruz kalın kompozit laminalarda dil ve oluk birleştirme tekniği ile yapıştırma, parametrelerin incelenmesi ve genetik algoritma yöntemi ile optimum tasarım parametrelerinin bulunması.”, TÜBİTAK 106E214 numaralı proje, 01/10/2007-01/10/2009, Araştırmacı.
3. “Nano Grafen ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Katkılı Epoksi Bazlı Yapıştırıcıların Geliştirilmesi ve Kesici Takımlarda Kullanılması”, YTÜ Genç Araştırmacıları Destek Projesi (GEP), 01/05/2015, Araştırmacı, (Önerilmiştir, değerlendirme aşamasında).