KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DELİNMİŞ VE DELİKLİ İMAL EDİLMİŞ GFRP PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ

MUHAMMED FATİH ÖZTÜRK

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DELİNMİŞ VE DELİKLİ İMAL EDİLMİŞ GFRP PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ

MUHAMMED FATİH ÖZTÜRK

Doç.Dr. Abdulkadir CENGİZ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof.Dr. Mehmet UÇAR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Doç.Dr. Hüseyin Kürşat ÇELİK
Jüri Üyesi, Akdeniz Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında. kompozit malzemelerde şekil bağlı birleştirmelerin gerekli olduğu alanlarda malzeme üzerine konvansiyonel delik açma yöntemleriyle fiber sürekliliği bozularak delik açmak yerine malzemeyi en başında fiber sürekliliği sağlanarak delikli şekilde imal etmenin malzeme üzerindeki etkileri deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir.

Öncelikle tez konumun seçilmesine katkıda bulunan ve her aşamasında benden yardımını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Abdulkadir CENGİZ hocama, kompozit malzemelerin temin edilmesi ve yapımında her türlü desteği veren Yonca Onuk J.V firması çalışanlarına, kompozit malzeme hazırlanmasında ve testinde verdiği desteklerden dolayı değerli arkadaşım Ahmet SABAH'a ve bütün hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz - 2019 Muhammed Fatih ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ 3
2. MATERYAL VE YÖNTEM 8
2.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler 8
2.2. Deney Planı 9
2.3. El Yatırması Yöntemiyle Malzeme Üretilmesi 10
2.4. Dört Nokta Eğme Deneyi 20
2.4.1. Dört nokta eğme testi numuneleri için eğilme gerilmesi ve şekil değiştirme miktarı hesabı 21
2.4.2. Dört nokta eğme testi için saf sehim değeri hesabı 22
2.5. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) 25
2.5.1. Geometrik model oluşturma 25
2.5.2. Malzeme modeli oluşturma 36
2.5.3. Sonlu elemanlar ağ örgüsü oluşturma 38
2.5.4. Yükleme ve sınır koşullarının oluşturulması 41
2.5.5. Çözüm ve sonuçlar 45
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 47
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 68
KAYNAKLAR 70
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 74
ÖZGEÇMİŞ 75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kompozit malzeme oluşumu 3
Şekil 1.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesiyle oluşan delaminasyon bölgeleri 4
Şekil 1.3. Mekanik bağlantılarda görülen hasar tipleri 5
Şekil 2.1. Problem geometrisi 10
Şekil 2.2. Delikli ve deliksiz şekilde oluşturulmuş malzeme kalıpları 11
Şekil 2.3. Kalıp yüzeyinin temizlenmesi ve pimlerin kalıba yerleştirilmesi 11
Şekil 2.4. Cam elyaf demetlerinin delikli hazırlanmış kalıp üzerine yerleştirilmesi 12
Şekil 2.5. Reçine - jelkot karışımının cam elyaf demetleri üzerine uygulanması 12
Şekil 2.6. Uygulanan jelkot karışımındaki kabarıklıkların rulo ile giderilmesi 13
Şekil 2.7. Delikli üretilmiş kompozit malzemenin katmanlarının tamamlanmış hali 13
Şekil 2.8. Deliksiz şekilde üretilmiş malzemenin katmanlarının tamamlanmış hali 14
Şekil 2.9. Kalıptan çıkarılmış delikli şekilde üretilmiş kompozit plaka 14
Şekil 2.10. Kalıptan çıkarılmış deliksiz şekilde üretilmiş kompozit plaka 15
Şekil 2.11. Reçine ve katkı maddeleri karışımının hazırlanması 16
Şekil 2.12. Geleneksel delik delme prosesi 17
Şekil 2.13. Delikli imal edilmiş (PX) ve delinmiş (DX) ve deliksiz (Normal) kesilmiş numune örnekleri 18
Şekil 2.14. Delikli (PX) numuneler 19
Şekil 2.15. Delinmiş (DX) numuneler 19
Şekil 2.16. Dört nokta eğme testi konfigürasyonu 20
Şekil 2.17. Dört nokta eğme testi numune parçaları için belirlenmiş mesnetler arası mesafeler 20
Şekil 2.18. Dört nokta eğme testi saf sehim değeri hesabı 22
Şekil 2.19. Dört nokta eğme test cihazı 23
Şekil 2.20. Dört nokta eğme test cihazında malzemelerin test edilmesi 24
Şekil 2.21. Sonlu elemanlar metodu adımları 25
Şekil 2.22. Çap 5 mm için oluşturulan kompozit malzeme yüzey modeli 26
Şekil 2.23. Çap 8 mm için oluşturulan kompozit malzeme yüzey modeli 26
Şekil 2.24. Kumaş ayarları menüsü 27
Şekil 2.25. Rozet ayarları menüsü 28
Şekil 2.26. Yönlendirilmiş seçim kümesi ayarlarının yapılması 28
Şekil 2.27. Modelleme grubu ayarları yapılması 29
Şekil 2.28. Kompozit plaka katı model ayarlarının yapılması 30
Şekil 2.29. Kompozit plaka katı modeli 30
Şekil 2.30. Mesnetlerin geometrik modelinin oluşturulması 31
Şekil 2.31. Çap 8 mm için elyaf yığıntısı yüzey modelinin oluşturulması 32
Şekil 2.32. Çap 5 mm için elyaf yığıntısı yüzey modelinin oluşturulması 32
Şekil 2.33. Elyaf yığıntısı kumaş ayarlarının yapılması 33

Şekil 2.34. Elyaf yığıntısı rozet ayarlarının yapılması 34
Şekil 2.35. Elyaf yığıntısı yönlendirilmiş seçim kümeleri ayarlarının yapılması 34
Şekil 2.36. Elyaf yığıntısı modelleme grubu ayarlarının yapılması 35
Şekil 2.37. Elyaf yığıntısı katı model ayarlarının yapılması 36
Şekil 2.38. Elyaf yığıntısı katı modeli 36
Şekil 2.39. Elasto-plastik (kompozit) malzeme modeli oluşturma aşamaları 37
Şekil 2.40. Çap 5 mm için kompozit plaka eleman boyutlandırılması 39
Şekil 2.41. Çap 8 mm için kompozit plaka eleman boyutlandırılması 39
Şekil 2.42. Mesnetler için eleman boyutlandırılması 40
Şekil 2.43. Elyaf yığıntısı için eleman boyutlandırılması 40
Şekil 2.44. Kompozit plaka ve mesnetler arasındaki temas yüzeyi seçimleri 42
Şekil 2.45. Elyaf yığıntısı modeli ile kompozit plaka arasındaki temas yüzeyleri seçimi 42
Şekil 2.46. Alt mesnetlerin sabit destek olarak tanımlanması 43
Şekil 2.47. Standart yer çekimi tanımlaması 43
Şekil 2.48. Üst mesnetler için yer değiştirme ayarlarının yapılması 44
Şekil 2.49. Kompozit plaka için yer değiştirme ayarlarının yapılması 45
Şekil 2.50. Delinmiş numuneler için proje şeması 46
Şekil 2.51. Delikli numuneler için proje şeması 46
Şekil 3.1. Delinmiş numuneler (D5) için hasar oluşumları 47
Şekil 3.2. Delinmiş numuneler (D8) için hasar oluşumları 48
Şekil 3.3. Delikli imal edilmiş numuneler (P5) için hasar oluşumları 49
Şekil 3.4. Delikli imal edilmiş numuneler (P8) için hasar oluşumları 50
Şekil 3.5. Delikli imal edilmiş kalıplarda oluşan elyaf yığıntısı 51
Şekil 3.6. Delinmiş (D5) numunelere ait deneysel gerilme - gerinme grafikleri 53
Şekil 3.7. Delikli imal edilmiş (P5) numunelere ait deneysel gerilme - gerinme grafikleri 53
Şekil 3.8. Delinmiş (D8) numunelere ait deneysel gerilme - gerinme grafikleri 54
Şekil 3.9. Delikli imal edilmiş (P8) numunelere ait deneysel gerilme - gerinme grafikleri 54
Şekil 3.10. Delinmiş (D5) numunelere ait yük - sehim grafikleri 55
Şekil 3.11. Delikli imal edilmiş (P5) numunelere ait yük - sehim grafikleri 55
Şekil 3.12. Delinmiş (D8) numunelere ait yük - sehim grafikleri 56
Şekil 3.13. Delikli imal edilmiş (P8) numunelere ait yük - sehim grafikleri 56
Şekil 3.14. Delinmiş numunelerin (D5) FEM gerilme analizi sonuçları 57
Şekil 3.15. Delinmiş numunelerin (D5) FEM gerinme analizi sonuçları 58
Şekil 3.16. Delinmiş numunelerin (D8) FEM gerilme analizi sonuçları 59
Şekil 3.17. Delinmiş numunelerin (D8) FEM gerinme analizi sonuçları 60
Şekil 3.18. Delikli imal edilmiş numunelerin (P5) FEM gerilme analizi sonuçları 61
Şekil 3.19. Delikli imal edilmiş numunelerin (P5) FEM gerinme analizi sonuçları 62
Şekil 3.20. Delikli imal edilmiş numunelerin (P8) FEM gerilme analizi sonuçları 63

Şekil 3.21. Delikli imal edilmiş numunelerin (P8) FEM gerinme analizi sonuçları 64
Şekil 3.22. Delinmiş numunelerin (D5) FEM gerilme - gerinme grafikleri..... 65
Şekil 3.23 Delinmiş numuneler in (D8) FEM gerilme - gerinme grafikleri..... 65
Şekil 3.24. Delikli imal edilmiş numunelerin (P5) FEM gerilme - gerinme grafikleri 66
Şekil 3.25. Delikli imal edilmiş numunelerin (P8) FEM gerilme - gerinme grafikleri 66
Şekil 3.26. Deneysel ve FEM maksimum gerilme değerlerinin grafiksel karşılaştırılması 67

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Hazırlanan kompozit malzemenin mekanik özellikleri..... 9
Tablo 2.2. Deneyde kullanılan matris ve fiber malzemelerin mekanik özellikleri..... 9
Tablo 2.3. Deney planı..... 10
Tablo 2.4. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan ağ örgüsü..... 38
Tablo 3.1. Deneysel ve FEM hesaplanan max gerilme değerleri..... 67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ε	: Birim şekil değiştirme (Gerinme)
σe	: Eğilme gerilmesi
°	: Derece
vk	: Kompozit malzeme poisson oranı
δ	: Sehim (Deplasman)
F	: Kırılma yükü
Fd	: Deleminasyon kuvveti
G_c	: Kompozit malzeme elastisite modülü
H	: Numune kalınlığı
L	: Mesnetler arası mesafe
Me	: Eğilme momenti
ρf	: Cam elyaf fiber yoğunluğu
ρ	: Matris malzeme yoğunluğu
Vf	: Kompozit malzeme fiber hacim oranı
W	: Kesit alanı atalet momenti
Wf	: Fiber malzeme ağırlığı
Wc	: Kompozit malzeme ağırlığı
w	: Numune genişliği

Kısaltmalar

ACP	: ANSYS Composite Prep/Post
D	: Drilled (Delinmiş)
dev.	: Devir
FEM	: Finite Elements Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Placa (Cam Elyaf Takviyeli Plaka)
Kg	: Kilogram
MEKP	: Metil Etil Keton Peroksit
m	: Metre
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
N	: Newton
P	: Perforated (Delikli)
S	: Simple (Numune)
s	: Saniye

DELİNMİŞ VE DELİKLİ İMAL EDİLMİŞ GFRP PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Kompozit malzemelerin şekil bağlı birleştirilmesi için malzeme üzerinde delikler açılması gerekebilmektedir. Kompozit gövdeye delik açılması nedeniyle fiberlerde süreksizlik ve fiber - matris malzemesinin yapısında bozulmalar (delaminasyon vb.) görülmektedir. Bu çalışmada cam elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanılarak malzemede geleneksel delik açma yöntemleri yerine malzemeyi delikli olarak üretmenin malzemenin mekanik yapısı üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir.

Yapılan literatür incelemeleri sonucu bu konuyla ilgili az sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. Sonlu elemanlar metoduyla delinmiş ve delikli üretilmiş cam elyaf takviyeli kompozit plakalar farklı delik çapları için modellenerek analiz edilmiştir. Bu analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasında yüzde 0,2-1,8 arasında yakınlık elde edilmiştir. Tüm bu sonuçlar ışığında malzemeyi delikli şekilde imal etmenin malzemenin mukavemet değerleri açısından delik çapına bağlı olarak yüzde 6-15 arasında artış gösterdiği görülmüştür. Delikli mekanik bağlantı gerektiren alanlarda bu yöntemin kullanılmasının malzemenin kullanım ömrü açısından avantaj sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ansys Composite Pre/Post, Cam Elyaf Takviyeli Kompozit, Dört Nokta Eğme Testi, Geçici Yapısal (Dinamik) Analiz, Sonlu Elemanlar Metodu.

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIORS OF GFRP PLATES WITH DRILLED AND PERFORATED MANUFACTURED BY MEANS OF EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

Holes on the mechanical parts may need to be placed in order to form a composite bond. Discontinuity in the fibers and deterioration in the structure of the fiber mal matrix material (delamination, etc.) can be seen due to hole punching in the composite body. In this study, the effects of the production of perforated material on the mechanical structure of the material instead of conventional hole punching methods by using glass fiber reinforced composite material are calculated and experimentally examined.

As a result of the literature review, it seen that limited number of studies have been conducted on this subject.The glass fiber reinforced composite material modelled was analyzed through the finite element method for different hole diameters. The results of this analysis were compared with the experimental results. Between the experimental and numerical results 0,2-1,8 percent proximity was obtained. In light of all these results, it was seen that manufacturing of the material in a perforated manner increased 6-15 percent depending on the hole diameter in terms of strength of the material. It has been concluded that the use of this method in the areas requiring mechanical connection with holes is advantageous in terms of lifetime of the material.

Keywords: Ansys Composite Pre/Post, Glass Fiber Reinforced Composite, Four Point Bending Test, Transient Structural Analysis, Finite Elements Method.

GİRİŞ

Kompozit malzeme kısaca farklı özelliklerdeki malzemelerin daha üstün nitelikli bir malzeme oluşturmak amacıyla bir bağlayıcı kullanarak makro boyutta birleştirilmesi işlemidir [1-3].

Kompozit malzemeler genel olarak kendisini oluşturan malzemelerin en üstün özelliklerini gösterecek şekilde bir araya gelmişlerdir Kompozit malzemeler sağladıkları üstün özelliklerden dolayı (korozyon direnci, hafiflik , mukavemet artışı vb.) başta otomotiv, havacılık ve deniz sanayi olmak üzere diğer sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerden oluşan tasarımlarda kompozit malzemelerin tek parça halinde üretimi zor olduğu için genellikle parçalar halinde üretimi yapılmaktadır. Bu parçaların montajı için de değişik çözülebilir birleştirme elemanları kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerden imal edilen yapıların birleştirilmesinde pim perçin cıvata gibi bağlantı elemanlarıyla yapılan çözülebilir bağlantılar ekonomikliği, kolay uygulanabilirliği ve geniş uygulama alanlarına sahip olmalarından dolayı sıklıkla tercih edilmektedir [15-16,18,35].

Ancak bağlantı yapmak amacıyla kompozit malzeme üzerinde açılacak olan delikler gerilme yığılmalarına neden olmakta, malzemenin delik açılan bölgesindeki fiber matris malzemede kopmalar meydana getirmekte ve delinmenin etkisiyle malzemenin giriş ve çıkışında deleminasyon hasarları görülmektedir. Tüm bunlar malzemenin mukavemetinde azalma meydana getirmektedir. Gerilme yığılmasının olduğu bölgelerde çatlaklar oluşmaktadır. Yüklemenin de etkisiyle bu çatlaklar kenarlara doğru ilerleyerek en son malzemenin kopmasına sebep olmaktadır [8-11].

Kompozit malzemelerde delik açılarak şekil bağlı birleştirme yapılmak istendiğinde malzemeye dışardan konvansiyonel delik açma yöntemleri kullanılarak delik açmak yerine malzemeyi imal ederken en başından kalıp üzerinde delik oluşturarak üretmenin kompozit malzemenin mukavemeti üzerinde ne yönlü bir etki

göstereceğini incelemek tasarımların uygulanabilirliği üzerinde önemli bir konuyu oluşturmaktadır [32,33].

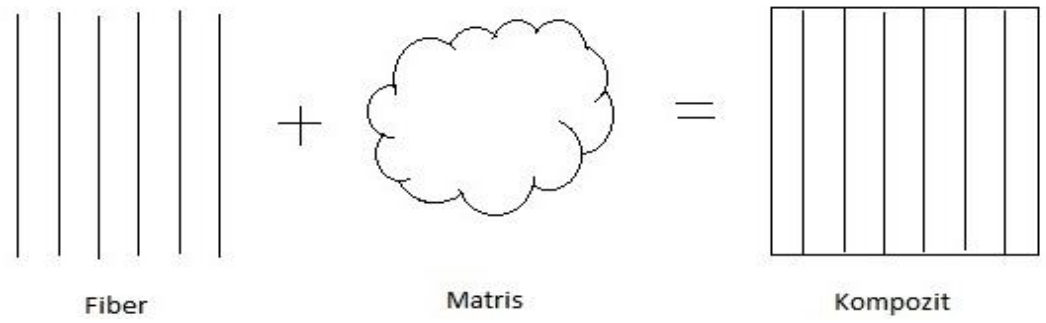
Otomotiv, havacılık ve deniz sektöründeki kullanılan taşıtlardaki yapıların çoğu farklı yüklere maruz kalmaktadırlar. Bu yapıların daha çok eğilme gerilmesine maruz kaldığı görülmektedir. Yapılar maruz kaldıkları eğilme yükleri etkisi altında zaman içinde tehlikeli hasarlara neden olabilmektedir [50].

Bu çalışmada ise fiber sürekliliği bozularak orta noktasına geleneksel delik açma yöntemleri kullanılarak 5 mm ve 8 mm çaplarında delikler açılarak delinmiş ve kompozit malzeme imal edilirken orta noktalarına fiber sürekliliği korunacak şekilde 5 mm ve 8 mm çaplarında pimler yerleştirilerek delikli imal edilmiş 8 katmanlı cam elyaf takviyeli epoksi reçine esaslı kompozit plakalar elde edilmiştir. Elde edilen kompozit plakaların eğilme dayanımları dört nokta eğme testine tabi tutularak deneysel olarak incelenmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar paket programı ANSYS Workbench kullanılarak delikli imal edilmiş ve delinerek hazırlanmış numuneler için, deneyin matematiksel modellemesi yapılmış ve analizi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen veriler kendi aralarında karşılaştırılmıştır [41-43].

1. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

Kompozit malzemeler matris ve fiber bileşenlerinden oluşur. Matris bileşeni kompozit yapıyı oluşturan malzemelerin bir arada tutulmasını sağlayan ve istenilen şekli kazandıran malzemedir. Takviye elemanının kompozit yapıyı oluşturan matris yapıya destek sağlamak kompozit malzeme üzerindeki yükü taşımak ve malzeme hacmini arttırma görevleri vardır. Takviye elemanı olarak sıklıkla elyaflar, kırpılmış lifler, viskerler, seramik ve metal partiküller, tabakalar kullanılabilmektedir [1-6,34].

Kompozit malzemeler Şekil 1.1 görüldüğü gibi temel olarak matris ve takviye bileşenlerinden oluşmaktadır [39].



Şekil 1.1. Kompozit malzeme oluşumu

Kompozit malzemeler üretim kısıtlıklarından dolayı çoğu zaman tek parça halinde üretilememektedir. Bu yüzden parçalar halinde üretilip mekanik birleştirme yöntemleri veya yapıştırma ile birleştirme yöntemleri kullanılarak istenen nihai yapı oluşturulmaktadır. Ekonomikliği ve uygulama kolaylığı gibi kriterlerden dolayı mekanik bağlantı yoluyla birleştirme yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Bu da malzeme üzerinde birleştirilme yapılabilmesi için delik olmasını gerektirmektedir [4-6].

Bağlantı yapmak amacıyla kompozit malzeme üzerinde açılacak olan delikler ise gerilme yığılmaları oluşturmakta ve delinme etkisiyle malzemenin giriş ve çıkış bölgelerinde Şekil 1.2'deki gibi delaminasyon hasarları oluşturmaktadır.

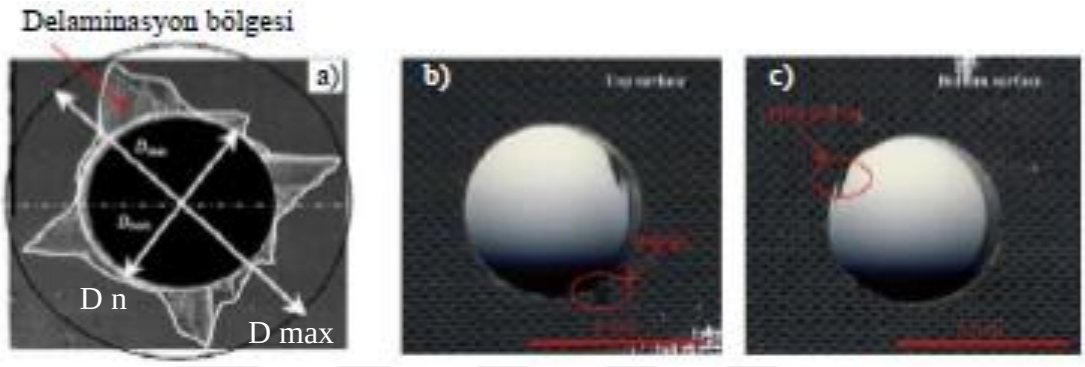
Elyaf takviyeli kompozitlerde delaminasyon hasarı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır [8].

$$Fd = D\,max/Dn \quad (1.1)$$

Fd: Deleminasyon faktörü

Dmax: Yüzeyde oluşan maksimum hasar çapı, mm

Dn: Matkap çapı, mm



Şekil 1.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesiyle oluşan delaminasyon bölgeleri a) Delaminasyonun oluşumu b) Delik girişindeki delaminasyon c) Delik çıkışındaki delaminasyon

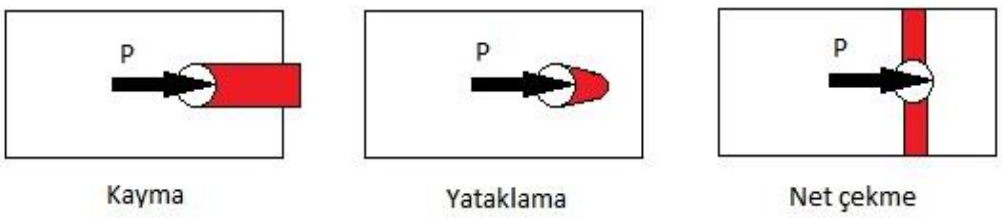
Çözülebilir bağlantı elemanları kullanılarak yapılan şekil bağlı birleştirmelerde sisteme uygulanan yük bağlantı elemanının üzerinden bağlantı parçalarına iletilmektedir [17].

Delinerek mukavemeti zayıflatılmış kompozit yapıda bağlantı elemanının delik yüzeyine yapacağı basınç ile birlikte malzemenin mukavemeti daha da olumsuz yönde etkilenecektir.

Mekanik bağlantılı kompozit yapılarda bağlantı elemanı etkisiyle üç tip hasar meydana gelmektedir. Bunlar Şekil 1.3'de görülebileceği üzere net çekme, kayma ve yataklama hasarlarıdır. Çekme hasarı aniden meydana gelen bir hasar tipidir. Bu hasar tipinde hasar parçanın genişliği boyunca yayıldığı için en tehlikeli hasar tipidir [13,14,46].

Kayma hasarı net çekme hasarına göre daha fazla yük taşımaya olanak sağlamasına rağmen yine de parça üzerinde istenmeyen bir hasar türüdür. Yatak hasarında ise ilk

hasardan sonra parça yükü taşımaya devam edebilmektedir. Yatak hasarında hasar tespiti ilk hasardan sonra yapılabilir ve bağlantı parçası değiştirilebilir. Bundan dolayı yataklama hasarı malzemede tercih edilen bir hasar türüdür [13,14].



Şekil 1.3. Mekanik bağlantılarda görülen hasar tipleri

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde araştırmaların çoğunda kompozit malzeme yüzeyi üzerinde delik açılmasına bağlı hasar oluşumları en aza indirmek için delik delme hızı optimizasyonu , kesim ucu açısı değiştirme, lif yönlendirme açısını değiştirme, farklı delik delme teknolojileri kullanma gibi yöntemler üzerinde çalışmalar yapıldığı görülmüştür [26-30,44,45].

Kompozit levhalarda dairesel delik etrafında oluşan gerilme yığılmalarıyla ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Lekhnitskii (1968), anizotropik plakalarda farklı yükleme ve sınır şartları için delik kenarlarında oluşan gerilme yığılmalarını incelemiştir [27].

Kaltakcı (1996), çekme ve basma yüklerine maruz kalmış dairesel delikli plakalarda gerilme yığılması analizleri yapmıştır. Gerilmenin fiber açısına bağlı olarak değiştiğini ve fiber yönünde çekme yükü uygulandığında gerilme yığılmalarının maksimum olduğunu, fiber açısı arttıkça gerilme yığılmalarının azaldığını göstermiştir [28].

Arslan ve ark.(2002), kare delikli kompozit levhalardaki gerilme yığılmalarını incelemişlerdir [29].

Özer ve Özbay (2004), sonlu elemanlar metoduyla düzlemsel yüklenmiş dairesel delikli kompozit plakalar için sonlu elemanlar yöntemi kullanarak elastik gerilme analizleri yapmıştır. Dairesel deliği bulunan plaka bir kenarı boyunca üniform

düzlemsel yüklemeye maruz bırakılmış ve deliğin kenarları boyunca herhangi bir yük uygulanmamıştır [30].

Karakılçık ve ark. (2016), tek eksenli gerilmeye maruz düzlemsel olarak yüklenmiş ve orta noktasında dairesel delik bulunan dört tabakalı grafit/epoksi kompozit levhalarda, delik kenarlarında oluşan gerilme yığılmalarını sonlu elemanlar analizi kullanarak incelemişlerdir ve literatür çalışmalarıyla kıyaslamışlardır. Fiber takviye açısının ve levha genişliğinin gerilme yığılmaları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Fiber takviye açısı ve levha genişliği/delik çapı oranı arttıkça gerilme yığılmasının da azaldığını görmüşlerdir [26].

Kaltakçı (1995), iki eksenli üniform yüklemede veya kesme etkisindeki dairesel delikli ortotrop yönlendirilmiş kompozit levhalarda dairesel delik kenarında oluşan gerilme dağılımlarını incelenmiştir. Ortotrop yönlendirilmiş plakada kompozit malzeme olarak cam-epoksi ve grafit-epoksi kullanılmıştır. Karşılaştırma yapmak için de izotrop yönlendirilmiş plakadaki sonuçlar elde edilmiştir. İki eksenli yükleme şartında, yüklemenin her ikisinin çekme veya basma olması haliyle, birisinin çekme diğerinin ise basma olması hali için sonuçlar elde edilmiştir [47].

Arslan ve ark. (2000), termoplastik matrisli, simetrik ve antisimetrik olarak farklı doğrultudaki açılarla takviye edilmiş plakalar için elasto-plastik gerilme analizini yapmışlardır [48].

Bunun dışında Arslan ve ark (2001), sonlu elemanlar metodu kullanılarak çelik fiberler ile takviye edilmiş termoplastik matrisli plakta elastik ve elasto-plastik gerilme analizi yapmışlardır [49].

Kompozit yapılarda ağırlık azalmak için veya birleştirme yapmak için farklı şekillerdeki kesikler gerekebilmektedir. Literatüre bakıldığında farklı kesikli şekillere sahip delikli kompozit plakalarda maksimum gerilme problemleriyle ilgili araştırmalar yapıldığı görülmüştür. Delikli kompozit levhalarda maksimum gerilme değerinde malzeme özelliklerinin uygun kombinasyonu lif oryantasyonun uygun seçimi yükleme açısının değiştirilmesi ve kesikli yapı oryantasyonunda değişiklik yapılarak iyileştirmeler sağlanabileceği anlaşılmıştır [36,37].

Blackburn (2009), akustik panellerde geleneksel delik delme yöntemleriyle çoklu deliklerin delinmesi yerine, lif sürekliliği sağlanarak oluşturulmuş kalıplama yaklaşımı üzerinde pregpeg ve reçine infüzyon tekniği kullanılmasıyla ilgili ön ağırlık ve maliyet analizleri yapmıştır. Daha çok araştırma ve doğru uygulama seçimi ile bu yeni yaklaşımın faydalı olabileceği sonucuna varmıştır [38].

Rathnakar ve Shivanan (2013), fiber takviyeli kompozitlerin eğilme yükü altındaki dayanım ve rijitliğini deneysel olarak incelemişlerdir [50].

Sudhir ve ark. (2015), üç farklı matris oranına sahip E-cam fiber takviyeli kompozitlere çekme, basma ve eğilme deneyi uygulayarak elde ettikleri verileri nümerik sonuçlar ile karşılaştırmışlardır [51].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde bu tez kapsamında kullanılan malzemeler, kullanılan test düzeneği ve sonlu elemanlar metodu uygulaması hakkında bilgiler verilmiştir.

2.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada takviye elemanı olarak cam elyaf kullanılarak reçine esaslı kompozit plakalar elde edilmiştir.

Cam elyaf fiberin yoğunluğu ρf = 2580 kg/m^3 ve matris malzemenin yoğunluğu da ρm = 1140 kg/m^3 olduğu bilindiği için kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı Vf, aşağıdaki formülden hesaplanmıştır [31,40].

$$Vf = (Wf / \rho f) / (Wc / \rho c) \quad (2.1)$$

Wf ve Wc sırası ile fiber ve kompozit malzemenin ağırlıklarıdır. ρf ve ρc ise sırası ile fiber ve kompozitin yoğunluklarıdır. Bu çalışmada kullanılan kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı $Vf = 0{,}72$ olarak bulunmuştur.

Kompozit malzemenin poisson oranı (vk) ve elastik modülü (G_c) aşağıdaki formüllerden hesaplanmıştır [31,40].

$$Vk = (Vf \times vf) + (Vm \times vm) \quad (2.2)$$

$$1/ G_c = (Vf / Gf) + (Vm / Gm) \quad (2.3)$$

Burada Tablo 2.2'de görüldüğü gibi cam elyaf fiberin poisson oranı vf = 0,30 matris malzemenin poisson oranı v m = 0,20 cam elyaf fiberin elastik modülü Gf = 72500 MPa ve matris malzemenin elastik modülü ise Gm = 3000 MPa olarak alınmıştır.

Böylece hazırlanan kompozit malzemenin özellikleri aşağıdaki Tablo 2.1 deki gibi bulunmuştur [12,21,22].

Tablo 2.1. Hazırlanan kompozit malzemenin mekanik özellikleri

	Yoğunluk (kg/m³)	**Elastisite modülü (MPa)**	**Poisson oranı**
Hazırlanan GFRP malzeme	2177	53000	0,228

Tablo 2.2'de bu çalışmada kullanılan matris ve fiber malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir [12,21,22].

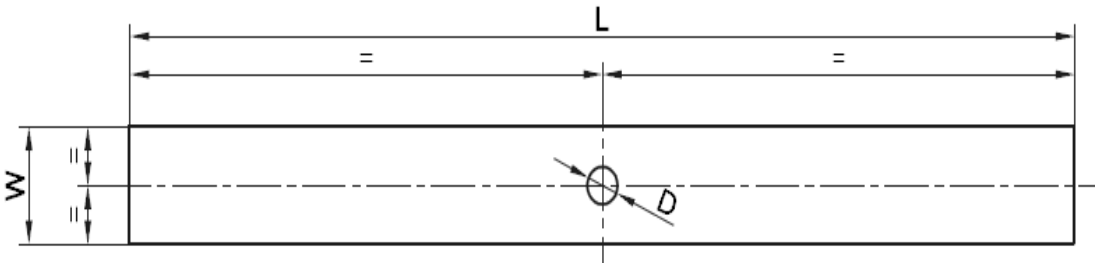
Tablo 2.2. Deneyde kullanılan matris ve fiber malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	**Yoğunluk (kg/m³)**	**Elastisite modülü (MPa)**	**Poisson oranı**	**Ağırlık (gr)**	**Hacimsel oran %**
E-Glass woven (fiber)	2580	72500	0,30	1225	72
Epoxy Derakine-411 (matris)	1140	3000	0,20	750	28

2.2. Deney Planı

Kompozit malzemeler sağladıkları üstün özelliklerden dolayı başta otomotiv, havacılık ve deniz sektörleri olmak üzere sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sektörlerde kullanılan taşıtlardaki yapılar daha çok eğilme gerilmesine maruz kalmaktadır. Yapılar maruz kaldıkları eğilme yükleri etkisi altında zaman içinde tehlikeli hasarlara neden olabilmektedir [50].

Bu yüzden bu çalışmada orta noktasında lif sürekliliği sağlanarak ve bozularak oluşturulan dairesel delik bulunan cam elyaf takviyeli epoksi reçine esaslı kompozit plakaların mukavemetleri dört nokta eğme testi yapılarak incelenmiştir.



Şekil 2.1. Problem geometrisi

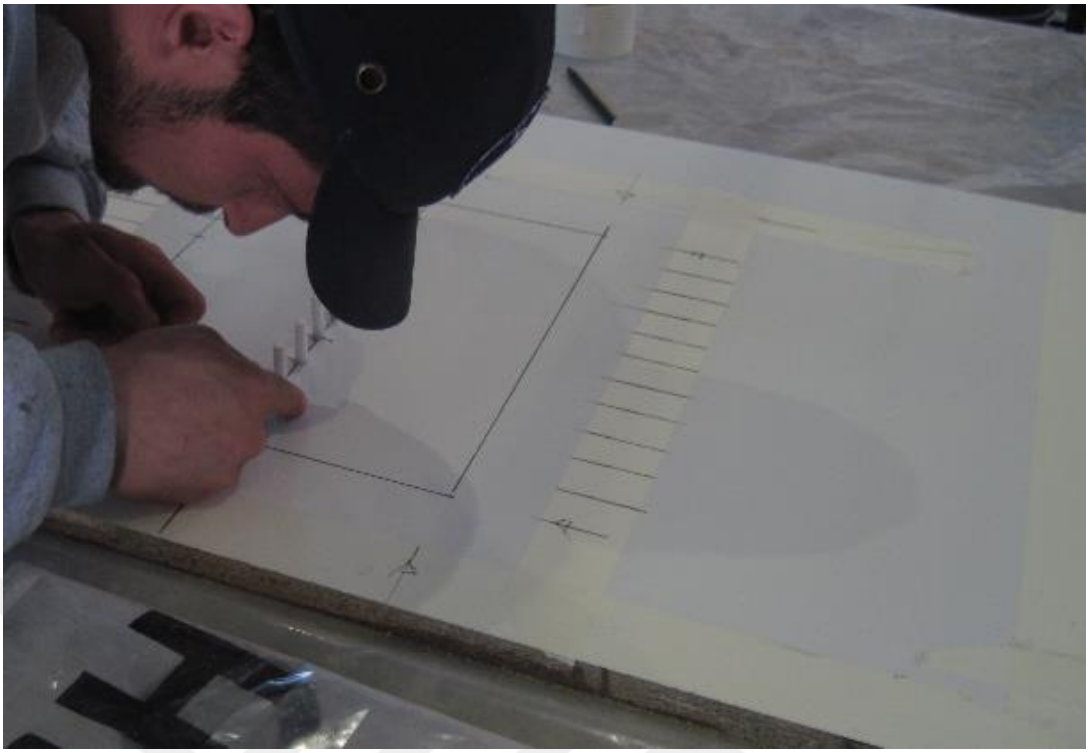
Tablo 2.3. Deney planı

Numune Tipleri	**D (mm)**	**L (mm)**	**W (mm)**
Lif Sürekliliği Sağlanarak (Delikli) Oluşturulan Numuneler	5	250	25
	8	250	25
Lif Sürekliliği Bozularak (Delinmiş) Oluşturulan Numuneler	5	250	25
	8	250	25

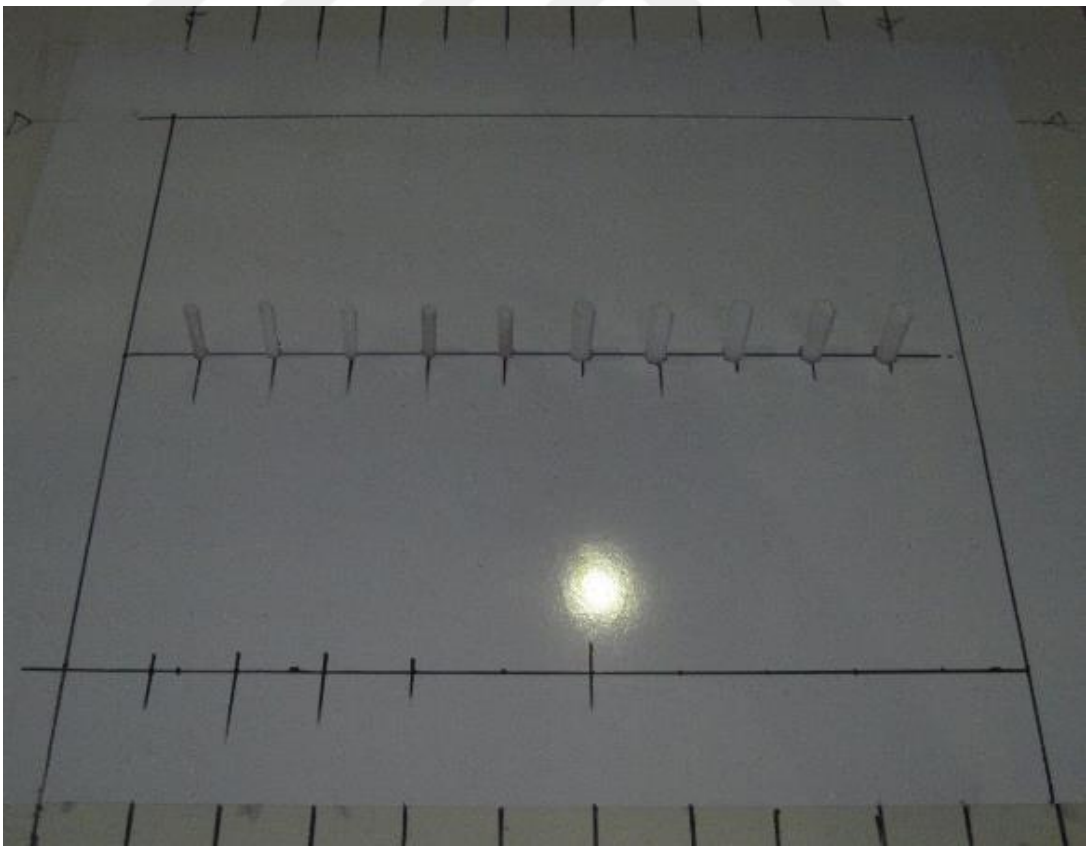
2.3. El Yatırması Yöntemiyle Malzeme Üretilmesi

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli epoksi reçine esaslı kompozit malzeme numunelerini elde etmek için el yatırması yöntemi kullanılmıştır. 400x350 mm boyutlarında iki adet kalıp kullanılmıştır.

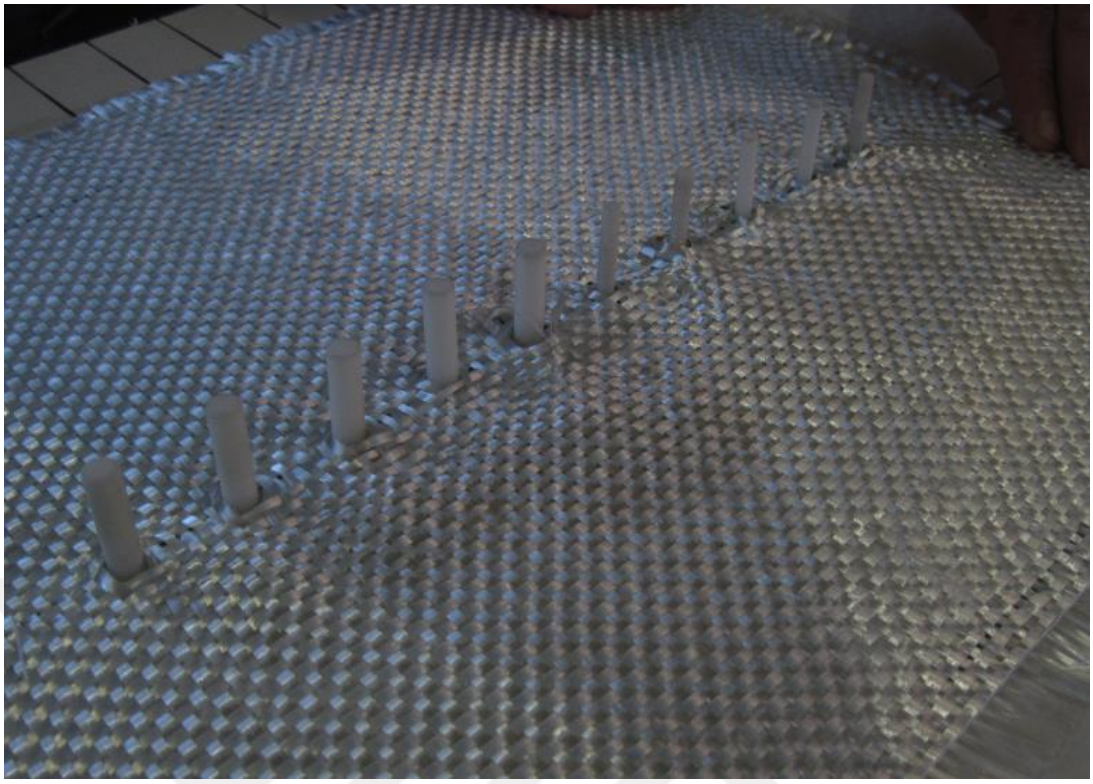
Kalıpların hazırlanırken bir tanesine Şekil.2.2 ve Şekil 2.3 de görüldüğü gibi 5 ve 8 mm çaplarında pimler yerleştirilerek delikli şekilde diğeri ise deliksiz şekilde yapılmıştır.



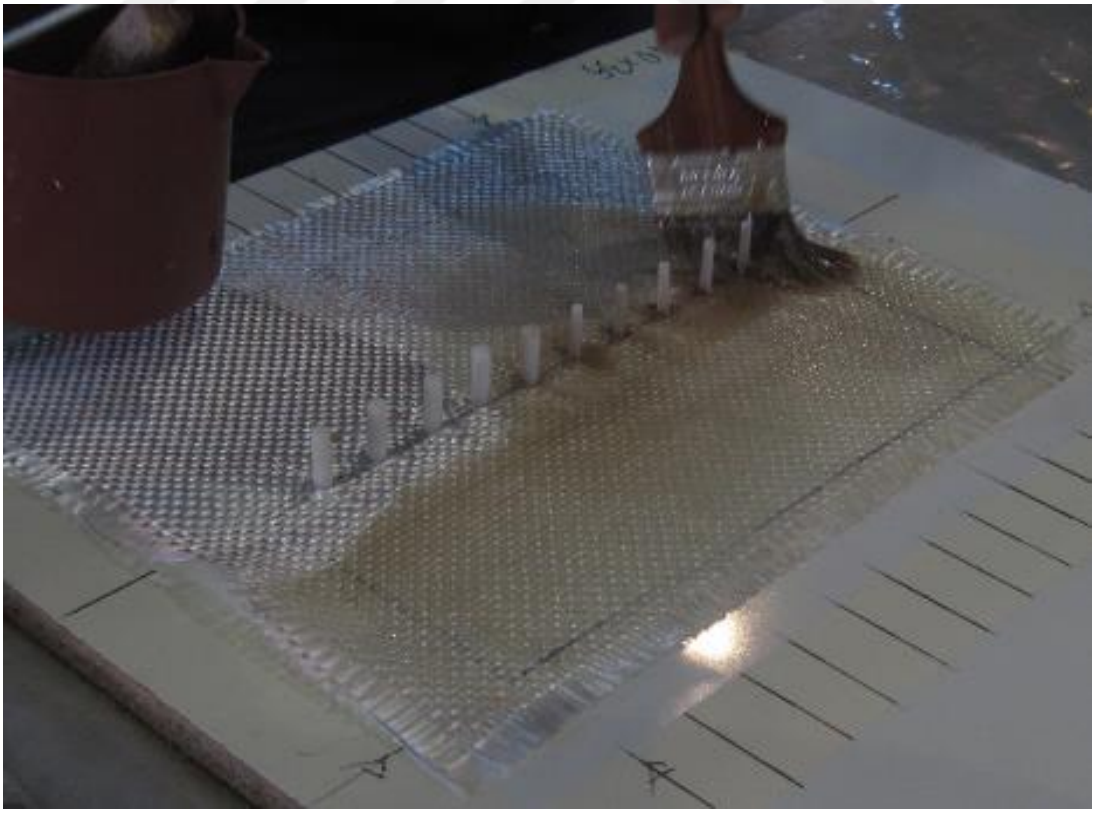
Şekil 2.2. Delikli ve deliksiz şekilde oluşturulmuş malzeme kalıpları



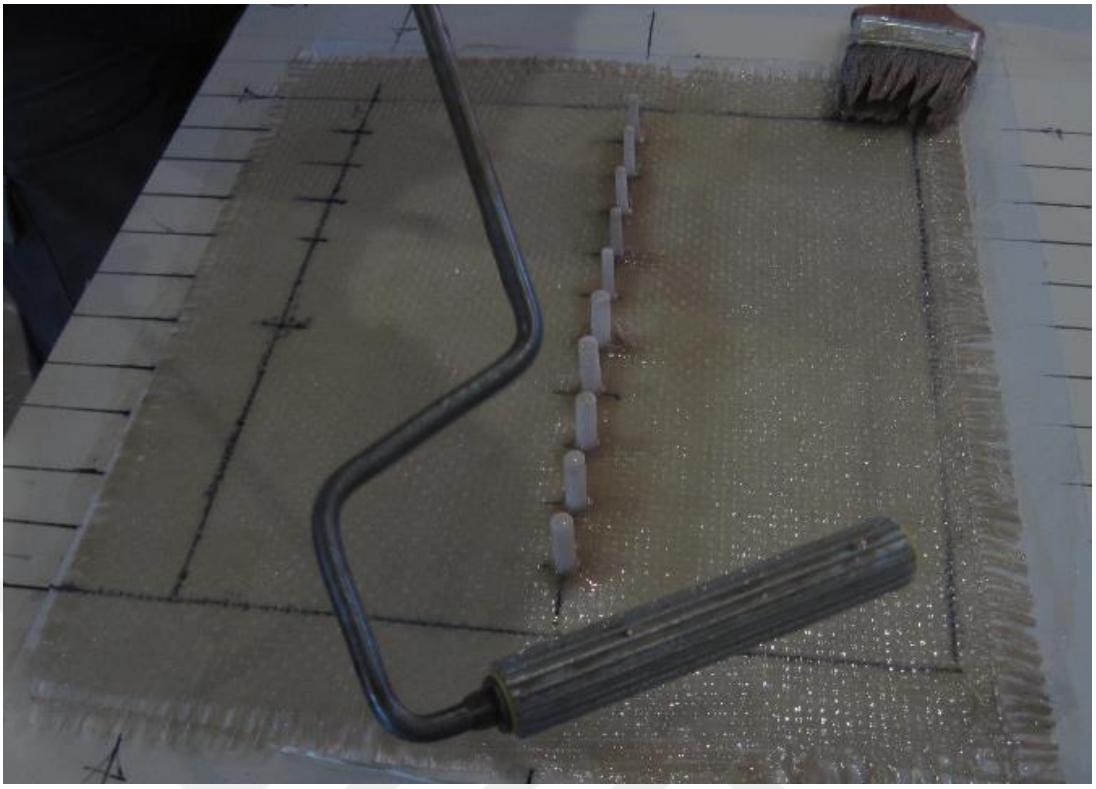
Şekil 2.3. Kalıp yüzeyinin temizlenmesi ve pimlerin kalıba yerleştirilmesi



Şekil 2.4. Cam elyaf demetlerinin delikli hazırlanmış kalıp üzerine yerleştirilmesi

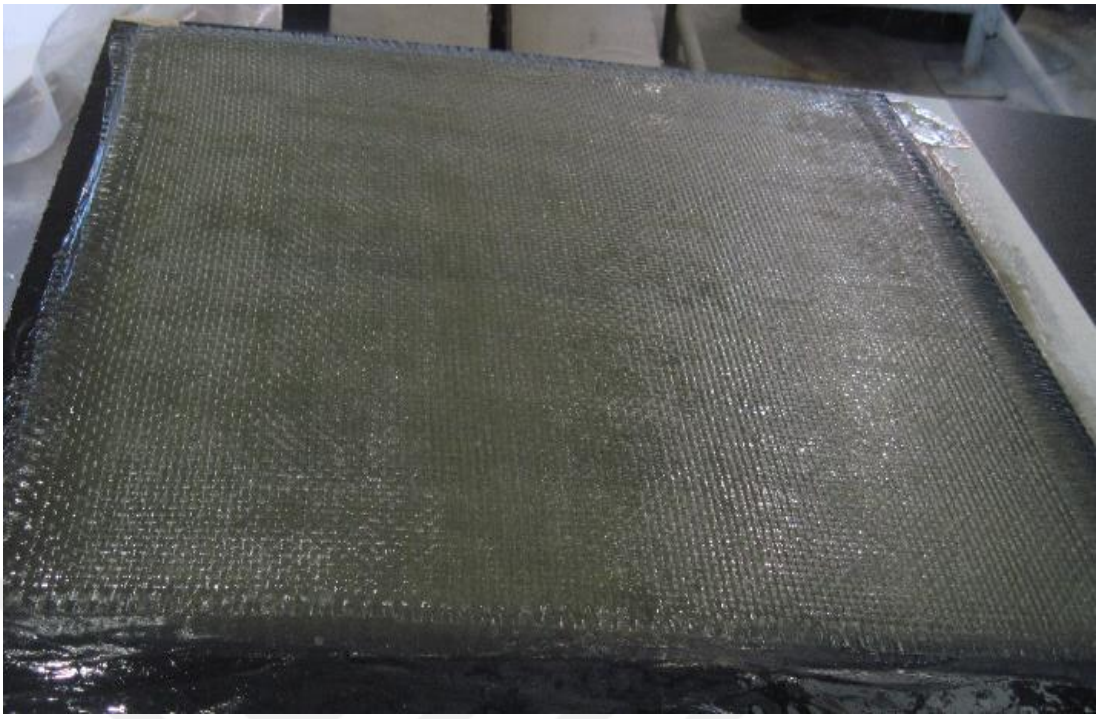


Şekil 2.5. Reçine - jelkot karışımının cam elyaf demetleri üzerine uygulanması

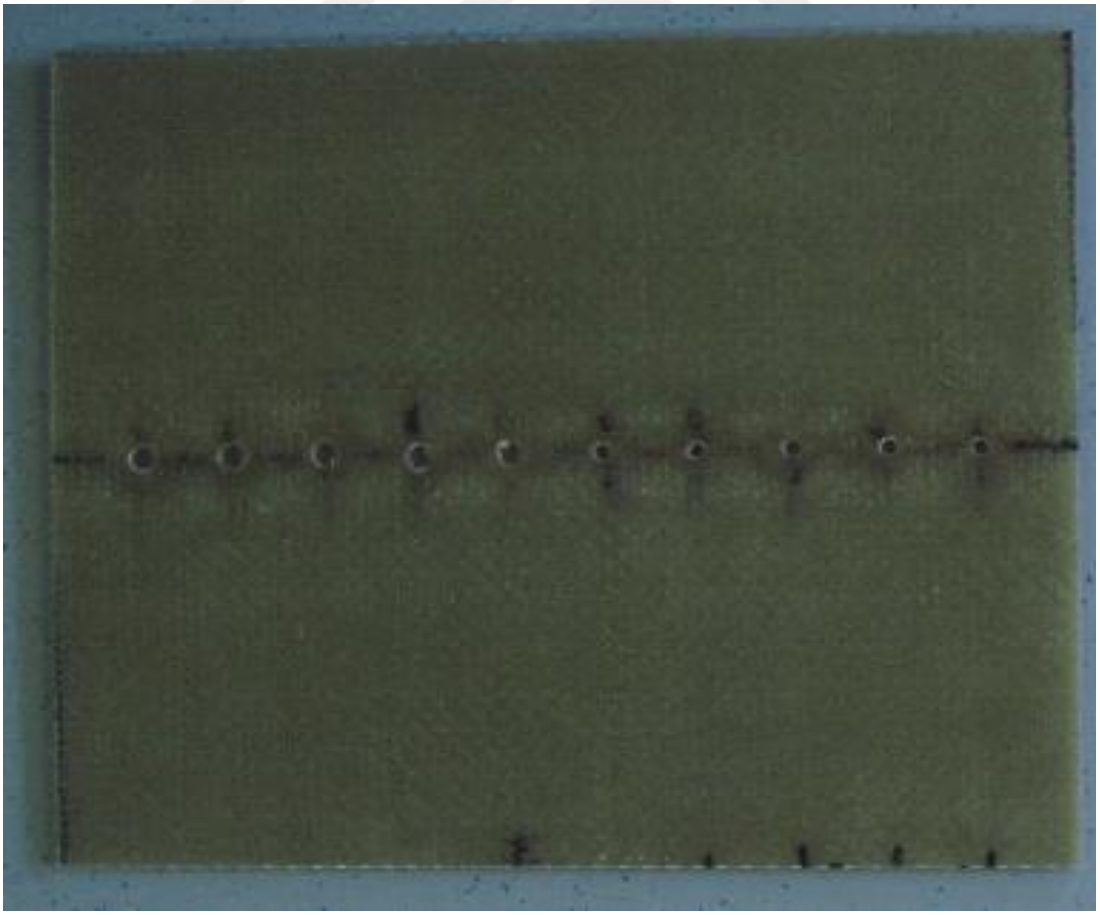


Şekil 2.6. Uygulanan jelkot karışımındaki kabarıklıkların rulo ile giderilmesi

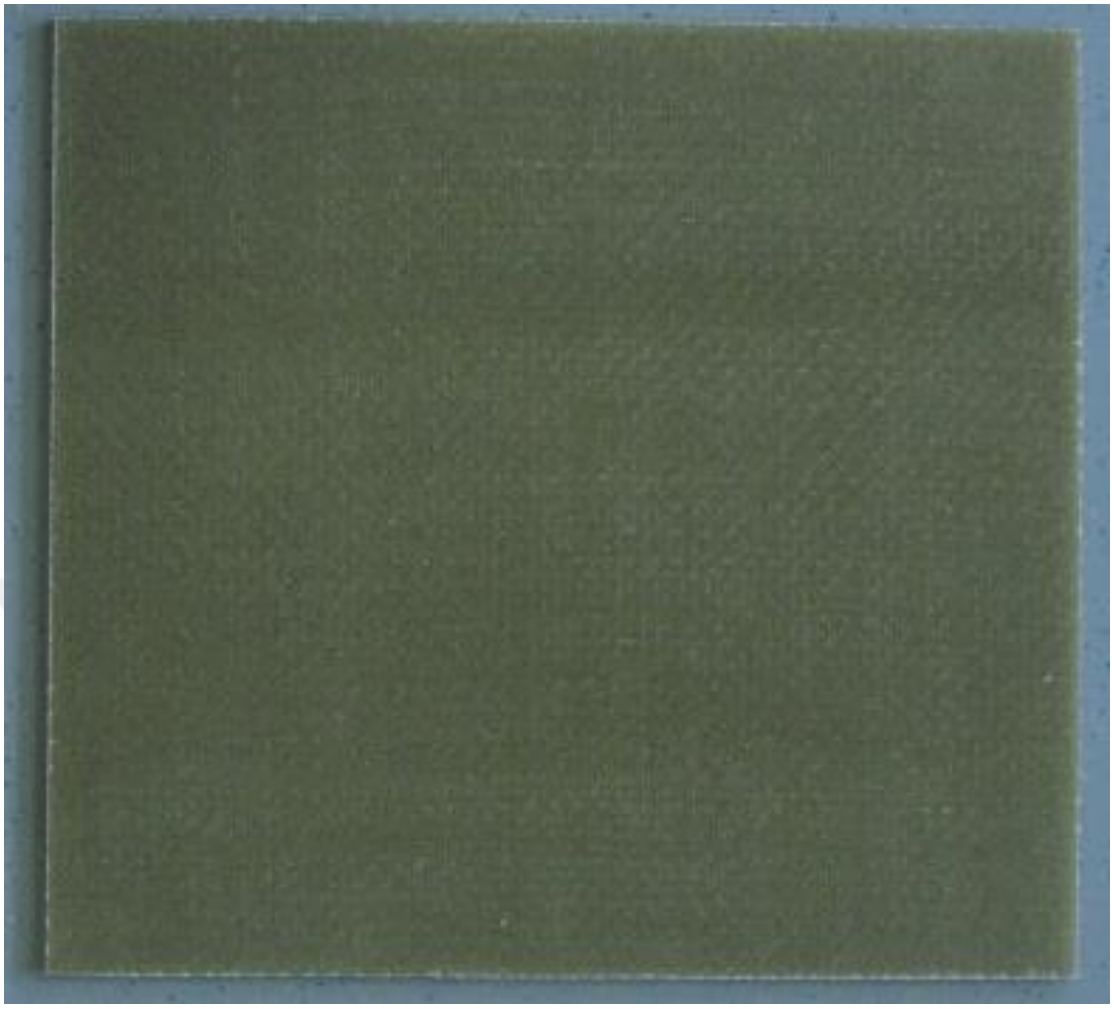
Şekil 2.7. Delikli üretilmiş kompozit malzemenin katmanlarının tamamlanmış hali



Şekil 2.8. Deliksiz şekilde üretilmiş malzemenin katmanlarının tamamlanmış hali



Şekil 2.9. Kalıptan çıkarılmış delikli şekilde üretilmiş kompozit plaka



Şekil 2.10. Kalıptan çıkarılmış deliksiz şekilde üretilmiş kompozit plaka

Kompozit malzemenin üretilmesi amacıyla kullanılacak olan 400x350 mm boyutlarındaki kompozit kalıpların yüzeylerinde kalıntı kalmaması için ilk başta asetonla temizlenmiştir. Daha sonra kalıp yüzeyinin düzgün çıkması için bir miktar kalıp ayırıcı yüzeye uygulanmıştır.

Kullanılacak olan takviye ve reçine miktarı belirlendikten sonra, üretim aşaması için reçine içine sertleştirici olarak MEKP ve tepkime hızlandırıcısı olarak da cobalt napthan eklenmiştir.

Şekil 2.11 da görüldüğü gibi reçine karışımının içindeki dağılımın düzgün olması için hava kabarcığı kalmayacak şekilde yavaşça karıştırılmasına dikkat edilmiştir [7].

Şekil 2.11. Reçine ve katkı maddeleri karışımının hazırlanması

Kalıp ayırıcı sürülen kalıpların üzerine hazırladığımız reçine karışımı fırça yardımıyla bir kat uygulanmıştır. Daha sonra yüzeye 1 kat cam elyaf demeti uygun şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.4.). Daha sonra hazırladığımız reçine karışımı fırça yardımıyla bir kat daha uygulanmıştır (Şekil 2.5). Bu işlemden sonra rulo yardımıyla yüzeydeki kabarıklıkların giderilmesi ve cam elyafın reçineyi emmesi sağlanmıştır (Şekil 2.6).

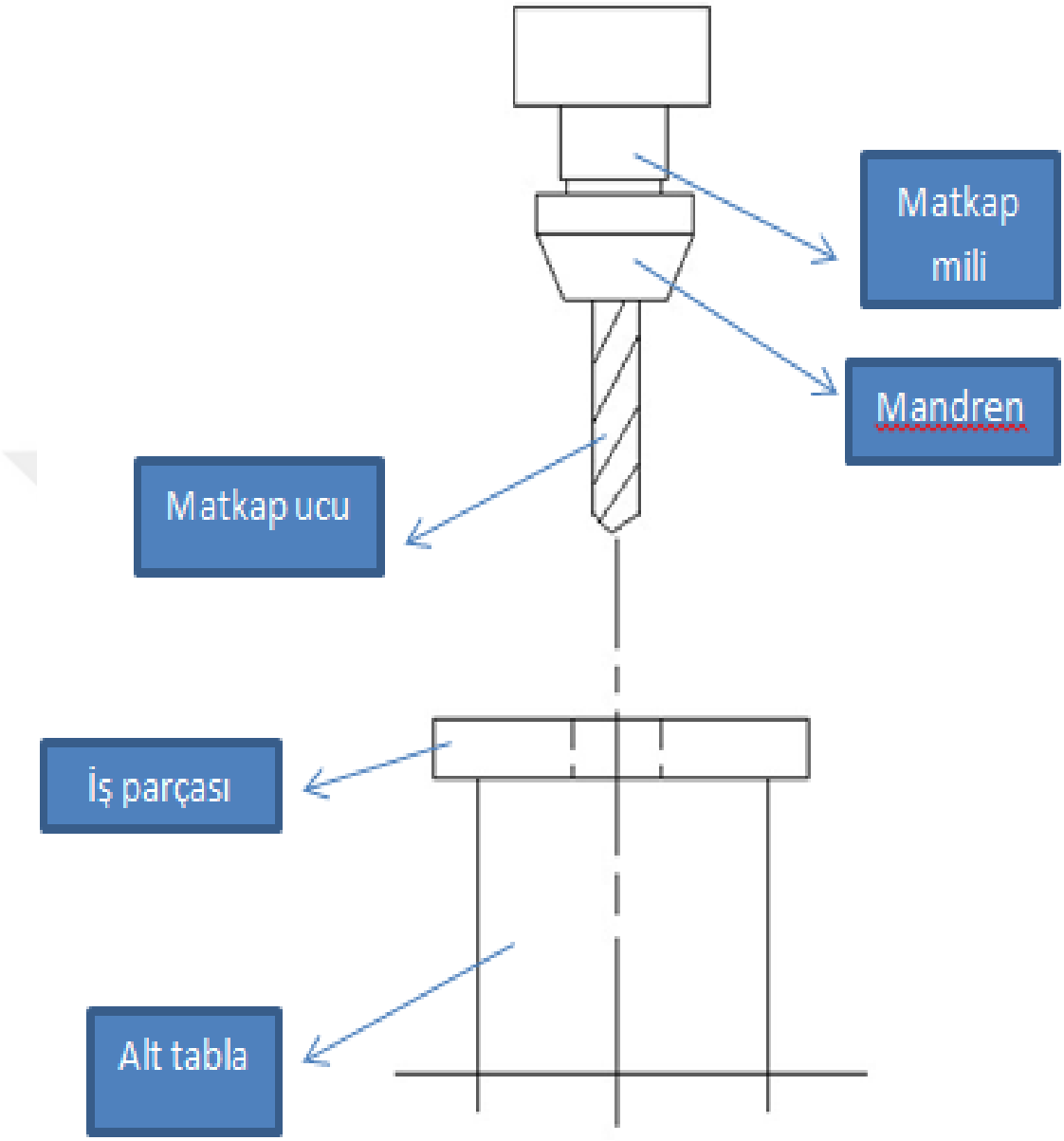
Aynı işlemler 4,4 mm kalınlıkta 8 katlı bir kompozit (8 kat cam elyaf demeti - 8 kat reçine) elde edilinceye kadar tekrarlanmıştır. Bu işlemler yapılırken hesaplanan cam elyaf reçine oranının korunması için reçine kaybının olmamasına dikkat edilmiştir [23].

Hazırlanan kompozit malzemenin üst yüzeyinin düzgün olması ve alt katmanlar arasında hava kabarcıklarının giderilmesi için en son uygulanan reçine ve cam elyaf katından sonra üst kısma asetat filmi yerleştirilmiştir (Şekil 2.8).

Tüm bu işlemler tamamladıktan sonra hazırlanan kompozitler sertleşmeye bırakılmıştır. Sertleşen kompozitler kalıp yüzeyinden ayrılmıştır (Şekil 2.9 ve Şekil 2.10). Her bir kalıptan 250x25x4,4 mm boyutlarında numuneler su jetinde kesilerek istenen boyutlarda parçalar elde edilmiştir.

Deliksiz kesilmiş numuneler orta noktalarına talaşlı imalat yöntemi ile 5 ve 8 mm çaplarında delikler delinmiştir. En az hasarda delik açmak için 0,06 mm/dev ilerleme hızında ve 60^{o} uç açısında matkap kullanılmıştır [44,45].

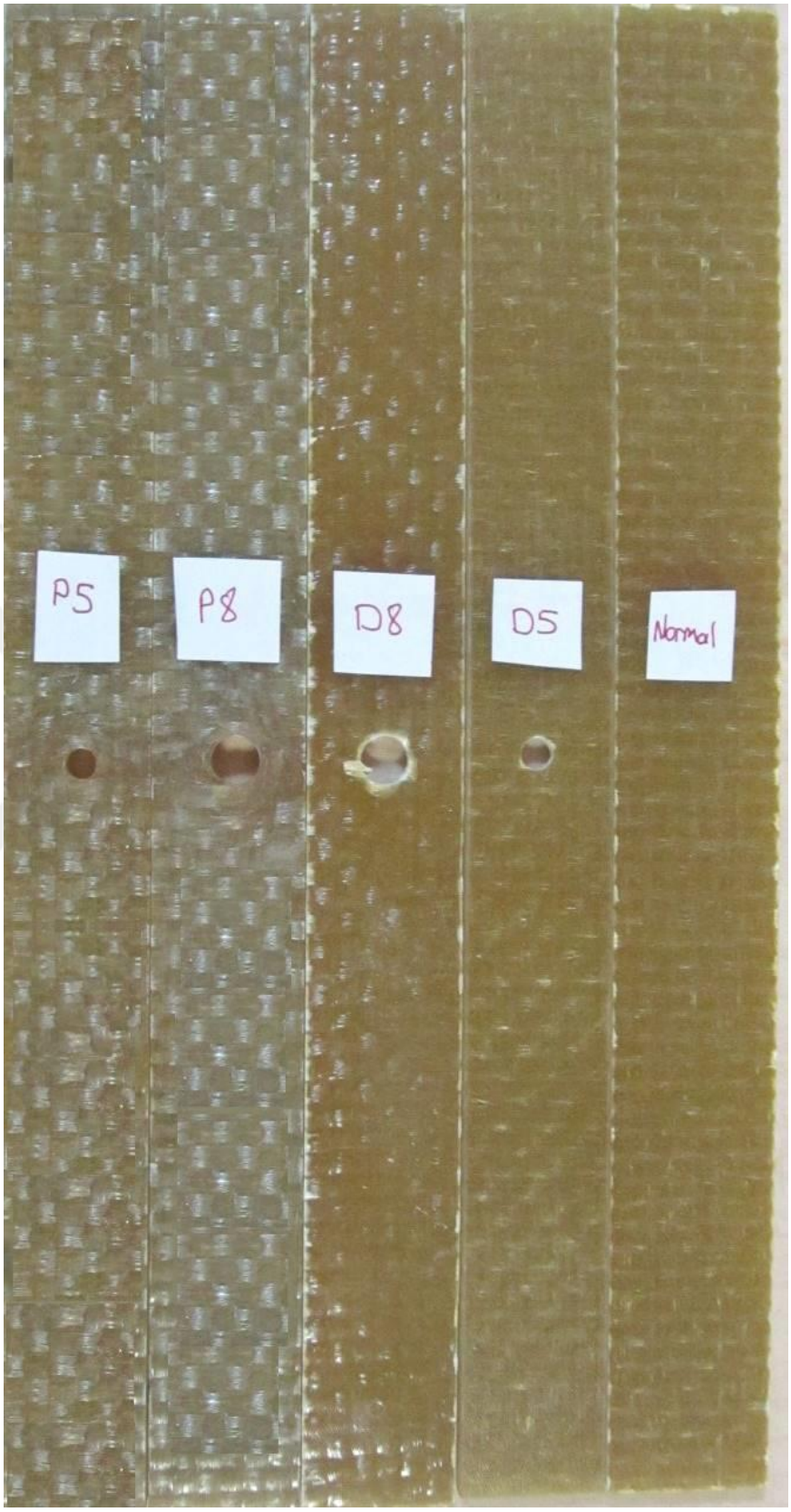
Şekil 2.12’ de geleneksel delme işleminin temsili resmi görülmektedir.



Şekil 2.12. Geleneksel delik delme prosesi

Şekil 2.13, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’te orta noktalarında 5 ve 8 mm çaplarında delikler olan delinmiş ve delikli şekilde hazırlanmış numunelere ait görseller görülmektedir.

Her bir delinmiş ve delikli imal edilmiş numune için üçer parça dört nokta eğme testi için ayrılmıştır.



Şekil 2.13. Delikli imal edilmiş (PX) ve delinmiş (DX) ve deliksiz (Normal) kesilmiş numune örnekleri

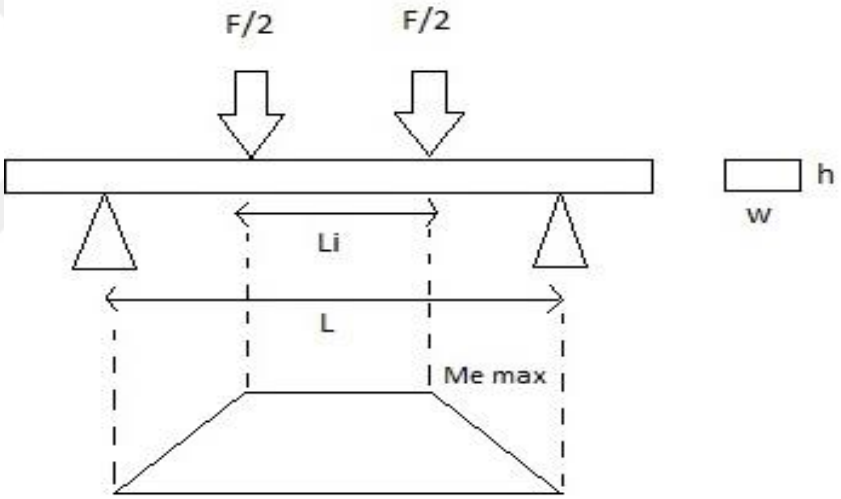
Şekil 2.14. Delikli (PX) numuneler

Şekil 2.15. Delinmiş (DX) numuneler

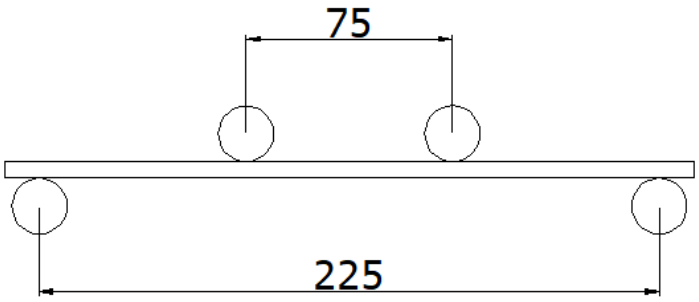
2.4. Dört Nokta Eğme Deneyi

Aşağıdan iki mesnetle sabitlenmiş numune üzerine düşey yönde eşit yüklerdeki iki kuvvet uygulanmaktadır. Bu kuvvetlerin uygulandığı noktalar değişim gösterse de genel olarak iki mesnet arası mesafenin üçte biri kadardır. Bu metot daha çok gevrek yapıdaki ve kırılma tokluğu düşük malzemeler için tercih edilmektedir [19].

Dört nokta eğme testinde maksimum moment belli aralıkta değer almakta, bu aralıkta kesme kuvveti sıfır olmakta ve saf eğilme hali oluşmaktadır. Bu yüzden dört nokta eğme testi malzemenin mekanik özelliklerini tespit ederken daha sağlıklı sonuçlar göstermektedir. Bu çalışmada delik etrafında oluşan gerilme yığılmalarını daha net görmek için dört nokta eğme testi üzerinde çalışılmıştır. Şekil 2.16'da dört nokta eğme testi düzeneğinin konfigürasyonu görülmektedir [20].



Şekil 2.16. Dört nokta eğme testi konfigürasyonu



Şekil 2.17. Dört nokta eğme testi numune parçaları için belirlenmiş mesnetler arası mesafeler

2.4.1. Dört nokta eğme testi numuneleri için eğilme gerilmesi ve şekil değiştirme miktarı hesabı

Dört nokta eğme testinde dikdörtgen kesitli numuneler için eğilme gerilmesi hesabı (2.4) bağıntısıyla hesaplanmıştır [24,25].

$$\sigma e = Me/W = (F \times L/6) / (w \times h^2/6) = (F \times L) / (w \times h^2) \quad (2.4)$$

σe = eğilme gerilmesi, [MPa]

Me = eğilme momenti, [Nm]

W = kesit alanı atalet momenti, [kg.m^2]

F = kırılma yükü, [N]

L = mesnetler arası mesafe, [mm]

h = numune kalınlığı, [mm]

w = numune genişliği, [mm]

Dört nokta eğme testinde dikdörtgen kesitli numuneler için şekil değiştirme miktarı hesabı (2.5) bağıntısıyla hesaplanmıştır [24,25].

$$\varepsilon = (6 \times \delta \times F)/L^2 \quad (2.5)$$

ε = birim şekil değiştirme, [mm/mm]

δ = sehim, [mm]

F = uygulanan kuvvet, [N]

L= mesnetler arası mesafe, [mm]

Dört noktalı eğme deneyinde yukarıda verilen eğilme dayanımı formülleri, uygulanan iki düşey yük noktasının, mesnetler arası uzunluğu üç eşit parçaya böldüğü durum için geçerlidir.

Eğer düşey kuvvetlerin uygulama noktaları değişirse denklem de değişeceği için

eğilme gerilmesi (2.6) bağıntısındaki gibi hesaplanmıştır [24,25].

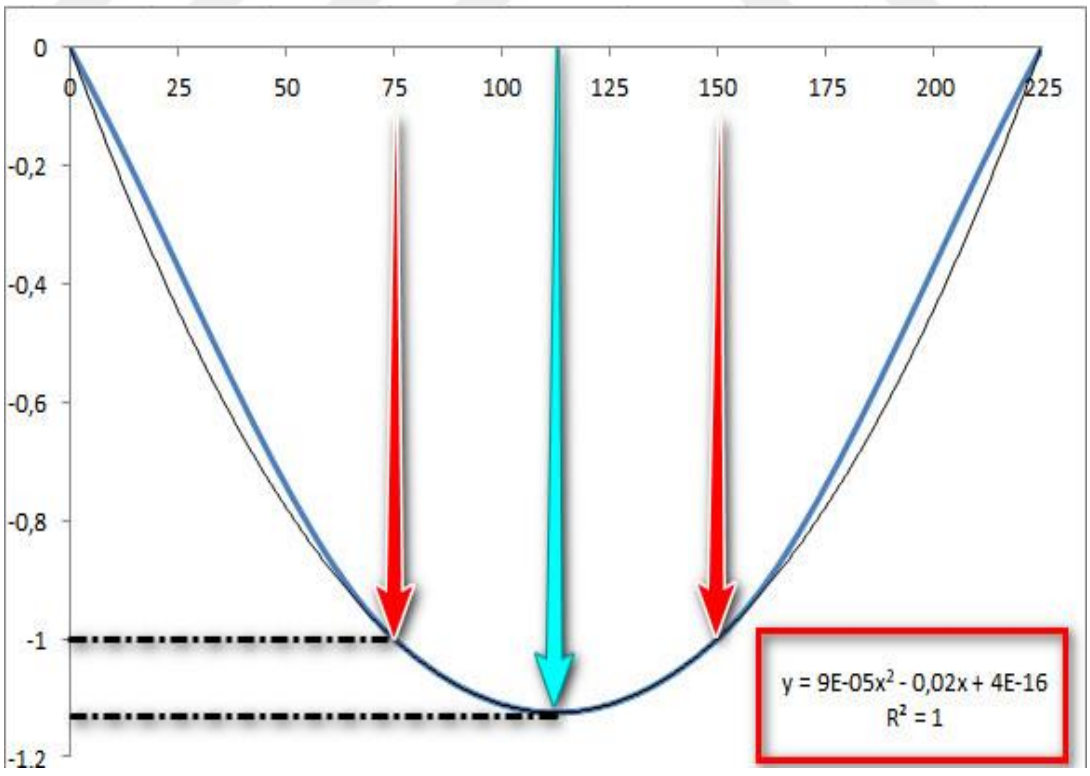
$$\sigma e = (3F \times L\text{-}Li) / (2 \times w \times h^2) \quad (2.6)$$

Li = Uygulanan düşey yük noktaları arası mesafe, [mm]

2.4.2. Dört nokta eğme testi için saf sehim değeri hesabı

Dört nokta eğme testinde cihazdaki sensör, kuvvetlerin uygulandığı noktalarda oluşan sehim değerlerini ölçmektedir. Ancak normalde malzeme üzerinde saf bir eğilme hali oluştuğu için kuvvetlerin uygulandığı mesnetlerin orta noktasında, kuvvetin uygulandığı noktalarda ölçülen sehim değerlerinden daha büyük bir sehim oluşmaktadır.

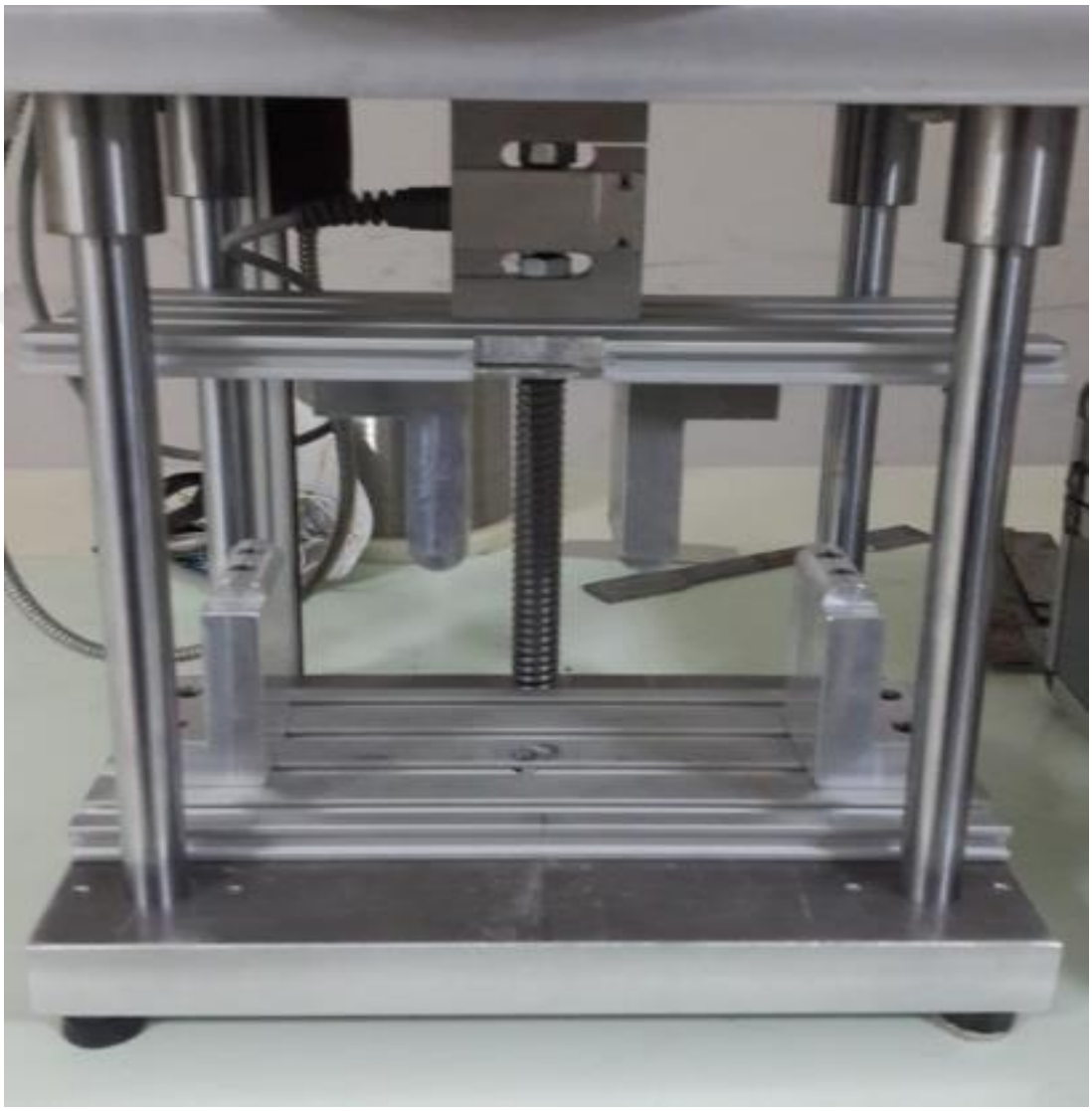
Kompozit malzeme üzerinde oluşan gerçek sehim değerini hesaplamak için birim sehim miktarı için sehim grafiği oluşturulmuştur. Şekil 2.18'deki grafik elde edilirken kompozit plakayı alt kısımdan sabit tutan mesnetlerde sehim değeri sıfır kabul edilmiş, kuvvetin uygulandığı noktalardaki üst mesnetlerde ise 1 mm sehim değeri ölçüldüğü varsayılmıştır.



Şekil 2.18. Dört nokta eğme testi saf sehim değeri hesabı

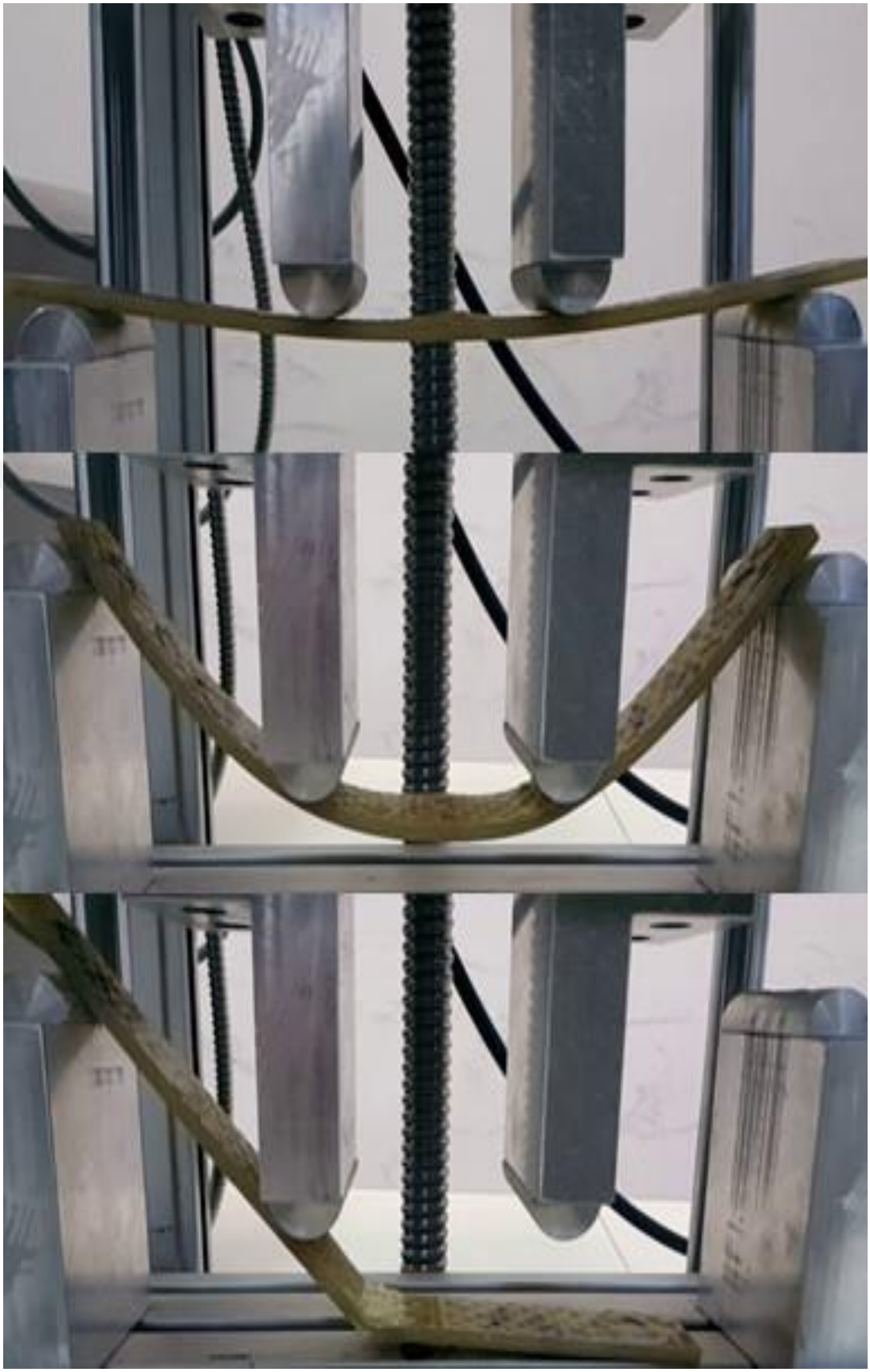
Elde edilen grafiğin eğimi hesaplandığında kuvvetin uygulandığı noktalarda sensör 1 mm sehim ölçtüğünde aslında malzeme üzerinde yaklaşık olarak 1,125 mm sehim oluştuğu hesaplanmıştır. Sehim hesapları yapılırken (2.7) bağıntısı kullanılmıştır.

Gerçek sehim (mm) = Sensörden ölçülen sehim (mm) x 1,125 (2.7)



Şekil 2.19. Dört nokta eğme test cihazı

Hazırlanan numuneler şekilde görüldüğü gibi mesnetler arası mesafe uygun şekilde yerleştirilmiş ve test edilmiştir. Test sonuçlarından yola çıkarak deney yapılan her bir numuneye ait gerilme, sehim, birim uzama hesapları yapılmıştır. Bu sonuçlardan yola çıkarak yük-sehim, gerilme-birim uzama grafikleri çizilmiştir (Şekil 2.19, Şekil 2.20).

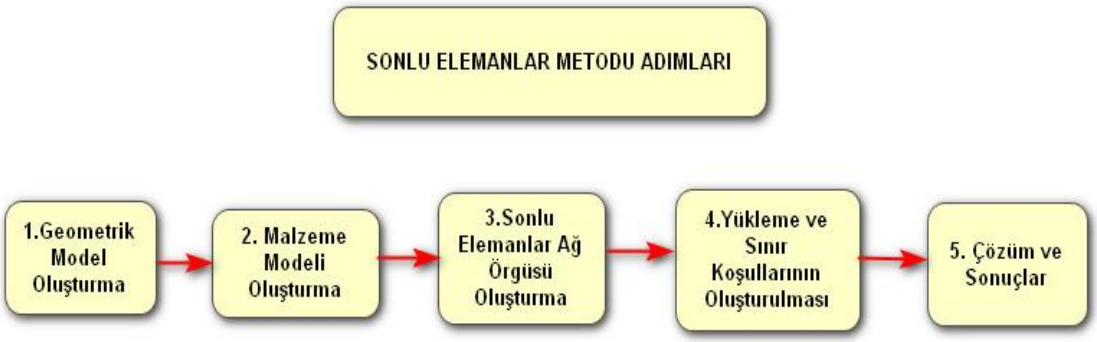


Şekil 2.20. Dört nokta eğme test cihazında malzemelerin test edilmesi

2.5. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM)

Sonlu elemanlar analizi, fiziksel bir sistemi matematiksel olarak ifade edebilmemizi sağlamaktadır. Sonlu elemanlar analizi ile matematiksel metodlar kullanılarak malzeme analizleri yapılmaktadır. Bu metodla karmaşık yapıları alt parçalara ayırarak kendi içinde çözümlemesi yapılır ve böylelikle tam çözüme ulaşılır [41,42].

Sonlu elemanlar metodunun genel adımları Şekil 2.21'de görülmektedir.



Şekil 2.21. Sonlu elemanlar metodu adımları

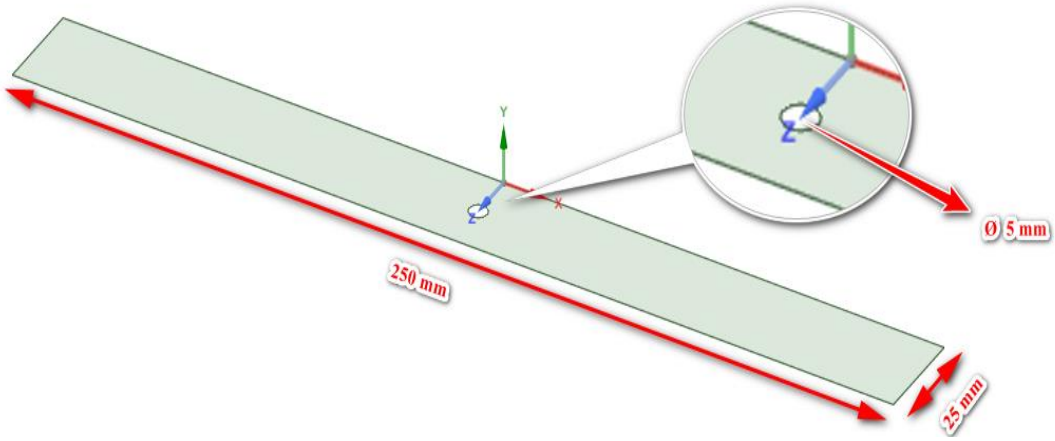
2.5.1. Geometrik model oluşturma

Problemin geometrik yapısının oluşturulduğu aşamadır. Bu geometrik yapı analiz programının içinde veya bilgisayar destekli katı model programlarında oluşturulduktan sonra uygun formatlara çevrilerek program içine aktarılarak yapılabilmektedir.

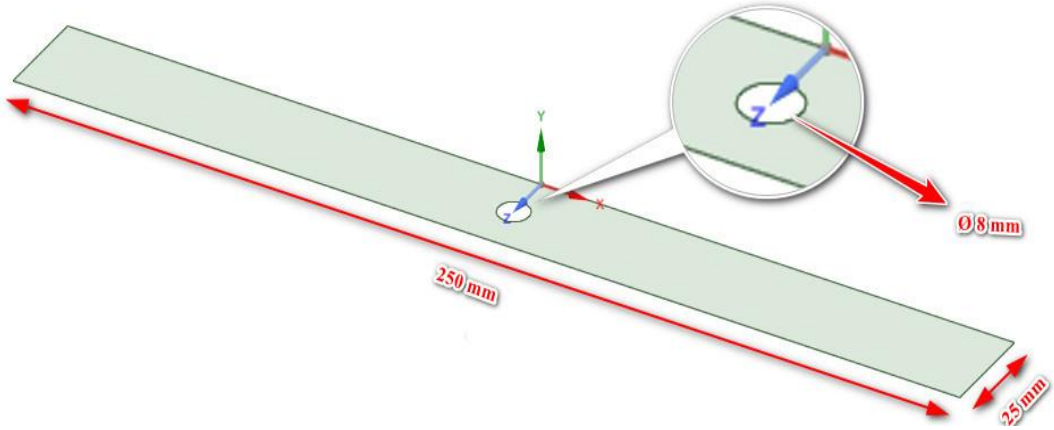
- Elasto-plastik malzeme geometrik modeli oluşturma:

Bu çalışmada kompozit malzemenin Ansys Workbench içerisindeki Space Claim katı model oluşturma modülü aracılığıyla ilk olarak yüzey modeli oluşturulmuştur. Daha sonra Ansys Workbench programının ACP (Ansys Composite Pre/Post) modülünden her bir katmana ait bilgiler tanımlanarak 8 katmanlı laminant kompozit malzeme katı modeli oluşturulmuştur.

Deneysel sistemde 5 mm ve 8 mm çapları kullanıldığı için iki farklı model oluşturulmuştur. Şekil 2.21 ve Şekil 2.22'de oluşturulan kompozit malzeme yüzey modelleri görülmektedir.



Şekil 2.22. Çap 5 mm için oluşturulan kompozit malzeme yüzey modeli

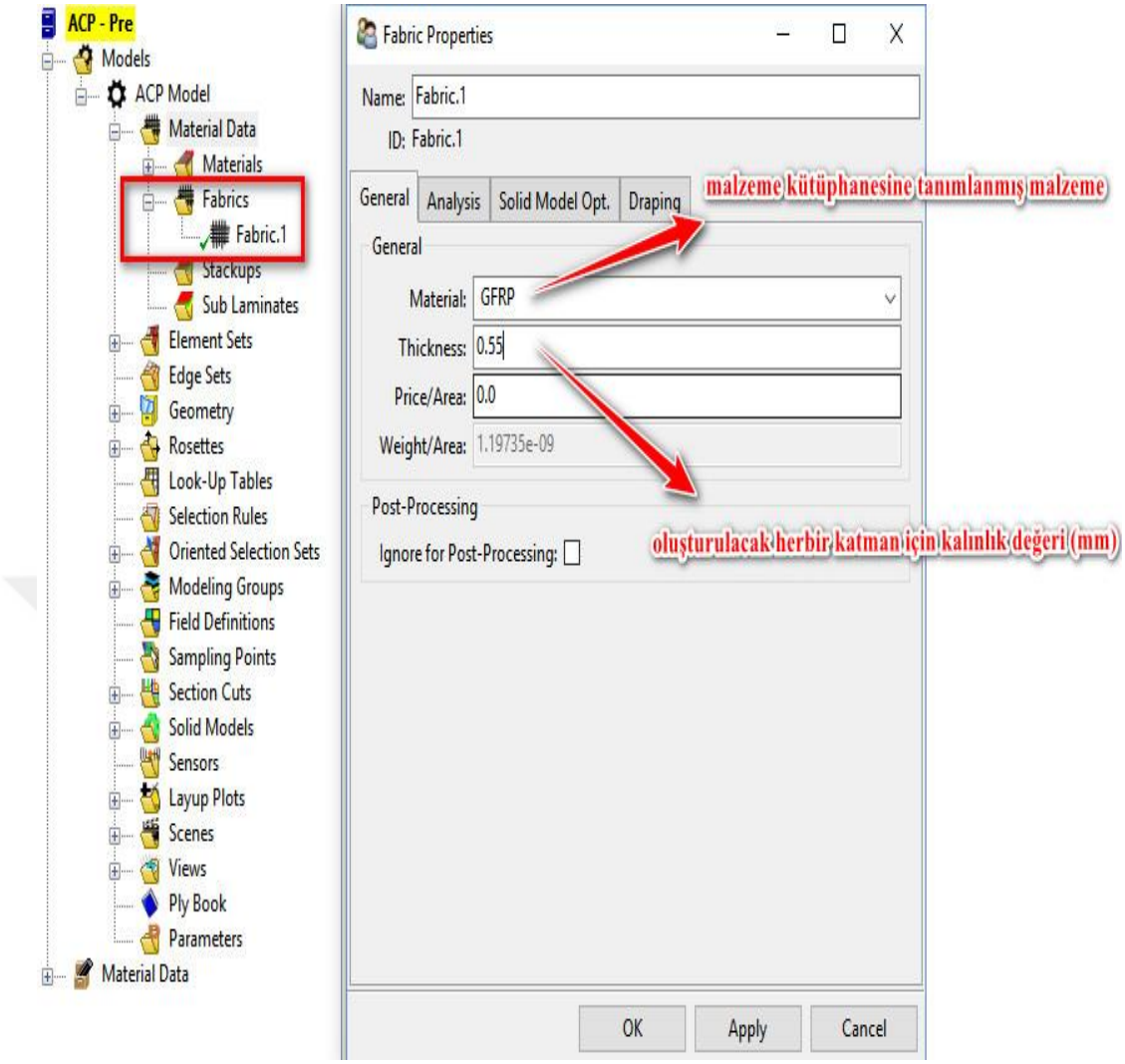


Şekil 2.23. Çap 8 mm için oluşturulan kompozit malzeme yüzey modeli

ACP modülü katmanlı kompozit yapıların modellenmesine olanak sağlayan Ansys'in bir eklenti modülüdür. Yüzey modelimiz oluşturulduktan sonra ACP (Ansys Composite Pre/Post) modülünden 8 katmanlı kompozit malzememizin katı modeli oluşturulmuştur.

ACP modülünden kompozit malzeme oluşturulurken sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir;

Fabrics menüsünden kumaş ayarları yapılmaktadır. Şekil 2.24'de görüldüğü gibi malzeme seçimi olarak malzeme kütüphanesine tanımladığımız GFRP malzemesi seçilmiştir ve oluşturulacak her bir katman için kullanılacak kumaş kalınlık değeri olan 0,55 mm girilmiştir.

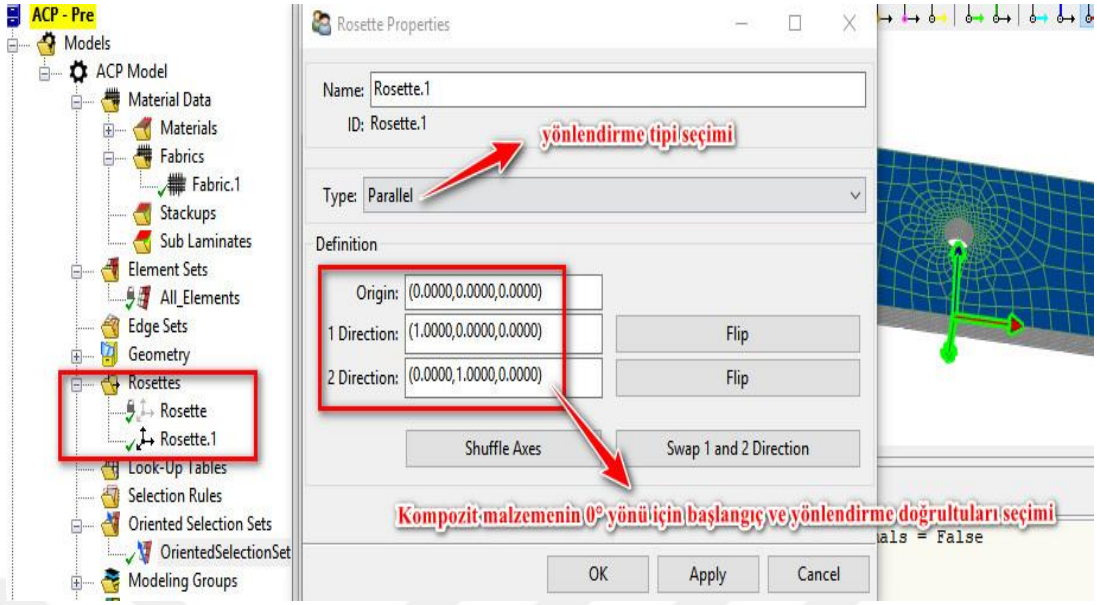


Şekil 2.24. Kumaş ayarları menüsü

Rosettes menüsüyle rozet ayarları yapılmaktadır. Rozetler, yönlendirilmiş seçim kümelerinin referans yönünü ayarlamak için kullanılan koordinat sistemleridir.

Rozetler kompozit yerleşim için malzemenin 0° yönünü tanımlamak için kullanılmaktadır. Mekanikte kullanılan koordinat sistemleri varsayılan olarak alınır. Rozetlerin orijin ve doğrultuları global koordinat sisteminde verilmiştir.

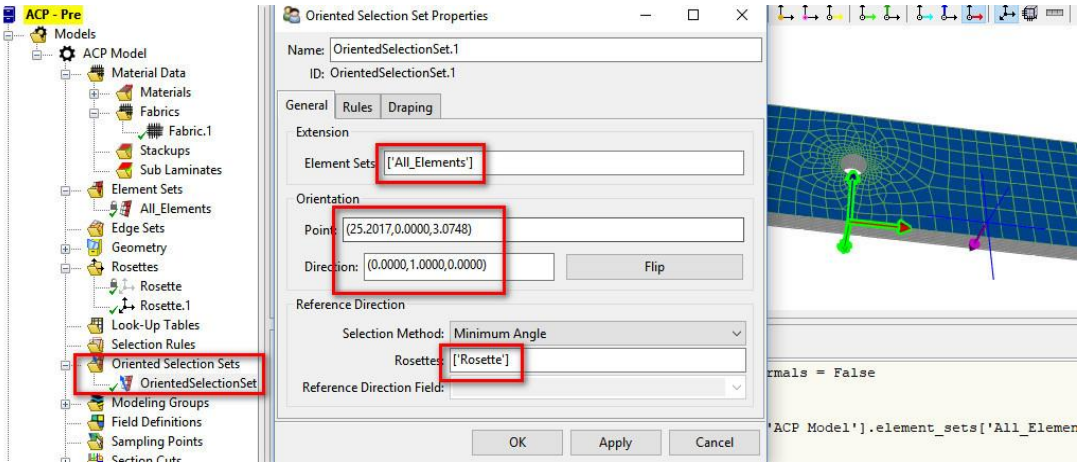
Şekil 2.25'de görüldüğü gibi rozet tipi olarak, deney sisteminde malzemeyi hazırladığımız gibi paralel yönlendirme seçilmiştir. Daha sonra elyaf için koordinat sisteminde orijin ve yönlendirme doğrultuları seçimleri yapılmıştır.



Şekil 2.25. Rozet ayarları menüsü

Oriented Selectionsets menüsüyle yönlendirilmiş seçim kümeleri için ayarlar yapılmaktadır. Yönlendirilmiş seçim kümeleri, elemanların referans yönünü ayarlamak için bir veya daha fazla rozet kullanılabilir. Tek bir eleman için referans yönü, geçerli rozetin elemana yansıtılmasıyla belirlenmektedir. Referans yönünü tanımlamak için farklı rozet tipleri kullanılabilmektedir.

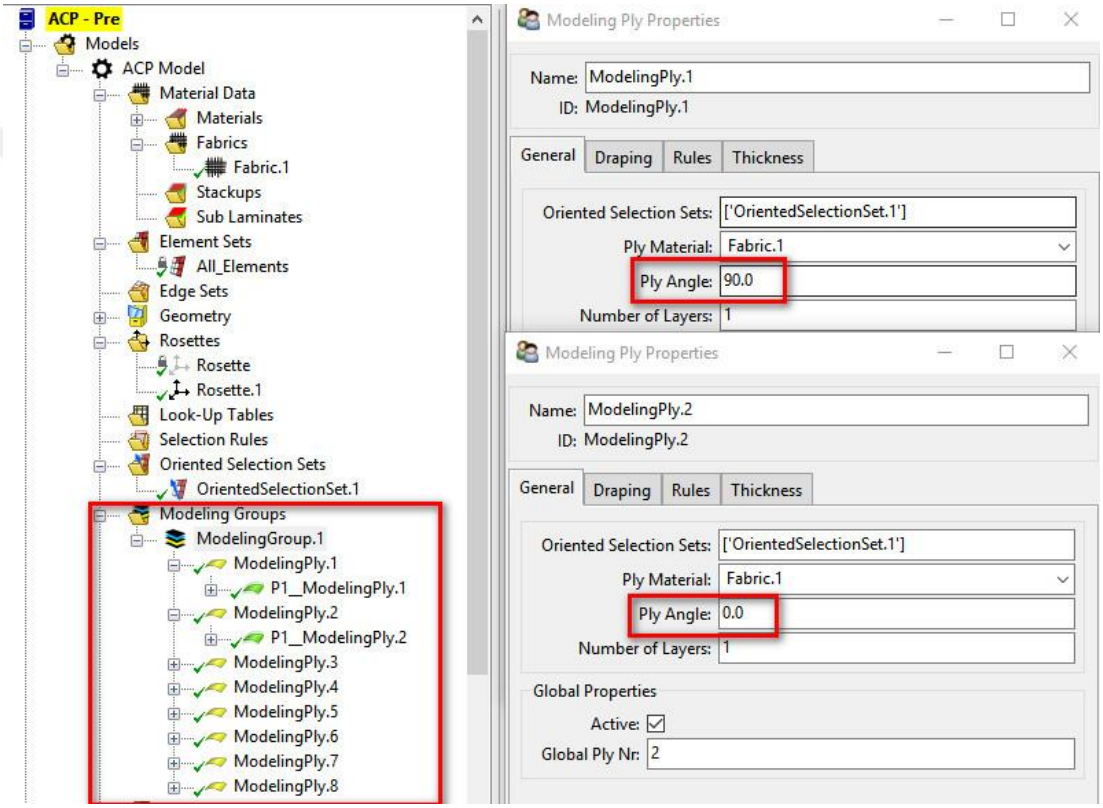
Şekil 2.26' da görüldüğü gibi eleman kümesi olarak yüzey modelini oluşturduğumuz kompozit plakadaki eleman kümesinin tamamı seçilmiştir. Yönlendirme noktası ve doğrultu seçimleri yapılmıştır. Son olarak da referans yönü olarak bir önceki adımda oluşturduğumuz rozet seçilmiştir.



Şekil 2.26. Yönlendirilmiş seçim kümesi ayarlarının yapılması

Modelling Groups menüsünden modelleme grupları için seçimler yapılmaktadır. Bir den fazla modelleme gurubu oluşturulması imkan tanımaktadır.

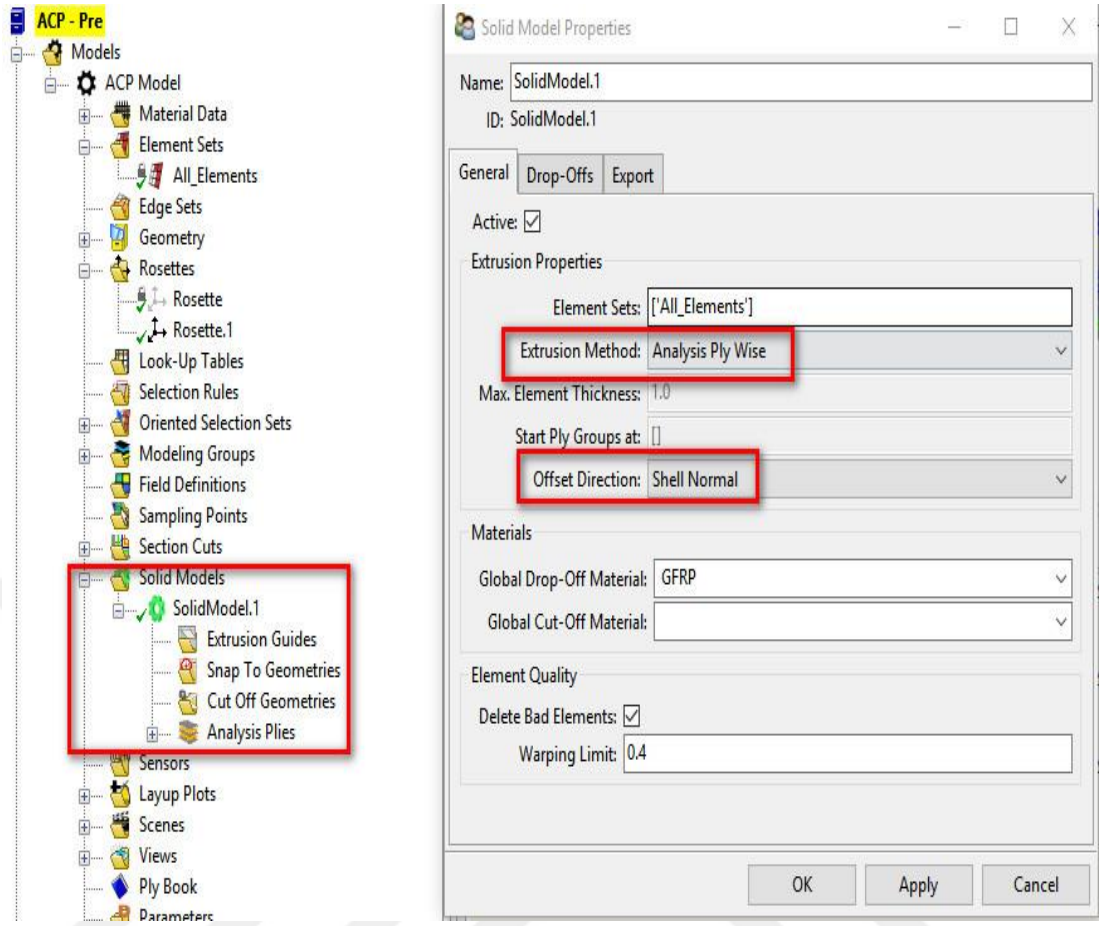
Şekil 2.27'de görüldüğü gibi modelleme grubu olarak tek malzeme gurubu tanımlanmıştır. Bu modelleme grubunun altında 8 adet katman oluşturulmuştur. Her bir katman için yönlendirilmiş seçim kümesi ve tanımladığımız kumaş malzemesi seçimleri yapılmıştır. Bu çalışmada örgü tipi cam elyaf kullanıldığı için elyaf yönlendirme açısı olarak [90°/0°] kullanılmıştır.



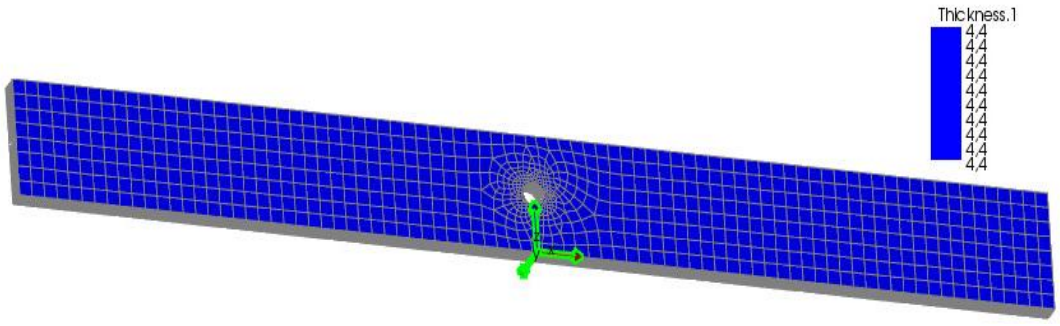
Şekil 2.27. Modelleme grubu ayarları yapılması

Solid Models menüsü oluşturduğumuz modelleme grubunu tek bir katı kompozit malzeme modeli haline dönüştürmemizi sağlamaktadır.

Şekil 2.28'de görüldüğü gibi katı model oluşturmak için ilk olarak oluşturduğumuz yönlendirilmiş seçim kümesi seçilmiştir. Ekstrüzyon yöntemi için ise her bir katmanı tek bir eleman katmanı olarak birleştiren analiz katmanı yöntemi seçilmiştir. Öteleme doğrultusu olarak katman yüzeylerini yansıtması için kabuk normal seçilmiştir. Böylelikle Şekil 2.29'da görüldüğü gibi kompozit plaka katı modeli oluşturulmuştur.



Şekil 2.28. Kompozit plaka katı model ayarlarının yapılması

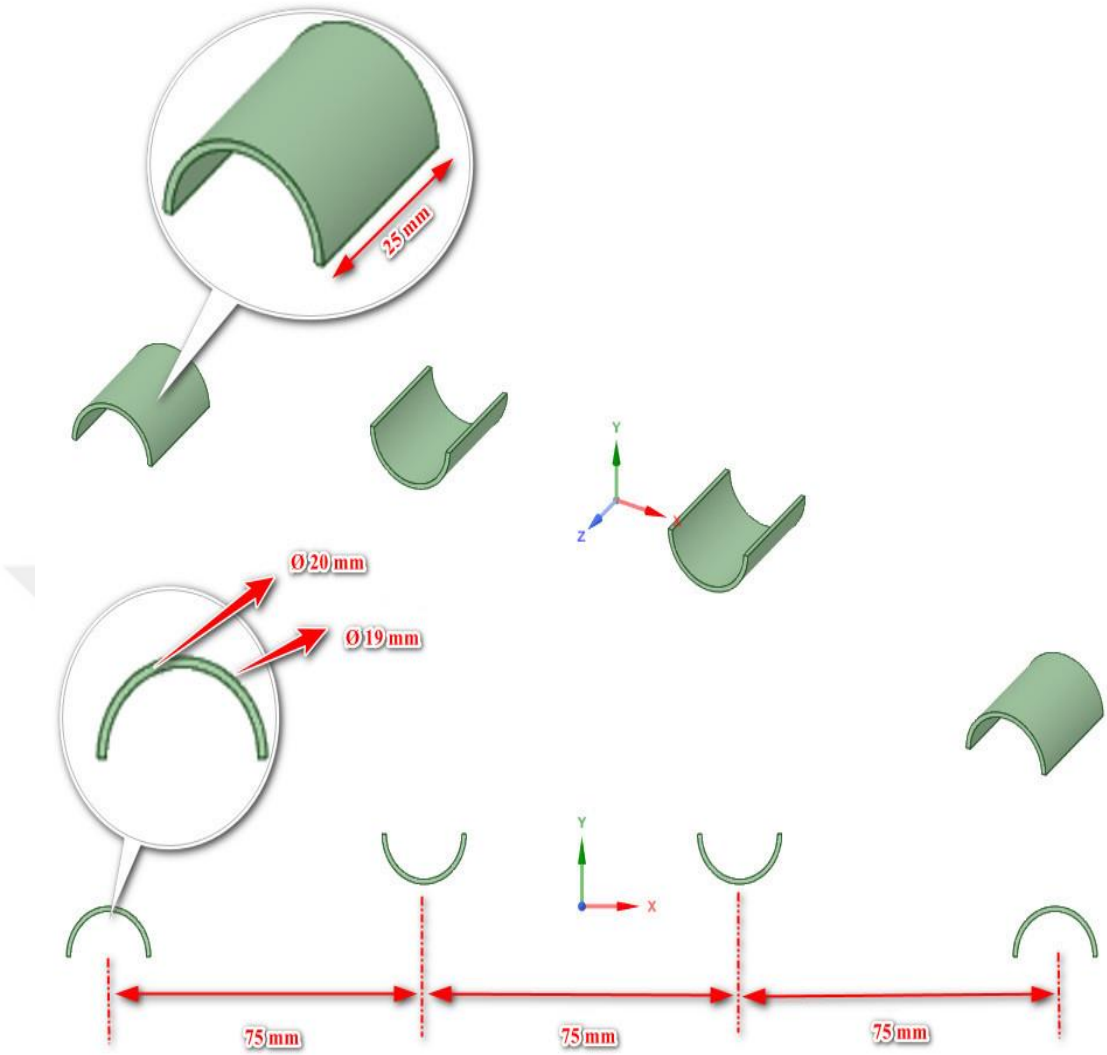


Şekil 2.29. Kompozit plaka katı modeli

- Mesnetlerin geometrik modelinin oluşturulması:

Dört nokta eğme testinde kullanılan mesnetlerin geometrik modeli Ansys Workbench içerisindeki Space Claim katı model oluşturma modülü aracılığıyla oluşturulmuştur.

Şekil 2.30'da deney düzeneğinde kullanılan mesnetlerin geometrik modeli görülmektedir.

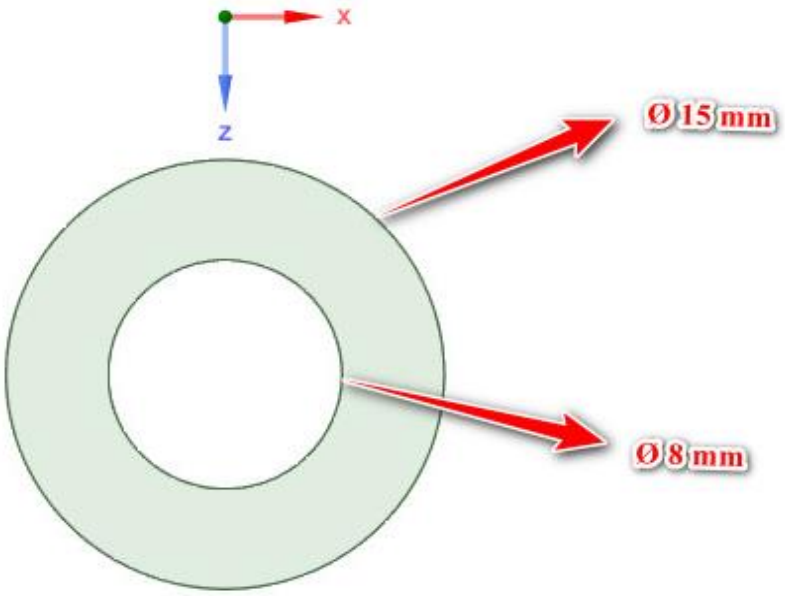


Şekil 2.30. Mesnetlerin geometrik modelinin oluşturulması

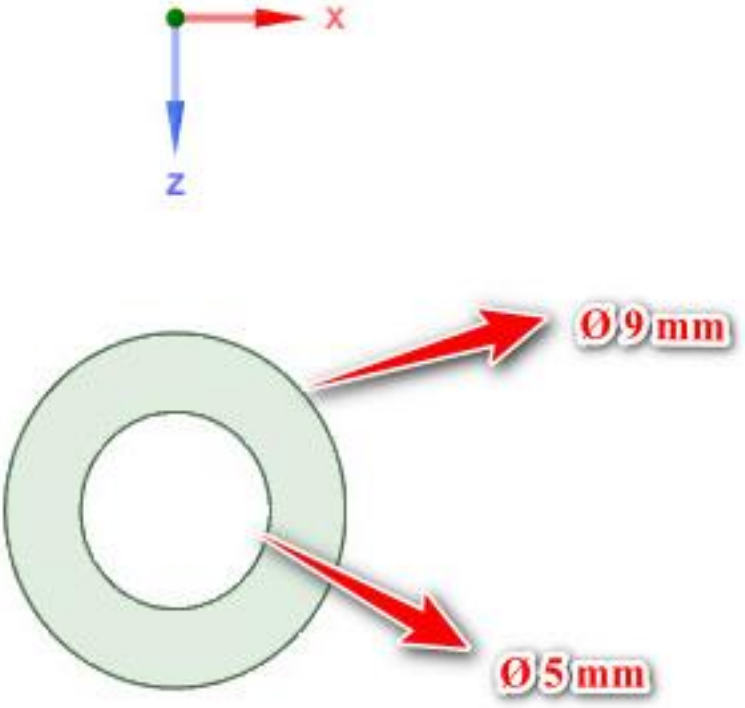
- Elyaf yığıntısı etkisinin geometrik modelinin oluşturulması:

Delikli imal edilmiş numunelerde, delinmiş numunelerden farklı olarak delik etrafında oluşan elyaf yığıntısı etkisinin geometrik modelini oluşturmak için Ansys Workbench içerisindeki Space Claim katı model oluşturma modülü aracılığıyla ilk olarak yüzey modeli oluşturulmuştur. Daha sonra Ansys Workbench programının ACP (Ansys Composite Pre/Post) modülünden her bir katmana ait bilgiler tanımlanarak 2 katmanlı elyaf yığıntısı katı modeli oluşturulmuştur.

Deneysel sistemde 5 mm ve 8 mm çapları kullanıldığı için iki farklı model oluşturulmuştur. Şekil 2.31 ve Şekil 2.32'de oluşturulan elyaf yığıntısı yüzey modelleri görülmektedir.



Şekil 2.31. Çap 8 mm için elyaf yığıntısı yüzey modelinin oluşturulması

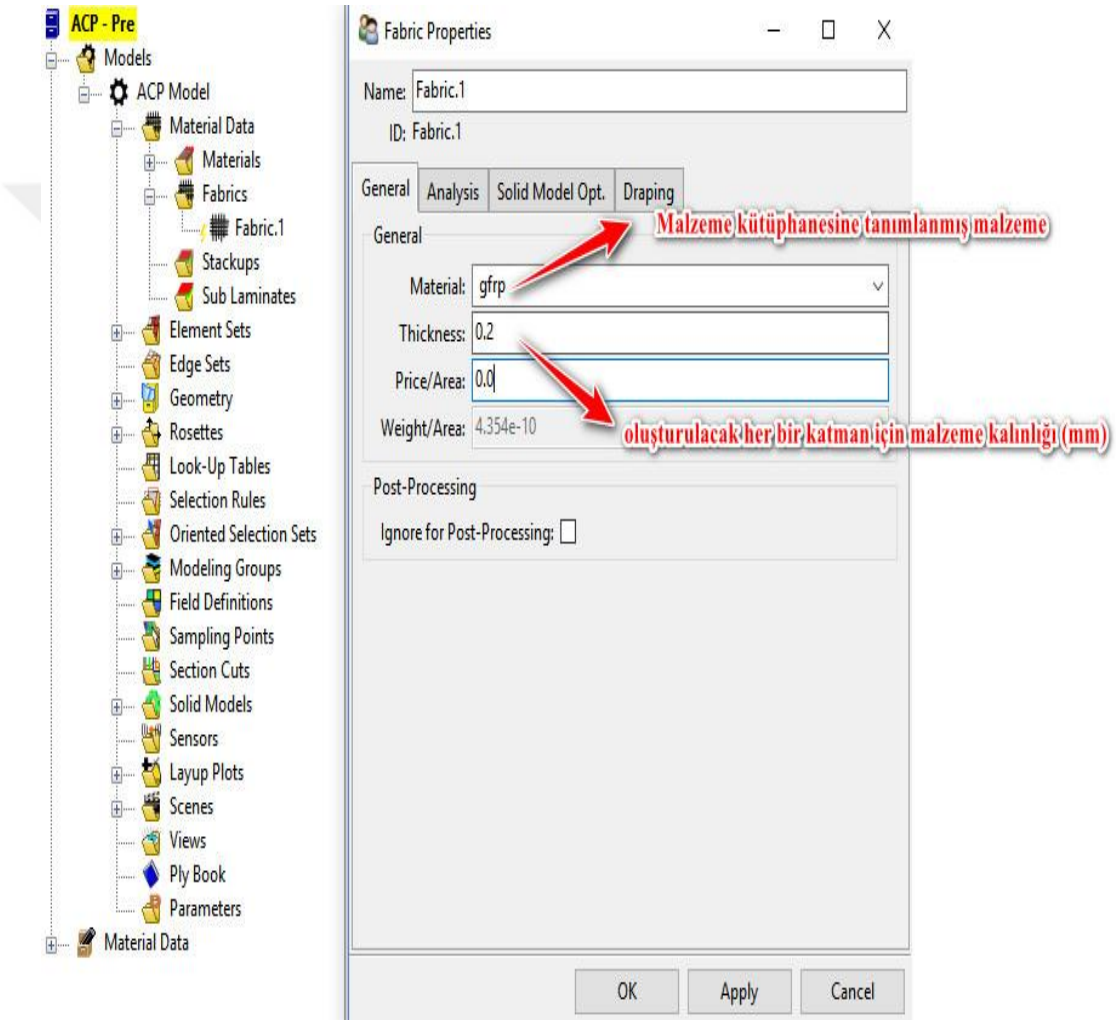


Şekil 2.32. Çap 5 mm için elyaf yığıntısı yüzey modelinin oluşturulması

Yüzey modeli oluşturulduktan sonra ACP (Ansys Composite Pre/Post) modülünden 2 katmanlı elyaf yığıntısı kompozit malzeme katı modeli oluşturulmuştur.

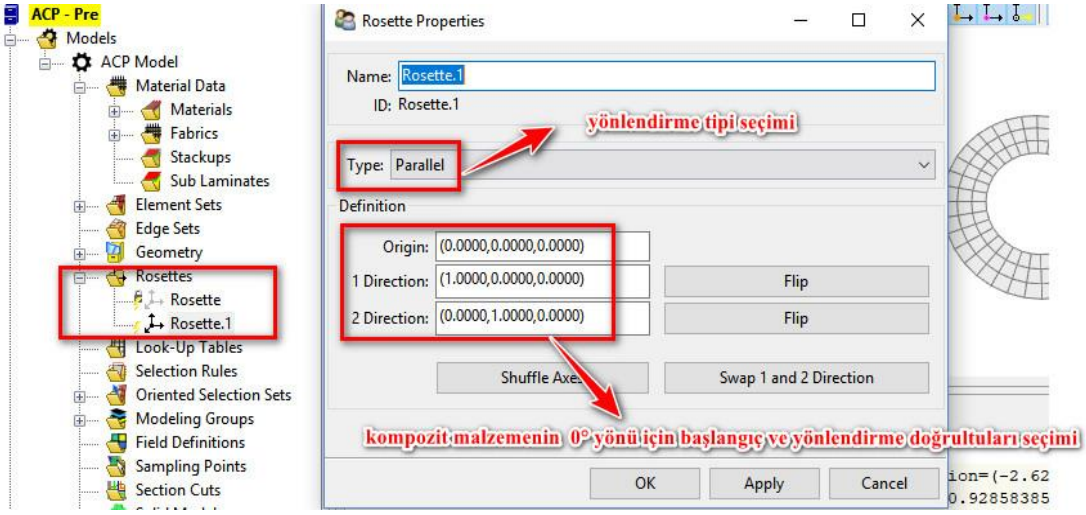
ACP modülünden elyaf yığıntısı katı modeli oluşturulurken sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir;

Fabrics menüsünden kumaş ayarları yapılmaktadır. Şekil 2.24'de görüldüğü gibi malzeme seçimi olarak malzeme kütüphanesine tanımladığımız GFRP malzemesi seçilmiştir ve oluşturulacak her bir katman için kullanılacak kumaş kalınlık değeri olan 0,2 mm girilmiştir.



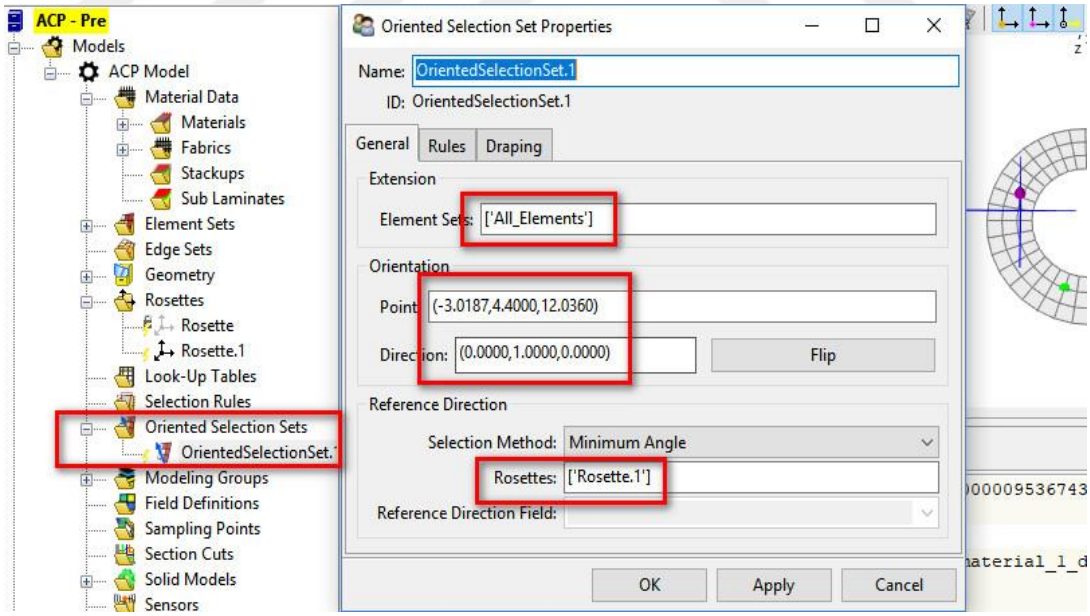
Şekil 2.33. Elyaf yığıntısı kumaş ayarlarının yapılması

Rozetler menüsünden malzemenin 0° yönünü tanımlamak için rozet seçimi yapılmıştır. Şekil 2.34'de görüldüğü gibi rozet tipi olarak, deney sisteminde malzemeyi hazırladığımız gibi paralel yönlendirme seçilmiştir. Daha sonra elyaf yığıntısı için koordinat sisteminde orijin ve yönlendirme doğrultuları seçimleri yapılmıştır.



Şekil 2.34. Elyaf yığıntısı rozet ayarlarının yapılması

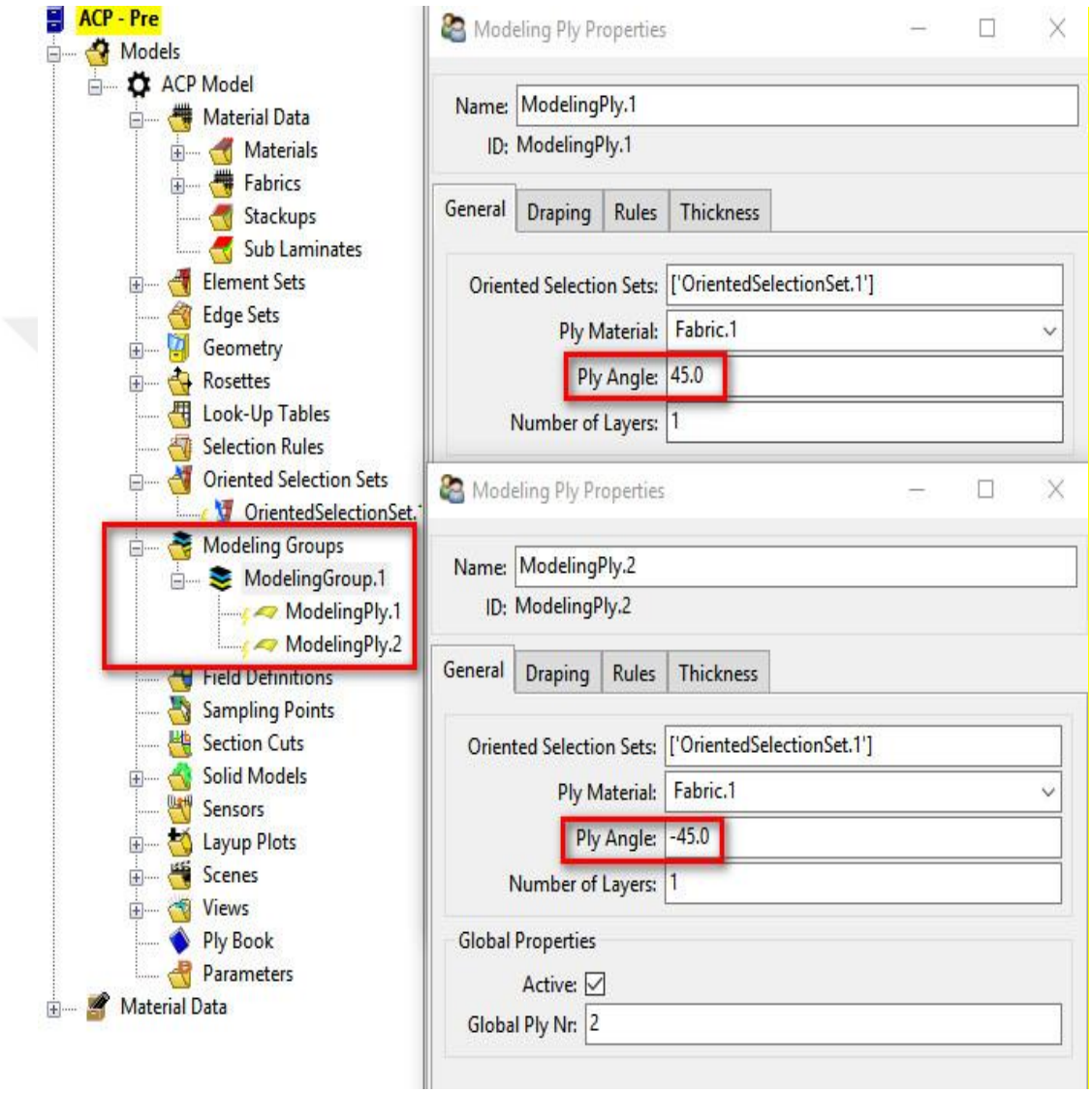
Yönlendirilmiş seçim kümeleri menüsünden elemanların referans yönünü ayarları yapılmıştır. Şekil 2.35'de görüldüğü gibi eleman kümesi olarak yüzey modelini oluşturduğumuz elyaf yığıntısı yüzey modelindeki eleman kümesinin tamamı seçilmiştir. Yönlendirme noktası ve doğrultu seçimleri yapılmıştır. Son olarak da referans yönü olarak bir önceki adımda oluşturduğumuz rozet seçilmiştir.



Şekil 2.35. Elyaf yığıntısı yönlendirilmiş seçim kümeleri ayarlarının yapılması

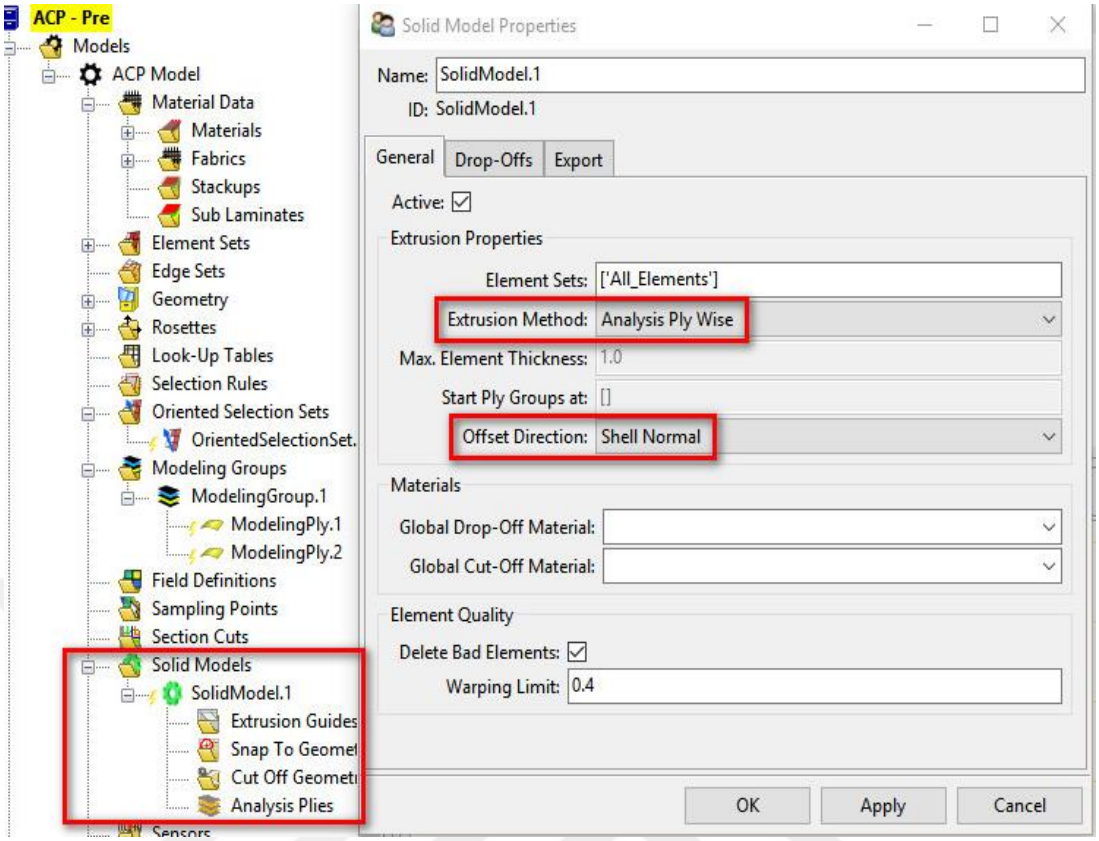
Şekil 2.36'da görüldüğü gibi modelleme grubu olarak tek malzeme gurubu tanımlanmıştır. Bu modelleme grubunun altında 2 adet katman oluşturulmuştur. Her bir katman için yönlendirilmiş seçim kümesi ve tanımladığımız kumaş malzemesi

seçimleri yapılmıştır. Delikli imal edilmiş kalıplarda delik oluşturmak için yerleştirilen pimlerin etkisiyle bu bölgelerdeki elyaf dağılımları değişerek pimin şeklini almak için teğet olacak şekilde yönlendiği için elyaf yönlendirme açısı olarak [45°/- 45°] kullanılmıştır.

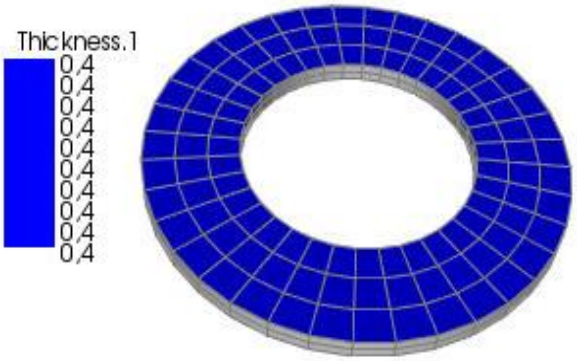


Şekil 2.36. Elyaf yığıntısı modelleme grubu ayarlarının yapılması

Şekil 2.37'de görüldüğü gibi katı model oluşturmak için ilk olarak oluşturduğumuz yönlendirilmiş seçim kümesi seçilmiştir. Ekstrüzyon yöntemi için ise her bir katmanı tek bir eleman katmanı olarak birleştiren analiz katmanı yöntemi seçilmiştir. Öteleme doğrultusu olarak katman yüzeylerini yansıtması için kabuk normal seçilmiştir. Böylelikle Şekil 2.38 'de görüldüğü gibi elyaf yığıntısı katı modeli oluşturulmuştur.



Şekil 2.37. Elyaf yığıntısı katı model ayarlarının yapılması



Şekil 2.38. Elyaf yığıntısı katı modeli

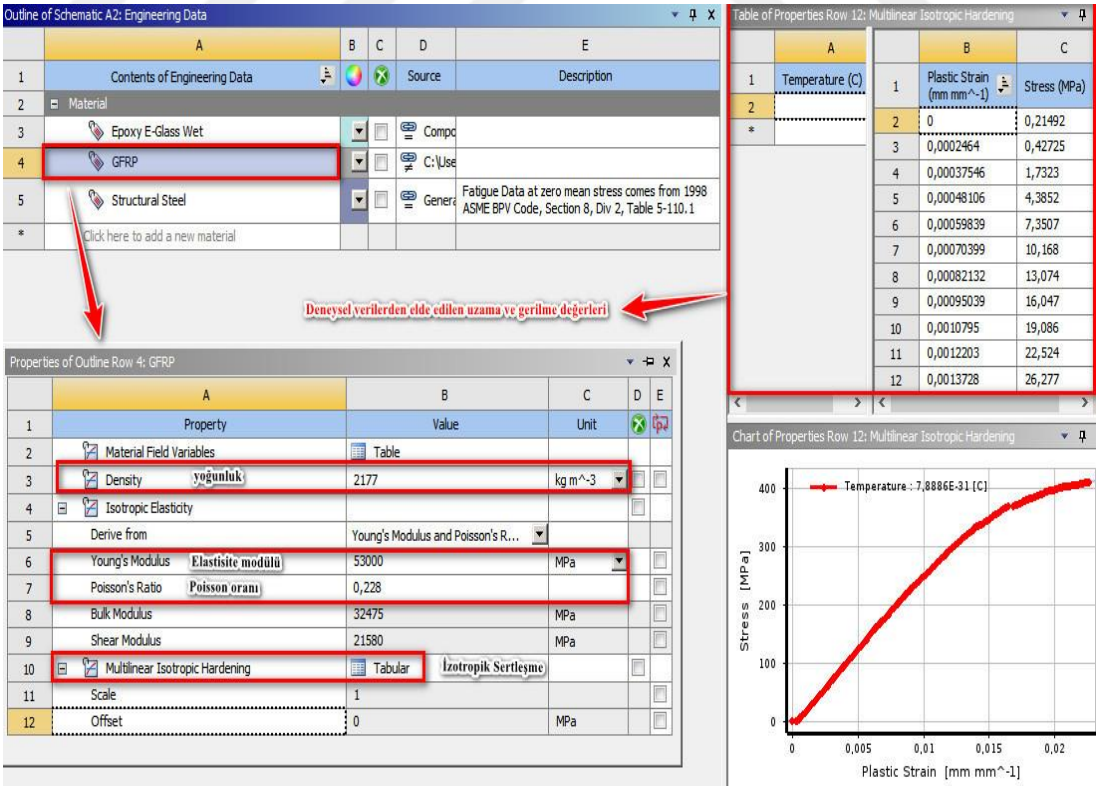
2.5.2. Malzeme modeli oluşturma

Sonlu elemanlar yazılım programları içerisinde kullanılacak malzemelerin özelliklerinin tanımlanması aşamasıdır. Bu özellikler belirli yük altında analizi gerçekleştirilen yapının mekanik davranışlarını belirleyen yoğunluk, elastisite modülü , poisson oranı ve ısıl genleşme katsayısı gibi özelliklerdir.

Bu çalışmada kullanılan elasto-plastik (kompozit) malzeme, Ansys malzeme kütüphanesinde tanımlı bir malzeme olmadığı için yeni bir malzeme modeli oluşturulmuştur.

Malzeme modeli oluşturmak için ilk olarak yeni malzeme ekle seçeneğinden malzeme adı olarak "GFRP" adı yazılarak yeni malzeme adı tanımlanmıştır. Malzeme özelliklerini tanımlayan değerler sırasıyla girilmiştir. İlk olarak Tablo 2.1'de belirtilen, deneysel verilerden elde edilen yoğunluk, elastisite modülü, poisson oranı değerleri el ile sisteme girilmiştir. Daha sonra deneysel verilerden elde edilen, elasto-plastik malzemeye ait izotropik sertleşme özelliklerini belirleyen gerilme ve gerinme değerleri tablo halinde sisteme yüklenmiştir. Bu değerler sırasıyla girildikten sonra elasto-plastik (kompozit) malzeme modeli, Ansys malzeme kütüphanesine tanımlanmıştır.

Delikli imal edilmiş kompozit plakalardaki delik etrafında oluşan elyaf yığıntısı etkisini temsil etmek oluşturulan model için de malzeme olarak malzeme kütüphaneye tanımladığımız "GFRP" malzeme modeli kullanılmıştır.



Şekil 2.39. Elasto-plastik (kompozit) malzeme modeli oluşturma aşamaları

Mesnetlerde ise malzeme modeli olarak Ansys malzeme kütüphanesine tanımlı olan yapı çeliği malzemesi kullanılmıştır.

2.5.3. Sonlu elemanlar ağ örgüsü oluşturma

Bu aşamada kullanılacak analiz türüne ve yapının geometrik şekline uygun eleman tipi, eleman sayısı ve eleman boyutları belirlenerek yapı sonlu sayıda elemana bölünmektedir. Uygun eleman seçimi problem çözümü üzerinde doğrudan etkilidir.

Sonlu eleman modelinin oluşturulması geometrik yapının önceden davranışı belirlenmiş belirli sayıda elemana bölünmesi (meshing) olarak tanımlanmaktadır.

Günümüzde sonlu eleman yazılımlarının bazıları oluşturulan model geometrisine uygun olarak eleman tipini ve elemanın boyutlarını otomatik olarak tanımlama imkanı sunmaktadır.

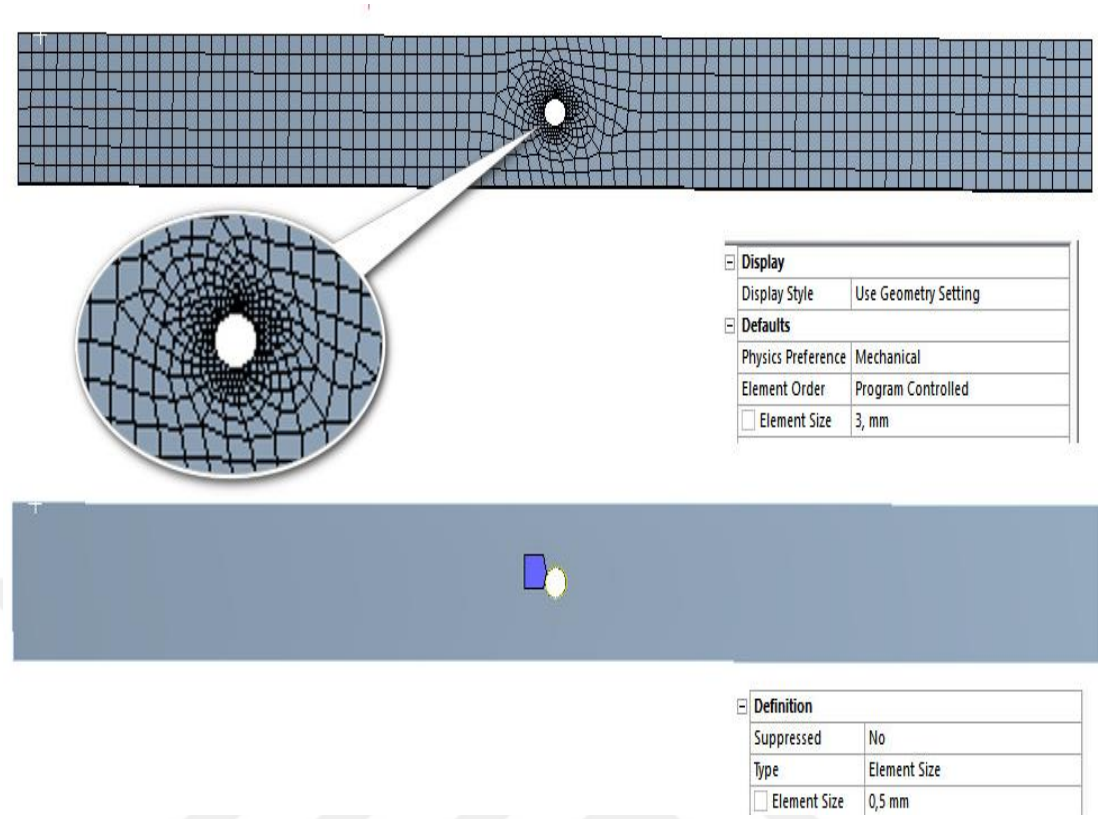
Bu çalışmada eleman tipi olarak oluşturulan geometrik modellere uygun olacak şekilde program kontrollü olarak otomatik seçilmiştir.

Eleman boyutu olarak geometrik modellerin tamamında 3 mm değeri seçilmiştir. Delik kenarlarında ise eleman boyutu olarak 0,5 mm değeri seçilmiştir (Şekil 2.40, Şekil 2.41, Şekil 2.42, Şekil 2.43.).

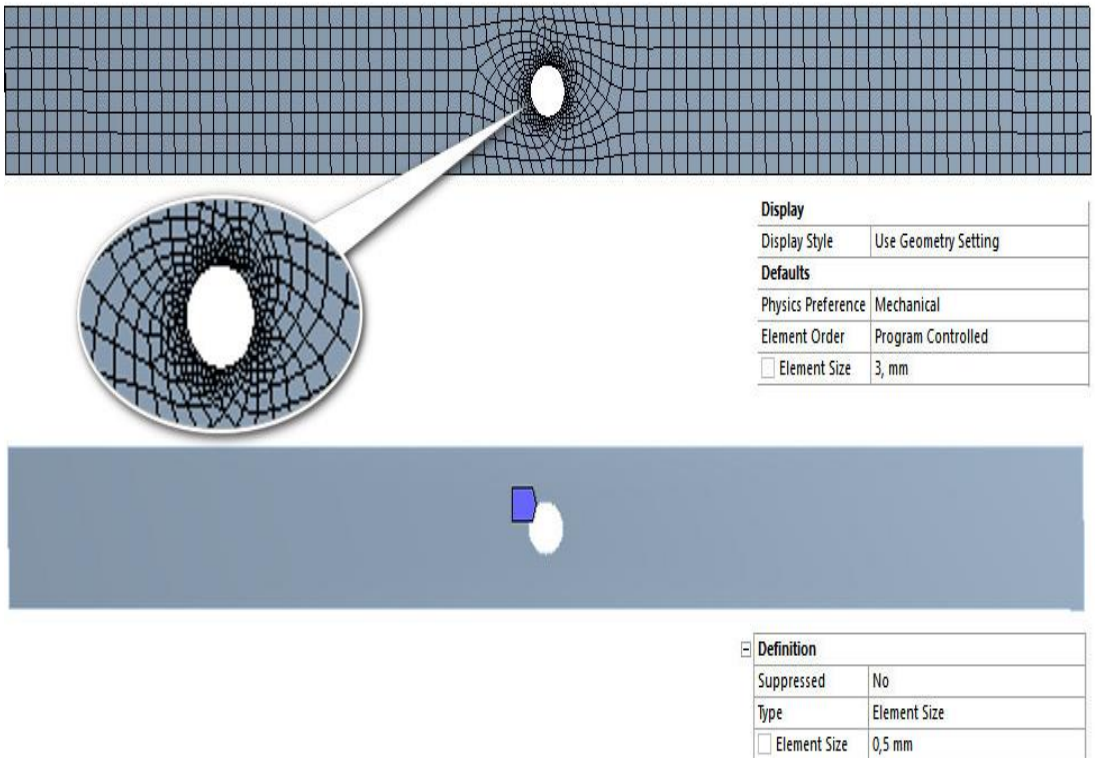
Tablo 2.4'de sonlu elemanlar modelinde kullanılan ağ örgüsü detayları görülmektedir.

Tablo 2.4. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan ağ örgüsü

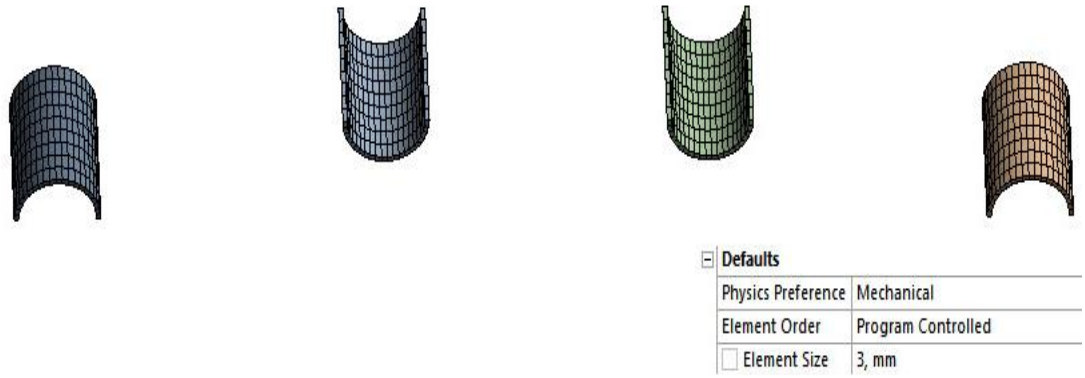
Düğüm sayısı	31409
Eleman sayısı	9780
Eleman tipi	Program kontrollü (Otomatik)



Şekil 2.40. Çap 5 mm için kompozit plaka eleman boyutlandırılması

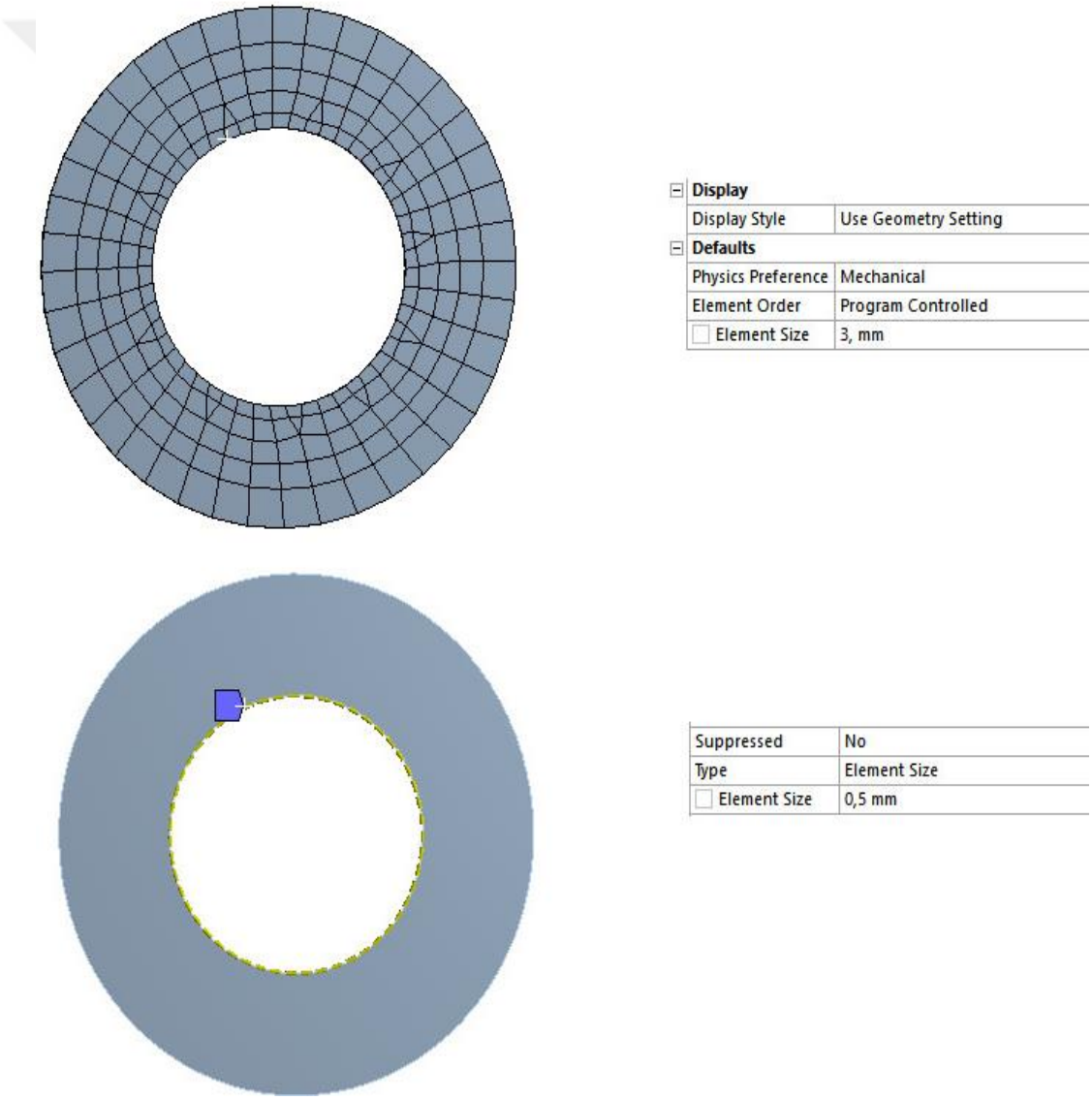


Şekil 2.41. Çap 8 mm için kompozit plaka eleman boyutlandırılması



Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	3, mm

Şekil 2.42. Mesnetler için eleman boyutlandırılması



Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	3, mm

Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	0,5 mm

Şekil 2.43. Elyaf yığıntısı için eleman boyutlandırılması

2.5.4. Yükleme ve sınır koşullarının oluşturulması

Modelin gerçekteki çalışma koşullarına uygun olan yükleme ve sınır koşullarının tanımlanması aşamasıdır.

- Kompozit plaka ve mesnetler arasındaki temas yüzeyi seçimleri:

Kompozit plaka ve mesnetler arasındaki temas yüzeyleri için Şekil 2.44'deki seçimler yapılmıştır.

Temas tipi : Sürtünmesiz temas seçilmiştir. Bu temasta sıfır bir sürtünme katsayısı olduğu varsayılarak serbest kaymaya izin verilmektedir. Sürtünmesiz temas ayarı kullanılırken kısıtlamalar uygun şekilde yapılmıştır.

Tespit metodu: İyi bir yakınsama elde etmek için analizde kullanılan temas tespit yerini seçmemizi sağlamaktadır.

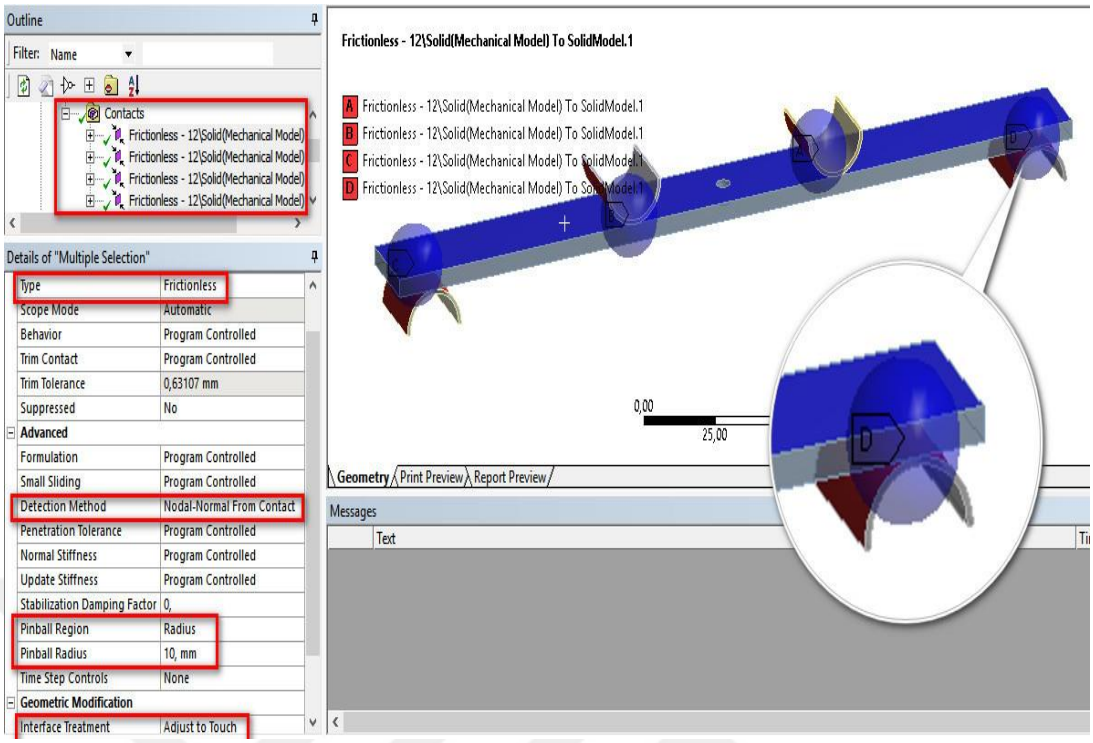
Bu çalışmada tespit metodu olarak temas normalinin temas yüzeyine dik olduğu düğüm noktası olan düğüm - normal temas kullanılmıştır.

Pinpall bölgesi: Program temas davranışının yeterince yakalandığından emin olmak için her türlü kontrol ve ayarları yapmaktadır.

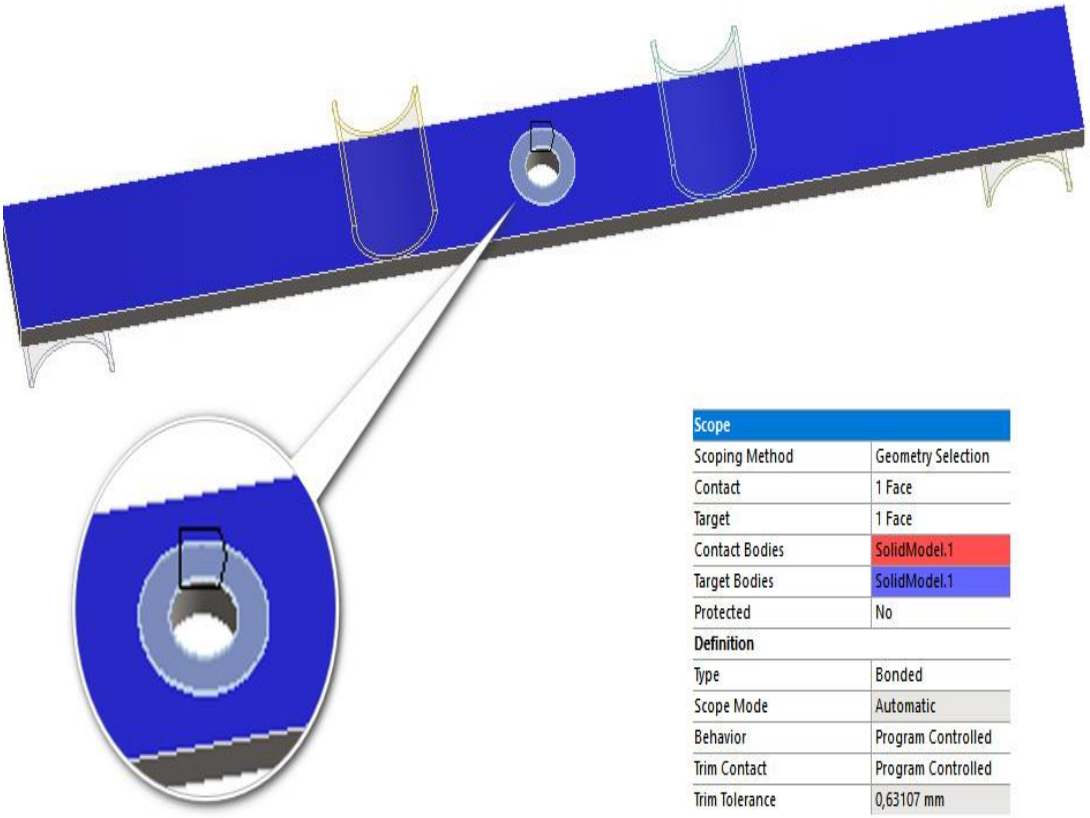
Yarıçap değeri el ile girilebilmektedir. Çalışmada mesnet yarıçapı olan 10 mm değeri pinpall yarıçapı olarak girilmiştir.

Arayüz işlemi: Bu ayar herhangi bir boşluk olsa bile (pinpall bölgesi içinde olduğu sürece) ilk temasın gerçekleşmesini sağlamak için kullanılmaktadır. Çünkü başlangıç boşluğu yok sayılsa bile doğrusal olmayan temas türleri içi yükleme sırasında hala boşluklar olabilmektedir. Arayüz işlemi olarak dokunma için ayarlanmıştır.

Delikli imal edilmiş plakalardaki sonlu elemanlar modelinde ek olarak elyaf yığıntısı modeli yer almaktadır. Delikli imal edilmiş plakalarda delik etrafında oluşan elyaf yığıntısı modeli ile kompozit plaka arasındaki temas yüzeyleri birbirine yapışık olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.45).

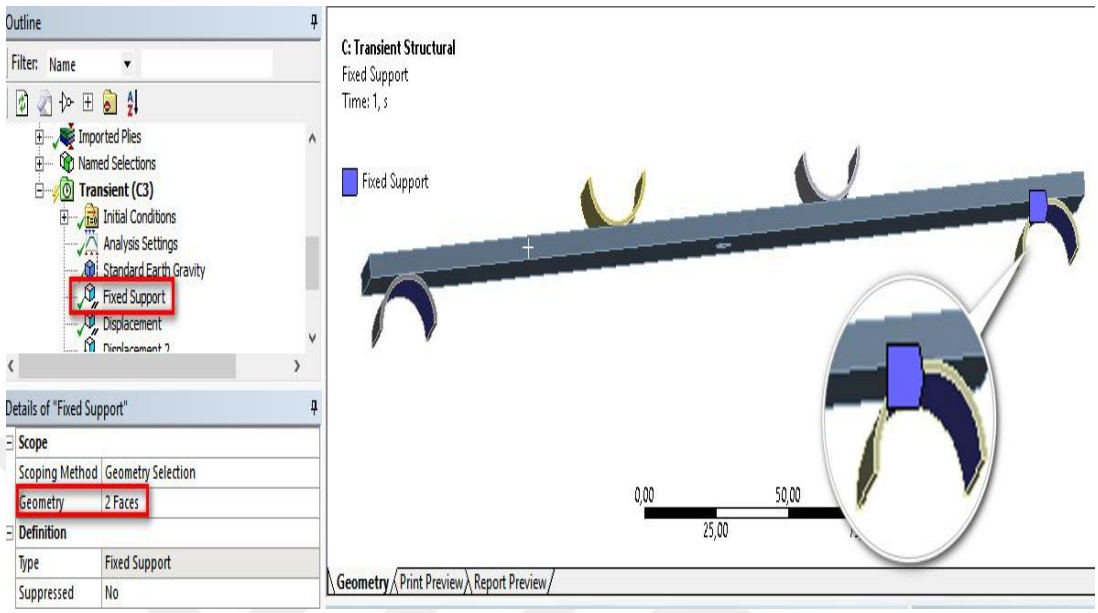


Şekil 2.44. Kompozit plaka ve mesnetler arasındaki temas yüzeyi seçimleri



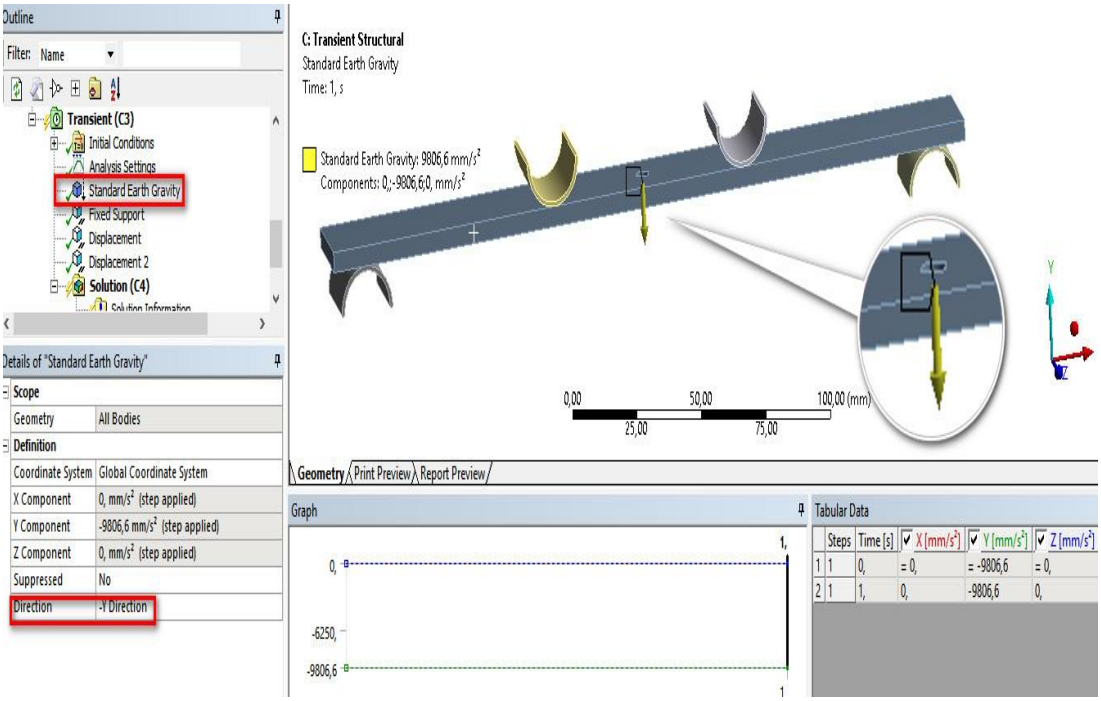
Şekil 2.45. Elyaf yığıntısı modeli ile kompozit plaka arasındaki temas yüzeyleri seçimi

Alt mesnetler Şekil 2.46'de görüldüğü gibi seçilerek sabit destek olarak tanımlanmıştır.



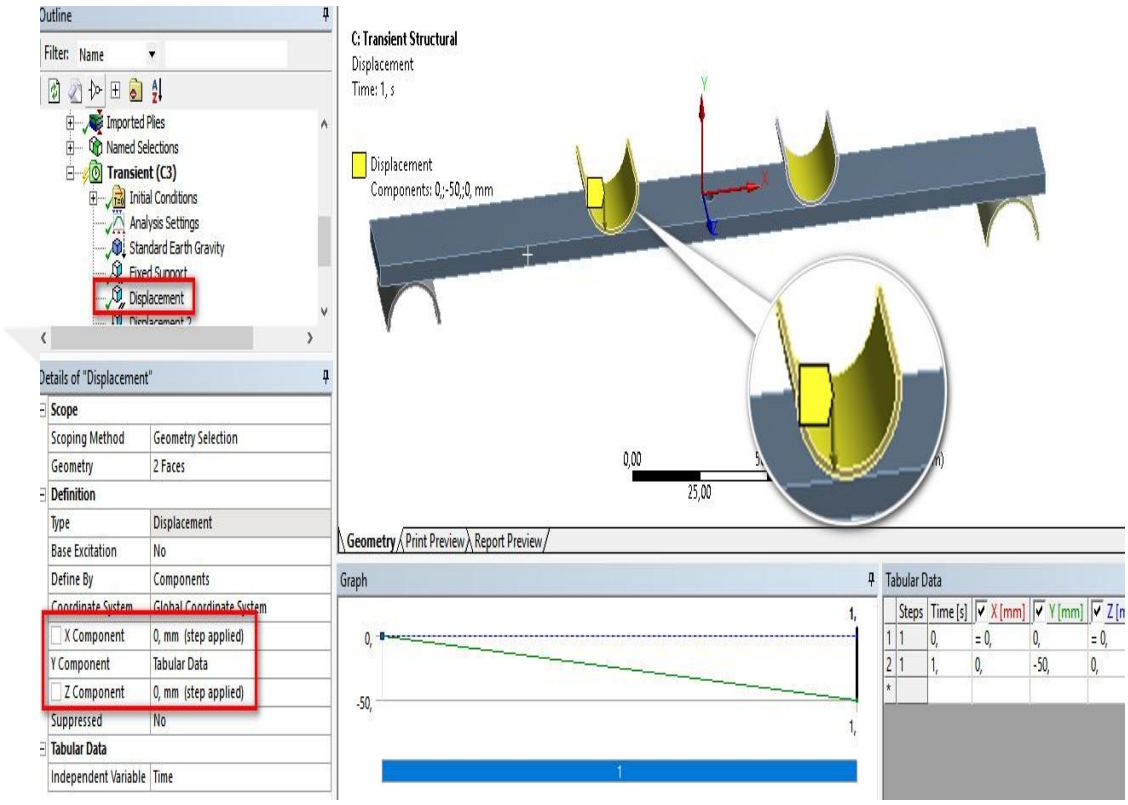
Şekil 2.46. Alt mesnetlerin sabit destek olarak tanımlanması

Kompozit malzemenin yer çekimi etkisiyle daha rahat eğilmesi için koordinat sisteminde -y doğrultusunda standart yer çekimi tanımlanmıştır (Şekil 2.47).



Şekil 2.47. Standart yer çekimi tanımlaması

Üst mesnetler seçilerek malzemenin düşey yönde kompozit malzemelerinin kırılma anına kadar gösterdikleri max sehim değerleri olan koordinat sisteminde düşey doğrultuda (-y) çap 5 mm numuneler için 40 mm ve çap 8 mm numuneler için 50 mm yer değiştirme değerleri adım olarak girilmiştir (Şekil 2.48).

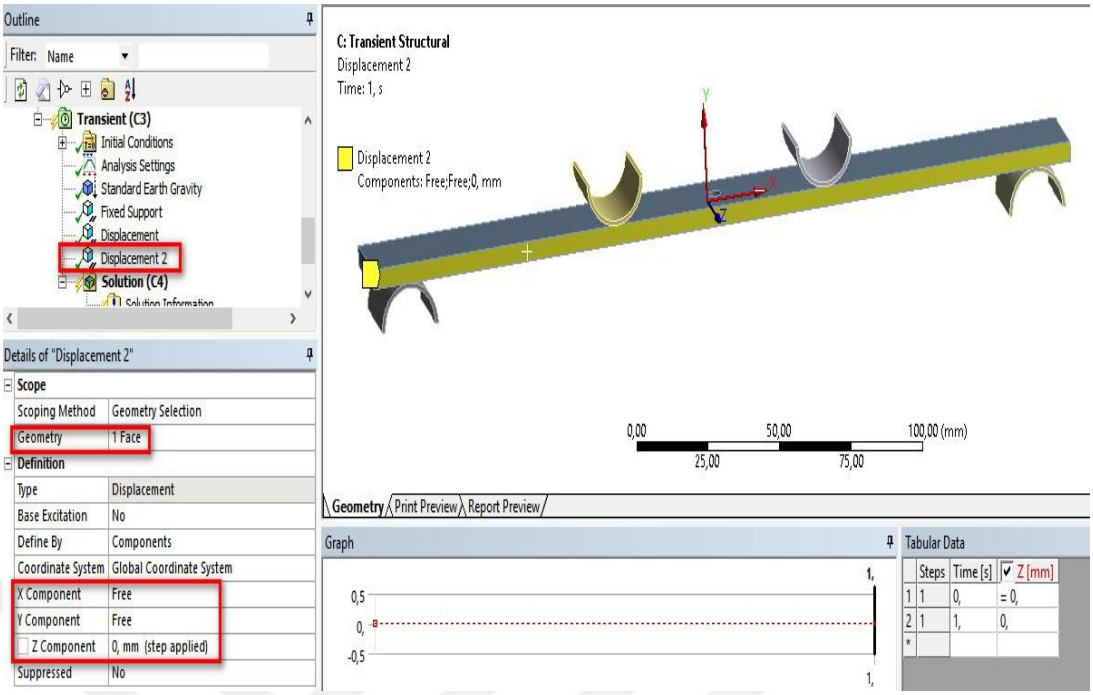


Şekil 2.48. Üst mesnetler için yer değiştirme ayarlarının yapılması

Malzemenin üst mesnetlerden koordinat sistemine göre düşey doğrultuda (-y) uygulanan yer değiştirme etkisiyle kompozit malzemedeki eğilmenin gerçekleşebilmesi için kompozit plakanın koordinat sistemine göre yatay doğrultuda (z) hareketini kısıtlamak gerekmektedir.

Bunun için de kompozit plakanın koordinat sistemine göre sadece z doğrultusunda hareketi ‘0’ değeri girilerek kısıtlanmıştır.

Böylelikle kompozit test malzemesi uygulanan yer değiştirmesiyle alt mesnet temas yüzeyleri üzerinde kaymadan rahat şekilde hareket edebilmesi sağlanmıştır (Şekil 2.49).



Şekil 2.49. Kompozit plaka için yer değiştirme ayarlarının yapılması

2.5.5. Çözüm ve sonuçlar

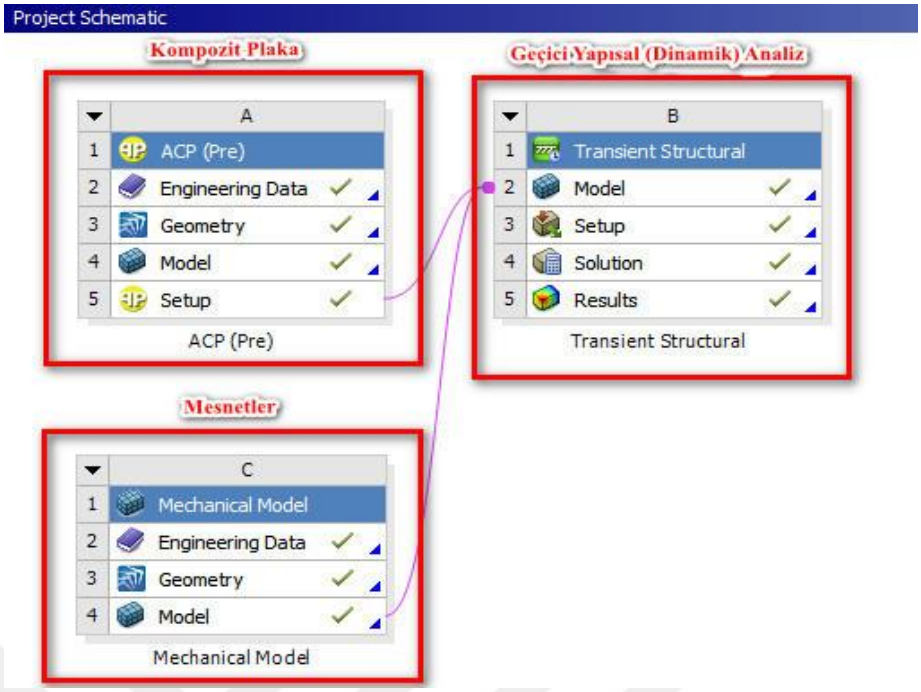
Bu aşama tanımlanan yükleme ve sınır şartları altında modelin sonlu sayıda oluşturulmuş elemanları arasında kurulan denklemlerin çözümlenmesi ve sonuçlarının ortaya çıkarılması işlemlerini içermektedir.

- Transient Structural Analysis (Geçici Yapısal/Dinamik Analiz) :

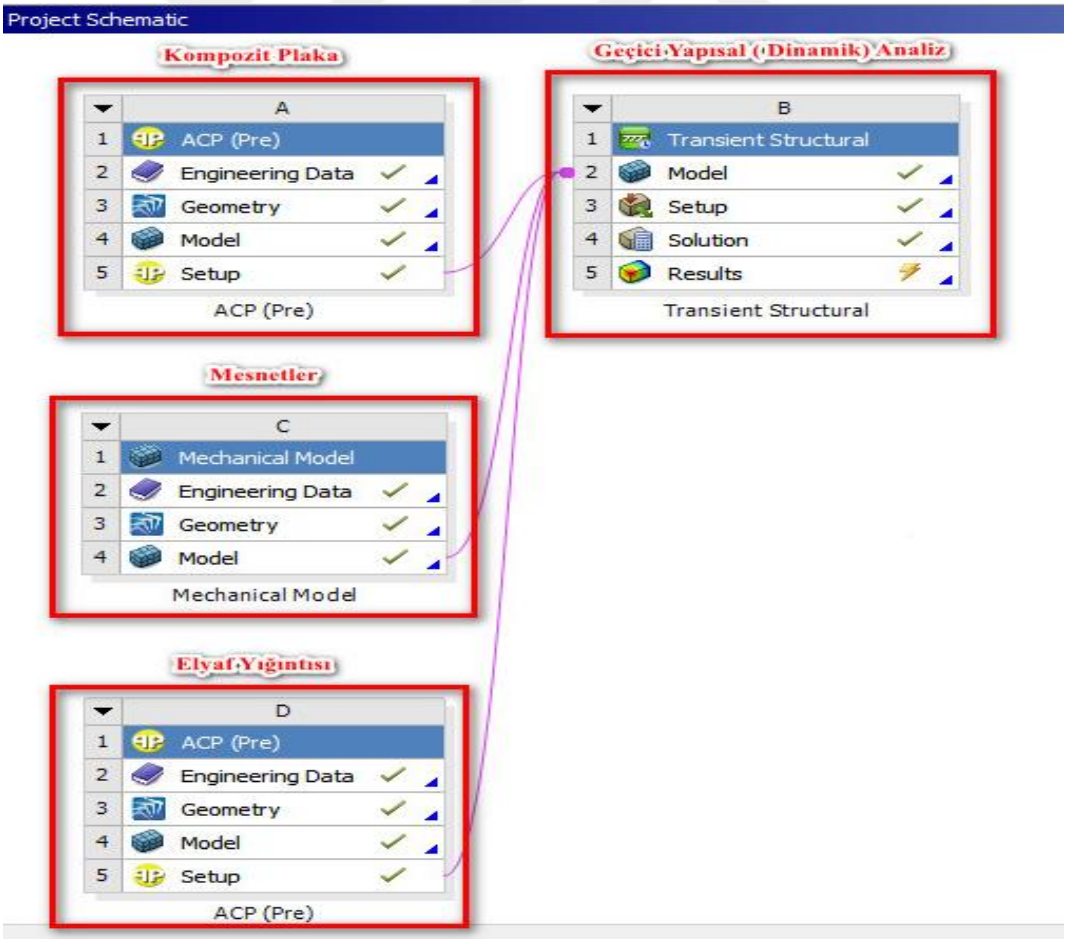
Geçici Yapısal/Dinamik Analiz, zaman içinde değişen yükün etkisi altında bir yapının dinamik tepkisini görmek için kullanılmaktadır. Sistem herhangi bir geçici yüke cevap verirken yapıdaki zamanla değişen yer değiştirmelerini, gerilmeleri ve kuvvetleri tespit etmek kullanılmaktadır. Yüklemenin zaman ölçeğinin, atalet veya sönümleme etkilerinin önemli olduğu kabul edilmektedir [52].

Oluşturulan sonlu eleman modelleri Ansys Geçici Yapısal (Dinamik) Analiz modülüne aktarılarak gerilme ve gerinme analizleri yapılmıştır (Şekil 2.50, Şekil 2.51).

Analiz tek bir adımda gerçekleştirilmiştir. Adım süresi olarak 1 s seçilmiştir. Alt adım sayısı olarak da minimum 20, maksimum 200 değerleri girilmiştir.



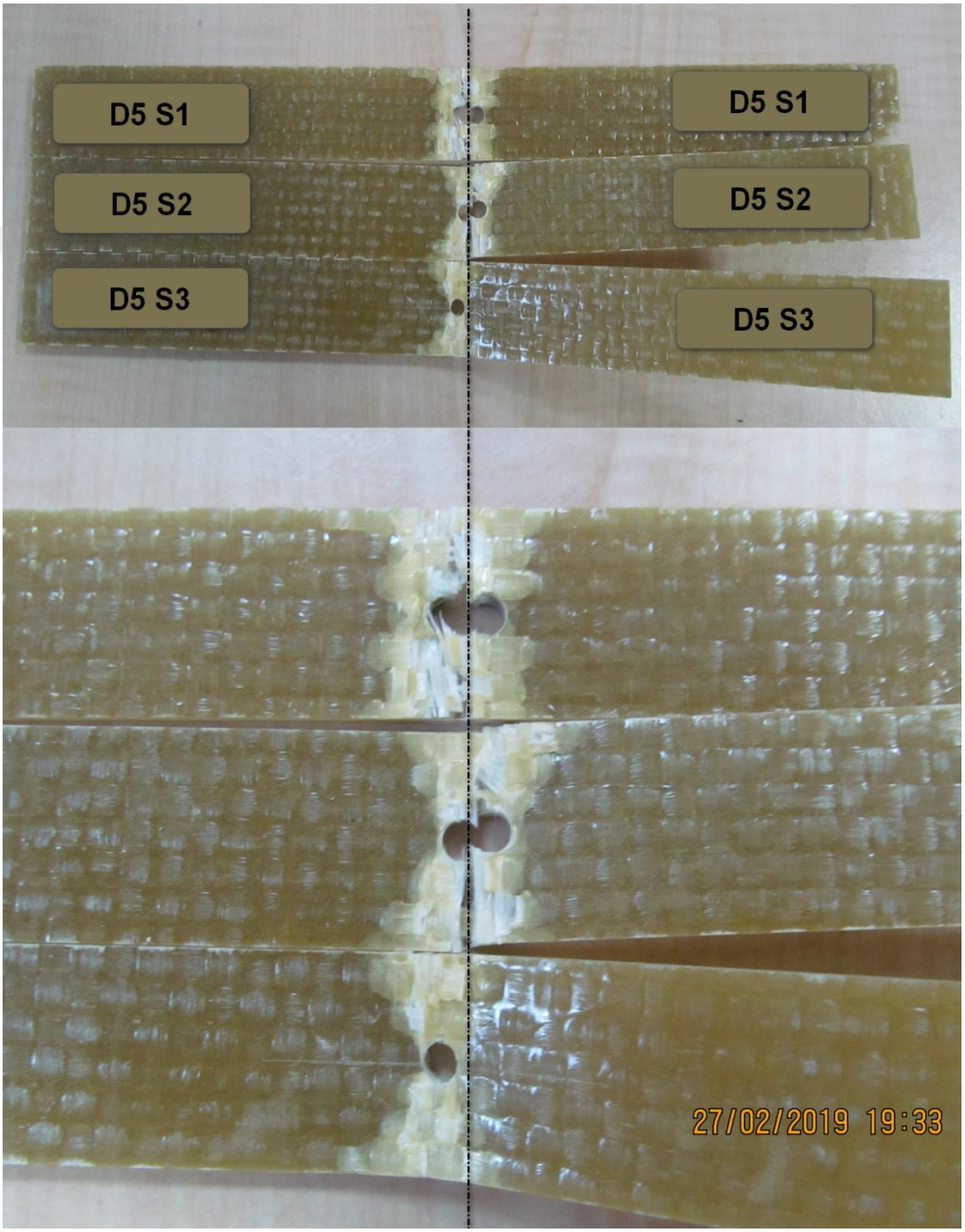
Şekil 2.50. Delinmiş numuneler için proje şeması



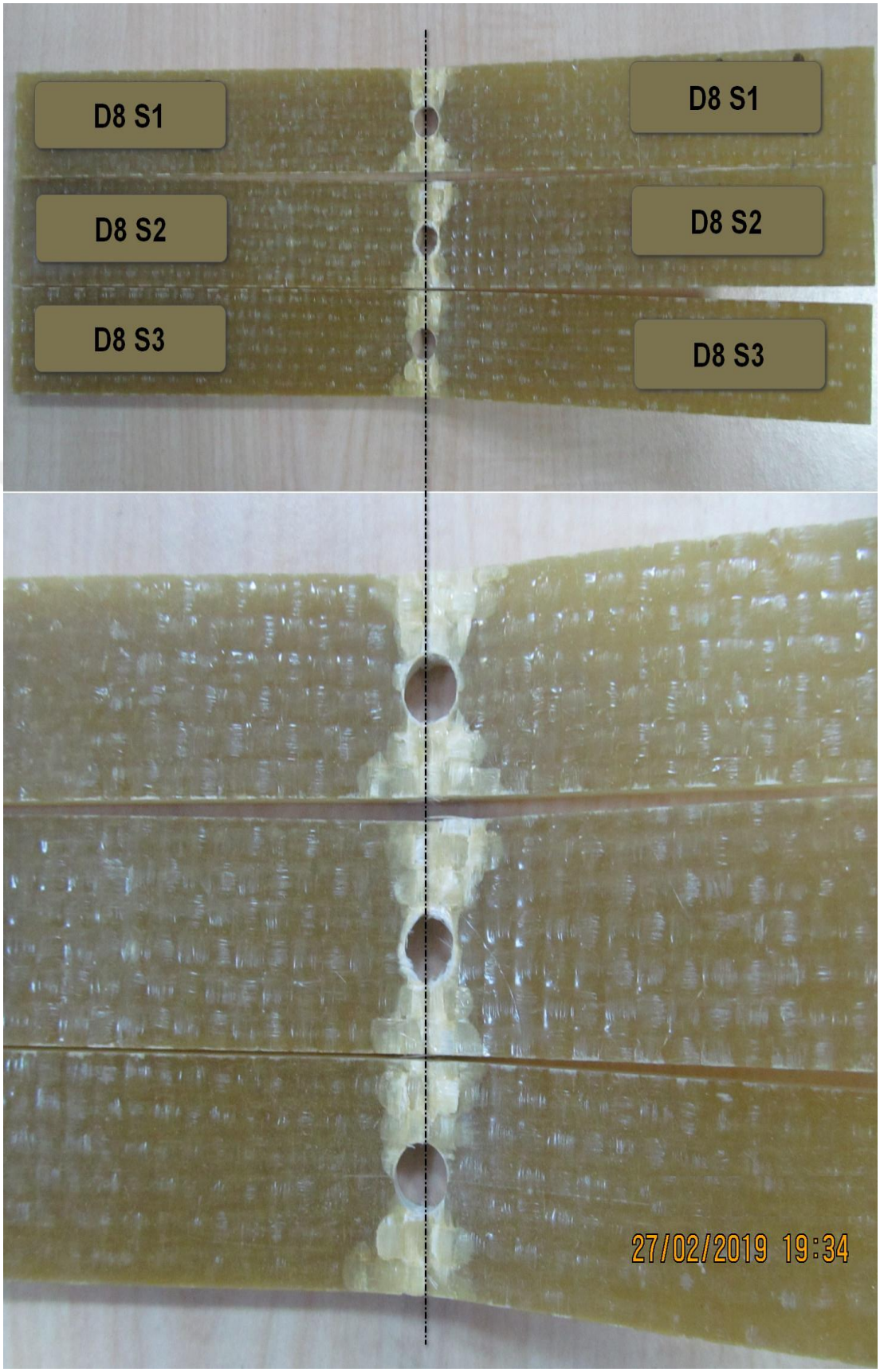
Şekil 2.51. Delikli numuneler için proje şeması

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

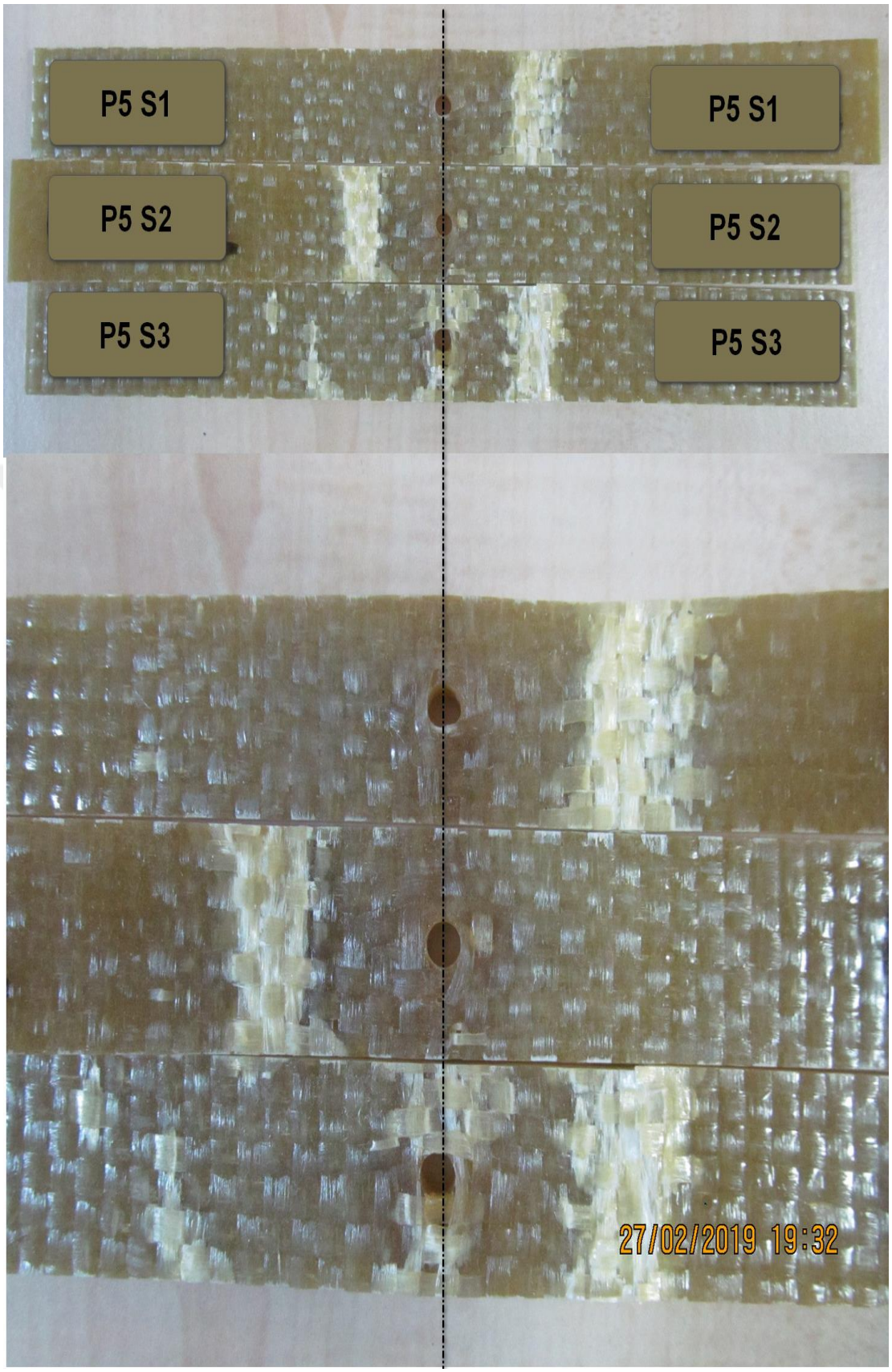
Şekil 3.1 , Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te dört nokta eğme testi sonrası delinmiş ve delikli kompozit numunelerde ait hasar oluşumları görülmektedir.



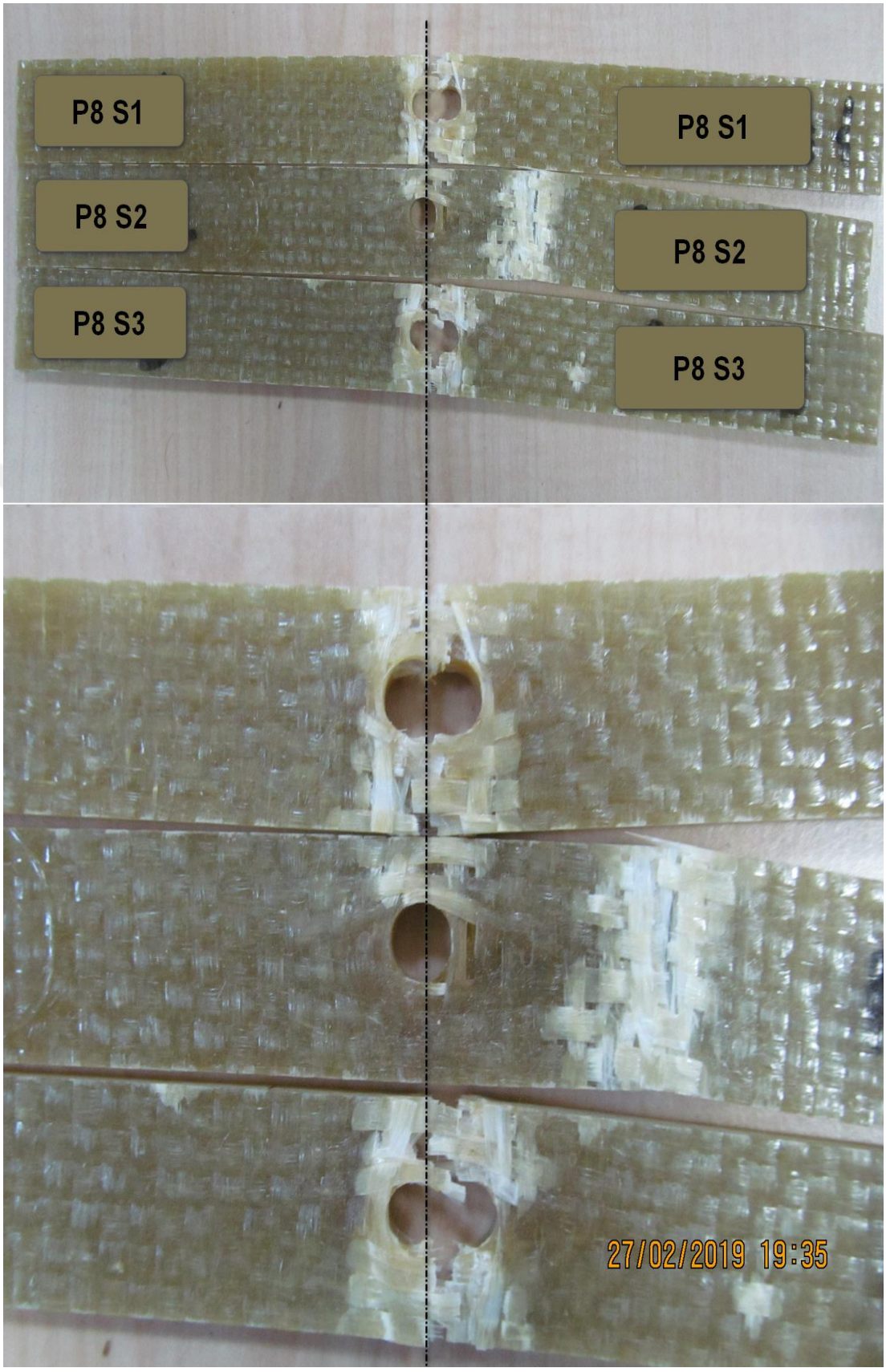
Şekil 3.1. Delinmiş numuneler (D5) için hasar oluşumları



Şekil 3.2. Delinmiş numuneler (D8) için hasar oluşumları



Şekil 3.3. Delikli imal edilmiş numuneler (P5) için hasar oluşumları



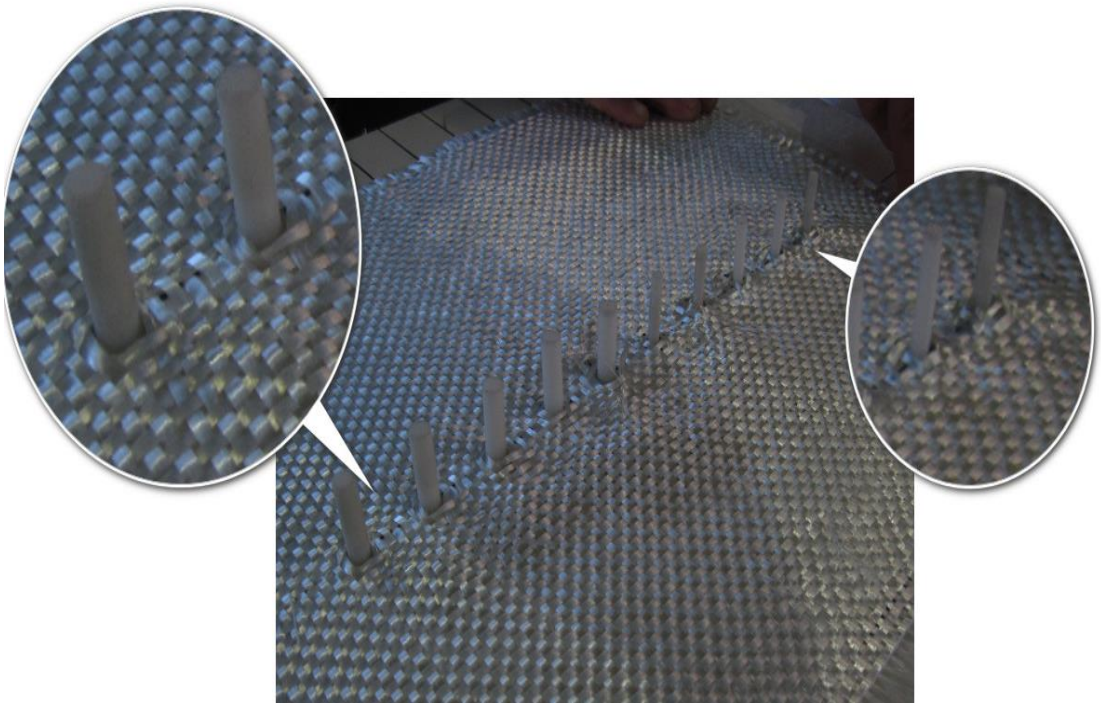
Şekil 3.4. Delikli imal edilmiş numuneler (P8) için hasar oluşumları

Dört nokta eğme testi sonrası oluşan hasar oluşumları incelendiğinde fiber sürekliği bozularak oluşturulmuş yani delinmiş numunelerin tamamı deliğin açıldığı yerden kırıldığı görülmüştür.

Fiber sürekliliği sağlanarak delikli üretilmiş numunelerde ise kırılmanın genelde delik oluşturulmuş yerde değil de deliğin sağında veya solunda meydana geldiği görülmüştür.

- Elyaf yığıntısı etkisi:

Şekil 3.5'de görüldüğü gibi delikli imal edilmiş kalıplar hazırlanırken cam elyaf demetleri delik oluşturulmak için kalıba yerleştirilmiş pimlerin üzerinden geçirilerek 8 katmanlı cam elyaf/epoksi kompozit malzeme oluşturulmuştur.



Şekil 3.5. Delikli imal edilmiş kalıplarda oluşan elyaf yığıntısı

Cam elyaf demetleri pimlerin üzerinden geçirilmesi için pimin olduğu bölgelerde, pim geçecek kadar cam elyaf demetleri koparılmadan açılarak elyaf demetlerinin pim üzerinden geçişi sağlanmıştır. Cam elyaf demetlerindeki açılmaya bağlı olarak da pimin olduğu bölgelerde fiber yönlendirme açılarının değiştiği gözlemlenmiştir.

Her bir cam elyaf demeti/ epoksi reçine katmanı üst üste gelince bu etkiyle beraber pimlerin olduğu bölgelerde kompozit malzemenin kesit alanının, diğer bölgelerin kesit alanına göre daha kalın bir yapı oluşturduğu görülmüştür. Cam elyaf demetlerinin pim etkisiyle yoğunlaşarak oluşturduğu bu bölgelere elyaf yığıntısı denilmiştir.

Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 da kompozit malzeme numuneleri için dört nokta eğme test cihazı ölçüm verilerinden yola çıkarak oluşturulmuş gerilme - şekil değiştirme grafikleri görülmektedir.

Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 de kompozit malzeme numuneleri için dört nokta eğme test cihazı ölçüm verilerinden yola çıkarak oluşturulmuş yük - sehim grafikleri görülmektedir.

Şekil 3.14, Şekil 3.16, Şekil 3.18 ve Şekil 3.20 de kompozit malzeme numuneleri için oluşturulmuş FEM gerilme analizi sonuçları görülmektedir.

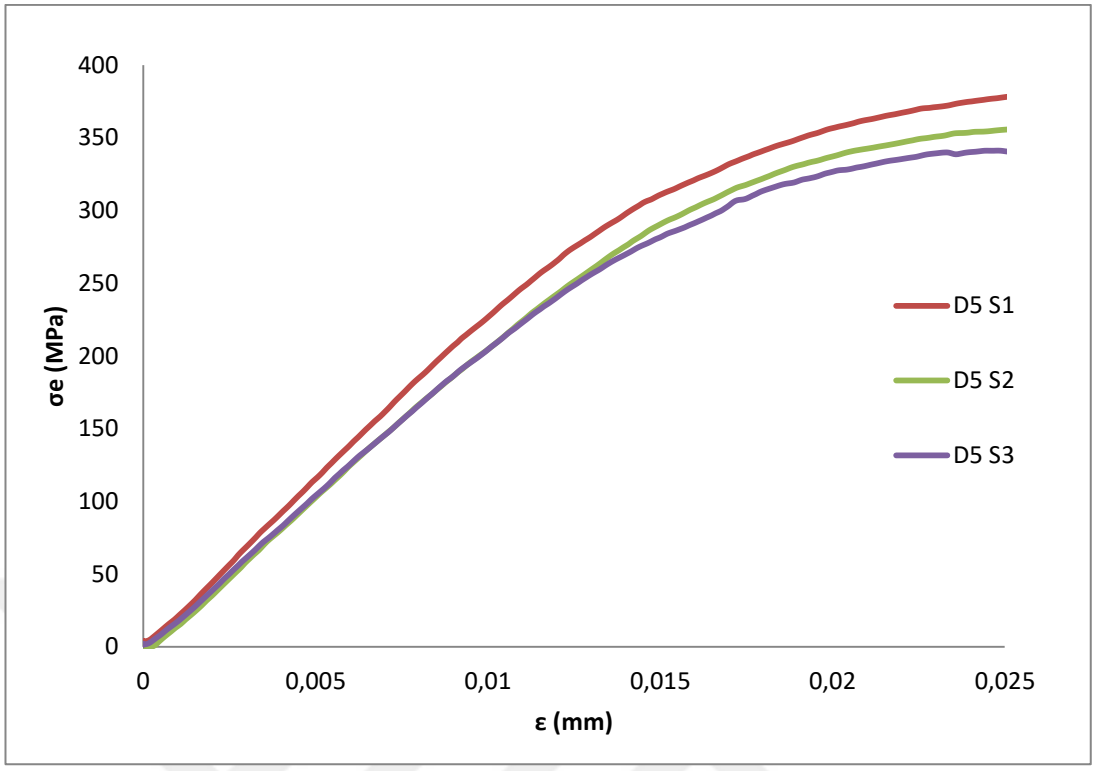
Şekil 3.15, Şekil 3.17, Şekil 3.19 ve Şekil 3.21 de kompozit malzeme numuneleri için oluşturulmuş FEM gerinme analizi sonuçları görülmektedir.

Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25 de kompozit malzeme numuneleri için oluşturulmuş FEM gerilme ve gerinme analizi sonuçlarından yola çıkılarak oluşturulmuş gerilme - gerinim grafikleri yer almaktadır.

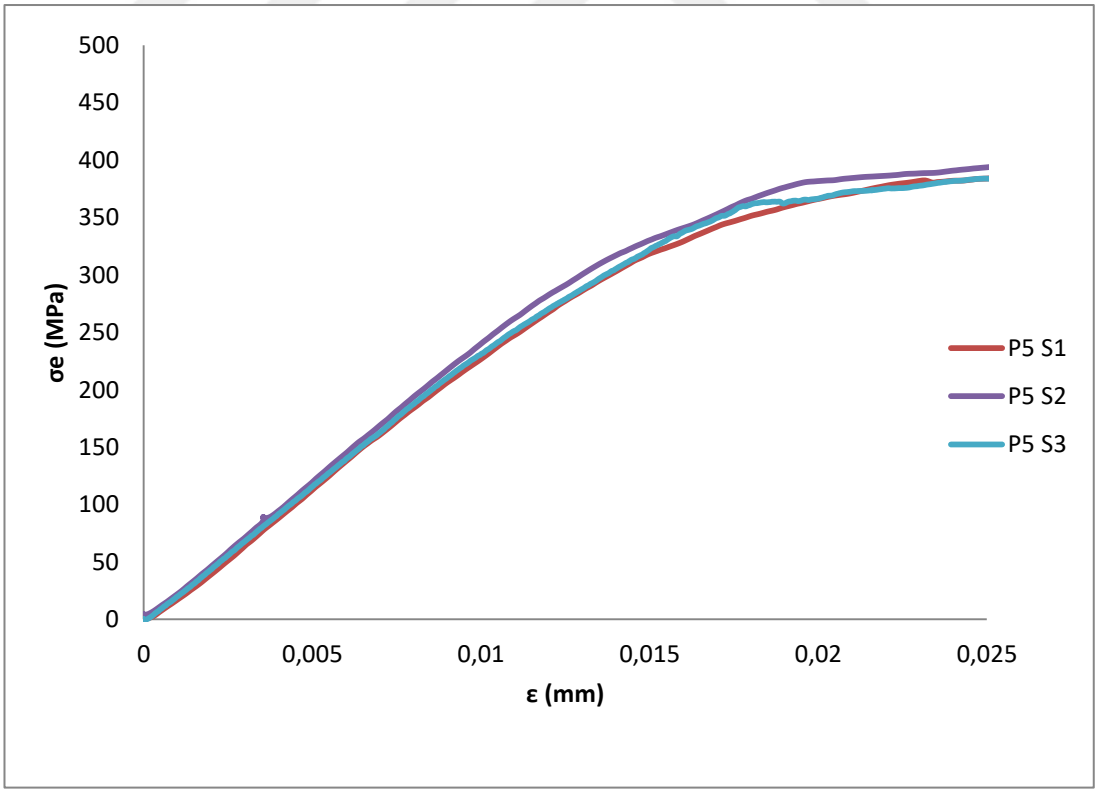
Maksimum gerilmelerin çentik faktörü, gerilme yığılması faktörü ve fiber yönlendirme doğrultusuna bağlı olarak delik etrafında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.

Grafikler incelendiğinde delinmiş ve delikli üretilmiş numuneler de ortak olarak çap büyüklüğü arttıkça max gerilme değerlerinde artış olduğu görülmektedir.

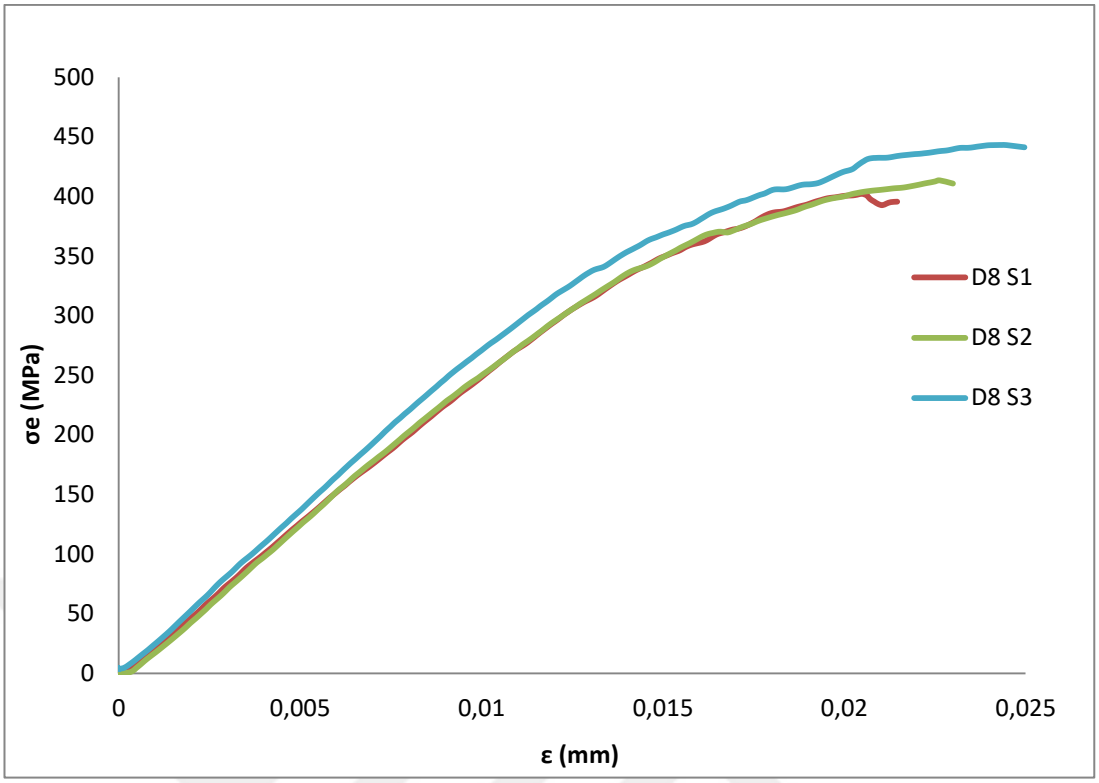
Aynı çaplar için delinmiş ve delikli imal edilmiş numuneler karşılaştırıldığında ise delikli imal edilmiş numunelerin max gerilme değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür. Grafikler incelendiğinde delinmiş ve delikli üretilmiş numuneler de ortak olarak çap büyüklüğü arttıkça malzemenin kırılması için gerekli yük değerlerinin arttığı görülmüştür.



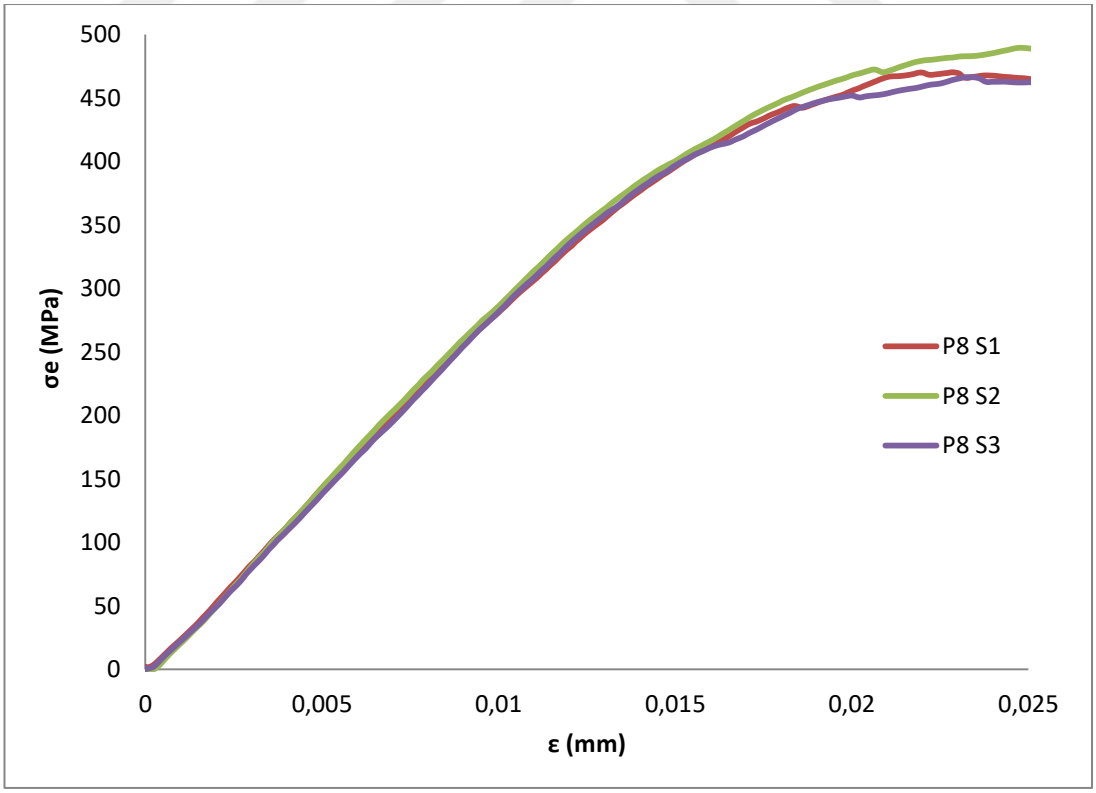
Şekil 3.6. Delinmiş (D5) numunelere ait deneysel gerilme - gerinme grafikleri



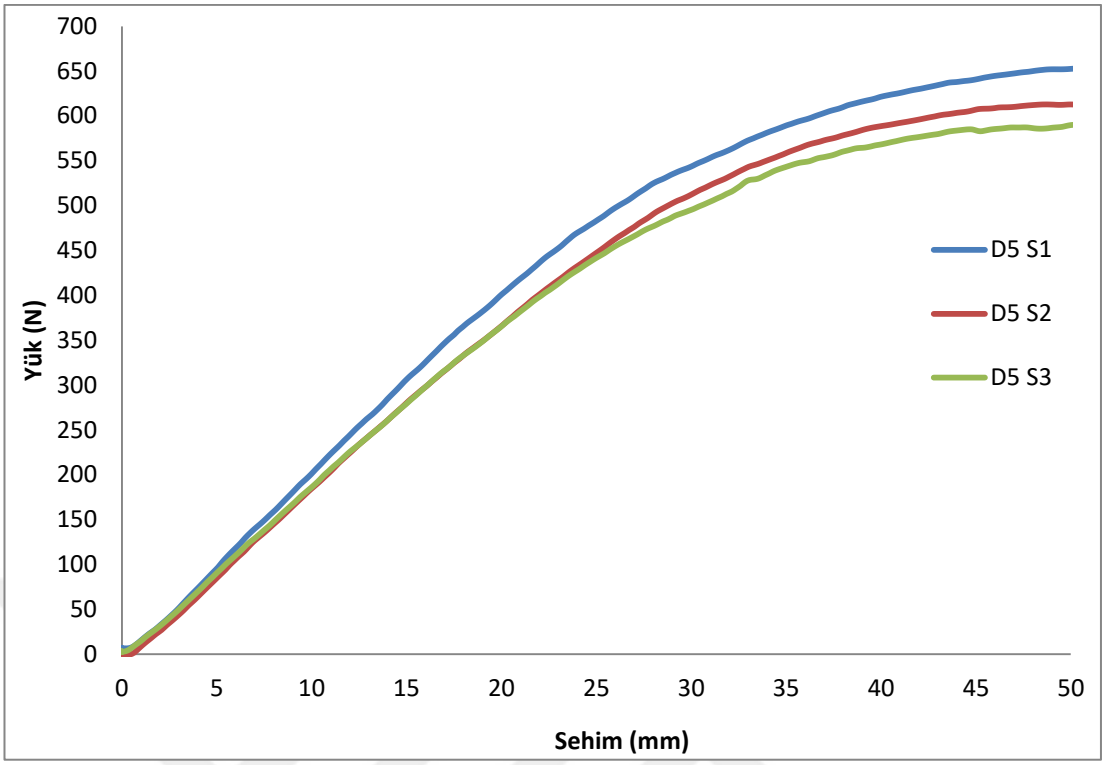
Şekil 3.7. Delikli imal edilmiş (P5) numunelere ait deneysel gerilme - gerinme grafikleri



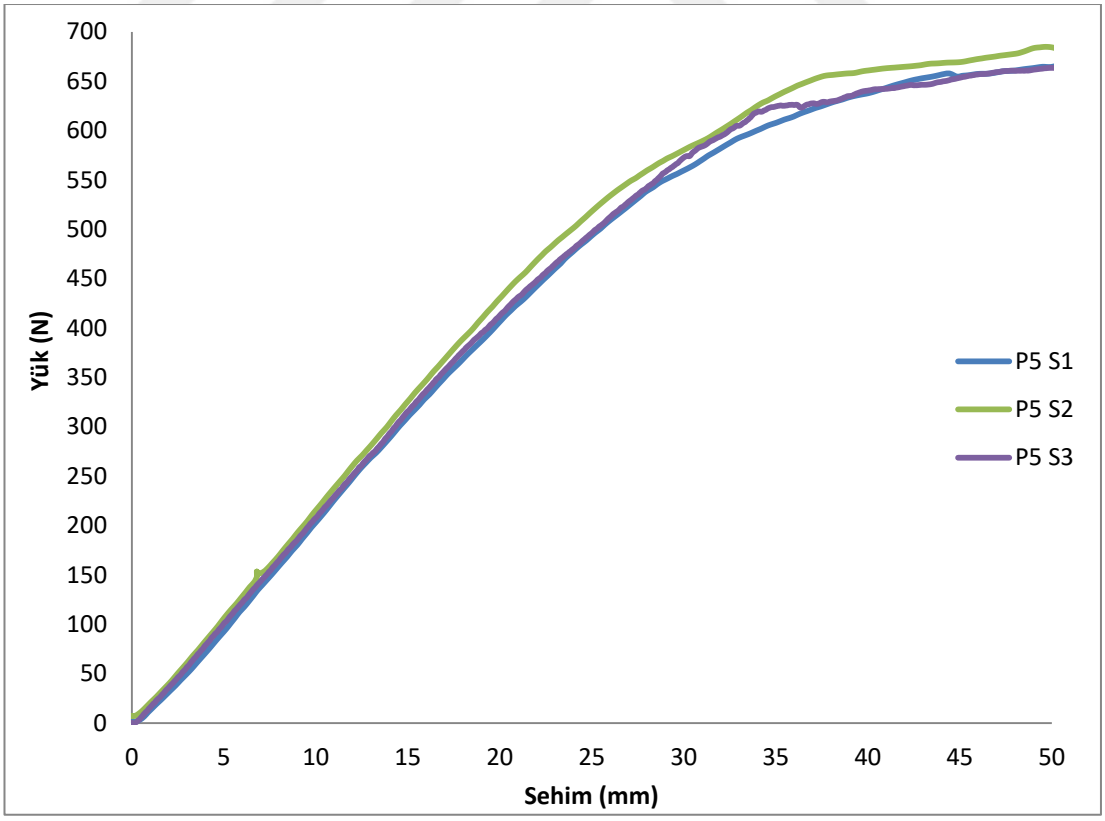
Şekil 3.8. Delinmiş (D8) numunelere ait deneysel gerilme - gerinme grafikleri



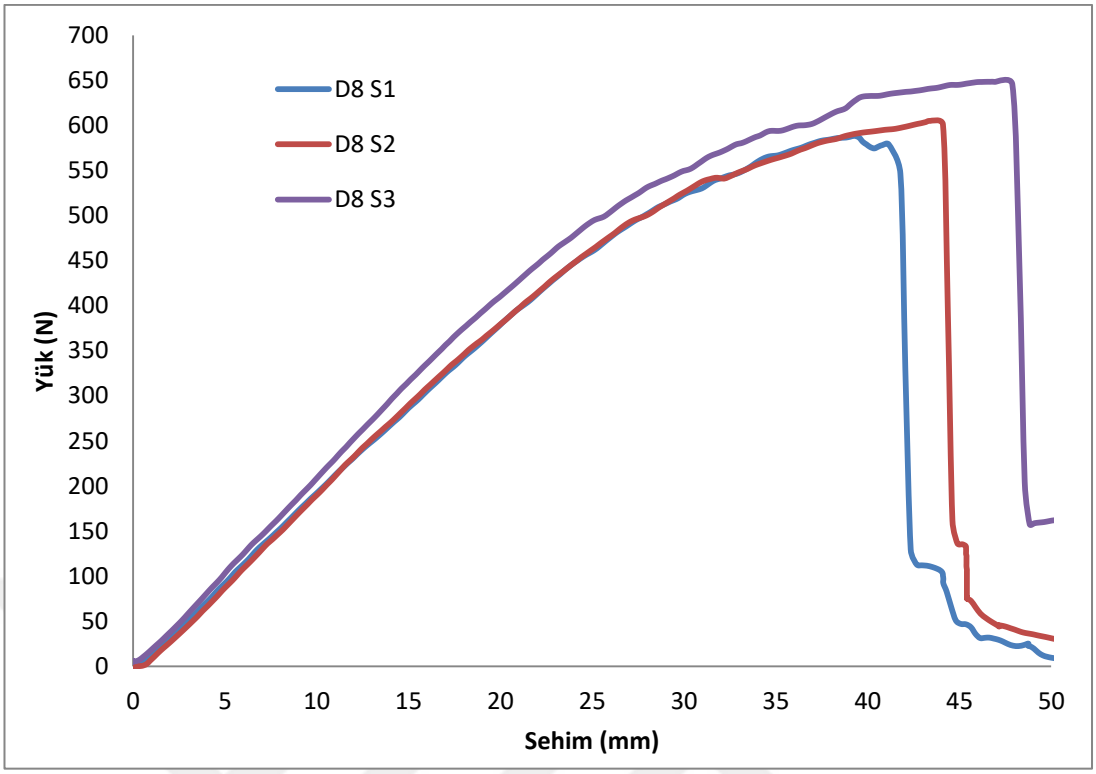
Şekil 3.9. Delikli imal edilmiş (P8) numunelere ait deneysel gerilme - gerinme grafikleri



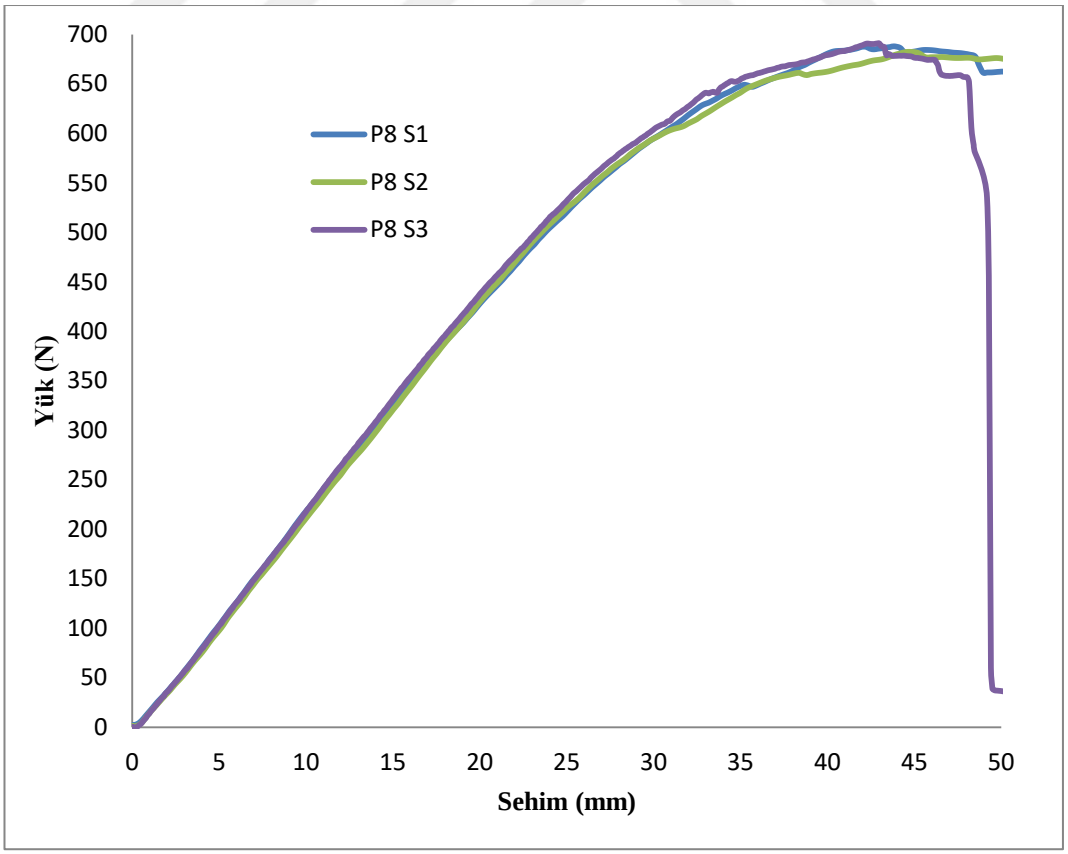
Şekil 3.10. Delinmiş (D5) numunelere ait yük - sehim grafikleri



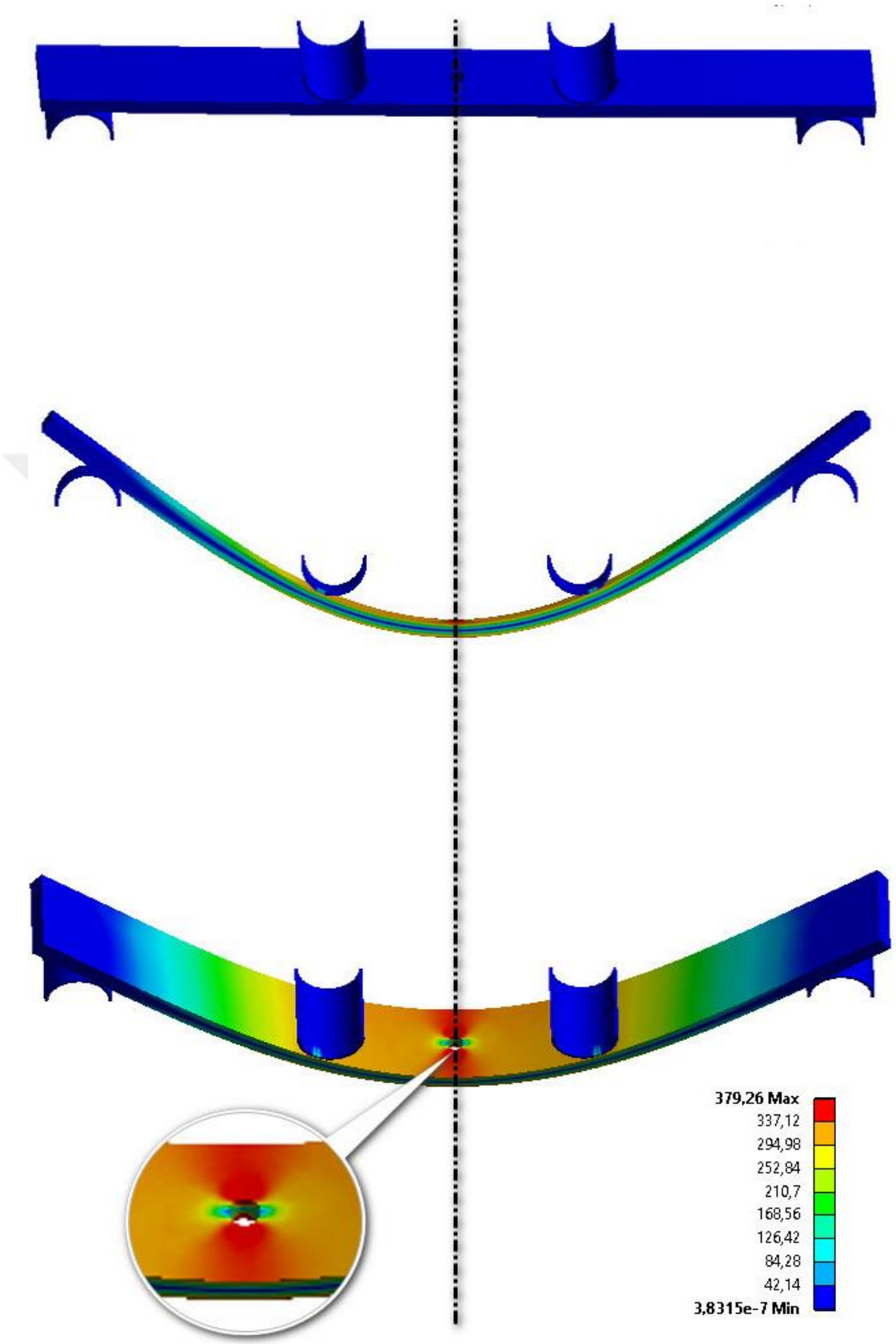
Şekil 3.11. Delikli imal edilmiş (P5) numunelere ait yük - sehim grafikleri



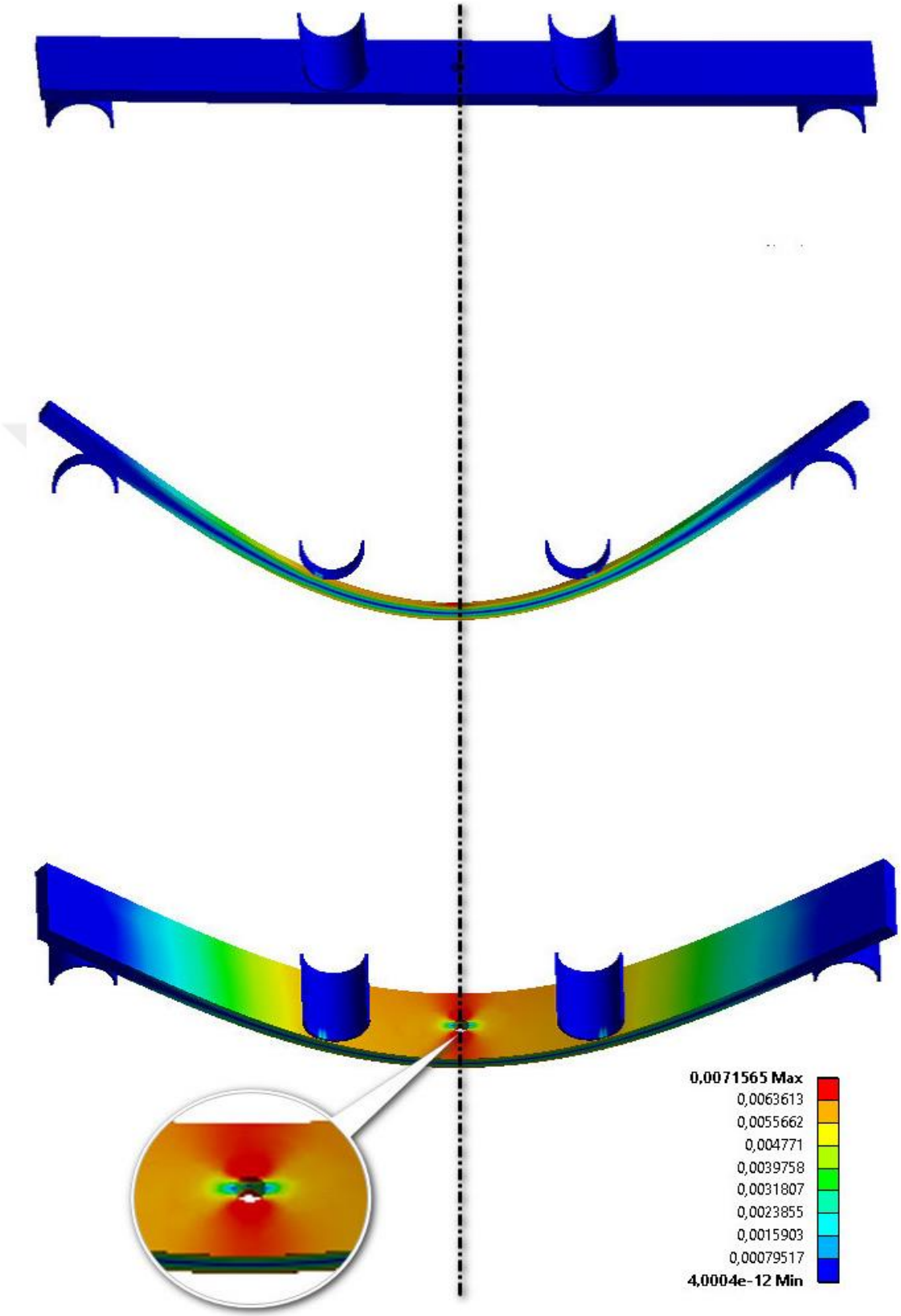
Şekil 3.12. Delinmiş (D8) numunelere ait yük - sehim grafikleri



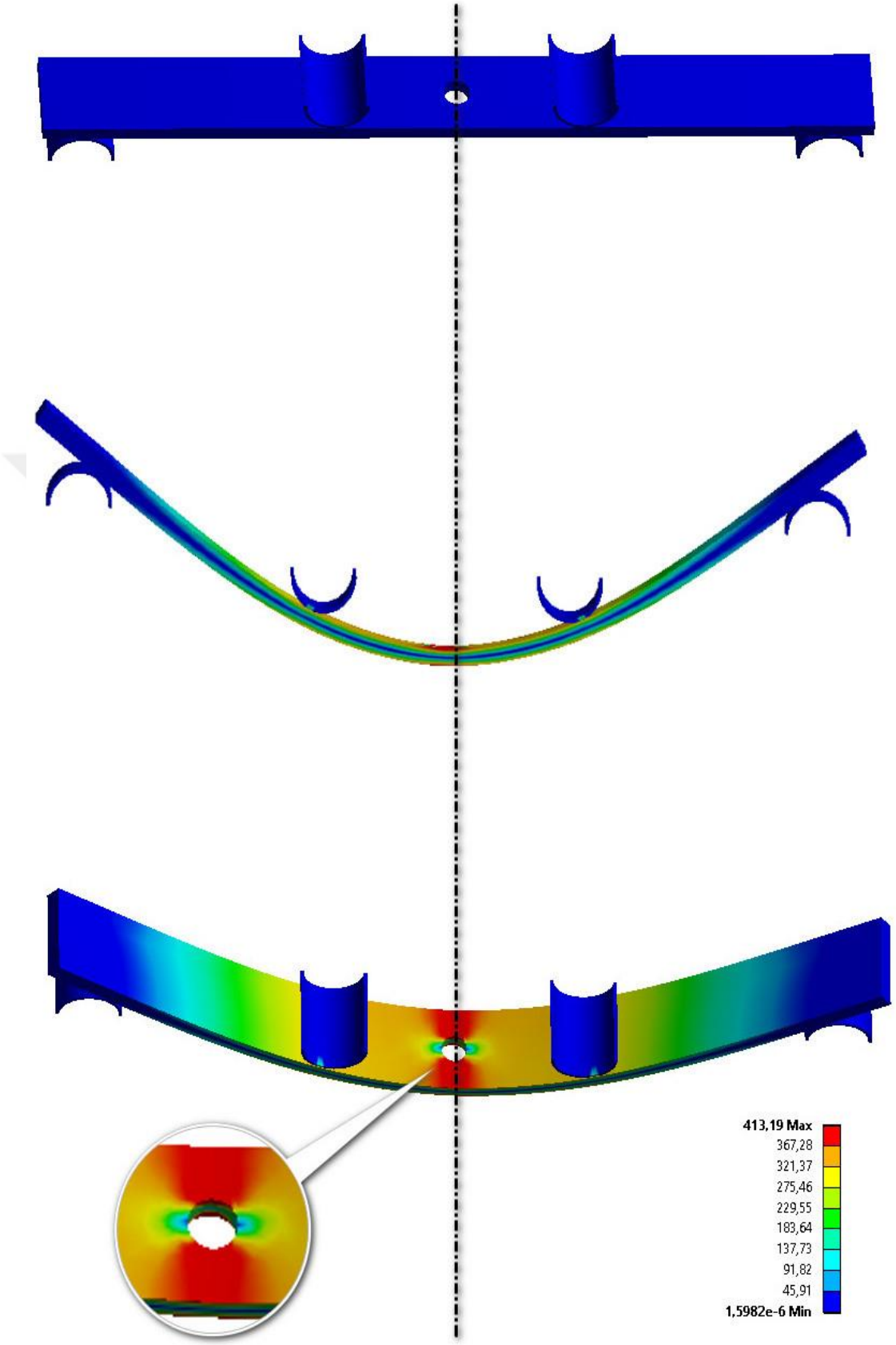
Şekil 3.13. Delikli imal edilmiş (P8) numunelere ait yük - sehim grafikleri



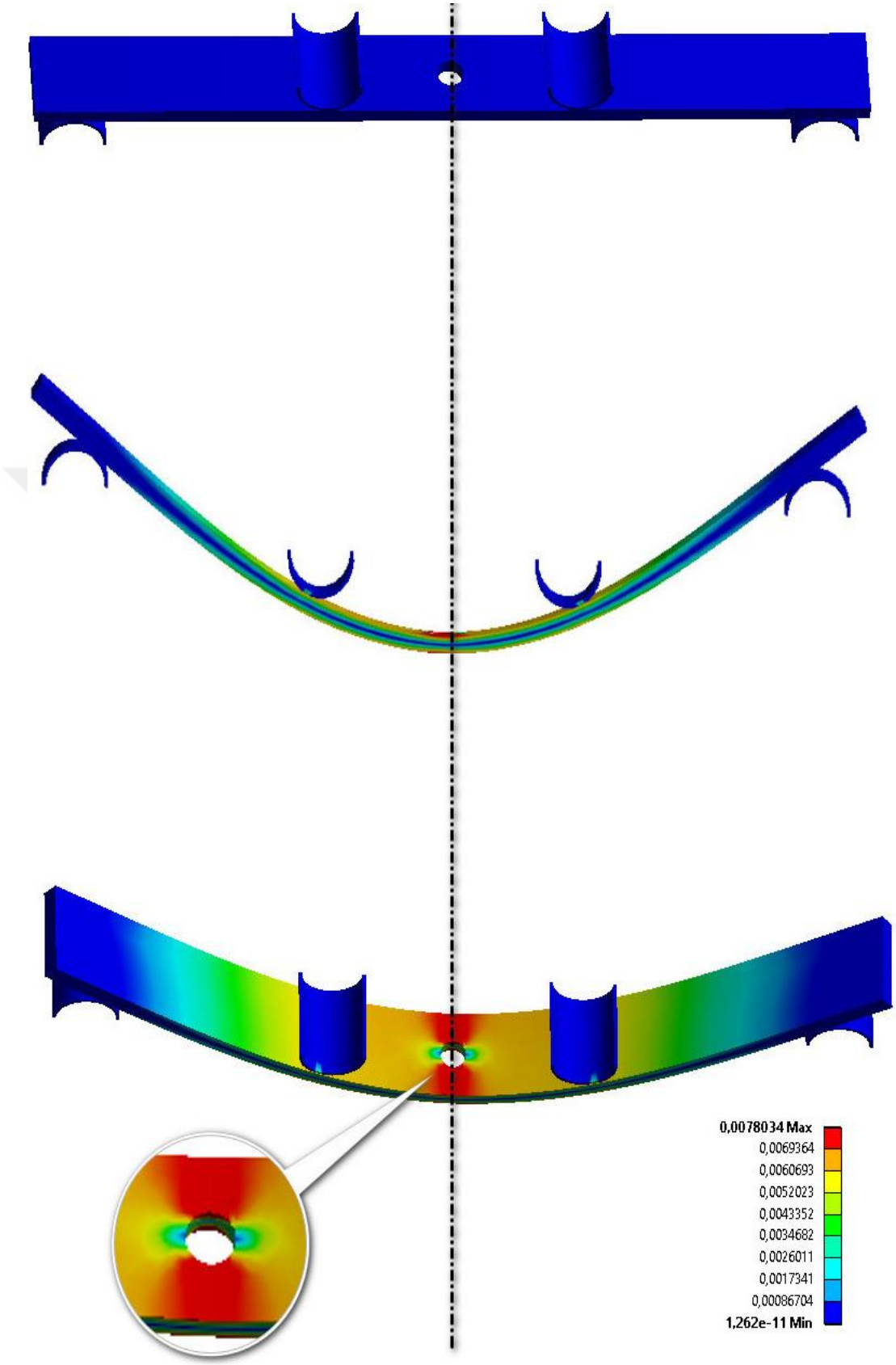
Şekil 3.14. Delinmiş numunelerin (D5) FEM gerilme analizi sonuçları



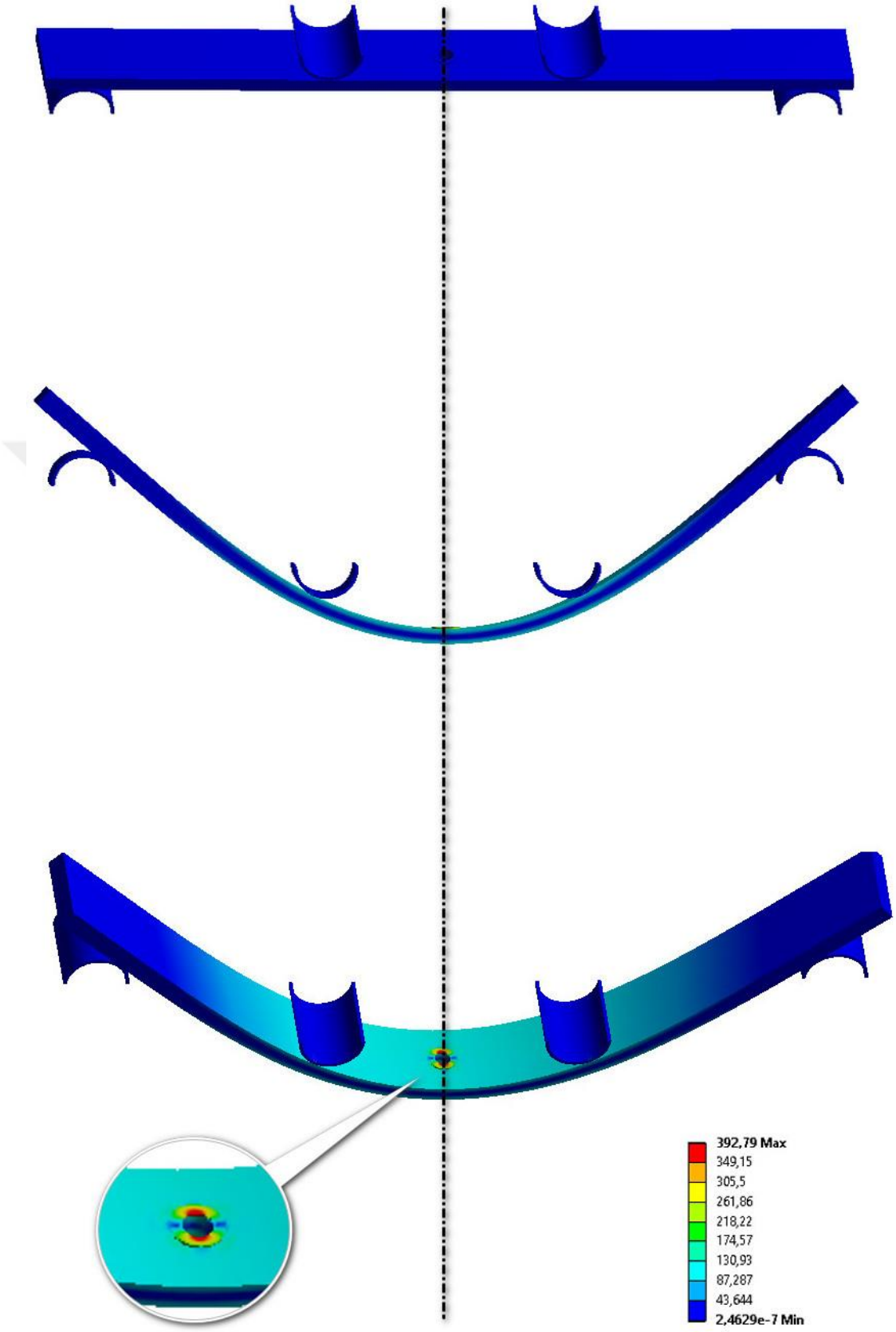
Şekil 3.15. Delinmiş numunelerin (D5) FEM gerinme analizi sonuçları



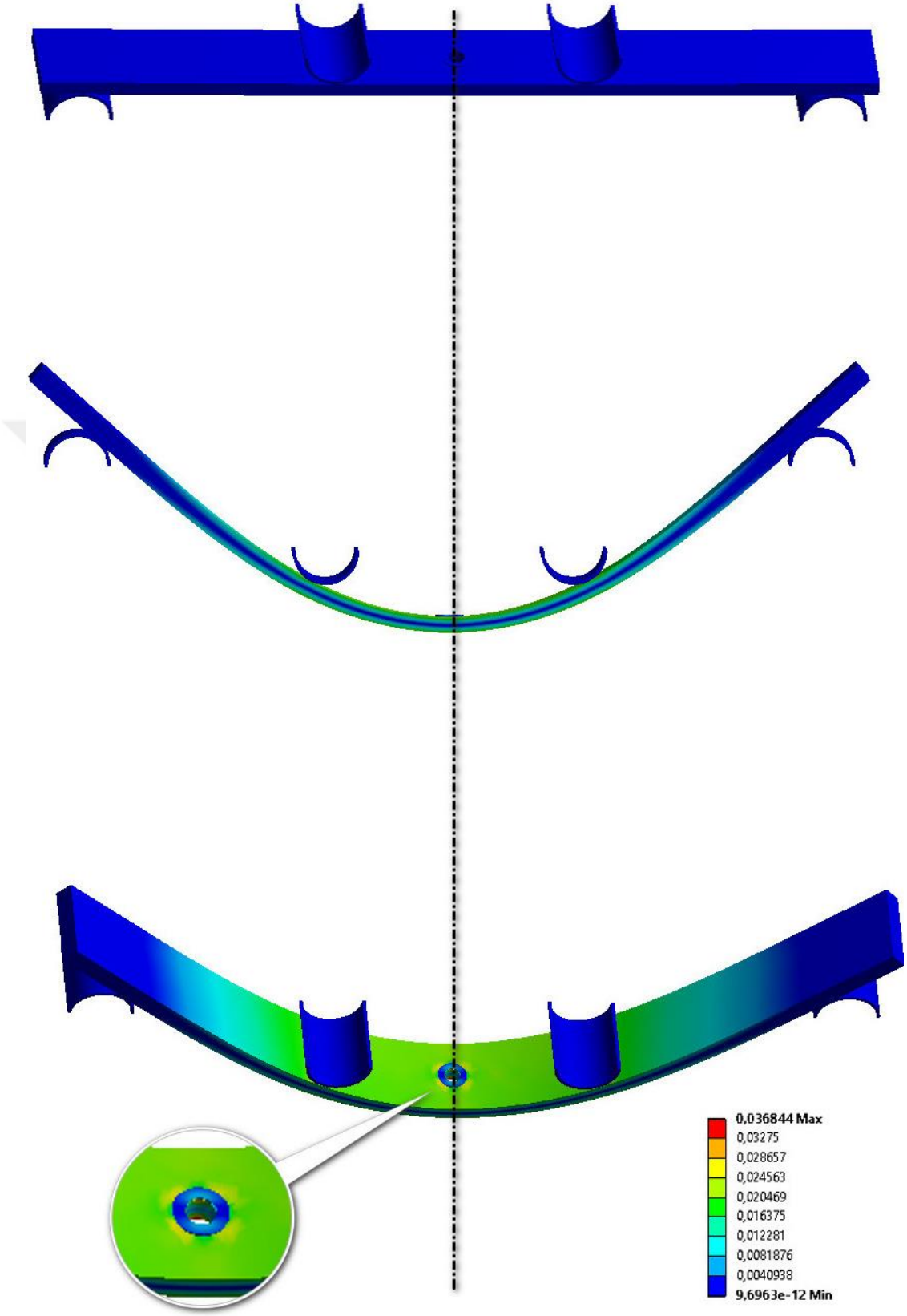
Şekil 3.16. Delinmiş numunelerin (D8) FEM gerilme analizi sonuçları



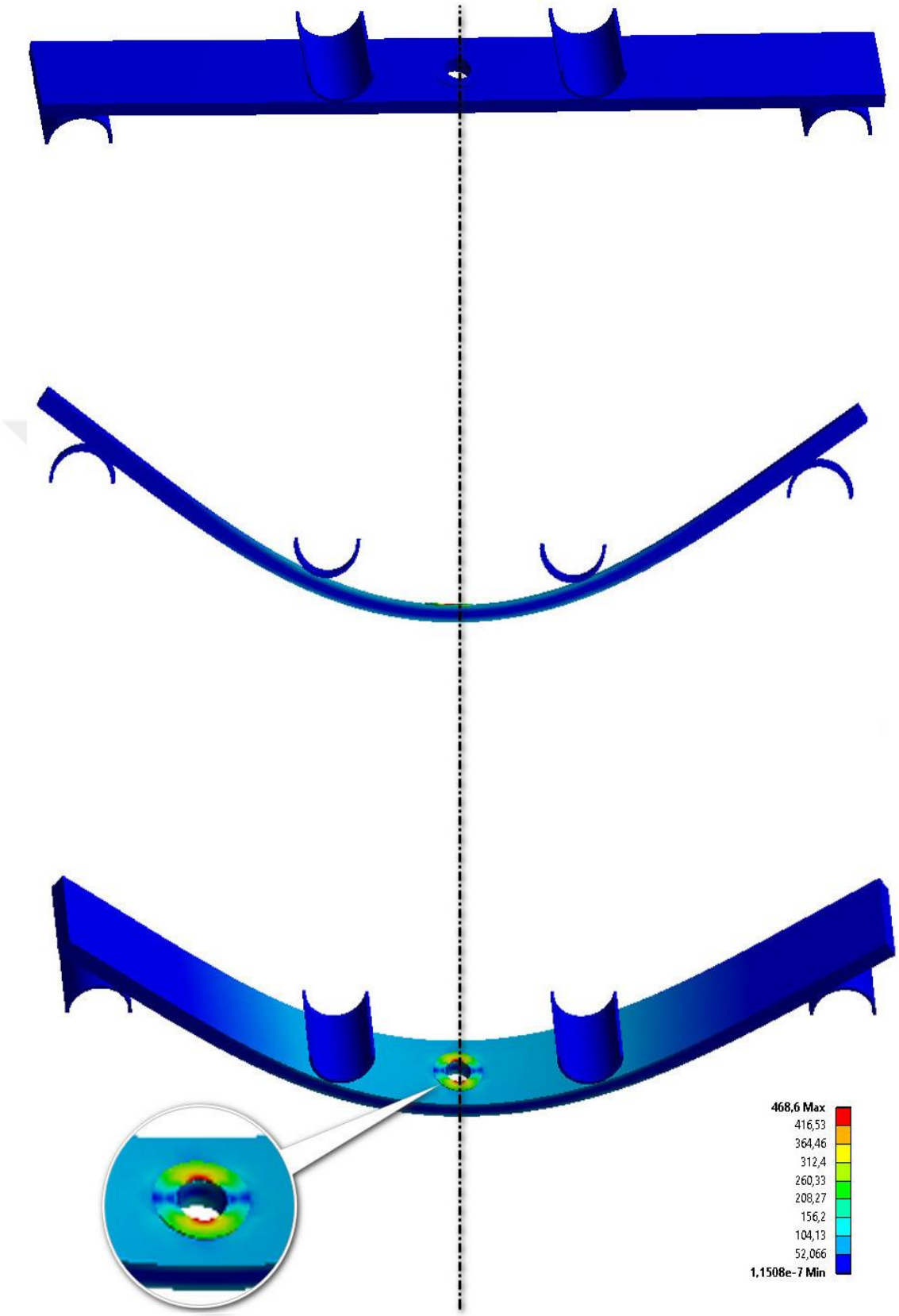
Şekil 3.17. Delinmiş numunelerin (D8) FEM gerinme analizi sonuçları



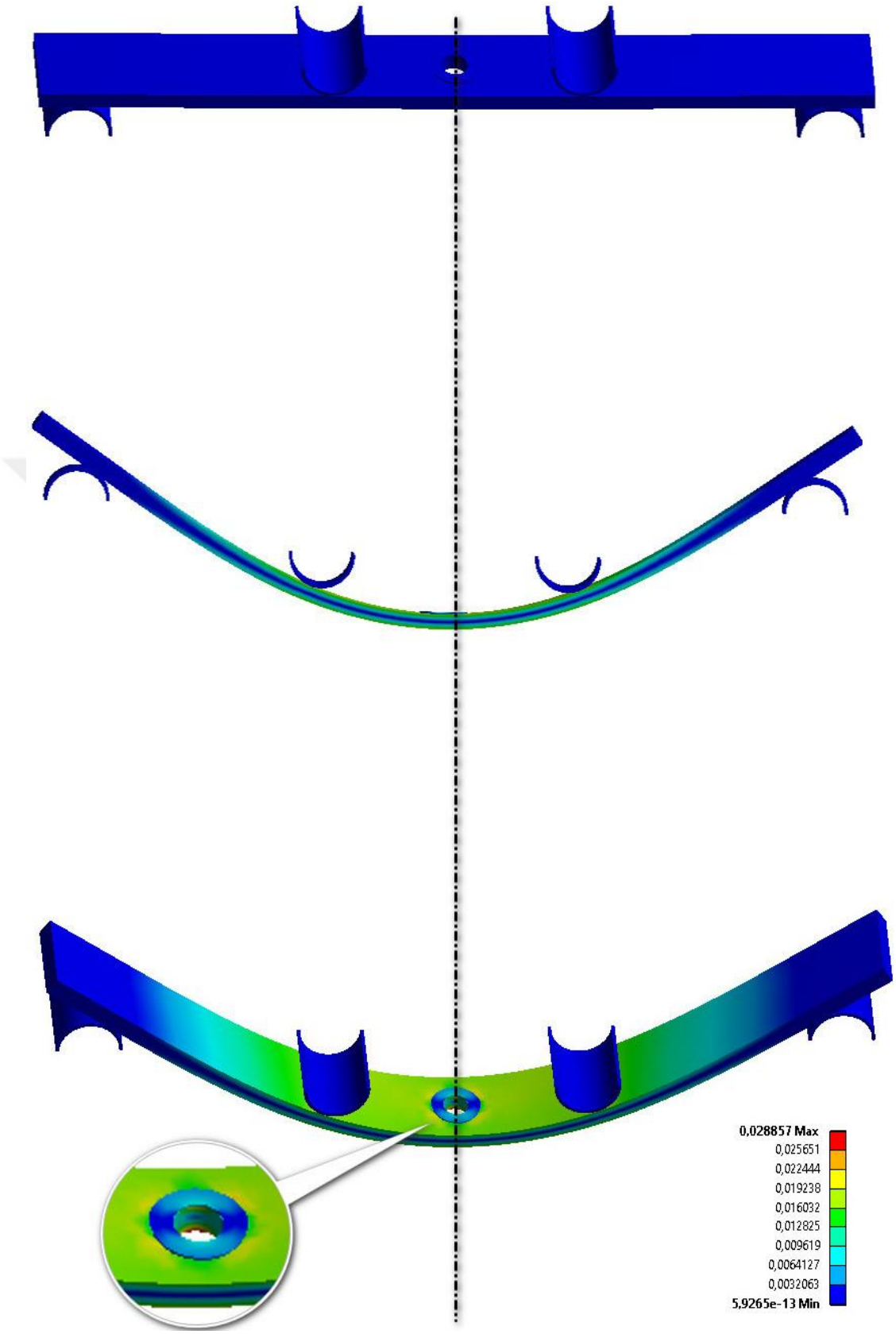
Şekil 3.18. Delikli imal edilmiş numunelerin (P5) FEM gerilme analizi sonuçları



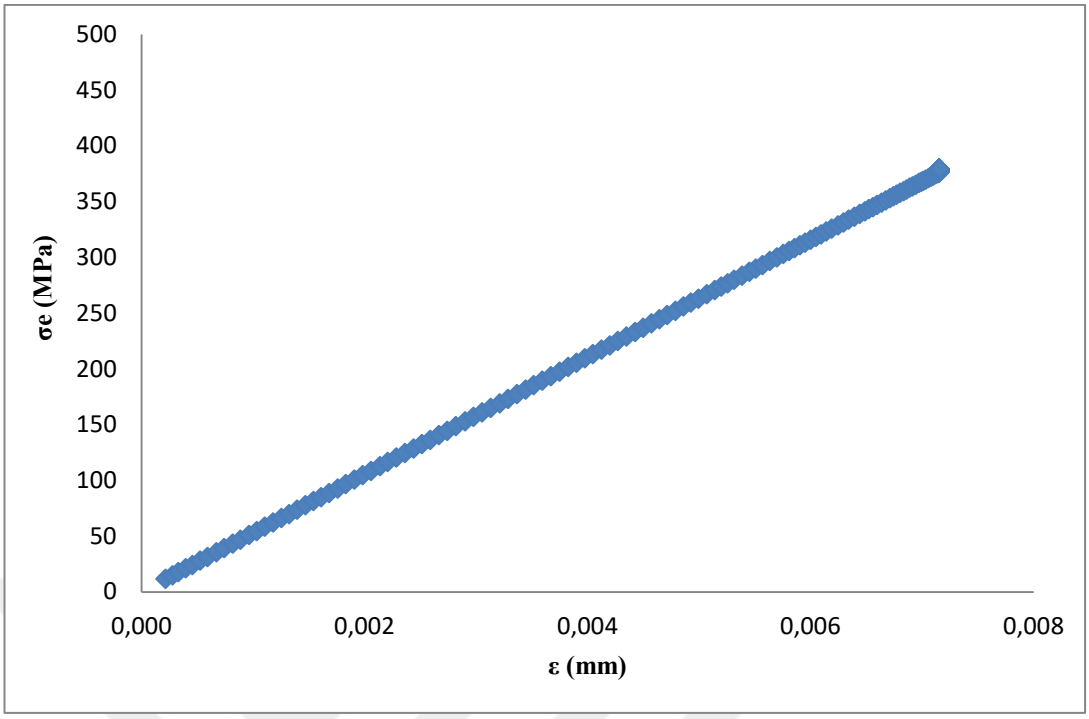
Şekil 3.19. Delikli imal edilmiş numunelerin (P5) FEM gerinme analizi sonuçları



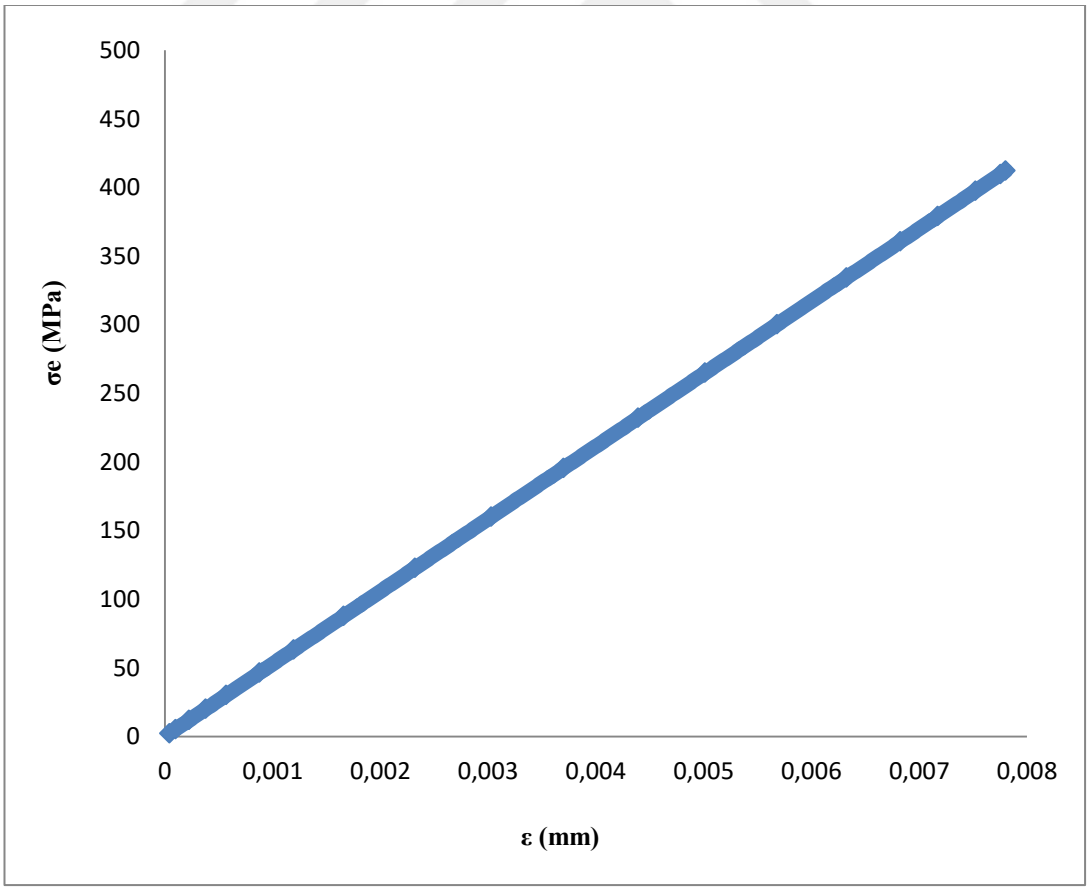
Şekil 3.20. Delikli imal edilmiş numunelerin (P8) FEM gerilme analizi sonuçları



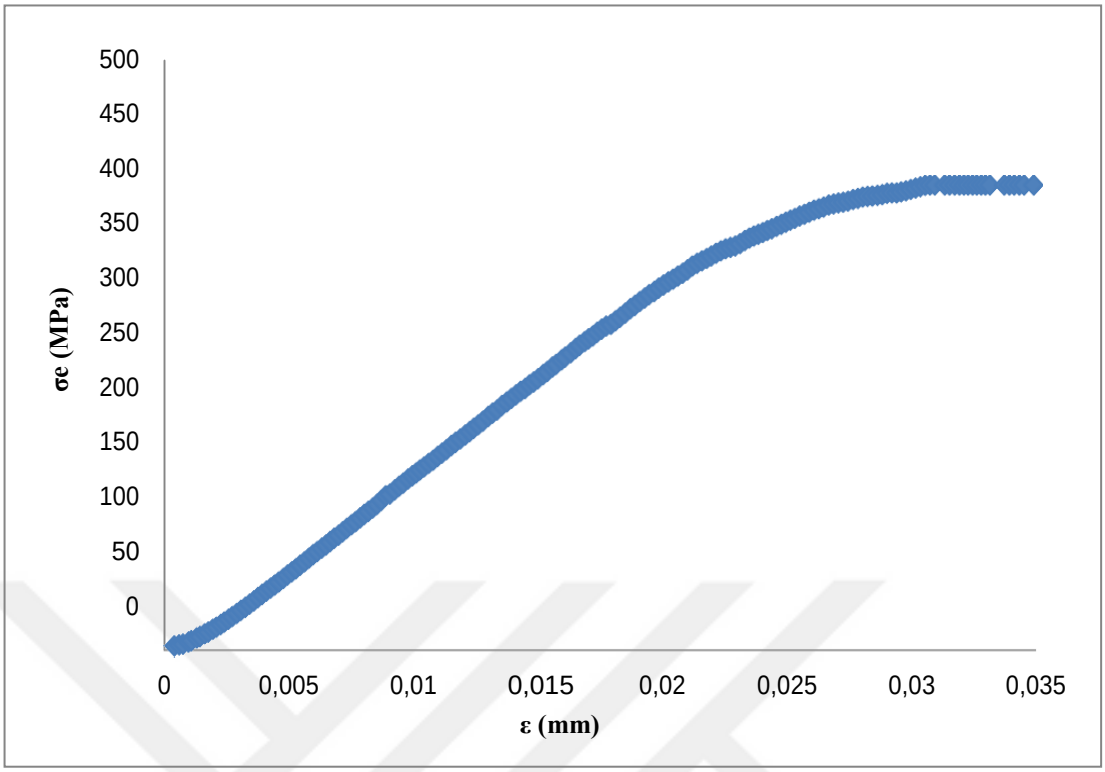
Şekil 3.21. Delikli imal edilmiş numunelerin (P8) FEM gerinme analizi sonuçları



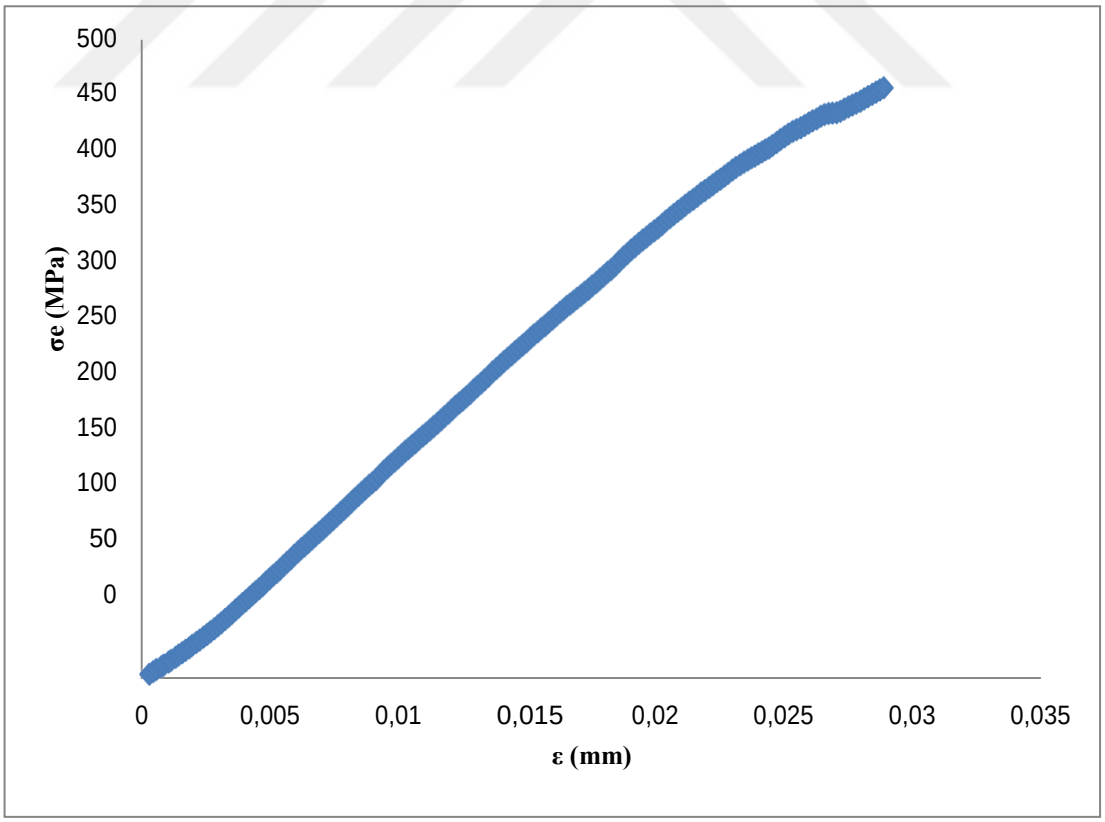
Şekil 3.22. Delinmiş numunelerin (D5) FEM gerilme - gerinme grafikleri



Şekil 3.23 Delinmiş numunelerin (D8) FEM gerilme - gerinme grafikleri



Şekil 3.24. Delikli imal edilmiş numunelerin (P5) FEM gerilme - gerinme grafikleri

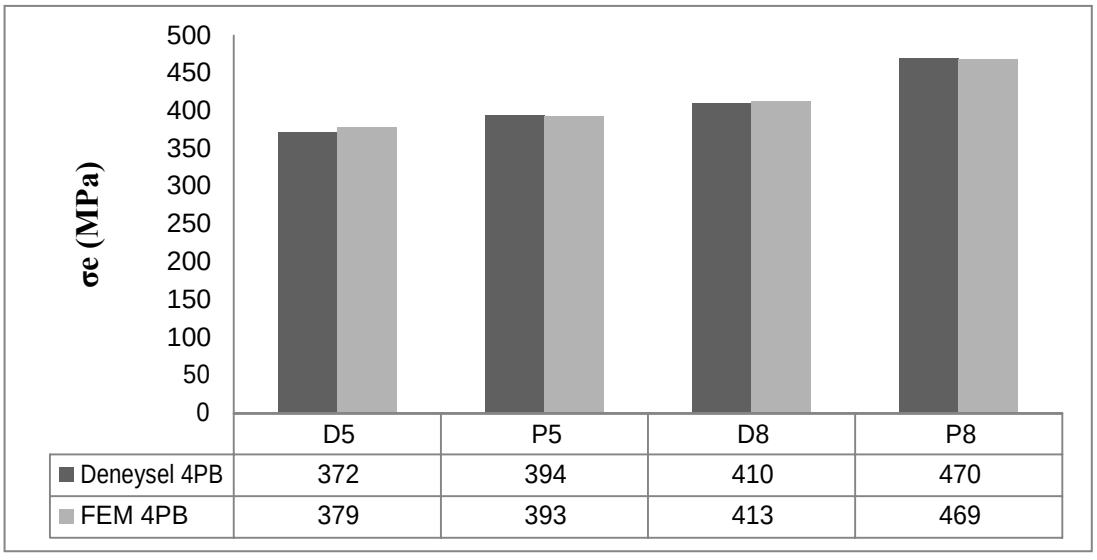


Şekil 3.25. Delikli imal edilmiş numunelerin (P8) FEM gerilme - gerinme grafikleri

Tablo 3.1. Deneysel ve FEM hesaplanan max gerilme değerleri

Numune tipi	Deneysel max gerilme (MPa)	FEM max gerilme (MPa)	Fark %
Delinmiş numuneler (D5)	372	379	1,8
Delinmiş numuneler (D8)	410	413	0,7
Delikli imal edilmiş numuneler (P5)	394	393	0,3
Delikli imal edilmiş numuneler(P8)	470	469	0,2

Tablo 3.1 ve Şekil 3.26 incelenirse delikli imal edilen ve delikli numuneler için dört nokta testi sonucu elde edilen deneysel ve FEM verileri arasında çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3.26. Deneysel ve FEM maksimum gerilme değerlerinin grafiksel karşılaştırılması

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kompozit malzemelerin kullanımı sağladıkları üstün özelliklerden dolayı başta otomotiv, uçak sektörü gibi sektörlerde her geçen gün artmaktadır. Kompozit malzemeler kullanıldıkları alanlarda malzeme üretim yöntemleri kısıtlılıklarından dolayı çoğu zaman tek parça halinde üretilememekte, parça parça üretilip kendi arasında birleştirilebilmekte veya kullanıldığı alana göre farklı bir malzeme üzerine montaj yapılarak birleştirilmesi gerekebilir.

Şekil bağlı birleştirmelerde mekanik bağlantılar ve yapıştırma yöntemlerinin her ikisi de günlük yaşamda kullanılsa da ekonomikliği ve uygulama kolaylığı gibi kriterlerden dolayı mekanik bağlantı yoluyla birleştirme yöntemine sıklıkla başvurulmaktadır. Bu da malzeme üzerinde mekanik bağlantının yapılabilmesi için delik gerekliliğine yol açmaktadır.

Bu çalışmada kompozit malzemeler için mekanik yöntemler kullanılarak şekil bağlı birleştirilmenin gerekli olduğu alanlarda malzeme üzerine konvansiyonel yöntemlerle delik açmak yerine yeni bir bakış açısı sunarak kompozit malzemenin imal edilme aşamasında pimler yerleştirilerek delikli şekilde üretiminin malzemenin mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kompozit malzeme olarak cam elyaf takviyeli epoksi reçine esaslı kompozit üzerinde çalışma yapılmıştır. Kompozit numuneler geleneksel el yatırması metodu kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada iki çeşit kalıp hazırlanmıştır. Kalıpların biri deliksiz düz şekilde hazırlanmış ve daha sonra orta noktalarına delikler açılmıştır. Diğer kalıp ise orta noktalarına pimler yerleştirilerek delikli şekilde hazırlanmıştır.

Elde edilen delinmiş ve delikli imal edilmiş numuneler ilk başta dört nokta eğme testinde incelenmiştir. Daha sonra numunelere ait deneysel verilerden yola çıkılarak sonlu elemanlar yöntemiyle sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştur ve deneyin simülasyonu yapılmıştır.

Ansys Geçici Yapısal/Dinamik Analiz (Transient Structural Analysis) ile oluşturulan

sonlu elemanlar modelinin gerilme ve gerinme analizleri yapılmıştır.

Deneysel veriler ve FEM verileri arasında yüzde 0,2-1,8 arasında yakınlık elde edilmiştir.

Deney numunelerinden elde edilen maksimum gerilme verileri incelendiğinde, delikli imal edilen numunelerin mukavemet değerlerinin sonradan delinmiş numunelerden yüksek olduğu ve her iki grup için delik çapının artmasıyla birlikte maksimum mukavemet değerlerinin de arttığı görülmüştür.

İlk olarak, delikli imal edilen parçalardaki mukavemet artışı, pim yerleştirirken delik oluşturulan bölgedeki fiberlerin kenarlara doğru itildiği ve delik kenarlarında yüksek fiber yoğunluğu oluşturması ve delinmiş parçalarda ise fiber ve matris malzeme kayıpları ile açıklanabilir. Diğer taraftan delik çapı büyüdükçe oluşan mukavemet artışı, gerilme yoğunluğunun, çentik etkisi oluşturan geometrinin yarıçapına bağlı olarak gerilme yoğunlaşmasının değişim formülü ile açıklanabilir.

Tüm bu sonuçlar ışığında malzemeyi delikli şekilde imal etmenin malzemenin mukavemet değerlerinde, delik çapına bağlı olarak yüzde 6-15 arasında artış görülmüştür. Delikli mekanik bağlantı gerektiren alanlarda yeni bir bakış açısıyla bu yöntemin kullanılmasının malzemenin kullanım ömrü açısından avantaj sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Yapılan literatür incelemeleri sonucu, bu konuyla ilgili sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür.

Diğer kompozit malzemeler üzerindeki etkileri görmek amacıyla, farklı türdeki kompozit malzemeler üzerinde ve basınçlı kaplar, kompozit güç aktarma elemanları gibi farklı yükleme koşullarında da benzer çalışmalar yapılarak konu daha da genişletilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Ersoy H.Y., *Kompozit Malzeme,* Literatür Yayıncılık, Ankara, 2001.

[2] Şahin Y., *Kompozit Malzemelere Giriş*, Seçkin Yayıncılık, İstanbul, 2006.

[3] Saçak M., *Polimer Kimyası*, Gazi Kitapevi, Ankara, 2010.

[4] Olcay Y., Akyol M., Gemci R., Polimer Esaslı Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Arabirim Mukavemeti Üzerine Farklı Kür Metodlarının İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2002, **7**(1) **,** 93.

[5] Akdoğan Eker A., Plastik Matrisli Kompozitler Ders Notları, 2008.

[6] Atas C., Kompozit Üretim Teknolojileri Ders Notları, 2016.

[7] Groover M. P., *Fundamentals Of Modern Manufacturing: Materials, Processes And Systems*, 4th ed. , John Wiley & Sons, Inc, Hoboken , 2010.

[8] Chen W., Some Experimental Investigations In The Drilling Of Carbon Fibre-Reinforced Plastic(CFRP) Composite Laminates, *International Journal of MachineTools&Manufacture*, 1997, **37**(8), 1097-108.

[9] Koenig W., Wulf C., Grass P., Willerscheid H., Machining Of Fiber Reinforced Plastics, *Manufacturing Technology-CIRP Annals*, 1985, **34**(2), 537-548.

[10] Miller J.A., Drilling Graphite/Epoxy At Lockheed, *Am Mach Autom. Manufact*, 1987, **131**(10), 70-71.

[11] Zitoune R., Krishnaraj V., Collombet F., Study Of Drilling Of Composite Material And Aluminium Stack, *Composite Structures*, 2010, **92**(5), 1246-1255.

[12] http://www.fibercamelyaf.com/cam%20elyaf%20urunler.html (Ziyaret tarihi: 20 Şubat 2019).

[13] Turan K., Çözülebilen Bağlantılı Kompozit Plakaların Mekanik Davranışlarının Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2009, 245663.

[14] Turan K., Gür M., Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda İlerlemeli Hasar Analizi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2002, **3**(2), 91-99.

[15] Jones RM., *Mechanics of Composite Material*, 2. Edt., Taylor& Francis, Philadelphia , 1999.

[16] Hutchinson A R., Lecture Notes, Mechanical Connections in Polymer Composite Materials, Oxford Brookes University School of Engineering, Advanced Materials Engineering and Joining.

[17] Hancox Neil L., Mayer Rayner M., *Design Data for Reinforced Plastics*, Chapman & Hall, London, 1994.

[18] Lubin G. (ed.), *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1982.

[19] ASTM Test D790, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, United States, 2003.

[20] Hodgkinson J. M. (ed.), *Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites*, CRC Press, New York, 127-142, 2000.

[21] http://www.fibercamelyaf.com/cam%20elyaf%20urunler.html (Ziyaret tarihi: 20 Ocak 2019).

[22] http://www.derakane.com (Ziyaret tarihi: 1 Ekim 2018).

[23] https://malzemebilimi.net/elyaf-takviyeli-kompozit-malzemelerde-el-yatirma-yontemi.html_(Ziyaret tarihi: 03.10.2018).

[24] Çapik M,, Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Laboratuvarı Ders Notları, 2015.

[25] Yiğiter H., Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi II Ders Notları.

[26] Karakılçık S.,Özbay M., Adin H., Dairesel Delikli Kompozit Levhalarda Gerilme Yığılmalarının İncelenmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi - Mühendislik Dergisi* , 2016, **7**(1), 113-128.

[27] Lekhnitskii S.G., *Anisotropic Plates*, Gordon and Breach Science Publishers, N.Y. USA, 245-250, 1968.

[28] Kaltakcı M.Y., Stress Concentrations and Failure Criteria İn Anisotropic Plates With Circular Holes Subjected To Tension Or Compression, *Computers and Structures*, 1996, **61**(1), 67-78.

[29] Arslan N., Çelik M., Arslan N., Prediction Of The Elastic-Plastic Behavior Of Thermo Plastic Composite Laminated Plates With Square Hole, *Composite Structures*, 2002, 55, 37-49.

[30] Özer D., Özbay M., Düzlemsel Yüklenmiş Ortasında Dairesel Delik Bulunan Kompozit Plakta Oluşan Elastik Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2004, **19**(1), 51-57.

[31] Autar K. Kaw, Kompozit Malzeme Mekaniği, çev., Okutan Baba B., Karakuzu R., Efil Yayınevi, Ankara, 2014.

[32] Mallick P.K., *Fiber-reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design*, Marcel Decker, New York, 1993.

[33] Reddy J.N., *Mechanics of Laminated Composite Plates Theory and Analysis*, CRC Press, New York, 1997.

[34] Tong L., Mouritz A.P. and Bannister M., *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*, Elsevier Science, 2002.

[35] Scalea F.L.D., Cappello F. and Cloud G.L. "On The Elastic Behavior Of A Cross-Ply Composite Pin-Joint With Clearance Fits", *J. of Thermoplastic Composite Materials*, 1999, 12, 13-22.

[36] Woo J., Na1 WB., Effect of Cutout Orientation on Stress Concentration of Perforated Plates with Various Cutouts and Bluntness, *International Journal of Ocean System Engineering*, 2011, **1**(2), 95-101.

[37] Kumar M.M., Rajesh S., Yogesh H., Yeshaswini B R., Study on the Effect of Stress Concentration on Cutout Orientation of Plates with Various Cutouts and Bluntness, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol.3, Issue.3, May-June. 2013, 1295-1303.

[38] Blackburn R. ,The Manufacture and Testing of Perforated Composite Acoustic Panels, , Master Thesis, University of Plymouth, Faculty of Technology, Philosophy Department of Mechanical and Marine Engineering, United Kingdom, 2009.

[39] Akkimaradi K., Khadabadi U.B., Design And Analysis Of Composite Cylinder,*International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, e-ISSN: 2395 -0056 Volume: 03 Issue: 02 , 2016, 991.

[40] Avcı A., Ekrem M., Erkendirici Ö.F., Cam Kumaş Takviyeli Termoplastik Kompozitlerde Kırılma Davranışlarının İncelenmesi, *8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı*, Istanbul/Türkiye, 7 - 9 Kasım 2007.

[41] Tekeli S., Tetik O., Örgülü Kompozit Malzemenin Ansys ve Abaqus İle Gerilme Analizleri ve Deneysel Kırılma Tokluğunun Hesaplanması, Bitirme projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, 2007.

[42] http://www.caeai.com/.../CAEA_v17_Update_seminar_ACP.pdf (Ziyaret tarihi: 23 Şubat 2019).

[43] ANSYS Academic R19 ©

[44] Gilpin A., Tools Solutions For Machining Composites, *Reinf. Plast*., 2009, 53, 30 -33.

[45] Abrate S., *Machining of Composite Materials. In Composites Engineering Handbook*, Mallick, P.K. Ed, Marcel Dekker, New York, 1997, 777 - 809.

[46] Sen F., Sayman O., Kompozit Levhalarda Hasar Analizi, *MakineTek Dergisi*, 2010, 9, 180-182.

[47] Kaltakcı M.Y., İki Eksenli Yükleme veya Kesme Etkisindeki Daire Delikli Ortotropik Levhalarda Gerilme Yığılmaları, *S.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1995, 10, 1-9.

[48] Arslan N., Pıhtılı H., Gur M., Elasto-Plastic Stress Analysis Of Thermoplastic Matrix Composite Laminated And Perforated Plates Under In-Plane Loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2001, **20**, 1222-1252.

[49] Arslan N., Sancaktar E., Çelik M., Elasto-Plastic Behavior of Thermoplastic Matrix Roller Chain Link Plates Reinforced with Steel Fibers, *ASME 2000 Design Engineering Technical Conferences And Computers and Information in Engineering Conference*, 1-10, Baltimore, Maryland, September 10-13, 2000.

[50] Rathnakar G., Shivanan, H.K., Experimental evaluation of strength and stiffness of fibre reinforced composites under flexural loading, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2013, **2**(7), 219-222.

[51] Sudhir S. Mathapati, Shivukumar S. Mathapati, Testing And Analysis Of Mechanical Properties Of E-Glass Fiber Reinforced Epoxy Polymer Composites, *International Journal of Research and Innovations in Science&Technology*, 2015, **2**(1), 46-52.

[52] http://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/enus/help/wb_sim/ds_transient_mechanical_analysis_type.html (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2018).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Öztürk M. F.**, Cengiz A., Sabah A., Delinmiş ve Delikli İmal Edilmiş GFRP Plakaların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, *1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18*), Karabük, Turkey, March 22-24, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1994 yılında Adana'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 2012 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünden 2016 yılında ikincilik ile mezun oldu. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Çalışma hayatına Trigo Çözüm A.Ş. firmasında Kalite Mühendisi olarak devam etmektedir.