

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HASARLI KOMPOZİT PLAKLARDA ONARIM  
OPTİMİZASYONU**

**Olgay DAĞDELEN**

**Haziran, 2010**

**İZMİR**

# **HASARLI KOMPOZİT PLAKLARDA ONARIM OPTİMİZASYONU**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Dalı**

**Olgay DAĞDELEN**

**Haziran, 2010**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**OLGAY DAĞDELEN**, tarafından **DOÇ. DR. CESİM ATAŞ** yönetiminde hazırlanan **“HASARLI KOMPOZİT PLAKLARDA ONARIM OPTİMİZASYONU”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Cesim ATAŞ

Danışman

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başlangıcından bitimine kadar engin bilgilerini paylaşmaktan çekinmeyerek her aşamada sabırlı ve özverili yardımlarda bulunan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Cesim ATAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN'e, Yrd. Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT'a, mekanik ana bilim dalı öğretim üyelerine ve araştırma görevlilerine, proje ve tez hazırlama aşamalarında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve çalışma arkadaşım Yalın AKGÜN'e sabır ve desteklerinden dolayı özel teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Son olarak 107M406 no'lu TÜBİTAK projesi ile gerçekleşen bu çalışmaya olan katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Olgay DAĞDELEN

# HASARLI KOMPOZİT PLAKLARDA ONARIM OPTİMİZASYONU

## ÖZ

Bu çalışmanın amacı; onarılmış kompozit plaklarda çeşitli onarım parametrelerinin mekanik performansa etkisini incelemek ve bir onarım optimizasyonu yapmaktır. Bunun için nümerik analizler ve deneyler yapıp karşılaştırmalar sunulmuştur. Nümerik çalışmalar için LUSAS 14.3 Analiz Programı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada; Dokuz Eylül Üniversitesi, Kompozit Araştırma Laboratuvarı'nda hazırlanan onarılmış kompozit plaklar uygun boyutlarda kesilerek SCHIMADZU Universal Test Cihazı'nda çekme deneyleri yapılmıştır.

Nümerik analizlerle optimizasyon dört farklı parametrenin değiştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bunlar; basamak uzunluğu, bindirme uzunluğu, dizilim ve basamak sayısıdır. Bu parametrelerin farklı durumları için analizler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca hasarsız modeller hazırlanıp karşılaştırma yapılmıştır.

Deneysel olarak; bazı parametreler sabit tutularak yama derinliğinin etkisi dört farklı numunede incelenmiş ve bu numunelerin sonlu eleman modelleri oluşturularak sonuçlar nümerik analizlerle karşılaştırılmıştır.

Nümerik ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar ışığında ideal bir yamaya ilişkin değerlendirme ve tartışmalara son bölümde yer verilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** kompozit plaklar, onarım optimizasyonu, nümerik analiz

# REPAIR OPTIMIZATION OF DAMAGED COMPOSITE PLATES

## ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the effects of repair parameters on the mechanical performance of repaired composite plates and hence to make an optimization. For this purpose numerical analyses and experiments were done and compared with each other. LUSAS 14.3 Software was utilized in the numerical analysis.

For experimental study, tensile tests were performed on repaired composite samples with appropriate dimensions, by using a universal testing machine, SCHIMADZU. The samples we manufactured in Composite Research Laboratory at Dokuz Eylül University.

In the numerical analyses, for optimization, four parameters were considered; length of step length of lap, stacking sequence and the number of plies. Analyses results for these parameters are compared with those of intact samples.

For comparison, a number experiments were also conducted. In chapter 4, the results obtained numerically and experimentally are discussed in respect of a reliable and efficient repair.

**Keywords:** composite plates, repair optimization, numerical analysis

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ..... | ii  |
| TEŞEKKÜR.....                              | iii |
| ÖZ .....                                   | iv  |
| ABSTRACT.....                              | v   |

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| <b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b> | <b>1</b> |
|--------------------------------|----------|

|                                                   |          |
|---------------------------------------------------|----------|
| <b>BÖLÜM İKİ – KOMPOZİT YAPILARDA ONARIM.....</b> | <b>8</b> |
|---------------------------------------------------|----------|

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Hasar Tipleri.....                                                     | 10 |
| 2.1.1 Yüzey Hasarı.....                                                    | 10 |
| 2.1.2 Tabaka Hasarı.....                                                   | 11 |
| 2.1.3 Bağlantı Delaminasyonu .....                                         | 11 |
| 2.2 Onarımın Amaçları ve Onarıma Genel Bir Bakış .....                     | 12 |
| 2.2.1 Yapısal Tespit .....                                                 | 13 |
| 2.2.2 Onarım Tasarımı .....                                                | 15 |
| 2.2.3 Onarım Malzemesi Seçimi.....                                         | 16 |
| 2.2.4 Onarım Analizi.....                                                  | 17 |
| 2.2.5 Onarım Yapılışı.....                                                 | 18 |
| 2.3 Onarım Metotları.....                                                  | 19 |
| 2.3.1 Koruyucu Bant Metodu.....                                            | 19 |
| 2.3.2 Reçine İle Tıkama Metodu.....                                        | 19 |
| 2.3.3 Doldurma Onarımı Metodu.....                                         | 19 |
| 2.3.4 Cıvatalanmış Çiftler İle Onarım Ve Yama Onarımı Karşılaştırılması... | 20 |
| 2.3.5 Oda Sıcaklığında El Yatırması Metodu .....                           | 21 |
| 2.3.6 Yüksek Sıcaklıklarda El Yatırması Metodu.....                        | 22 |
| 2.3.7 Pre-Preg Onarımı .....                                               | 22 |
| 2.3.8 Dolgu Ve Basamaklı Yama Onarımı .....                                | 23 |

|                                                                           |               |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>BÖLÜM ÜÇ – LUSAS 14.3 PROGRAMI İLE MODELLEME VE OPTİMİZASYON .....</b> | <b>27</b>     |
| 3.1 LUSAS 14.3 Analiz Programı.....                                       | 27            |
| 3.1.1 LUSAS Hakkında.....                                                 | 27            |
| 3.1.2 Lusas 14.3 İle Yapılmış Analizlerin Teorik Altyapısı .....          | 28            |
| 3.1.2.1 Non-Linear Analiz .....                                           | 28            |
| 3.1.2.2 Non-Linear Çözüm Prosedürü .....                                  | 29            |
| 3.1.2.2.1 Tekrar Prosedürü.....                                           | 30            |
| 3.1.2.2.2 Ara Yüz Malzeme Delaminasyonu .....                             | 30            |
| 3.1.2.2.3 Kırılma Modları .....                                           | 30            |
| 3.1.2.2.4 Ara Yüz Malzeme Parametreleri.....                              | 31            |
| 3.1.2.2.5 Analizin Sonlandırılması.....                                   | 32            |
| 3.1.2.2.6 Sınırlandırılmış Çözüm Metotları .....                          | 32            |
| 3.2 Numunelerin Modellenmesi.....                                         | 32            |
| 3.2.1 Geometrinin Oluşturulması.....                                      | 32            |
| 3.2.2 Malzemenin Atanması .....                                           | 33            |
| 3.2.3 Kompozit Tabakalarının Tanımlanması.....                            | 34            |
| 3.2.4 Katı Ağ Ve Ara Yüz Ağının Atanması .....                            | 35            |
| 3.2.5 Sınırlandırmalar Ve Yükleme .....                                   | 35            |
| 3.2.6 Analizin Kontrolü Ve Çalıştırılması .....                           | 36            |
| 3.2.7 Sonuçların İncelenmesi .....                                        | 38            |
| 3.3 Optimizasyon .....                                                    | 38            |
| <br><b>BÖLÜM DÖRT – ANALİZ VE DENEY SONUÇLARI .....</b>                   | <br><b>41</b> |
| 4.1 Yama Bölgesine Etki Eden Gerilmeler .....                             | 41            |
| 4.2 Yamasız Modelde Açık Oryantasyonunun Etkisi .....                     | 44            |
| 4.3 Optimizasyon .....                                                    | 45            |
| 4.3.1 Basamak Uzunluğu Etkisi .....                                       | 46            |
| 4.3.2 Bindirme Uzunluğu Etkisi.....                                       | 52            |
| 4.3.3 Dizilim Etkisi .....                                                | 59            |

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.4 Basamak Sayısı Etkisi .....                                   | 66        |
| 4.4 Nümerik Analizlerin Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması ..... | 80        |
| 4.4.1 Üretim Aşaması.....                                           | 82        |
| 4.4.2 Deneysel Ve Nümerik Sonuçlar.....                             | 84        |
| <br><b>BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR .....</b>                               | <b>91</b> |
| <br><b>KAYNAKLAR .....</b>                                          | <b>93</b> |

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Fiber takviyeli ve polimer matrisli kompozitlerin havacılık ve uzay araçlarından, deniz ve otomotiv endüstrisine kadar değişen pek çok sahada kullanımına, özellikle son dönemlerde, artan bir ilgi vardır. Bunun nedeni; fiber takviyeli polimer kompozitlerin klasik malzemelere oranla sahip oldukları hafiflik, yüksek “dayanım/ağırlık” oranı, dayanıklı ve kolay onarılabilmek gibi avantajlardır. Kompozit parçaların tasarım ve analizinin yanında onların onarımı ve bakımı da çok önemli bir konudur.

Hasarlı parçaların yama yapmak suretiyle gerçekleşen onarım teknolojisi, zaman ve maliyetlerde sağladığı avantajlar ve karmaşık geometrik parçalara da uygulanabilirliği nedeni ile her geçen gün geliştirilmekte ve daha büyük önem kazanmaktadır. Diğer taraftan, hangi tip onarılma tekniğinin uygun ve izin verilebilir olacağının belirlenmesi de önemli konulardan biridir. Bu yüzden, hasarlı kompozit parçalara fonksiyonlarını tekrar kazandırmak için modern onarım yöntemlerinin anlaşılması ve geliştirilmesi önemli hale gelmektedir.

Kompozit onarımı yeni gelişen bir konu olduğundan dolayı bilinen belli başlı metotlar kullanılmaktadır fakat bunlardan elde edilecek maksimum verime henüz ulaşamamıştır bu aşamada devreye optimizasyon konusu girmektedir. Malzeme, geometri ve fiber dizilimleri gibi parametrelerde optimizasyon yapılması önem arz etmektedir.

Kompozit yapıların bakım ve onarımının gerekliliği ve önemi nedeniyle literatürde yapılmış bir çok çalışma mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Ahn ve Springer (1998), hasara uğramış fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin onarımında kullanılan tekniklerin verimliliğini tespit etmek için deneysel bir çalışma yaptılar. Dolgu (the scarf), düzgün dıştan yama (the uniform lap) veya basamaklı dış

yama (the stepped lap) teknikleri ile yapılan onarımların kalitesi ve verimliliğini belirlemek için çekme testleri yaptılar. Çalışmalarında kısaca şu parametreleri göz önüne aldılar: onarımı yapılacak hasarlı plakaların malzeme tipi, onarım malzemesi tipi, dolgu açısı ve dolgu onarımda kullanılan dış tabaka sayısı, onarım öncesi ve sonrası malzemedeki nem oranı, test sıcaklığı, onarıma hazırlanan yüzeyin işlenmesinde kullanılan takımlar ve onarım bölgesinin yamanması esnasında uygulanan işlem sıcaklığı. Diğer taraftan aynı yazarlar dolgu ve düzgün dış yama teknikleri ile onarılan kompozit plakların hasar yüklerinin hesaplanmasına yönelik matematiksel modeller geliştirdiler. Geliştirilen formüllerden elde edilen hasar yükleri ile deneysel verilerin birbirleri ile çok uyumlu olduğu gözlemlendi. Keller (2004), Boeing firması adına kompozit yapıların bakım ve onarımı esnasında karşılaşılan sorunlar ve bu sorunların çözüm yöntemleri üzerine geniş perspektifli bir çalışma yaptı. Marioli-Riga ve arkadaşları (2004), özel bir problemi (hava araçlarının hasara uğramış parçalarının onarımı ile ilgili olarak) çözerken “hangi onarım ve analiz tekniğinin en uygun olacağı” konusundaki karmaşıklığı gidermek için spesifik ve standardize edilmiş bir metodoloji sundular. Tzetzis ve Hogg (2006-2008), karbon fiber kompozitlerin vakum destekli infüzyon sistemi ile yapılan onarımlarında yapışma ara yüzey tokluğunun geliştirilmesi üzerine bir çalışma yaptılar. Yapışma tokluğunu tespit etmek için; ana malzeme ile yama malzemesi arasında imalat esnasında teflon filimler kullanılarak başlangıç çatlakları oluşturuldu ve daha sonra tamir bölgesinden ön çatlak içeren DCB numuneler çıkarılarak Mode-I tabakalar arası kırılma tokluğu incelendi. Ana malzeme ile yama malzemesi arasında daha ince liflerden oluşan ara perde (karbon, polyester veya her ikisinin bileşiminden oluşan ince tabakalar) kullanımının yapışma tokluğuna etkisi incelendi. Ayrıca vakum destekli infüzyon sistemi ile onarım yapmanın avantajlarından da çalışmada bahsedilmiştir. Bleay ve diğer araştırmacılar (2001), ise fiberler koptuğunda hasar alanında serbest kalan reçine ve delikli fiberlerden meydana gelen polimer kompozitlerdeki delaminasyonların onarımı için bir teknik geliştirmişlerdir. Pang ve Bond (2005), mekanik dayanımı iyileştiren ve görünmeyen hasarlar için fiber takviyeli kompozitlerde “yayılma” (bleeding) adında özel bir onarım tanımlamışlar ve geliştirmişlerdir. Odi ve Friend yakın zamanda kompozit yapıların yapışma onarımı için sonlu elemanlar modellerinin karşılaştırmalı çalışmasını sundular. Bu

çalışmada konuyu çevreleyen, kompozit yapıların onarımı ve onarım şemalarının dizaynı için geliştirilen analitik tekniklere ihtiyaç vurgulanmasından dolayı yeniden inceleme yapmışlardır.

Gama ve arkadaşları (2003), dolgu tekniği ile onarılmış kalın kesitli kompozit plakların statik ve dinamik eksenel yükler altındaki dayanımını incelediler. Dinamik yükleme durumu için eksenel hasar gerilmesinin dolgu (the scarf) açısına ve yükleme hızına (the rate of loading) bağlı olduğu gösterilmiştir. Değişik malzemeler, dolgu açıları ve yükleme koşulları için kırılma/akma gerilme değerleri rapor edilmiştir. Charalambides ve arkadaşları (1998), karbon fiber/epoxy ile onarılmış bağlantıların statik ve dinamik (yorulma yükleri) altındaki performansını hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar yöntemi ile incelediler. Deneysel çalışmada kullandıkları test numunelerini 16 ay süre ile 50° C deki damıtılmış su içinde tutulan plaklardan (onarılmış) elde ettiler. Böylece ıslak ve sıcak ortam şartlarının statik ve yorulma dayanımı üzerindeki etkisini araştırdılar. Belhouari ve arkadaşları (2004), simetrik kompozit yapılarda tek taraflı veya çift taraflı yama ile yapılan onarımların kırılma mekaniği açısından nümerik bir analizini yaptılar ve çalışma sonucunda, çatlak ucundaki gerilme yığılma faktörünün çift taraflı yamada (tek taraflı yamaya oranla) ne kadar azaldığını incelediler. Leiborich ve çalışma arkadaşları (1990), onarılmış parçalarda kompozit yamaların yorulma çatlağı ilerlemesine etkisini incelemişlerdir. Naboulsi ve Mall (1998), çatlak barındıran alüminyum panellerin hasarlı bölgelerine kompozit yama yaparak bu yamanın etkisini nonlinear analizlerle ortaya koymaya çalışmışlardır. Aymerich ve arkadaşları (2003) kenarları dikilmiş grafit takviyeli kompozit levhaların statik çekme ve yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Kevlar ile dikmenin levha kenar delaminasyonuna etkisi araştırılmıştır. [-45/0/90] ve [-30/90] açılarına sahip simetrik levhalarda maksimum çekme mukavemeti ve çekmede yorulma ömrü belirlenmiştir. Tabakalı levhaların statik delaminasyon direnci, kalınlık boyunca dikilmiş levhalarda daha iyi çıkmıştır. Fakat kalınlık boyunca dikilmiş levhalarda daha iyi çıkmıştır. Fakat kalınlık boyunca dikmek [-30/90]<sub>s</sub> fiber oryantasyonuna sahip levhada maksimum çekme mukavemetini ve yorulma ömrünü arttırırken [-45/0/90]<sub>s</sub> fiber oryantasyonuna sahip levhada maksimum çekme mukavemetini ve yorulma ömrünü azaltmıştır. Jain ve arkadaşları (1998) kompozit levhalarda kalınlık boyunca kompoziti dikerek takviye etmenin yorulma ömrüne

etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada,  $[0/45/90]_s$  fiber açılara sahip tabakalar kalınlık boyunca kevlar iplikler ile zikzak formunda dikilmiş ve reçine enjeksiyon tekniği kullanılarak şekillendirilmişlerdir. Deney sonuçları, çatlağın dikilmemiş levhalarda levha kenarında başladığını göstermiştir. Ayrıca sonuçlar, dikilmiş levhaların yorulma ömürlerinin dikilmemiş levhaların yorulma ömründen daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bennati ve Valvo (2006) bası yüklemesi şeklindeki yorulmada kompozit plakalardaki tabakalar arası ayrılmanın ilerlemesini incelemişlerdir. Plak-ara yüzey düzleminin normaline ve teğetine etkiyen doğrusal elastik yaylar ile elastik ara yüzey yapıştırılmış iki alt plakadan oluşacak şekilde modellenmiştir. Mod I ve Mod II için potansiyel enerji boşalma oranı ve Mod I-Mod II açısı tespit edilmiştir. Shivakumar ve arkadaşları (2006) tabakalar arası ayrılma hasarı bulunan kompozit yapıların kırılması ve yorulması üzerine çalışmışlardır. Çalışmada kullanılan yöntem, Mod I yüklemesinde örgü tipi cam lifi/vinilester kompozitlere uygulanmıştır. Enerji boşalma direncinin, delaminasyon büyümesinin bir fonksiyonu olarak tespit edilmesi için Amerikan test merkezince standardize edilmiş Mod I yüklemesi kullanılarak kırılma deneyleri yapılmıştır. Meziere ve arkadaşları (2005) tek yönde karbon fiberlerle takviye edilmiş epoksi reçine ile emdirilmiş kompozitlerin yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Mergenelerdeki gerilme yığılmalarının meydana gelmemesi için özel test aparatları ve yöntemleri geliştirilmiştir. Ferreira ve arkadaşları (2006) epoksi ve polyester reçineler ile emdirilmiş cam lifi takviyeli kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine çalışmışlar ve elde ettikleri sonuçları literatürdeki cam lifi takviyeli kompozitlerin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Bu kompozitlerin ısı ve elektrik iletimi gibi özelliklerini belirlemişlerdir. Elektron mikroskobu kullanılarak hasar mekanizmaları incelenmiş ve kompozitlerin yorulma davranışları üzerine fiber hacim oranının etkileri belirlenmiştir. Beheshty ve arkadaşları (1999) malzeme özelliklerinin yorulma ömrüne etkilerini karbon fiber takviyeli ve cam lifi takviyeli plastik tabakalı kompozit kullanarak belirlemişlerdir. Her iki tip kompozit, darbe sonrası yorulma testlerine tabi tutulmuş ve darbe sonrası yorulma ömürlerinin farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Özellikle deniz araçlarında, askeri araçlarda ve inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon dışında malzemelerden üretilen kalın kesitli kompozitler de

çok geniş kullanım alanları bulmaktadır. Bu nedenle kalın kesitli ve hasarlı kompozitlerin onarımı da önemli araştırma konularından biridir. Hosur ve arkadaşları (2003), balistik darbeye maruz kalmış kalın kesitli ve örgülü S2-cam elyaf /vinylester kompozitlerin onarım stratejileri üzerine bir çalışmanın sonuçlarını sundular. Çalışmaları birkaç basamaktan oluşmaktadır: balistik darbe sonucu oluşan hasar alanının tespiti, hasarlı kısmın yapıdan çıkarılması, onarım yüzeyinin hazırlanması ve reçine infüzyonu ile yama yapılması. Daha sonra onarım kalitesi ve verimliliğini tespit etmek için onarılan kısımlar üzerinde çeşitli tahribatsız muayeneler ve onarım sonrası bir takım deneyler (darbe ve eğilme deneyleri) yaptılar. Cam, karbon ve aramid/epoksi kompozitler farklı enerjilerde uygulanan tekrarlı darbe yükleri altında incelenmiştir. Belingardi ve arkadaşları (2008), vakum infüzyon ve el yatırma yöntemleriyle üretilen yoğun cam takviyeli tabakalarda tekrarlı darbe testlerini uygulamışlardır. Bu çalışmada hasar ilerleme devresinde darbe etkisini, en yüksek kuvvet ve rijitlik kaybının darbe sayısının bir fonksiyonu olarak gelişiminin ve hasar içeriğinin hesaplanmasından değerlendirdiler. Tek yönlü karbon fiber takviyeli polieterimid (PEI) kompozitlerin düşük hız tekrarlı darbeleri, darbe-yorulma özelliklerini incelemek için 0.54 - 0.94 J enerji seviyesi değişiminde sarkaç tipi gereçle bir darbe test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı darbe yüklemelerine maruz kalan kompozit malzemelerin ömür süresini tarif etmek için analitik bir model ayrıca sunulmuştur. Morais ve arkadaşları (2005), tabaka kalınlığının takviyeli kompozitlerin tekrarlı düşük enerji darbelerine direncinin etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, kesin bir enerji kademesinin aşağısında tabakanın kesit alanı darbe direncini belirten en alakalı değişken olduğunu gösterdi. Bu çalışmada darbe enerjisinin arttığı sırada fiber karakteristikleri bağlantılı hale geldiği sonucuna varılmıştır.

Soutis ve çalışma arkadaşları yama yapılarak onarılmış karbon fiber/epoksi kompozit plakların bası yükleri altındaki davranışları üzerine bir çalışma yaptılar. Çalışmalarında, bası yükü altında kritik hasar mekanizmalarının 0° yönündeki mikroburkulmalar, matris kırıkları ve tabakalar arası ayrılma olduğunu ve bu hasarların temelde yapışma ara yüzeylerinde tetiklendiklerini gösterdiler. Hu ve Soutis (2000), eksensel bası yüklerine maruz dıştan yama edilmiş karbon fiber takviyeli kompozit plakların dayanımını incelemişlerdir. Koh ve diğer araştırmacılar (1999), yüzey

montajlı PZT sensor/aktüatör elemanlarında yapışma ile üretilmiş kompozit yapıların hasar değerlendirmeleri üzerinde çalışmışlardır. Kessler ve White (2001), örgülü cam/epoksi kompozitlerde delaminasyon hasarının iyileştirilmesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır.

Bair ve arkadaşları (1991), hasara uğramış kompozit plakların analizi için bir sonlu elemanlar yaklaşımı sundular. Biri tabakalı plakların çekme yükleri diğeri sandviç yapıların eğilme yükleri altındaki analizi olmak üzere iki durumu göz önüne aldılar. Hasarsız, hasarlı ve onarılmış plaka durumları için analizler yaparak elde edilen sonuçları gerçek testler ile karşılaştırdılar. Çalışmalarında ayrıca kullanılan değişik modelleme tekniklerinin avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır. Chue ve Liu (1995), tabakalı bir kompozit yamadaki tabaka dizilişinin, ortasında çatlak bulunan ve iki eksenli bir yükleme altında bulunan bir plakanın onarımı üzerindeki etkisini araştırdılar. Çalışmada, sonlu elemanlar metodu ve şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu teorisi kullanılarak söz konusu yükleme durumu için optimum tabaka dizilişleri tespit edilmiştir. Campilho ve diğer araştırmacılar (2005), ABAQUS programını kullanarak çekme kuvvetlerine maruz tek ve çift taraftan onarılmış kompozit plaklardaki gerilme dağılımı ve dayanımı üzerine bir araştırma yaptılar. Bir onarımın performansını etkileyen en önemli parametrelerin numunenin geometrisi, tabaka dizilişi ve yama kalınlığı olduğunu tespit ettiler. Ayrıca tabaka özelliklerinin, ana malzeme/yapıştırıcı ve yapıştırıcı/yama ara yüzey özelliklerinin etkisini de incelediler. Benzer şekilde bu konu ile ilgili olarak yapılan yayınların listesini genişletmek mümkündür. Ayrıca kompozit malzemelerin onarım ve bakımı ile ilgili temel bilgilere çeşitli kitaplardan ulaşmak da mümkündür. Wilmarth (1985), BREPAIR adında bir analiz programı geliştirdi; program sınır kollokasyon metoduyla cıvata bağlantılı onarım için yapılmıştır fakat BREPAIR çift simetrisi olan konfigürasyonlara uygulanan tek eksenli ve kayma yük durumları ile sınırlı olarak kullanılabilir. Bu programın kullanılması ile yapılan çalışmada; Bohlmann ve arkadaşları (1981), kanat kabuğu tabakalarında cıvatalanmış onarım alanı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada elde edilen deneysel verilerle BREPAIR programını doğrulamışlardır. Her ve Shie (1998), klasik sonlu elemanlar yaklaşımını kullanarak cıvatalı onarılmış kompozitlerin analizini yaptılar. Widagdo ve Aliabadi (2001), mekanik olarak bağlanmış kompozit onarım yamalarının, analizini iki boyutlu sınır

elemanları için yapmışlar ve çatlaklı panellerin onarımının modellenmesi için bir sınır eleman formülü geliştirmişlerdir. Bu onarılmış panellerde  $E_2/E_1$  “rijitlik oranının”, “rijitlik yoğunluğu katsayısı” değerine etkisini göstermişlerdir. Attia ve arkadaşları (2003) yorulma yüklerine maruz kompozitlerde darbe sonucu oluşan hasar yayılımını önceden belirlemek için yeni bir yöntem ileri sürmüşler ve sonlu elemanlar metodu kullanarak çözüm yapmışlardır. Numune olara karbon fiber takviyeli polimer esaslı kompozit levha kullanılmıştır. Mevcut çalışmadan elde edilen teorik sonuçlar ile daha önceden yapılmış olan deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır

Zhang (2001), cıvatalı kompozit bağlantılar ve onarımlarının yapısal bütünlüğünü doğrulayan bir sınır eleman metodu bulmuştur ve bu metodun maksimum hasar yükleri ve kuvvet dağılımı üzerinde çok iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Fekirini ve arkadaşları (2008), sonlu elemanlar metoduyla farklı özelliklerdeki iki yapışma bandı ile yapılmış kompozit onarımının analizini yaptılar. Wang ve Gunnion (2008), kompozit yapılarda dolgu bağlantılarının dayanımlarını buldular ve tasarım metodolojisi geliştirdiler. Yığın halindeki kompozit tabakalarının “dolgu bağlantı dayanım”ına etkisini gözlemlediler. Yala ve Megueni (2008), çatlak ucundaki gerilme yoğunluk faktörünü (K) etkileyen; plaka ve yamadaki yapışmanın kimyasal özellikleri ve boyutları gibi farklı parametrelerin etkilerini araştıran deneysel bir tasarım metodu kullandılar.

Bu çalışmada, onarılmış kompozit yapının uygulama şartlarında beklenen işlevlerini eksiksiz yerine getirmesi için en uygun onarım parametrelerinin eksenel yükleme durumuna göre tespit edilmesi için belli parametrelerde optimizasyon yapılarak en uygun değerlerin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

## BÖLÜM İKİ

### KOMPOZİT YAPILARDA ONARIM

Onarım, çeşitli nedenlerle hasar görmüş yapıların tekrar kullanılabilmesi için yapılan işlemlerdir.

Fiber takviyeli polimerlerden imal edilmiş yapılarda hasar iki kategoride toplanır. İlkinde hasar, çarpışma veya farklı sıra dışı kuvvetlerden kaynaklanır. İkincisinde ise; hasar, tasarım yetersizlikleri veya üretim hatalarından dolayı oluşabilir. Bu durumda hasar bölgesi yeniden onararak malzeme orijinal mukavemetine yakın hale getirilmelidir. Yükler ve gerilme dağılımları, uygun tasarım değişiklikleri yapılarak tekrar incelenmelidir. Hasar beklenmedik bir olaydan kaynaklandığında ise ikincil bir yapışma malzemeyi daha güçlü yapacak veya orijinal mukavemet değerlerine getirecek yeni, ek malzeme kullanılmalıdır. Genelde fiber takviyeli polimer yapılara onarım yapmak diğer malzemelerden imal edilmiş yapılara onarım yapmaktan daha kolaydır. Ancak uygun çevresel şartlar ile hazırlama ve çalışma şartları çok önemlidir.

Günümüz hava taşıtları kullanım ömrünün sonuna yaklaştığında, perçin delikleri çevresinde ve diğer yüksek gerilmeye maruz bölgelerde gelişmiş yorulma çatlakları barındırır. Hava taşıtlarının ömrünü uzatmak için bu çatlakları önlemede onarım kullanılır. Yeni onarım metotlarını oluşturan kompozit tabakalar ve yamalar, hasarlı elemanların ömrünü uzatabilir. Onarımı kolaylaştırmak için birçok çelik perçin veya alüminyum plaka yerine tek bir kompozit tabaka hasarlı yapıyla birleştirilerek kullanılabilir. Yapışma ile yapılan onarımın mekanik olarak yapılan bağlantılara göre birçok avantajı vardır:

- Perçin deliği çevresinde yeni bir gerilme dağılımı meydana gelmez
- Yamanın; yüksek rijitlik/ağırlık ve dayanım/ağırlık oranları azalmaya karşı direnç gösterir.
- Düzensiz geometrili yapılarda onarım daha kolay yapılabilir.

- Yüksek yorulma ömrü ve korozyon direnci elde edilir.
- Üretimde zaman kazandırır.



Şekil 2.1 Bir savaş uçağının yapısal hasarı (Philip, Larson The Air Force Research Labrotary [AFLR], 2008 )

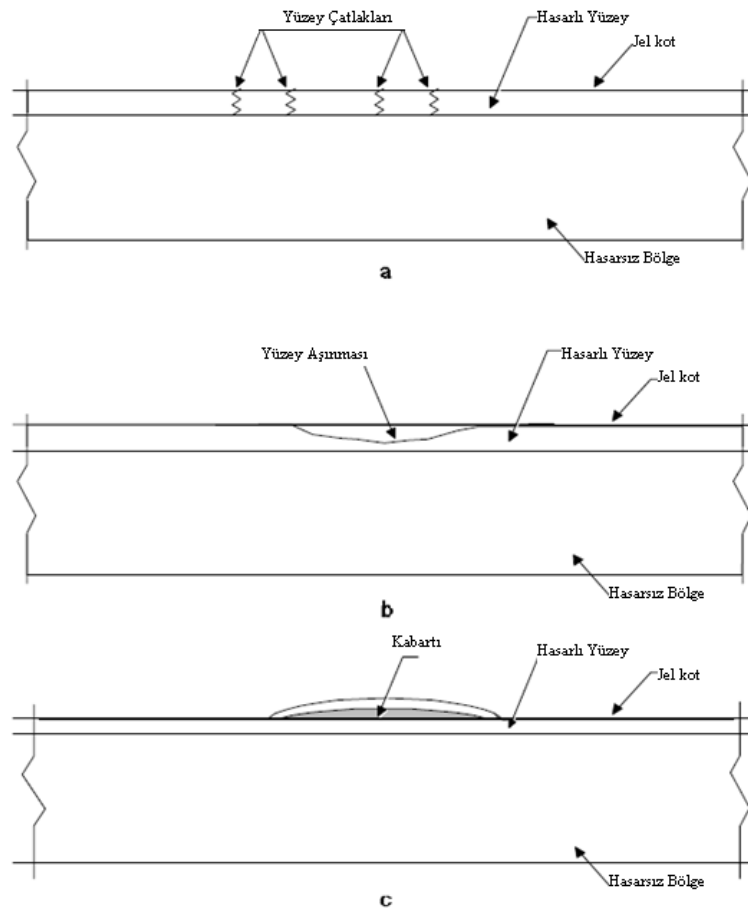
Yapışma ile yapılan onarım ilk olarak askeri havacılık alanında kullanılmıştır. Bu uygulamalara örnek verecek olursak:

- C-141 filosunda delikler çevresindeki çatlaklarda
- F-16'larda çatlamış yakıt menfez deliklerinde
- B-52G/H modellerinde üst kanadın çatlamış ek yerlerinde
- B52'lerin çatlamış yakıt geçiş kapısı çevresinde
- C-5A filosunun ana gövdesinin üst parçasındaki çatlaklarda
- F-111'in alçak kanat kabuğundaki çatlaklarda onarımlar yapılmıştır.

## 2.1 Hasar Tipleri

### 2.1.1 Yüzey Hasarı

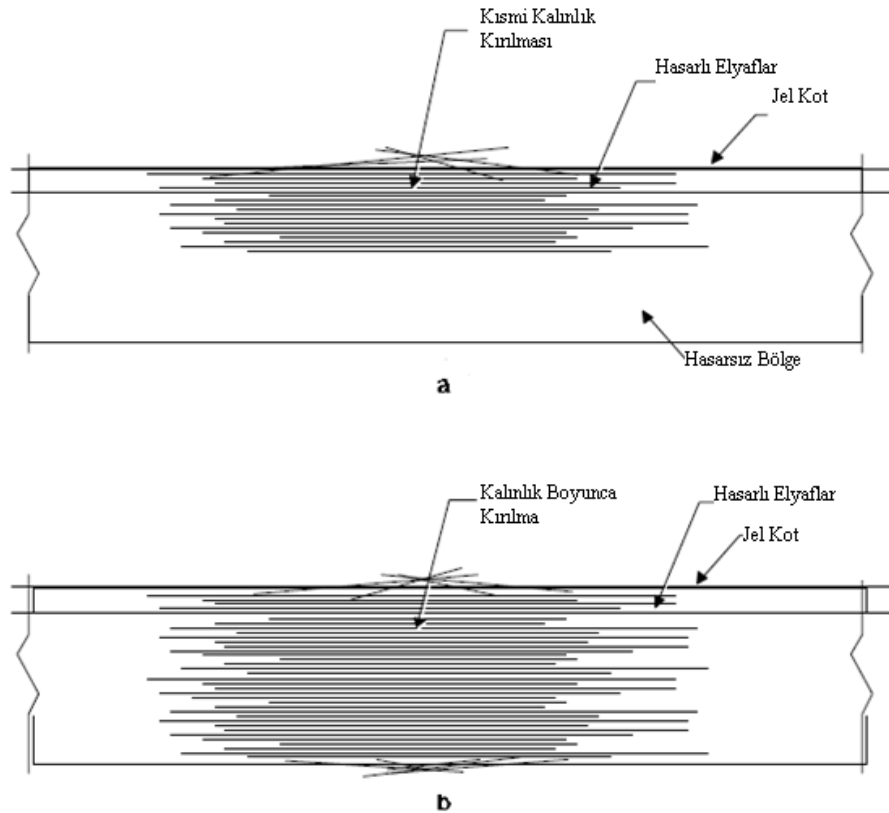
Çatlamalar, aşınmalar ve kabartılar cam fiber takviyeli kompozitlerin yaygın olan hasarlarıdır. Yüzey hasarları 2mm'den az olan kalınlıklar için söz konusudur ve hasarsız bölgeye yayılmazlar. Bu hasarların tek başına bir anlamı yoktur fakat göz ardı edilirlse fiberler arasına sıvı sızması ile tabaka ayrılmaları görülebilir. Çatlamalar da yüksek gerilmeler ve yüzey altında tabaka hasarları gösterebilirler.



Şekil 2.2 Başlıca hasarlar a)çatlama, b)aşınma, c)kabartı  
(Kadala ve Gregory, [www.marinecomposites.com](http://www.marinecomposites.com),)

### 2.1.2 Tabaka Hasarı

Sıra dışı yüklemeler çatlaklara, küçük deliklere, ezilmelere ve tabakalar arası kaymalara neden olabilir. Bu hasarlar ilk olarak cam fiber takviyeli kompozitlerin cam fiberlerinde meydana gelir. Tabakalar arası kayma düzlem dışı gerilmelerden dolayı ilk olarak süreksiz bölgelerde başlar. Onarım prosedüründe bu hasar tipi “kalınlık boyunca kısmi hasar” ve “kalınlık boyunca hasar” olarak ikiye ayrılır. (Şekil 2.3)



Şekil 2.3 Hasarlar: tabaka çatlakları, kırılmalar, küçük delinmeler, delaminasyonlar  
a)kalınlık boyunca kısmi hasar, b)kalınlık boyunca hasar (www.marinecomposites.com)

### 2.1.3 Bağlantı Delaminasyonu

Gemi bölmesi veya güverte gibi panel bağlantıları, üst üste konmuş cam fiberler içeren tabakalı bağlantılar ile yapılır. Bu formlar bağlanacak yapısal bileşenleri birleştirir. Ancak birleştirme yapılırken bileşenlerin bütün bölgeleri kür işlemine tabi tutulmalıdır. Çünkü tabakalı bağlantı elemanlarının geometrisi gerilme

konsantrasyonu yaratmaya eğilimlidir ve bu elemanlar delaminasyon ve sıyrılmalara elverişlidirler.

## **2.2 Onarımın Amaçları ve Onarıma Genel Bir Bakış**

Onarım, makul giderlerde çeşitli yapıların hasarlı veya üretim hatası olan bileşenlerinin ömrünün uzatılması için kullanılır. Onarımın başlıca amaçlarını şöyle sıralayabiliriz:

- Yorulma iyileştirilmesi
- Çatlak yamalama
- Korozyon onarımı

Yorulma iyileştirilmesi: Onarım sadece gözle görülen hasarların giderilmesi için gerekli değildir. Görünmeyen küçük çatlakların yorulma nedeniyle büyümesi de çeşitli büyük hasarla sonuçlanabilir. Tekrar tasarlama, pahalı kontroller ve panellerin değiştirilmesi gibi gereklilikler beklenenden daha sık periyotlarda gerçekleşebilir. Yorulma iyileştirilmesi için yapılan onarımlar, yanlış tasarlanmış yapıların gerilme yoğunluğunu azaltmak, yorulma ömrünü uzatmak ve tekrarlanan kontrolleri minimize etmeyi hedeflemektedir.

Çatlak yamalama; çatlaklı yapının onarımı yapıya dış yama yapılarak gerçekleştirilebilir. Bu da çatlağın ilerlemesini durdurur veya yavaşlatır.

Korozyon onarımı; korozyon hasarı, hasarlı bölgenin yapıdan kaldırılması işlemi ile giderilir. Kalan girintili parçaya dolgu malzemesi ve yama yapılarak yapının orijinal yük taşıma değerleri yakalanmaya çalışılır.

Onarımda üç temel bilgi önem arz eder:

- 1) Tüm onarımlar sonradan eklenen bağlantılardır ve bu nedenle dayanımları reçinenin yapışma kabiliyetine bağlıdır.
- 2) Yüzey alanını arttırmak onarım mukavemetini ve sürekliliğini artırır.

3) Ana tabakanın kalınlığını, yoğunluğunu ve katman oryantasyonunu parçanın işlevselliğini koruyarak arttırmak büyük avantaj sağlar.

Hasarlı kompozit yapının onarımı üç aşamada gerçekleşir. Bunlar; yapısal hasar tespiti, onarım tasarımı ve analizi, onarımın yapılması ve muayenesidir. Kusurlu yapının tespiti onarım tasarımından önce yapılması gerekir. Kusur tasarım hatasından veya çatlak, korozyon gibi hasarlardan kaynaklanabilir. Tespit sadece yapısal tasarım detaylarını değil çevredeki yapıya zarar verecek doğal olayların da hesaba katılmasını kapsamalıdır. Bir onarımdan orijinal yapının tüm fonksiyonlarını yerine getirmesi beklenir. Bu şartlar; maksimum yük taşıma, süreklilik, hasar toleransı, çevre, sağlamlık, fonksiyonel aerodinamik ve elektronik performanslardır. Fakat onarım, yapının kullanım ömrünün sona ermesinde hızlandırıcı bir faktör olabilir. Bu durumda orijinal ömürden azalan miktar kabul edilebilir değerlerde olmalıdır. Bu bilgi uygun performans özelliklerine sahip olacak onarım için temel bir tasarım bilgisidir.

Yapıya ait bilgiler saptandıktan sonra onarım tasarımı başlayabilir. Onarım tasarımı orijinal yapının sağlaması gereken bütün şartları sağlamalıdır. Tasarımda önem verilmesi gereken iki alan hasarın kaynağı ve onarımın yapılmasıdır. Doğru tasarlanmış bir onarım eğer doğru yapılmamışsa performans kriterlerini yakalaması mümkün değildir. İşlemin son aşaması da muayenedir.

### **2.2.1 Yapısal Tespit**

Onarım tasarımının başlangıç noktası yüklemeler, gerilme dağılımı, geometri, çevresel etmenler gibi yapıya ait özelliklerin anlaşılmasıdır. Doğru bir onarım yapılabilmesi için gerekli olabilecek özellikler şunlardır:

- Onarılacak yapının malzeme tipi ve geometrisi
- Aerodinamik ve/veya elektromanyetik sınırlamalar
- Boyut sınırlaması
- Ek yapı veya hazır sistem

- Lokasyon sınırlamaları
- Kolay yanabilme
- Ağırlık ve denge
- Termodinamik sınırlamalar
- Aviyonik veya elektronik sınırlamalar
- Çevresel etkiler
- Gerilme değerleri
- Yükleme
- Yüzey hazırlık sınırlamaları
- Onarım malzemesi ve ekipmanların uygunluğu ve bütünlüğü

Yapısal kusurlar temelde yanlış tasarım ve üretim şartları veya normal çalışma şartlarında oluşabilirler. Yanlış tasarlanmış yapı ömür kriterini sağlamak için daha sık muayene ve /veya tekrar tasarlama veya onarım gerektirir. Hasar; paslanma sonucu çürüme ve yorulma çatlaklarının sonucu olarak yapısal yaşlanmadan veya asit dökülmesi, şimşek çarpması, kuş çarpması, delinme ve alet çizikleri gibi spesifik olaylardan dolayı meydana gelebilir.

Hasarın nedeni belirlenirse sonrasında gerçekleşecek hasarlar kolayca giderilebilir. Örneğin korozyon ortam, onarımda veya yapı çevresinde ek bir hasar oluşturabilir. Eğer bir hava taşıtında uçuşta hasar meydana gelirse bu diğer hava taşıtları için önemli bir deneyim olur. Hasarın nedeni bir defa anlaşılmışsa aynı bölgede nüksedecek hasara karşı önlem alınabilir.

### 2.2.2 Onarım Tasarımı

Onarım tasarımı; statik dayanım, süreklilik, işlevsellik, sağlamlık ve muayene edilebilirlik gibi özellikleri hasar toleransına uygun olacak şekilde sağlamalıdır. Yapısal ve yapısal olmayan sınırlamalar da dikkate alınmalıdır.

Tasarımın hedefi yamanın, taşınan yükün çoğunun transfer edilebilmesidir. Bu ana yapıdan yamaya olan yük transferi; hasarın by-pass edilmesi, gerilme yoğunluğu faktörü (K) azalması ve yorulma ömrünü uzatması gibi avantajlar doğurmalıdır. Bununla birlikte hesaba katılması gereken iki önemli faktör de yapışma bölgesinde gerçekleşen maksimum kayma gerilmesi ve yama üzerinde, yükleme yönündeki normal gerilmedir.

Kompozit yama onarımı, tasarımı ve yukarıda belirtilen değerlerin hesaplanması için analitik ve nümerik olarak çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bunların en yaygın kullanılan analitik metodu “Rose Denklemleri”dir. Diğer bir taraftan “Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)” başka bir yaygın metottur. SEM’in geniş kullanım alanı, çok yönlülüğü ve doğruluğu daha az efor sarf ederek çözüme ulaşmamıza yardımcı olur.

Yamanın şekli, boyutu ve kalınlığı bir onarım tasarımıdaki en önemli parametrelerdendir. Bununla birlikte onarımda dikkat edilmesi gereken bazı ince noktalar vardır. Örneğin; yamanın kenarları, yük transferinden dolayı kenarlarda meydana gelen gerilme yığılması nedeniyle inceltirilir.

Kompozit yama onarım tasarımının birkaç önemli kuralı vardır;

- Tabaka dizilimleri; çatlağa dik, yükleme doğrultusunda olmalıdır.
- Tabakaların küçük bir kısmı eksenel yükleri ve kayma gerilmelerini taşımak amacıyla yükleme doğrultusuna göre  $90^\circ$  ve  $\pm 45^\circ$  açıları ile dizilebilirler.
- Ana yapıdan yamaya veya yamadan ana yapıya yük aktarılırken yama basamak sayısı, basamak derinliği, bindirme uzunluğu gibi onarım parametreleri büyük gerilme yığılmalarına sebebiyet vermeyecek şekilde seçilmelidir.

Basamaklı yama yapılması özellikle gerilme geçişinin azalarak devam etmesini sağlar. Bu yolla yapışma yüzeyine geçen gerilmeler azalarak sıyrılma önlenmiş olacaktır. Ayrıca arzu edilmeyen gerilme yığılmalarından da kaçınılmış olacaktır.

### ***2.2.3 Onarım Malzemesi Seçimi***

Yapışma ve yama dayanımları belirlendikten sonra uygun malzeme seçimi yapılır. Yama malzemesi seçerken hesaba katılması gereken faktörler; gerekli rijitliği sağlamak için istenen yama kalınlığı, kullanımdaki sıcaklık ve çevre şartları, malzemenin kimyasal uygunluğu ve maliyetleridir. Seçilen malzemenin hasarlı bölgedeki beklenen şartlara, maksimum gerilmelere ve yorulma gerilmelerine dayanması gerekir. Onarımlarda metalik parçalarda kullanılabilmektedir. Bu tip durumlarda; onarım malzemesi ve onarılmış yapı arasındaki termal genleşme katsayısı (CTE) uygunluğu önemli bir faktördür. CTE’deki farklılıklar, onarım dışında yapısal hasara veya yama delaminasyonuna sebebiyet verebilir. Onarım tasarımında yapışkan ısıtma işlemi süresince ve yapının kullanımı esnasında doğacak sıcaklık farkından kaynaklanan termal gerilmeler de hesaba katılmalıdır.

En sık kullanılan yama malzemeleri; boron/epoksi ve karbon/epoksi prepreglerdir. Boron/epoksinin, karbon/epoksiye göre mekanik özellikleri daha iyidir. Oysa karbonun iyileştirme işleminden sonra meydana gelen artık gerilmelerin düşük olmasına neden olan termal genleşme katsayısı daha yüksektir. Fakat boron kesimi karbondan daha zordur ve boronun serilmesi de zordur çünkü kolay şekil alamazlar. Ayrıca daha pahalı ve az bulunurlar. Diğer taraftan karbon prepregleri ucuzdur ve kolay bulunurlar. Yeterli mekanik özelliklere sahip olan karbon prepregler kolay kesilebilir ve onarılan yapının şeklini kolayca alabilirler. Bu nedenlerle karbon yama kullanımı daha yaygındır. Fakat, alüminyum ile birleştiklerinde korozyon oluşur.

Cam fiber prepregler, yamayı çevresel etmenlerden korumak için üzerine yapıştırılırlar. Bu amaçla kullanılan cam fiberler yamanın yük transferine pek katkıda bulunmazlar.

Yapıştırıcı seçimi ise; yapışma dayanımı gerekliliğine, kullanım çevre şartlarına ve uygun kür (ısıtarak malzeme özelliklerini iyileştirme) cihaz özelliklerine bağlıdır.

Genelde epoksi bazlı yapıştırıcılar kullanılır çünkü epoksi yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Ayrıca yorulma ve darbe yükleri açısından toklukta iyi bir davranış gösterir. Film yapıştırıcılar da piyasada tercih edilen yapıştırıcılardandır. Kalıp halinde bulunurlar ve fiberler (genelde cam fiberler ile kullanılırlar) yamaya eklenene kadar dayanıklılık ve kolay tutunma özellikleri sağlarlar. Film yapıştırıcıların en önemli avantajı; kullanımdan önce karıştırılmalarına gerek yoktur böylece mekanik özellikleri karışımın nasıl olduğuna bağlı olarak değişmez. Dahası uygulanmaları kolay ve yamayla aynı anda kür işlemine tabi tutulabilirler. Fakat diğer yapıştırıcılara göre pahalıdırlar ve soğuk ortamda depolanmaları gerekmektedir.



Şekil 2.4 Bir uçak gövdesinin yama ile onarımı (Defence Science and Technology Organisation (n.d.) [www.dsto.defence.gov.au](http://www.dsto.defence.gov.au))

#### **2.2.4 Onarım Analizi**

Onarımı yapılan orijinal yapının fonksiyonları göz önüne alınarak tasarlanan onarımın verimliliğine dönük bir takım analizler yapılabilmektedir. Genellikle yöntem olarak ya sonlu elemanlar metodu gibi yöntemler ya da uygun kapalı form analizler yapılabilmektedir.

### 2.2.5 Onarım Yapılışı

Yapışma ile yapılan onarımda ilk olarak yüzey hazırlığı, ısıtma metotları, basınç metotları, kür işlemleri ve muayeneler yapılır.

Yamanın, yapı yüzeyine iyi yapışması yüzey hazırlığı ve onarım sürekliliği açısından önemlidir. Onarım malzemesinin imalat prosedürüne uygun olması gerekir.

Kür çevrimlerindeki sıcaklık değerleri ısıtıcı örtü, ısıtma blokları, fırın, otoklav, sıkıştırılmış hava veya ışıma ısısı üreten lamba sistemleri tarafından ayarlanır. En yaygın kaynak olan ısıtıcı örtünün ısıtma direnç kabloları oldukça esnektir bu nedenle onarım bölgesini kaplayabilirler. Isıtma metodu seçmede önemli faktörler şunlardır:

- Güç gereksinimleri: gerekli sıcaklığa, ısıtılan bölgenin kalınlığına, ısıtılan alana ve malzemenin yayılımına göre belirlenir.
- Isıtıcının yeri: genelde termal muayenelerde belirlenir.
- Onarımdan önce ve onarım esnasında gerekli olan sıcaklık dağılım kontrolü: ısı çiftler (thermocouples) ile yapılır.

Isıtma işlemi boyunca uygulanan basınç işlemi yapı, yapışkan ve yama arasındaki boşlukları minimize eder. Vakum torbası, mekanik aletler veya otoklav ile basınç yapılabilir. En yaygın basınç tekniği vakum torbası (vacuum bag) metodudur. Bu metotta hava sızdırmayan poşet, onarım bölgesine vakum yaparak bütün havayı boşaltır.

Tamamlanan onarımda yapıdaki hasarın büyümediğini ve beklenmeyen durumlar bulunmadığından emin olmak için tahribatsız muayene yapılır. Bu teknikler; indüksiyon akımı, boya geçişi, ultrasonik, x ışını ve termografik muayenelerdir.

## 2.3 Onarım Metotları

Birkaç çeşit onarım metodu mevcuttur bunlar arasında doğru seçim yapmak çok önemlidir. Öncelikle hasar tipi incelenmeli ve geçici, kalıcı veya onarılmayacak düzeyde olup olmadığı belirlenmelidir. Ekipmanların yeterliliği ve metodun sağlayacağı kolaylıklar düşünülüp seçim yapılmalıdır. Bunların yanı sıra servis ömrü gözetilerek onarılmış yapının ne kadar süre için kullanılacağı da önemli bir konudur. Bazı durumlarda da zaman yetersizliği ve onarımın pahalı olmasından dolayı parça değişikliği yapmak gerekebilir.

### 2.3.1 Koruyucu Bant Metodu

Koruyucu bant metodunda kullanılan bant ince alüminyum folyodur. 0,025 ila 0,075 mm arasında değişen kalınlıklarda bulunabilir. Folyonun arkasında çıkarılması gereken bir kağıt bulunur. Kağıdın altında ise basınca karşı hassas olan yapışkan vardır. Bu kağıt çıkarıldıktan sonra folyo, söz konusu yüzey iyice temizlendikten sonra üzerine yapıştırılır. Folyo su girişini engeller ve serbest kalmış fiberlerin dağılmasını engeller ve serbest kalmış fiberlerin dağılmasını önler. Geçici bir onarım metodu olan bu metot hava taşıtlarında bir veya birkaç uçuş için kullanılır. Dayanım sağlamaz fakat küçük hasarların daha kötü olmasını engeller ve böylelikle yapılacak kalıcı yama boyutlarını minimize etmiş olur. Koruyucu bant metodu, elektriksel iletkenliklerinden dolayı tarama alanındaki radarlar üzerinde kullanılmamalıdır ancak tarama alanının gerisinde kalan radarlarda kullanılabilir.

### 2.3.2 Reçine İle Kapatma Metodu

Reçine ile kapatma başka bir geçici onarım metodudur. Bu metotta hasarlı bölge, serbest kalan fiberleri tutmak ve hasar alanının boyutunun artmasını engellemek için onarım reçinesi ile kaplanır.

### 2.3.3 Doldurma Onarımı Metodu

Bu metot, uygun hasar sınırlarındaki küçük delikler barındıran bal peteği (*honeycomb*) panelleri için kullanılır. Delikler, oda sıcaklığında uygun doldurma bileşiği ile doldurulur. Kalıcı yama yapılane kadar su girişi engellenmiş olur. Ayrıca

doldurma bileşiğinin üzeri su emilimini minimuma düşürmek için koruyucu bant metoduyla kullanılan folyo ile kaplanabilir.

#### **2.3.4 Cıvatalanmış Çiftler İle Onarım Ve Yama Onarımı Karşılaştırılması**

Cıvatalanmış çiftler ile onarım metodu iki farklı biçimde uygulanabilir;

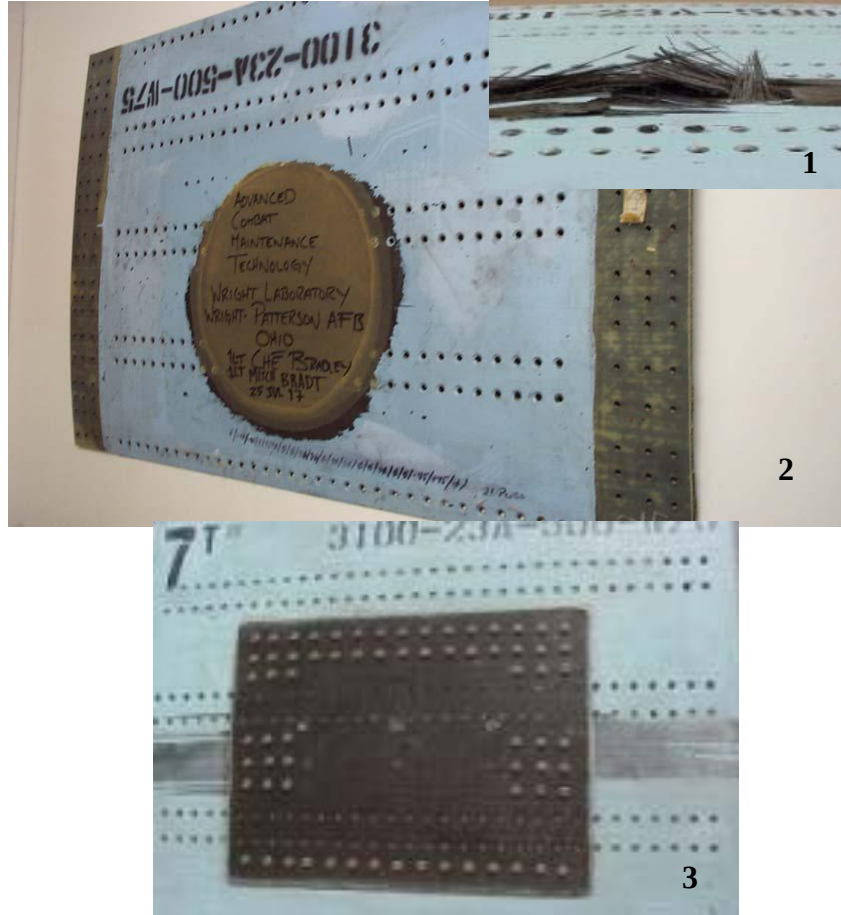
1) Geçici bir onarım olarak metotta kullanılan cıvata dışta metal bir kabuktan ve içte geniş çaplı rondelalardan oluşur. Hasarlı büyük bir kanadın veya çeşitli nedenlerle sıyrılmış dış kaplamanın bal peteği çekirdeğinin ve panellerinin cıvatalanması ile onarım yapılır. Bu metotta uçağın bütün panelini onarmak karmaşıklığa neden olup parçanın hurdaya ayrılmasıyla sonuçlanabilir. Hurda haline gelmemişse bile kapsamlı ve pahalı bir onarım gerektirir. Ancak bu metodun önemli bir avantajı vardır: hava taşıtlarının minimum gecikmeyle üsse dönmelerine olanak sağlar. Çünkü onarılmış yapıda tekrar hasar ya da cıvataların gevşemesi gibi istenmeyen bir durum görülürse anında müdahale ile onarım yapılarak hava taşıtı kısa sürede tekrar havalanabilir.

2) Kalıcı bir onarım olarak yapılan onarımda ise eğer katı, tabakalı kanat kabuğuna veya benzer panellere yapılacaksa kalıcı olabilir. Bu durumda metal plakada bütün deliklerin açılmasından ve son şeklin verilmesinden sonra anot işlemi veya başka uygun işlemlerin yapılması gerekir. Kalıcı cıvatalama onarımı genelde kalın panellere (2 mm veya daha fazla) yapılır. Bu yönüyle kalıcı cıvata onarımı, kalın panel onarımında geniş bir dolgu bağlantısı gerektiren yapışmalı yama onarımından daha hafif ve daha ucuz olur.

Fakat yama onarımının cıvatalı onarımlara göre avantajları daha fazladır.

- Onarılan yapıda delik açılmaz. Dolayısıyla yapıda artık gerilme yaratan ve yorulma ömrünü azaltan zayıf noktalar oluşturan ek bir gerilme yığılması meydana gelmez.
- Gerilme yoğunluğu çatlak üzerinde oldukça azalır çünkü yükler daha büyük bir yüzeye dağılır. Bu durum yapışma kalitesine göre değişkenlik gösterebilir.

- Onarım daha hafif ve daha incedir. Bu iki avantajın taşıtlarda yakıt tüketimi ve aerodinamik etkisi açılarından önemi büyüktür.



Şekil 2.5 Aynı hasarlı ve delikli iki panelin;1)hasarı, 2)dolgu yama ile onarımı, 3)çivatalı çift ile onarımı (Abaris Training Notes 2007)

### 2.3.5 Oda Sıcaklığında El Yatırması Metodu

Onarım şartlarına uygunluğu ve birçok avantajından dolayı çok tercih edilen bir metottur. Bu metodun avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- Kullanılacak kumaş veya bandın onarılacak yüzeyin şekline kolay uyum sağlamasına izin verir.
- Hızlı kürleşme gerekmediğinde ısıtma işlemine gerek duyulmaz.

- İyi bir yapışma için vakum basıncı yeterli olur.
- Birçok durumda gerçekleşen herhangi bir performans kaybını kapatmak için ek kumaş tabakaları kullanılabilir.

Fakat bu metodun iki dezavantajı vardır:

- Yüksek sıcaklıklarda performansı düşük bir onarımdır.
- Reçine hassas bir şekilde hazırlanmalı, karıştırma ve tartma işlemleri doğru bir şekilde yapılmalıdır.

### **2.3.6 Yüksek Sıcaklıklarda El Yatırması Metodu**

Bu metod, oda sıcaklığında el yatırması metodunun bütün avantajlarını kapsar ek olarak daha büyük parçalar için de kullanılabilir. Sadece bir dezavantajı vardır o da ısıya ihtiyaç duymasıdır. Isıl çiftler doğru yerleştirilmeli ve bütün kür (pişme) işlemi boyunca yama bölgesindeki işlem sıcaklığının minimum değerinde seyretmesi gerekir. Bu sistemler yaklaşık 95°C’ de kür işlemine tabi tutulmalıdır.

### **2.3.7 Pre-Preg Onarımı**

Pre-preg ingilizcede açık olarak “preimpregnated” şeklinde yazılır. Bu da “önceden emdirilmiş” manasına gelmektedir. Önceden reçine emdirilmiş kumaşlar anlamında bu tabir kullanılır.

Pre-preg onarımı birkaç biçimde yapılabilir;

- Düşük sıcaklık (yaklaşık 95°C) pre-preg kürleşmesi: sıcak kürleşen el yatırması metoduna benzer. Bu alanda geliştirme çalışmaları devam etmektedir.
- 120°C’ de kürleşen pre-pregler: yaklaşık 120°C veya 180°C’ de çalışacak yapılarda onarım parçası olarak kullanılabilirler.
- 180°C’ de kürleşen pre-pregler: 180°C’ de çalışacak yapılarda onarım parçası olarak kullanılabilirler. 120°C veya daha az sıcaklıklarda kullanılamazlar.

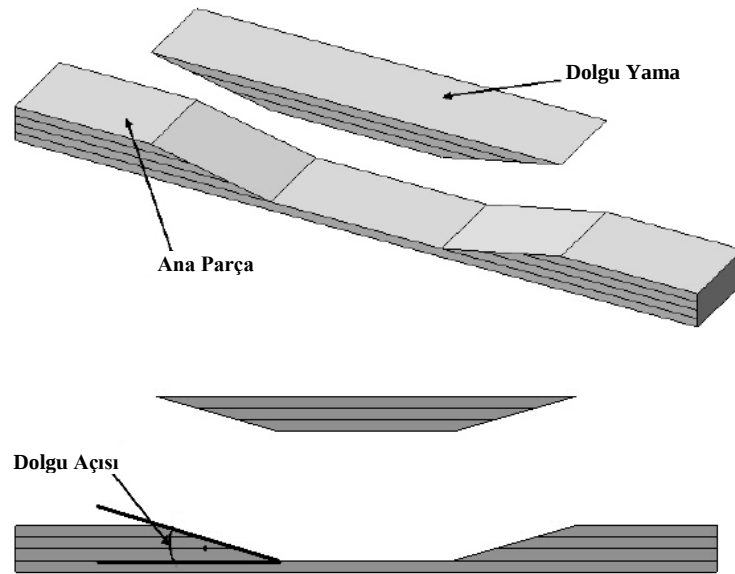
Eğer büyük boyutlarda bir onarım yapılacaksa pre-preg onarımı ile yapılmalıdır. İmalatçılar genelde pre-preg onarımını tercih ederler çünkü reçine karıştırma işleminde gerek yoktur ve pre-preg onarımı ile yapılan onarımlar temiz ve kolay olur.

Ancak; eğer onarım orijinal kür sıcaklığında yapılıyorsa bal peteği yapıları için sorunlar ortaya çıkar. Onarım alanı ısıtıldığında onarımı çevreleyen bal peteği yapı hücrelerindeki hava basıncı, eğer hücrelerde su buharı bulunuyorsa ve kür sıcaklığı 180°C ise atmosfer basıncından oldukça yüksek bir basınç oluşturur. Dış basınç genelde vakum ile yapılır normal olan 0,7 bar basınçtır. Onarım çevresindeki bal peteği yapılarından oluşan istenmeyen bu basınç patlamaya neden olur ve kötü sonuçlar doğurur. Bu nedenle büyük boyutlu onarımlar 120°C' den daha büyük sıcaklıklarda yapılmamalı veya ek bir sistemle vakum basıncı ayarlanmalıdır. Sıcak kürleşme istendiğinde ve bütün onarım bölgeleri eşdeğer sıcaklıkta tutulması gerektiğinde eğer büyük ve ağır parçalara onarım yapılacaksa onarım oldukça zorlaşır.

### **2.3.8 Dolgu Ve Basamaklı Yama Onarımı**

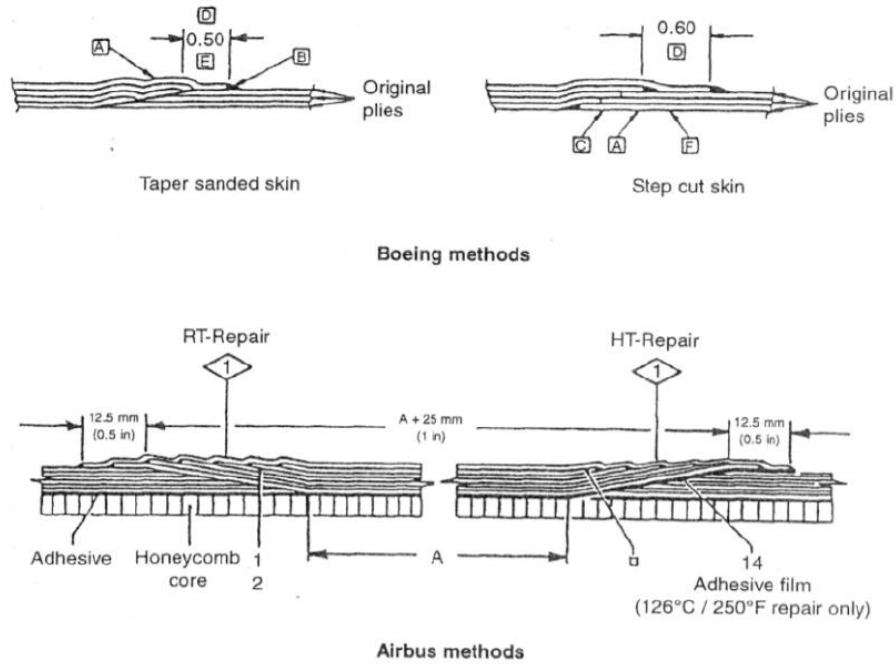
Bu yapışma ile yapılan yama onarımları en çok kullanılan onarım yöntemleridir.

*Dolgu Yama Onarımı:* Dolgu yamalar iyi bağlanma dayanımı istendiğinde kullanılır. Onarım işlemi çok dikkatli yapılmalıdır. Genelde dolgu yamaları panel gibi düz parçalara yapılır. Panel kenarlarına denk gelen yamalar dışında şekil 2.6 da görünen dolgu açıları 50'ye 1 oranı gözetilerek yapılır. Panel kenarlarında ise 20'ye 1 oranı tercih edilir. Bu değerler dayanım analizleri sonucu saptanan yaklaşık değerleridir.



Şekil 2.6 Dolgu yama ve dolgu açısı modelleri

Yamalar uzunlukları farklı olarak artan veya azalan boyutlarda ana parçaya uygulanır. Aşağıdaki şekilde piyasada uygulanan iki metot örneklenmektedir. Boeing Firması'nın çalışmasında en kısa yama ilk serilmiş oysa Airbus Firması'nınkinden en uzun yama ilk serilmiştir. İki metot da test edilmiş ve ikisi de iyi bağlanma dayanımı göstermiştir.

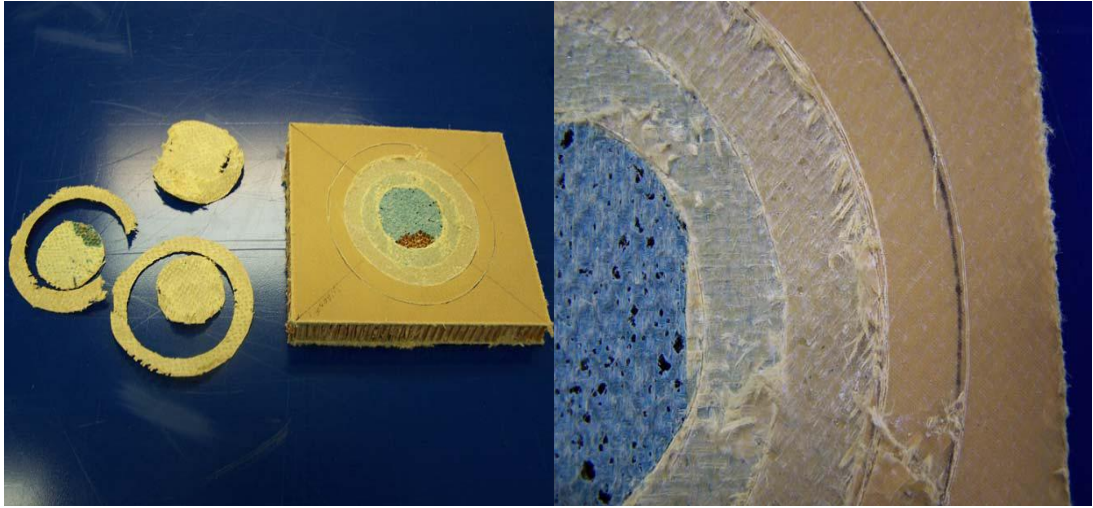


Şekil 2.7 Hasarlı panellere yapılan dolgu yama serilme şekillerinde Boeing ve Airbus Firma'larının karşılaştırılması (Courtesy of Aero Consultants (United Kingdom) Ltd.)

Dolgu yama onarımının avantajları şöyledir; yapışma yüzeyinde daha düzgün kayma gerilemeleri dağılımı gözlenir ve bu da delaminasyon etkisini azaltarak

sıyrılmayı engeller. Bindirme gibi ek yamalar yama bölgesi dışına taşarak sıyrılmaya etkisini azaltırlar. Dolgu yamalar yorulma testlerinde yüksek yük değerlerinde uzun periyotlardan sonra kenarlarda zayıflamaya başladığı görülmüştür. Bu bir avantajdır çünkü hasar başlangıç bölgesi kolay görülebilir ve bu bölgeye bir tabaka daha konularak onarım bir süre daha kullanılabilir. Normal şartlarda yükleme bu etkiyi yaratacak değerlere gelmez.

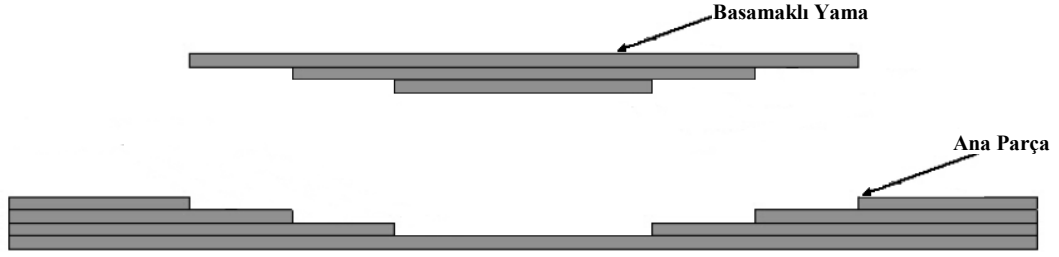
Dezavantajları ise; onarımın zor ve uzun zaman alan bir yöntem olmasıdır. Ayrıca yüzey boşaltma işleminde gerekli dolgu açısı değerini yakalamak için hasarsız bölgeden gerektiğinden fazla malzeme kaldırılır.



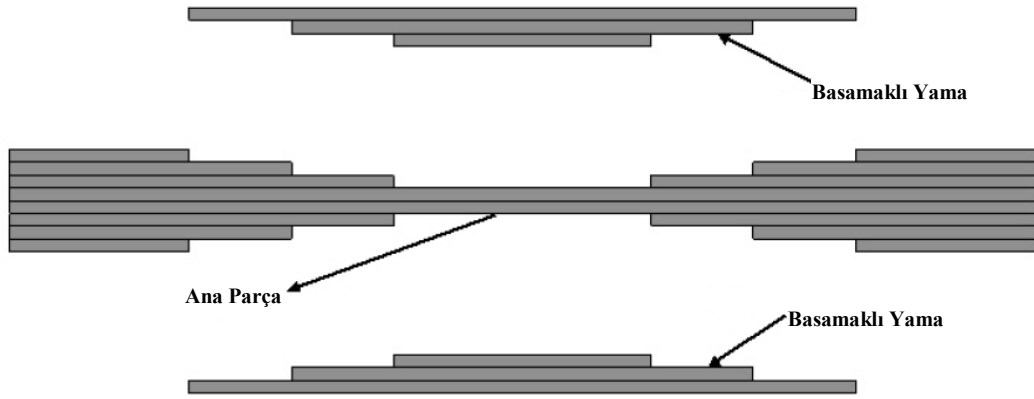
Şekil 2.8 Basamaklı yama onarımı için hasarlı yüzeyin çıkarılma işlemi (Abaris Training Notes 2007)

*Basamaklı Yama Onarımı:* Basamaklı yamalar da sıklıkla kullanılır. Dikkatli ve doğru bir şekilde yapılmalıdırlar. Cam fiber ve aramid kumaşlarında kolayca yapılan bu metot karbon fiberlerde oldukça zordur çünkü ayırık tabakaları düzenlerken kesimde birbiri üzerine düzgün bir şekilde gelmesini sağlamak ekstra dikkat ister. Bindirme boyutu her tabaka için genelde 12,5 veya 25 mm alınır ve her bir onarım tabakası birbiri üzerinde aynı yönde olmalıdır. Basamaklı yama onarımı ekstra yer kaplayan tabakaları minimize etmenin gerekli olduğu radar yapılarında sıklıkla kullanılır.

Basamaklı yama onarımının; tek taraflı ve çift taraflı basamaklı yama olmak üzere iki farklı tipi vardır. (Şekil 2.9 ve Şekil 2.10)



Şekil 2.9 Tek taraflı basamaklı yama



Şekil 2.10 Çift taraflı basamaklı yama

Tez çalışmalarında daha çok basamaklı yama üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bunun nedenleri basamaklı yama metodunun çok tercih edilmesi, gerilme dağılımlarının gözlenmesindeki kolaylıklar ve boyut optimizasyonuna uygun bir model oluşturmaktır. Kullanılan bu onarım metodu yapım aşamaları ileriki konularda açıklanacaktır.

## BÖLÜM ÜÇ

### LUSAS 14.3 PROGRAMI İLE MODELLEME VE OPTİMİZASYON

#### 3.1 Lusas 14.3 Analiz Programı

##### 3.1.1 Lusas Hakkında

LUSAS Programı, sonlu elemanlar metodunu kullanarak lineer ve lineer olmayan gerilme, dinamik ve ısı problemlerini çözmeye yarayan bir yazılımdır. Sonlu elemanlar metodu mühendislik problemlerinin geniş bir bölümünde nümerik çözüm sağlayan ve iyi sonuçlar veren kullanışlı bir yöntemdir. Uygulama alanı otomotiv, hava taşıtı, bina ve köprü yapılarının gerilme analizinden ısı akısı, sıvı akışı, manyetik akı, sızıntı ve diğer akışkanlar problemlerinin analizine kadar değişen geniş bir alandır. Analizin bu metodunda tanımlanan sürekli bir bölge sonlu elemanlar adı verilen basit geometrik şekillere bölünerek küçük elemanlar elde edilir. Malzeme özellikleri ve ilişkilerin düzenlenmesi bu elemanlar sayesinde yapılır ve köşelerindeki bilinmeyen değerler belirlenir. Gerekli yükler ve sınırlandırmalar verilerek, bir küme denklem çözümleriyle sonuca ulaşılır. Bu denklemlerin çözümü yaklaşık sürekli seri davranışını verir.

LUSAS sisteminin iki ana bileşeni vardır:

- LUSAS Modeller: model oluşturmak ve analiz sonuçlarını görüntülemek için enteraktif grafiksel bir ara yüzdür.
- LUSAS Solver: LUSAS Modeller’de tanımlanan problemin analizini gerçekleştiren bir sonlu eleman analiz motorudur.

Her bir analiz üç ana bölümden oluşur:

- Modelleme: Modelleme yapının geometrik bir sunumunu oluşturmak ve malzeme, yükleme ve sınırlandırma gibi fiziksel özellikleri açısından yapı karakteristiklerini tanımlamaktır.

- Analizin çalıştırılması: Modelleme işlemi tamamlandıktan sonra model analiz için LUSAS Solver'a gönderilir. LUSAS Solver otomatik yüklenmiş sonuçları oluşturur ve bir sonraki bölümde sonuçlar görülebilir.
- Sonuçların incelenmesi: LUSAS Solver analizi tamamladıktan sonra LUSAS Modeller'de sonuçları görmek mümkündür. Sonuçlar birçok farklı yollarla görüntülenebilir ve istenirse sonuçların bir kombinasyonu ile grafikler oluşturulabilir.

### ***3.1.2 Lusas 14.3 İle Yapılmış Analizlerin Teorik Altyapısı***

Bu çalışmada onarılmış kompozit yapı numunelerinin non-lineer analizleri LUSAS 14.3 programı yardımıyla yapılmıştır. Lineer olmayan analiz mantığının seçilmesinin nedeni aşağıdaki bilgilerle anlaşılabilir.

#### ***3.1.2.1 Non-Linear Analiz***

Lineer sonlu eleman analizi bütün malzemelerin lineer elastik davranışta ve deformasyonların yapının genel davranışına kayda değer bir etki yapamayacak kadar küçük olduğunu kabul eder. Oysaki gerçekte bu açıklamaya uyan çok az durum vardır fakat birkaç sınırlama ve kabullerle lineer analiz mühendislik uygulamalarının büyük bir bölümünde kullanılabilir.

Aşağıda non-lineer sonlu elemanlar analizi gerektirecek durumlar listelenmiştir:

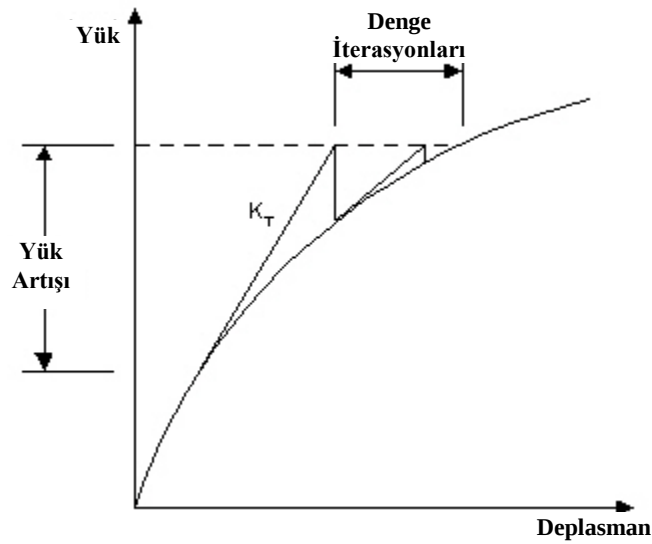
- Geometrideki büyük değişimler
- Kalıcı deformasyonlar
- Yapısal çatlaklar
- Burkulma
- Akma gerilmesinden büyük gerilmeler
- Bileşen parçalar arasında tanımlı kontak

Lineer olmayan analizlerin üç tipi LUSAS ile modellenebilir.

- Geometrik non-lineerite: örneğin; büyük yer değiştirme ve dönme, büyük şekil değiştirme, konservatif olmayan yükleme.
- Sınır non-lineeritesi: örneğin; fırlatma destekleri, genel kontak, sıkıştırılabilir yük transferi, dinamik darbe.
- Malzeme non-lineeritesi: örneğin; plastisite, kırılma/çatlama, hasar, sürünme, hacimsel çarpışma, lastik malzemesi

### 3.1.2.2 Non-Linear Çözüm Prosedürü

Non-lineer analizde dış yükleri dengeleyen gerilme dağılımı saptanabilir. Çözüm prosedüründe toplam gerekli yük bir dizi yük artışlarıyla uygulanır. Her artış sınırları içinde yapılan non-lineer analize cevap niteliğinde bir lineer tahmin yapılır ve bir sonraki tekrarda dengeyi bozan yük veya artık gerilmeleri eleyerek dengeyi yeniden kurmak için düzeltmeler yapılır.



Şekil 3.1 Non-lineer analizin yük-deplasman grafiği (LUSAS Modeller Online Help)

Yapılan tekrar düzeltmeleri bazı yakınsama kriterleri ile ifade edilir. Bu kriterler gerçekleşen denge durumunun nasıl geliştiğini belirtir. Bir çözüm prosedürü genelde artış-tekrar veya tahmin-düzeltilme şeklinde ifade edilir. Non-lineer çözüm LUSAS

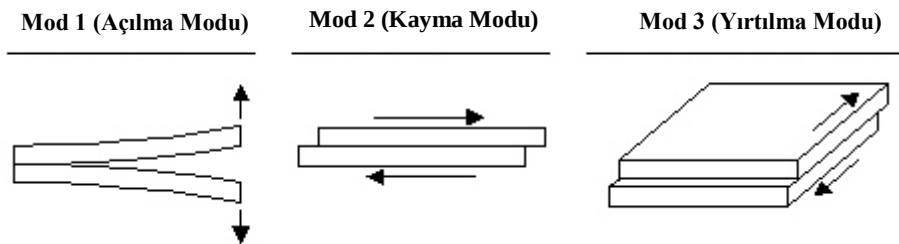
programında Newton-Raphson Yaklaşımı'na göre temellendirilmiştir. Çözümün detayları yük durumuna eklenen non-lineer kontrol paneli ile kontrol edilir.

Non-lineer problemlerin analizinde, çözüm prosedürü ile bulunan çözümler önem arz eder ve doğruya yakın sonuçlardır. Fakat en doğru çözüme ulaşmak için genel ayarlara ek olarak non-lineer çözüm özelliklerini sistemimize göre ayarlayıp çözüm yaptırmalıyız.

**3.1.2.2.1 Tekrar Prosedürü.** LUSAS'ta artış-tekrar prosedürü Newton-Raphson Yaklaşımı'na göre düzenlenmiştir. Newton-Raphson Yaklaşımı'nda artış çözümünün ilk tahmini, deplasman artışından ötürü oluşan tanjant direngenliğine göre düzeltme yapılarak elde edilir.

**3.1.2.2.2 Ara yüz Malzeme Deliminasyonu.** Ara yüz elemanları, tabakalar arasında delaminasyon potansiyeli olan yüzeylerde tabakalar arası hasar, çatlak büyümesi ve ilerlemesi durumlarında kullanılabilir. Eğer mukavemet değeri, açılma ve kayma doğrultularında dayanım eşik değerinin aşarsa, ara yüz elemanının malzeme özellikleri, malzeme parametreleri tarafından belirlendiği gibi lineer olarak düşer. Ayrıca tamamlanan hasar da kırılma hasarı aşıldığında meydana gelmiş kabul edilir. Modelde hasar meydana gelene kadar hareketsiz kalan delaminasyon potansiyelli alanlarda ara yüz elemanları bulunduğundan başlangıcı görülmemiş çatlaklar tabakalar arasına girer.

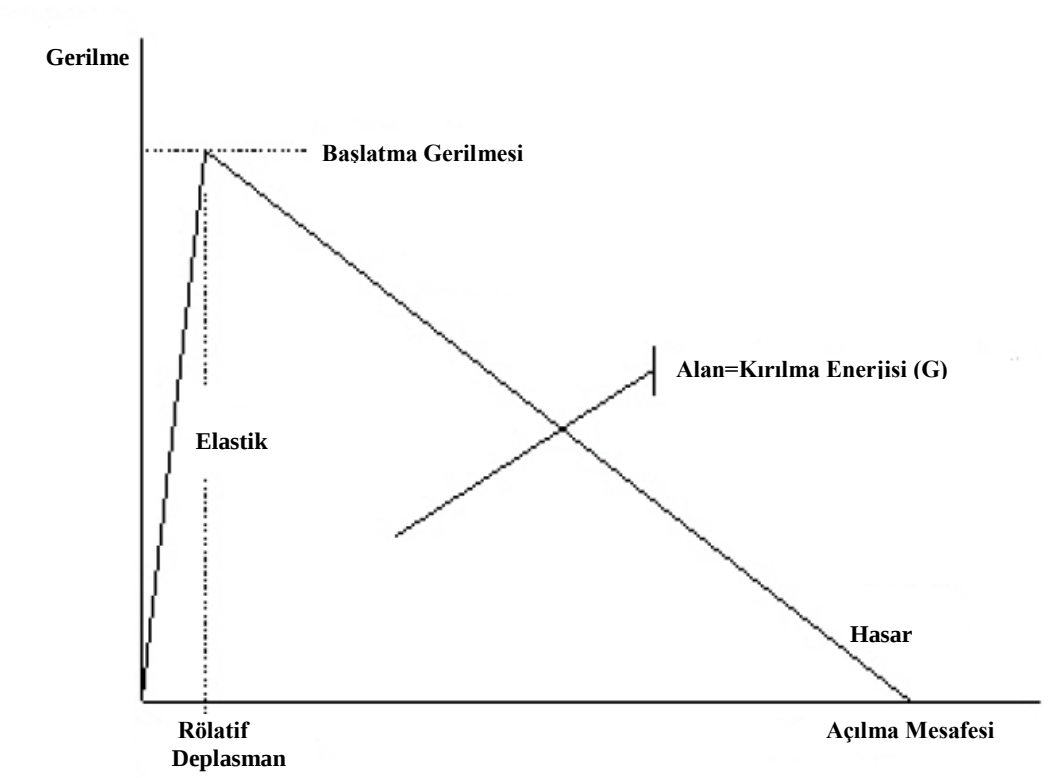
**3.1.2.2.3 Kırılma Modları.** Üç boyutlu modeller için ortogonal kaymada üç tip kırılma modu vardır: açılma, kayma ve yırtılma. Kırılma modlarının sayısı modelin boyut sayısına karşılık gelmektedir. Aşağıda verilen şekiller bu üç modu örneklendirmektedir. Bu çalışmada kullanılan modellerde kayma ve yırtılma modları eşit kabul edilmiştir.



Şekil 3.2 Kırılma modları (LUSAS Modeller Online Help)

Ara yüz elemanları, atışlı non-lineer analizin model delaminasyonunda kullanılır. Bu elemanların geometrik özellikleri yoktur ve kalınlıklarının olmadığı kabul edilir.

#### 3.1.2.2.4 Ara Yüz Malzeme Parametreleri.



Şekil 3.3 Ara yüz malzemesinin gerilme-açılma mesafesi grafiği (LUSAS Modeller Online Help)

- Kırılma Enerjisi: Her bir mod için ölçülen değerler kullanılan malzemeye bağlıdır. Örneğin; karbon-fiber, cam-fiber.
- Başlatma Gerilmesi: Delaminasyonun başladığı çekme, ara yüz mukavemetini gösteren gerilmedir. Bu gerilme asıl delaminasyon çekme dayanımını hesaplamada iyi sonuçlar verir fakat birçok mühendislik problemi için bu değer sonuç değerine çok az etki eder. Eğer yakınsamada zorlanma görülürse, çözümde eşik değerini düşürmek için gerekli olabilir.
- Rölatif Deplasman: Maksimum rölatif deplasman ara yüzün hasara uğramadan önce rijitliğini belirlemede kullanılır. İlk çok rijit ara yüzü simüle edecek kadar küçük olması şartıyla rölatif deplasman küçük bir etki yapabilir.

*3.1.2.2.5 Analizin Sonlandırılması.* Sonlandırma üç yolla yapılabilir:

- Uygulanan maksimum yük faktörünü sınırlandırarak,
- Uygulanan maksimum artış değerini sınırlandırarak,
- Adlandırılmış maksimum serbestlik değerini sınırlandırarak.

Bu çalışmada numunelerin maksimum yük değerini bulmak için ikinci sıradaki yol seçilmiştir.

*3.1.2.2.6 Sınırlandırılmış Çözüm Metotları (Yay Uzunluğu [Arc-Length]).* Sınırlandırılmış metotlar, sabit yük kademeli metotlardan kademelerin bir artışta sabit olması gerekmediği durumlarda farklılaşır. Aslında yük ve deplasman kademeleri önceden belirlenmiş bazı yolları izleyerek sınırlandırılır. Yay uzunluğu (arc-length) metodunun kullanımı şu avantajları sağlar.

- Sınır notalarını saptamak ve sonuçlandırma
- Yakınsama karakteristiklerini geliştirme

Bu çalışmada “Crisfield’in Modifiye Edilmiş Yay Uzunluğu Metodu” kullanıldı. Bu yöntemle sonuçlar deplasman uzayında tanımlanan küresel yüzeylerle sınırlandırılır. Bir serbestlik derecesi için bu durum dairesel yay olarak görünür.

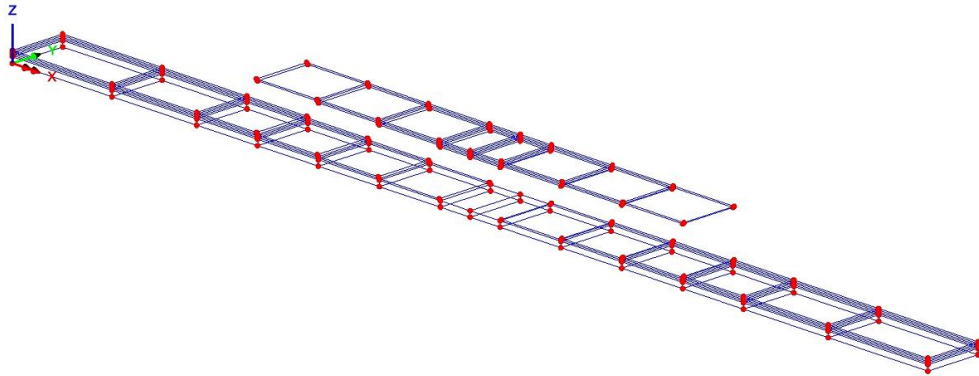
## **3.2 Numunelerin Modellenmesi**

### ***3.2.1 Geometrinin Oluşturulması***

LUSAS Programı’nda geometrik bir şekil oluşturmak için önce noktalar sonra yüzeyler ve yüzeylere kalınlık verilerek hacimler oluşturulur.

İlk olarak numune boyutuna uygun koordinatlardaki noktalar oluşturuldu. Sonra dikdörtgensel yüzeyler yaratılarak dikdörtgeni meydana getiren çizgiler daha sonra mesh atılacak aralıkların belirlenmesi için yama bölgeleri yoğun olmak suretiyle bölümlere ayrıldı. Son olarak yüzeyler istenen kalınlıklardaki hacimlere getirildi. Bu

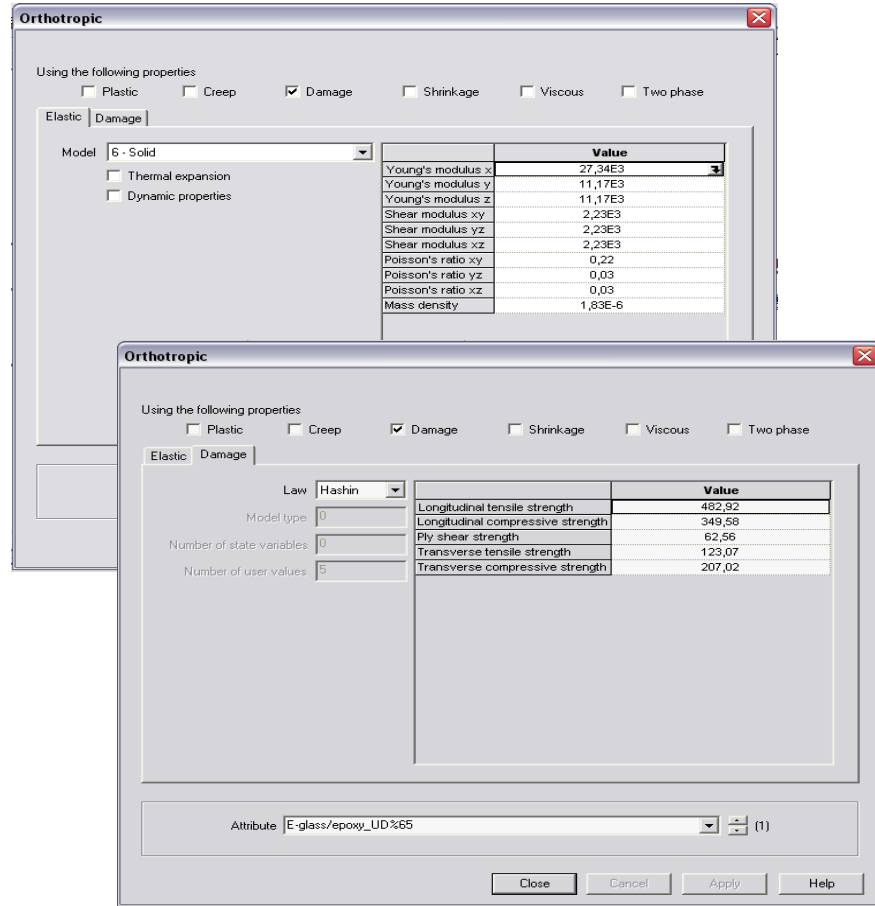
işlemlerde ana parça ve yamalar aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi farklı yerlerde oluşturulmuştur.



Şekil 3.4 Numunenin geometrik modeli

### 3.2.2 Malzemenin Atanması

Malzeme atama işleminde program tarafından istenen mekanik özellikler yapılan deneylerden elde edilmiştir. Ortotropik bir malzeme olan kompozit numunelerimiz için şu değerler atanmıştır:

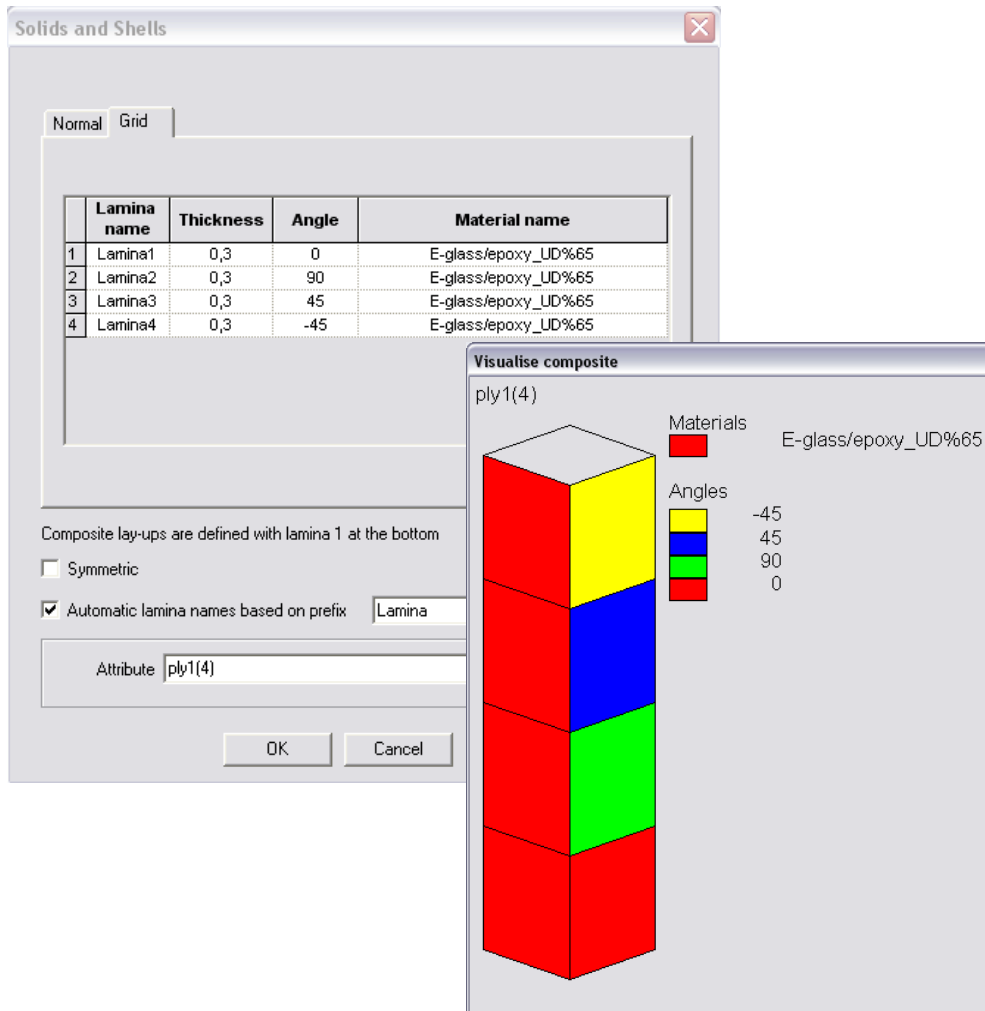


Şekil 3.5 Malzeme atama işlemi

LUSAS'ta oluşturulan bu malzemede hasar kriteri olarak “ Hashin Hasar Kriteri ” seçilmiştir. Bu kriter kompozitlere uygun olmasıyla birlikte, çözümde hasar sınırları belli olduğu için akma değerleri ve bölgeleri, kompozite ait üç hasar (matris, fiber ve kompozit hasarı) gibi sonuçlar görülebilecektir.

### 3.2.3 Kompozit Tabakalarının Tanıtılması

Malzeme bilgilerinin girilmesinden sonra tabakaların tanıtılma işlemine geçilebilir. Bunun için LUSAS'taki özel kompozit alanına tıklanarak katı ve yüzeyler için olan kısım seçilir. Atanan malzeme otomatik olarak görülecektir. Buradan tabaka sayısı, tabaka kalınlığı, fiber oryantasyon açıları ve malzeme belirlenir.

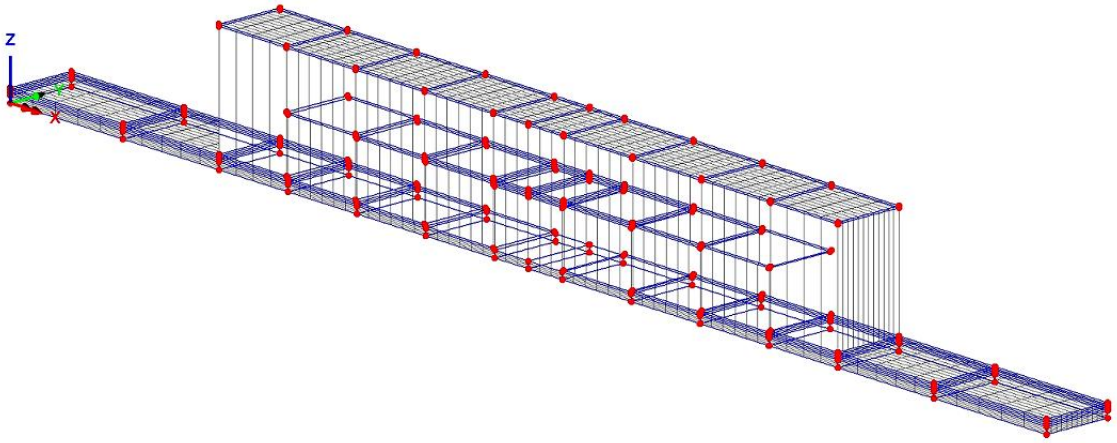


Şekil 3.6 Kompozit tabaka bilgilerinin girilmesi

### 3.2.4 Katı Ağ Ve Ara Yüz Ağının Atanması

Kompozit tabakalar da belirlendikten sonra ağ atama işlemine geçilebilir. Katı ağ oluşturmada geometrik şekil çok önemlidir. Yapılan denemelerde sivri kenarlara atılacak ağlarda sorun yaşanmış ve farklı tip ağ kullanarak problem giderilmiştir. Katı ağ atarken, çözüm aşamasının uzun sürmemesi için yamadan uzak ve sonuçlarının önemli olmadığı bölgelerde seyrek, yama ve yamaya yakın bölgelerde ise sık ağ bulunmasına dikkat edilmiştir. Bu ağ tipi için hacimsel olan “hegzahedral 8 lineer ağ” kullanılmıştır.

Yamalar ile ama parça arasına da reçine tabakası tanımlamak yerine gerçeğe daha yakın olan iki boyutlu ara yüz ağı kullanılmıştır. Ara yüz ağı için delaminasyon malzeme özelliklerinin girilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda malzeme özellikleri olarak reçine+sertleştirici karışımından elde edilen kırılma enerjisi ve başlangıç gerilmesi kullanılmıştır. İstenen değerler üç farklı kırılma modu için gerekmektedir fakat mod 2 ve mod 3 değerlerinde kayda değer bir farklılık görülmediği için eşit alınmıştır. Böylece yapışma yüzeyleri de bu şekilde modellenmiş olur.

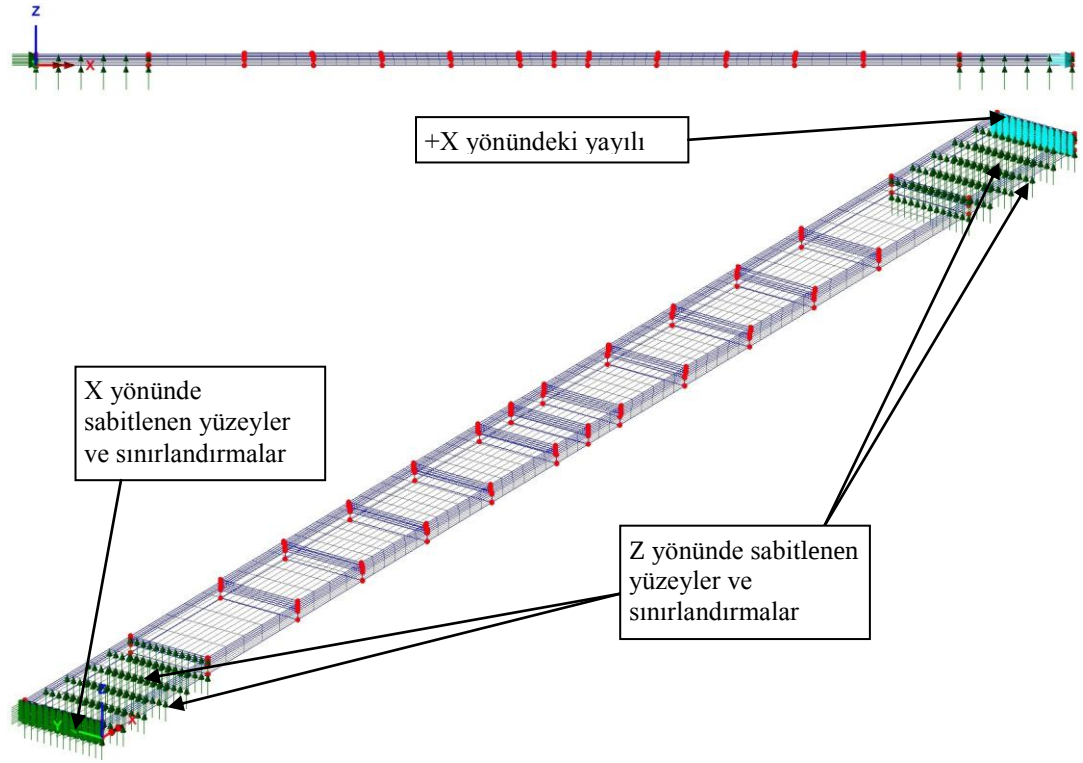


Şekil 3.7 Katı ağ ve ara yüz ağları

### 3.2.5 Sınırlandırmalar Ve Yükleme

Sınırlamalar ve yükleme çekme cihazının çalışma prensibine en yakın modeli bulmak amacıyla oluşturulmuştur. Simetrik olan numunemizin yükleme karşısında

da simetrik bir gerilme dağılımına neden olan sınırlandırmalar şekil 4.8’de görüldüğü gibidir. Yükleme ise eksenel çekmeye uygun olarak kompozitin ucundaki yüzeye dik dağılmış yayılı yük olarak verilmiştir. Yük faktör değeri non-lineer çözüm kontrolünde kolaylık sağlaması için 1 MPa olarak uygulanmıştır.



Şekil 3.8 Sınırlamalar ve yükleme

### 3.2.6 Analizin Kontrolü Ve Çalıştırılması

Non-lineer analiz bilindiği gibi yük artırımları ile gerçekleşmektedir. Önceki bölümde anlatılan LUSAS Program mantığına uygun olarak numune özelliklerine ait tahmin ve deneyimlere göre yük arttırma değeri, yük azaltma katsayısı, başlangıç gerilme faktörü, yapılacak yakınsama artış sayısı, yakınsama kriteri vb. değişkenlerde ayarlama yapılmıştır. Numune için gerekli değişiklikler yapıldıktan sonra model kaydedilip çalıştırma butonuna basılarak analiz başlatılır.

**Nonlinear & Transient**

**Incrementation**

☒ Nonlinear

Incrementation

Starting load factor

Max change in load factor

Max total load factor

☒ Adjust load based on convergence

Iterations per increment

☐ Time domain

Initial time step

Total response time

☐ Automatic time stepping

**Solution strategy**

☐ Same as previous loadcase

Max number of iterations

Residual force norm

Incremental displacement norm

**Incremental LUSAS file output**

☐ Same as previous loadcase

Output file

Plot file

Restart file

Max number of saved restarts

Log file

History file

**Common to all**

Max time steps or increments

---

**Advanced Nonlinear Incrementation Parameters**

**Automatic incrementation**

Stiffness ratio to switch to arc-length

☒ Use arc length control

Arc-length calculation

☒ Relative displacement arc length procedure

☐ Guide arc length solution with current stiffness

☐ Use root with lowest residual norm

Arc-length restart load factor

Arc-length restart load change

**Termination criteria**

☐ Terminate on value of limiting variable

Point number

Variable type

Value

**Step reduction**

☒ Allow step reduction

Maximum step reductions

Load reduction factor

Load increase factor

Şekil 3.9 Analiz kontrolü

### 3.2.7 Sonuçların İncelenmesi

LUSAS ile çözüm işlemi bittiğinde belirli aralıklar ile artan yük değerleri görülebilir (*Load Factor*). Bu değerlerden yakınsayanlar arasında inceleme yapılır. Bu çalışmada programda ilk akmanın gerçekleştiği yük değerleri, maksimum gerilmeler, gerilme dağılımı, hasar kriterine göre belirlenen kompozit hasarları ve bölgeleri, yapışma ara yüzeyinin gerçekleşen kayma gerilmeleri, yapışma ara yüzünün gerilme dağılımı gibi değerler incelenmiş ve artan yüklerde bu değerlerin nasıl değişkenlik gösterdiği grafik yardımı ile ortaya konmuştur.

### 3.3 Optimizasyon

Kompozit yapılarda onarım metot ve parametrelerinin geliştirilmesiyle; onarım optimizasyonu konusu önem kazanmıştır. Onarım optimizasyonu; malzeme seçimi, geometri, üretim metotları gibi konular için belirli amaç fonksiyonlarına göre belirlenen değişkenlerle yapılır.

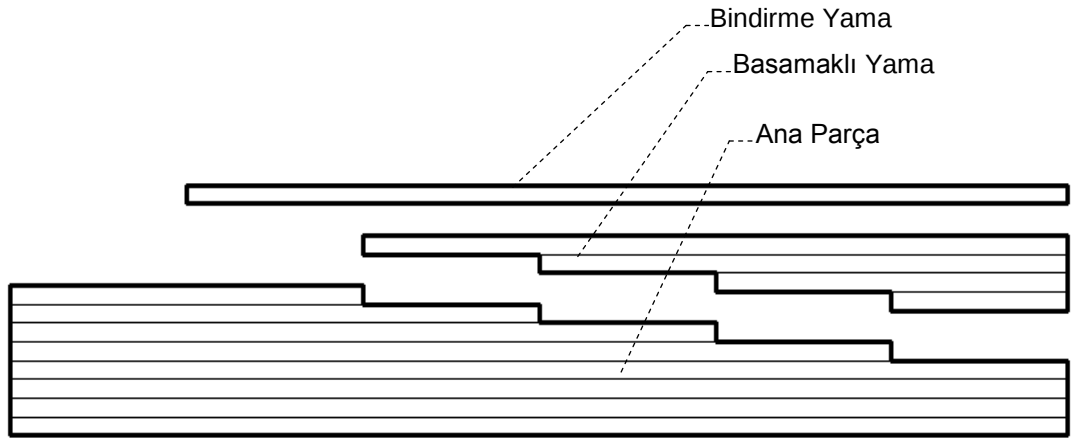
Ağırlık, maliyet ve dayanım konularında avantaj sağlayan optimizasyon nümerik analiz programları ile yapılarak optimum değerler uygulamada kullanılabilir.

Bu çalışmada daha çok fiber oryantasyon açıları ve geometrik optimizasyon üzerinde duruldu. “Basamaklı yamalar” üzerine “bindirme yama” konması ile yapılan modellerde “basamak uzunluğu”, “bindirme uzunluk farkı”, “basamak sayısı” ve “fiber oryantasyon açısı” tasarım değişkenleri olarak seçildi ve non-lineer nümerik analizler LUSAS 14.3 analiz programı ile tamamlandı. Bu analizler sonucu elde edilen;

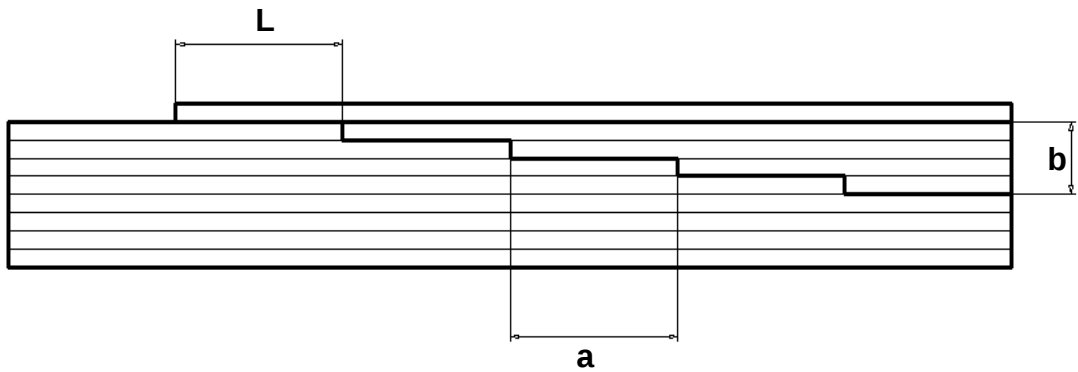
- Gerilme dayanımı
- Maksimum taşınan yük
- Akma başlangıç değeri
- Matris, fiber ve kompozit hasarları,

- Yapışma ara yüzeyi gerilme değerleri karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır.

Şekil 3.10 ve 3.11’de optimizasyonda kullanılan parametrelere ilişkin şematik gösterimler yer almaktadır.



Şekil 3.10 Dört basamaklı ve bindirme yama ile onarılmış numune modeli



Şekil 3.11 Tasarım değişkenleri: a: basamak uzunluğu, L: bindirme uzunluk farkı, b=sabit yama kalınlığı (1,2 mm). Not: Şekilde dört basamaklı numune modellenmiştir. Aynı özelliklerde 1 ve 2 basamaklı numuneler de mevcuttur.

Yama kalınlığı sabit tutularak, analizler dört farklı parametrenin değiştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler şöyledir:

- Basamak sayısı Optimizasyonu

Basamak sayıları 1, 2 ve 4 alınarak analizler yapılmıştır.

- Basamak Uzunluğu (a) Optimizasyonu

Bindirme uzunluk farkı (L) sabit alınarak basamak uzunluğu (a) değeri 10,15 ve 20 mm için analizler yapılmıştır.

- Lap Uzaklığı (L) Optimizasyonu

Basamak uzunluğu (a) sabit alınarak bindirme uzunluk farkı (L) değeri a-5, a ve a+5 mm için analizler yapılmıştır.

- Fiber Oryantasyon Açısı (Dizilim) Optimizasyonu

Yapılan bütün boyutlarda üç farklı farklı açı oryantasyonu için analizler yapılmıştır. Bu dizilimler aşağıdaki tabloda bu çalışmada kullanılan kodlarıyla beraber verilmiştir.

Açı dizilişleri:

Tablo 3.1 Oryantasyonda kullanılan tabaka dizilişleri

|    |                    |
|----|--------------------|
| D1 | $[0]_8$            |
| D2 | $[90]_8$           |
| D3 | $[0/90/+45/-45]_s$ |

## BÖLÜM DÖRT

### ANALİZ VE DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde yapılan nümerik analizler ve sonuçları şekiller, grafikler ve tablolar halinde sunulmuş ve yorumlanmıştır. Buradan hareketle elde edilen bilgiler sayesinde optimum değerler belirlenip optimizasyon işlemi tamamlanmıştır.

Bu bölümde verilen bütün gerilme değerleri MPa cinsindendir.

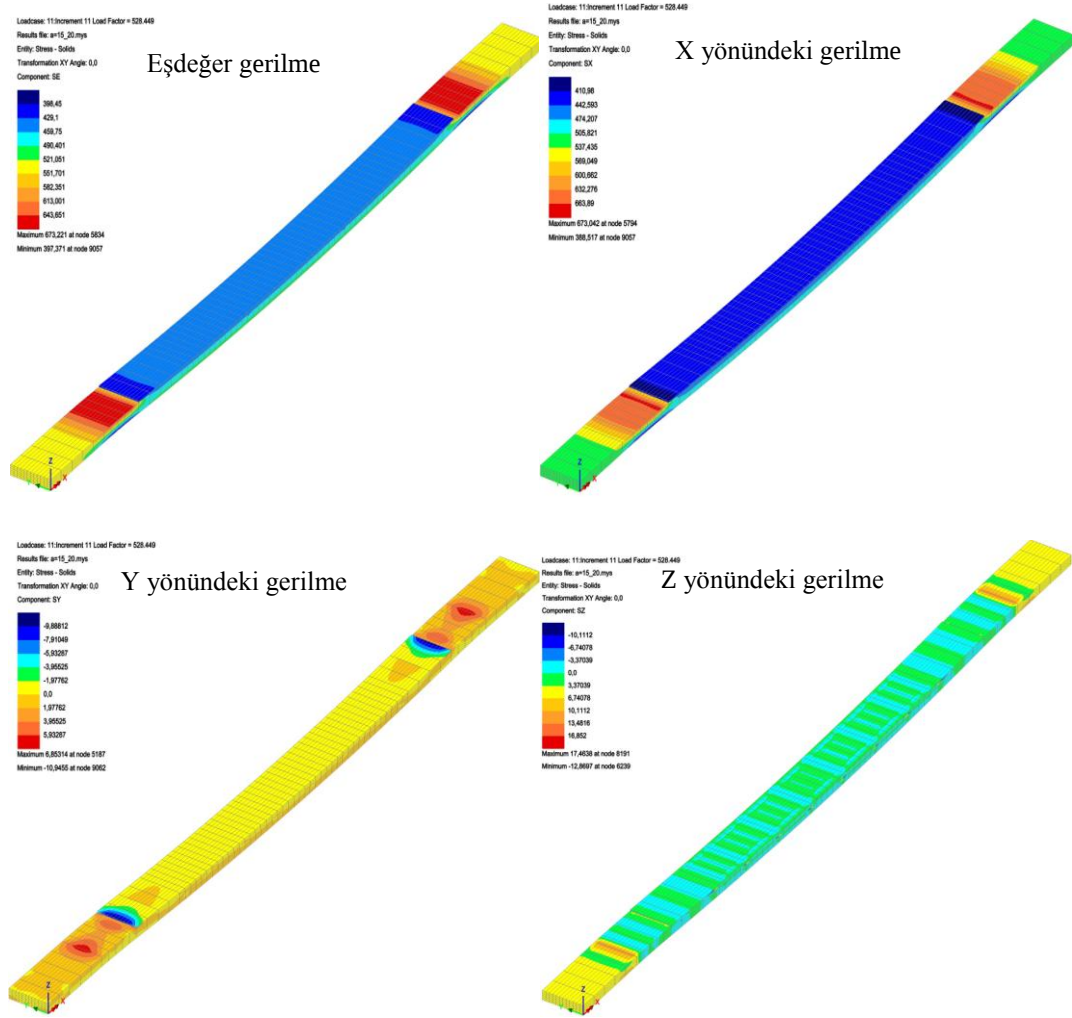
#### 4.1 Yama Bölgesine Etki Eden Gerilmeler

Eksenel yükleme şeklinde uygulanan yükler sonucunda yama bölgesinde normal gerilmelerin yanı sıra kayma gerilmeleri de meydana gelmiştir. Kayma gerilmelerinin yapışma yüzeyine bağlı olarak gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 4.1 ve 4.2’de örnek modeller için gerilme dağılımı gösterilmektedir.

Şekil 4.1’de taşınan maksimum yük değerine karşılık gelen eşdeğer gerilme ve x,y,z yönlerindeki normal gerilmelerin gerilme dağılımı gözlenmektedir. Görüldüğü gibi gerilmeler x eksenine doğrultusunda numunenin tam orta noktasına göre simetrik bir dağılım göstermiştir. Bu nedenle bundan sonraki resimlerde modelin yarısı sunulacaktır. Normal gerilmelerin eşdeğer gerilmeye etkisini daha iyi görebilmek için aşağıdaki tabloyu inceleyelim.

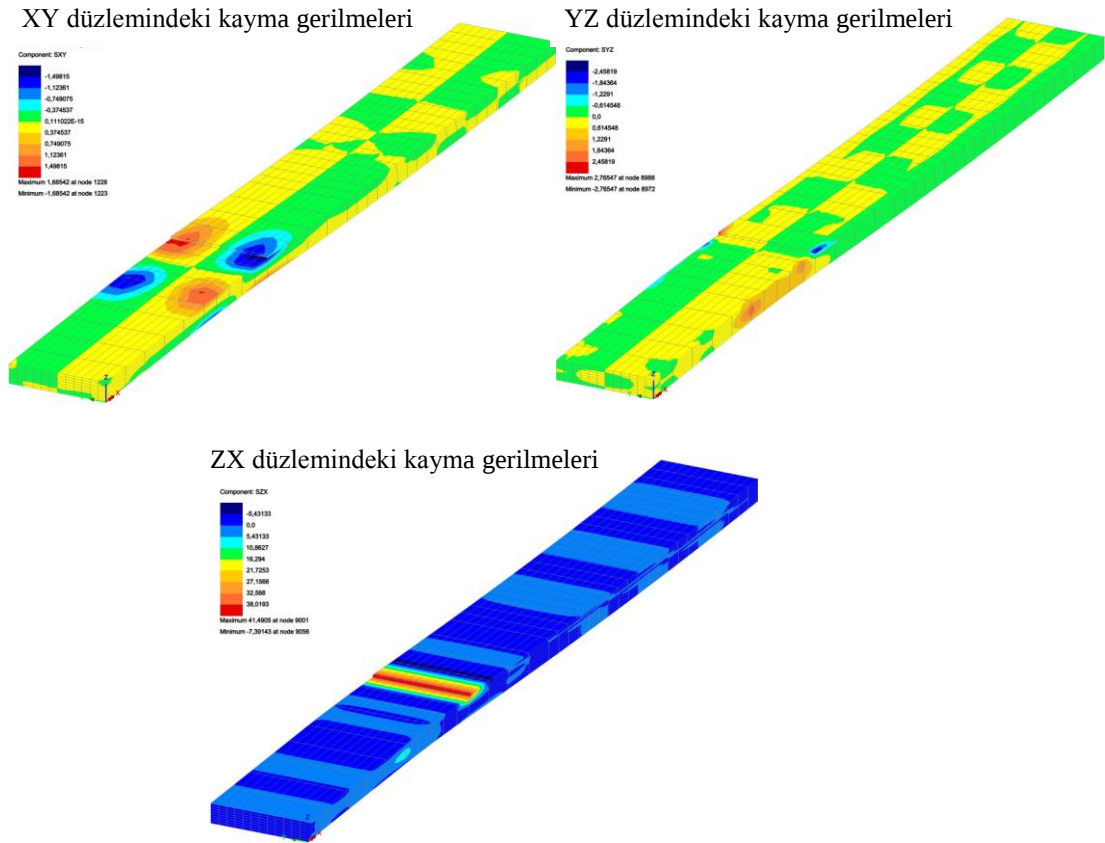
Tablo 4.1 Maksimum yüke karşılık gelen eşdeğer ve normal gerilmeler

|                           |         |         |
|---------------------------|---------|---------|
| Maksimum Taşınan Yük (LF) | 528,449 |         |
| Eşdeğer Gerilme (SE)      | 673,221 |         |
| X Yönündeki Gerilme (SX)  | 673,042 |         |
| Y Yönündeki Gerilme (SY)  | 6,853   | -10,946 |
| Z Yönündeki Gerilme (SZ)  | 17,464  | -12,87  |



Şekil 4.1 Bir model üzerindeki maksimum yükte gerçekleşen eşdeğer ve normal gerilmeler.

Tablo 4.1’de de görüldüğü gibi eşdeğer gerilmeye en büyük katkısı SX yapmaktadır. Fakat yama bölgesinde gerçekleşen SZ’ inde etkileri kayda değerdir. Şimdi de bu eşdeğer gerilmeye katkısı olan kayma gerilmelerini şekil 4.2’de inceleyebiliriz.



Şekil 4.2 Maksimum yükte gerçekleşen kayma gerilmeleri.

Şekil 4.2’ de taşınan maksimum yük değerlerine karşılık gelen kayma gerilmeleri görülmektedir. Tablo 4.2’ den de görüleceği gibi SXY ve SYZ değerleri çok düşüktür ve çeki-bası gerilmeleri birbirini sıfırlamaktadır. Fakat yapışma bölgesinde birebir etkili olan SZX gerilmesi eşdeğer gerilmeye önemli bir katkıda bulunmuştur. Bu gerilmeler yamanın başlangıç bölümünde maksimum değerine ulaşır.

Tablo 4.2 Maksimum yük karşılık gelen eşdeğer ve kayma gerilmeleri

|                                       |         |        |
|---------------------------------------|---------|--------|
| Maksimum Taşınan Yük (LF)             | 528,449 |        |
| Eşdeğer Gerilme (SE)                  | 673,221 |        |
| XY Düzlemindeki Kayma Gerilmesi (SXY) | 1,685   | -1,685 |
| YZ Düzlemindeki Kayma Gerilmesi (SYZ) | 2,766   | -2,766 |
| ZX Düzlemindeki Kayma Gerilmesi (SZX) | 41,491  | -7,391 |

Buradan sonraki bölümlerde değerlendirmelerde büyük zorluklar yaşanacağından sadece eşdeğer gerilme üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır.

#### 4.2 Yamasız Modelde Açı Oryantasyonunun Etkisi

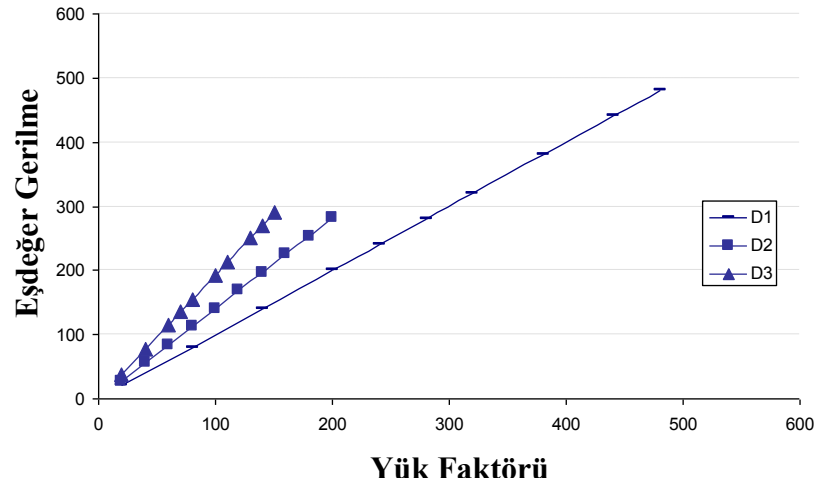
Karşılaştırma yapabilmek için bir yamasız model de hazırlanıp analizleri yapılmıştır. Dizilimin etkisi bölümünde açıklanacak üç farklı açı oryantasyonu için yapılan analiz sonuçları tablo grafik ve şekil olarak aşağıda verilmiştir.

Açı oryantasyonları ve kodları şöyledir:

$$D1=[0]_8$$

$$D2=[0/90]_{2s}$$

$$D3=[0/90/45/-45]_s$$



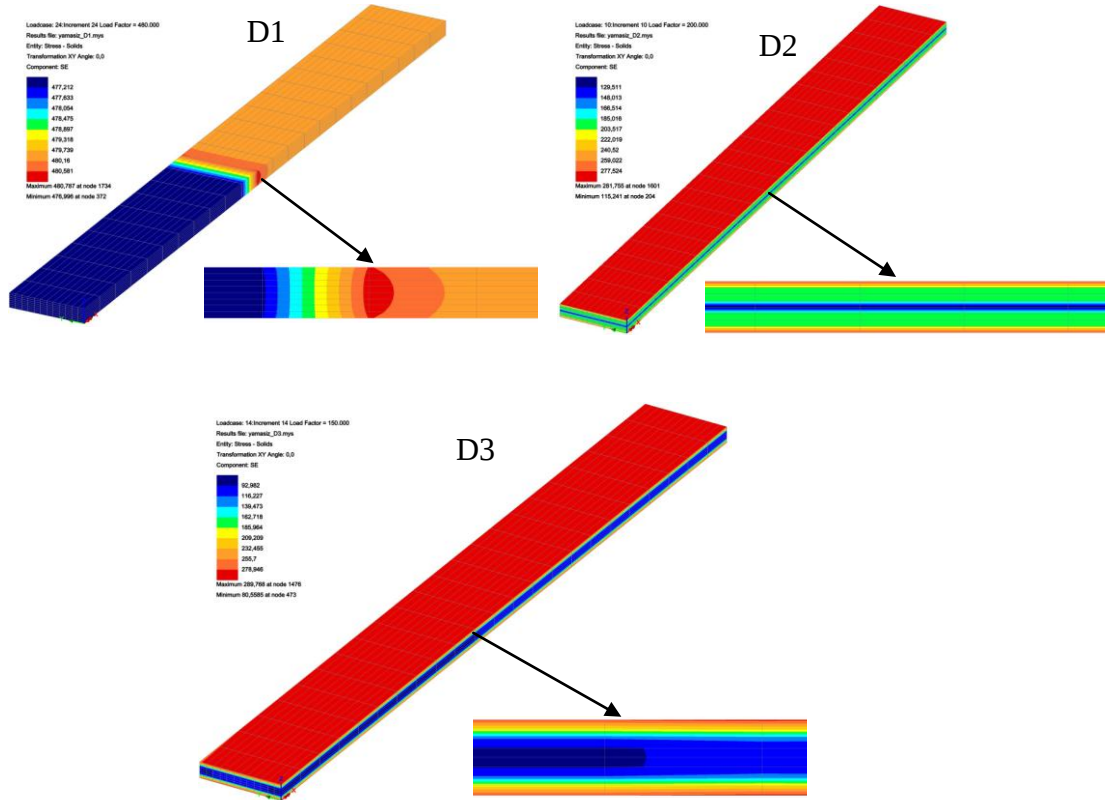
Şekil 4.3 Yamasız modelde açı oryantasyonunun etkisi

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi D1 kod’lu oryantasyonda maksimum yük taşınmış bununla beraber maksimum eşdeğer gerilme elde edilmiştir. En az yükün ise D3’te taşındığı gözleniyor.

Tablo 4.3 Açılı oryantasyonunda gerilme değerleri

|    | Taşıyan Maksimum Yük | Maksimum Eşdeğer Gerilme |
|----|----------------------|--------------------------|
| D1 | 480                  | 480,787                  |
| D2 | 200                  | 281,755                  |
| D3 | 150                  | 289,768                  |

D1’ de bütün tabakalar sıfır derece olduğu için maksimum dayanım görülmüştür. Hasar modelini tanımlamak için girilen malzeme özelliklerindeki X yönündeki çekme mukavemet değerine çok yakın değer elde edilmesinin nedeni bu dizilim özelliğinden kaynaklanır.



Şekil 4.4 Yamasız modelde maksimum yüke karşı gelen maksimum eşdeğer gerilme dağılımları

Şekil 4.4’te fiber oryantasyon açılına göre oluşturulan modellerin gerilme dağılımı görülüyor. Açılar çekme yönüne dik olduğu durumlarda fazla gerilme meydana gelmezken, çekme yönünde maksimum değerlere ulaşıyorlar. Sınırlandırılmış uçtan uzaklaştıkça bu dağılım daha net görülebiliyor.

### 4.3 Optimizasyon

Numunelere ait dört farklı parametrenin karakterize edilmesi sonucu elde edilen veriler bu bölümde incelenecektir. Bu parametreler “basamak uzunluğu”, “bindirme uzunluğu”, “dizilim” ve “basamak sayısıdır”. Söz konusu parametrelere bağlı değişkenlerle yapılan analiz sonuçları sunulup yorumlanmış ve optimum değerler belirlenmiştir.

Optimizasyon değişkenleri şöyledir:

- Basamak uzunluğu (a) :

$$a_1=10, a_2=15, a_3=20$$

- Bindirme uzunluğu (L) :

$$L_1=a-5, L_2=a, L_3=a+5$$

- Dizilim (D) :

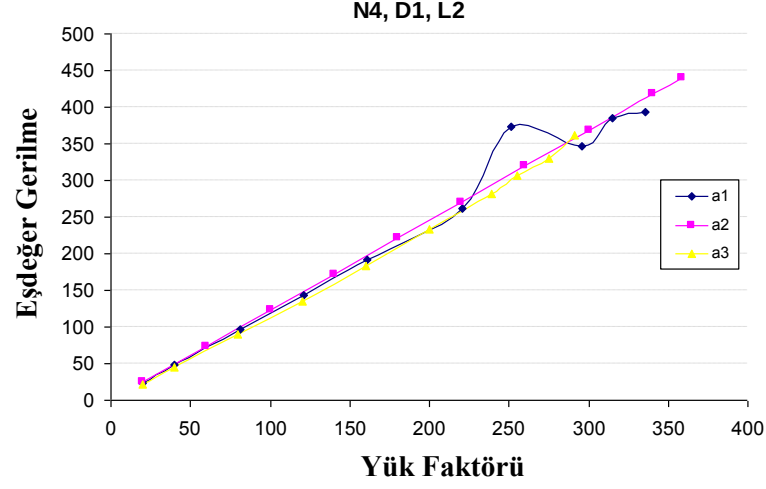
$$D_1=[0]_8, D_2=[0/90]_{2s}, D_3=[0/90/45/-45]_s$$

- Basamak sayısı (n) :

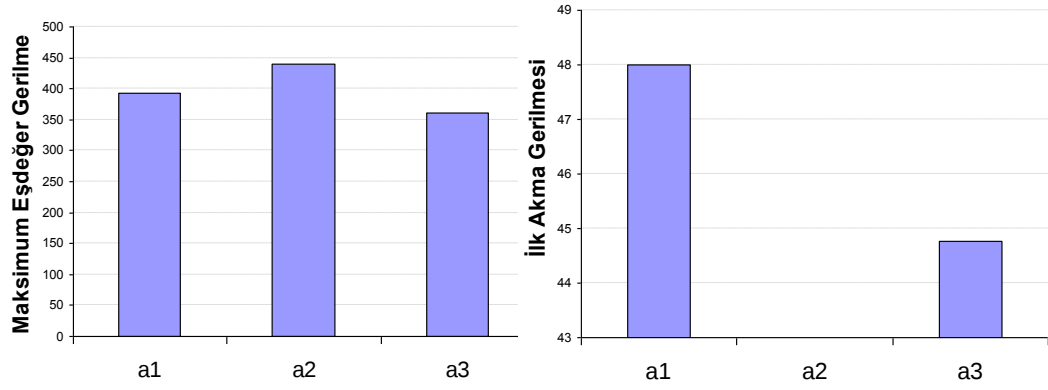
$$n_1=1, n_2=2, n_4=4$$

#### 4.3.1 Basamak Uzunluğu Etkisi

Kullanılan optimizasyon parametrelerinden basamak uzunluğu önemli bir tasarım değişkenidir. Gerilme akışını sağlayan basamakların uzunluğu gerilme dağılımını etkileyen önemli bir faktördür. Çok değişken olduğundan, modelleme ve analiz de zorlaşacaktır. Bu nedenle üç uzunluk seçilerek analizler yapılmıştır. Bu bölümde dört basamaklı yama için D1 kodlu dizilim seçilerek analizler yapılmıştır. Bindirme uzunluğu olarak, sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için basamak uzunluğuna eşit olan L2 parametresi kullanılmıştır. Bu kısıtlarla üç farklı durum için sonuçlar gösterilebilir.



Şekil 4.5 Basamak uzunluklarının, eşdeğer gerilme ve taşınan yük için karşılaştırılması

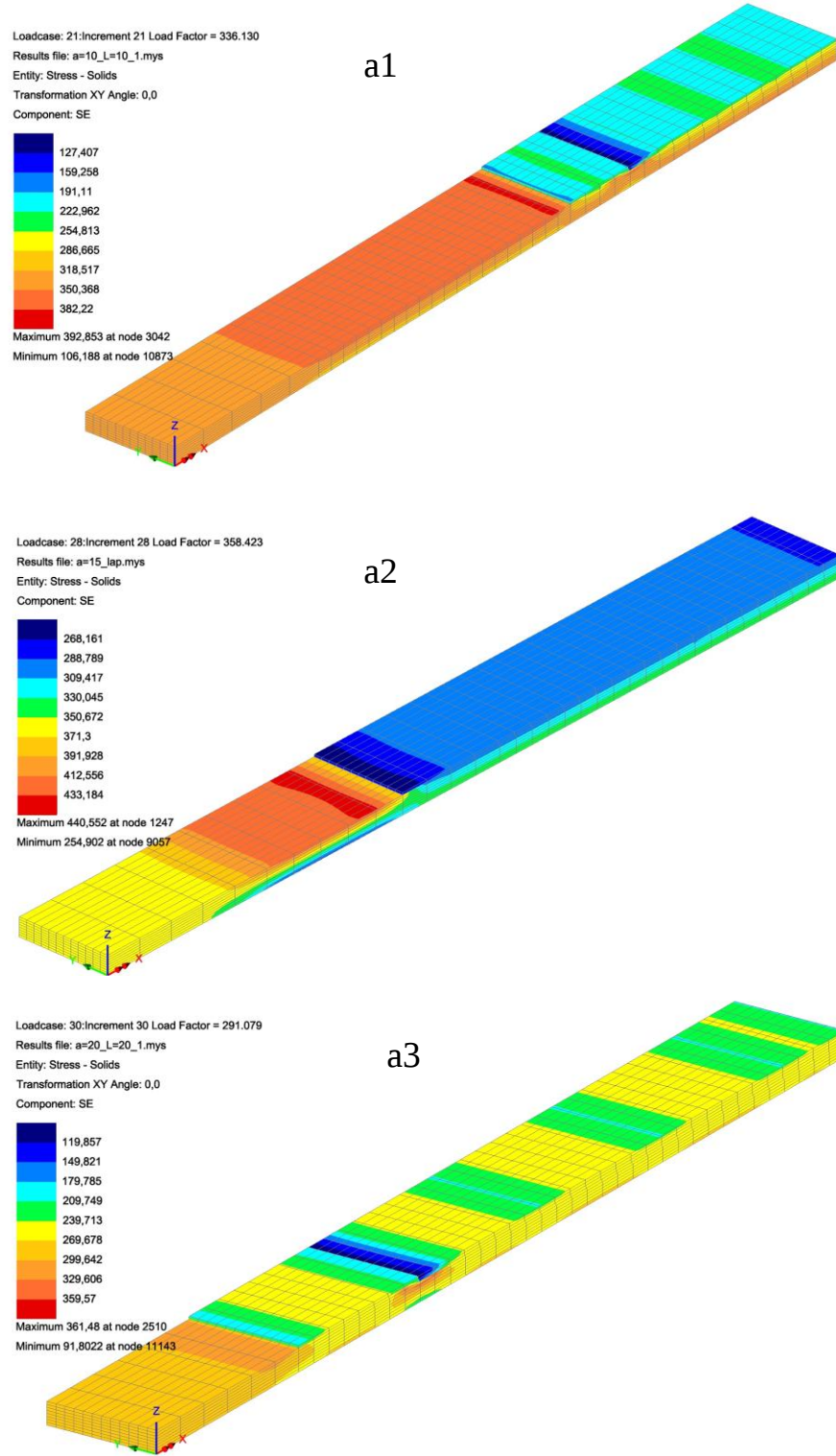


Şekil 4.6 Basamak uzunluklarının maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma gerilmesi cinsinden karşılaştırılması

Şekil 4.5’de değişkenler doğrusal bir karakter göstermiştir fakat a1 yaklaşık 220 MPa yükünden sonra non-lineer olarak devam etmiştir. Bunun nedeni yamanın ana parçadan ayrılıp artık yük taşıması sonucu gerilmenin parabolik artmasıdır. Ayrıca bu grafikte a2 uzunluklu numunenin maksimum yükü taşıdığını görüyoruz

Şekil 4.6’ü incelersek a2 kodlu uzunluğun en fazla gerilmeye maruz kaldığını ve akma gerilmesinin gerçekleşmediğini görürüz. Bu da a2’nin dayanıklılığını destekler. a3’ün diğerlerine göre az yük taşımasına rağmen gerilme değerinin yüksek olması bu uzunluğun gereksiz olduğunu ortaya koyuyor.

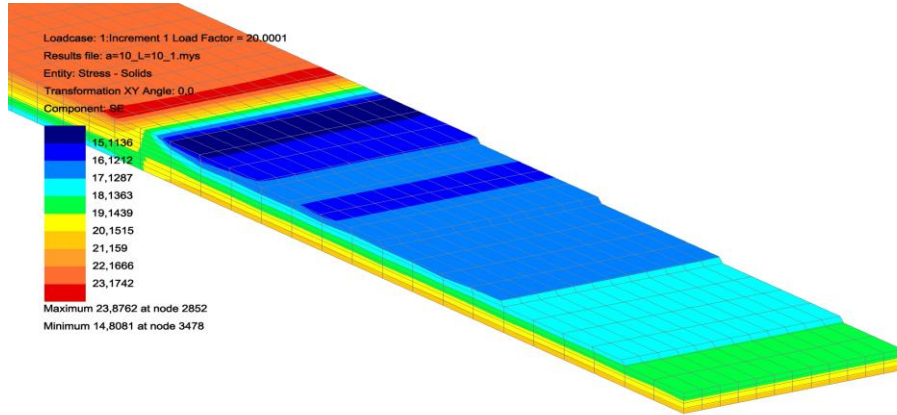
Şimdi de bu farklılığı resimler yardımıyla gerilme dağılımını inceleyerek görelim.



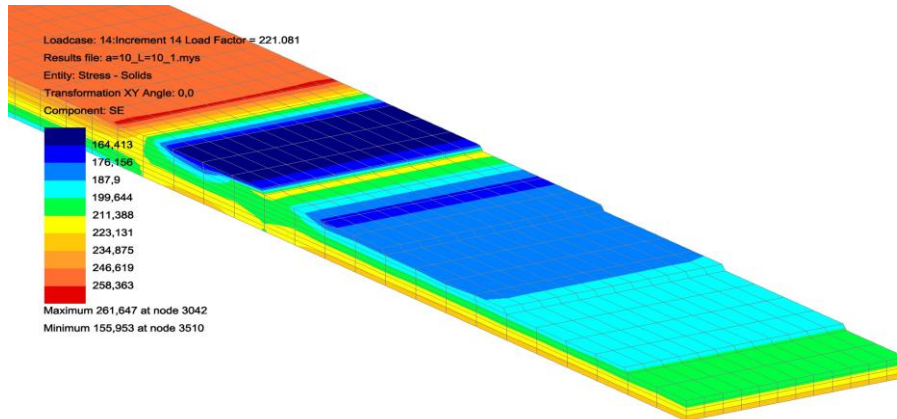
Şekil 4.6 Maksimum yükte oluşan gerilme dağılımları

Yamalı numunelerde gerilme yoğunluğu farklı bölgelerde artabiliyor. Şekil 4.6’de a1 ve a2’de maksimum gerilme yamanın başladığı bölgeden hemen önce meydana gelirken a3’te bindirme yamanın altında, basamaklı yamanın başladığı yerde oluşmuştur. Koyu mavi bölümlerin gerilme akışına katkısının az olması tasarımın güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

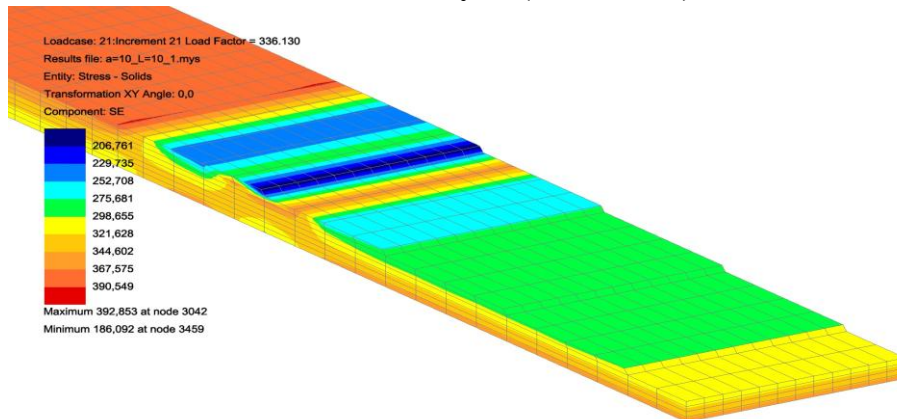
**a1, yük=20**



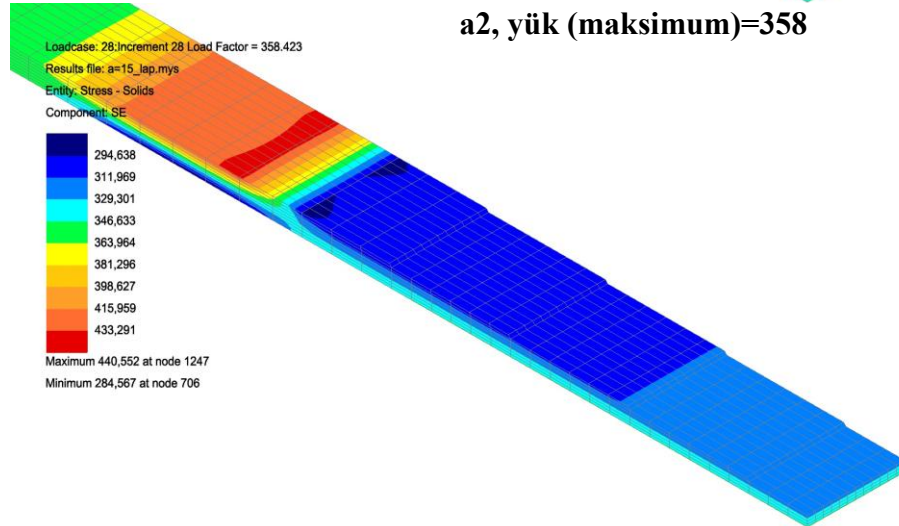
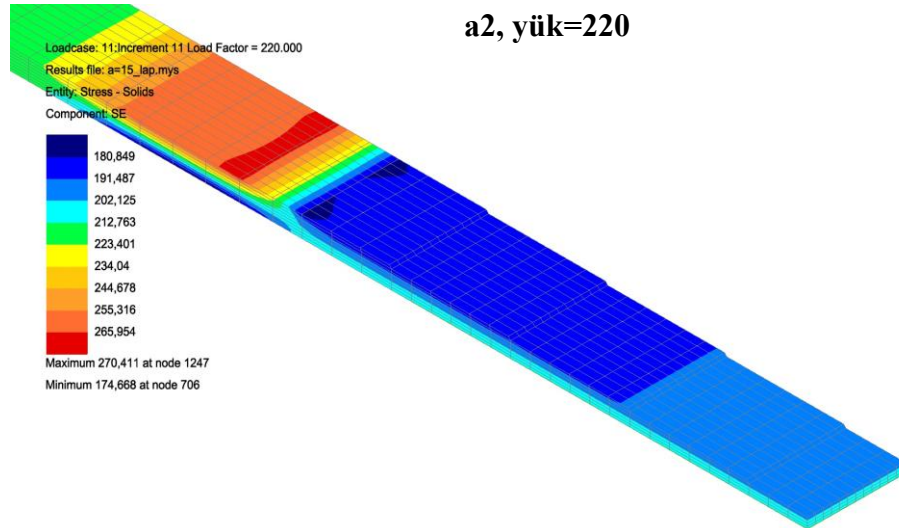
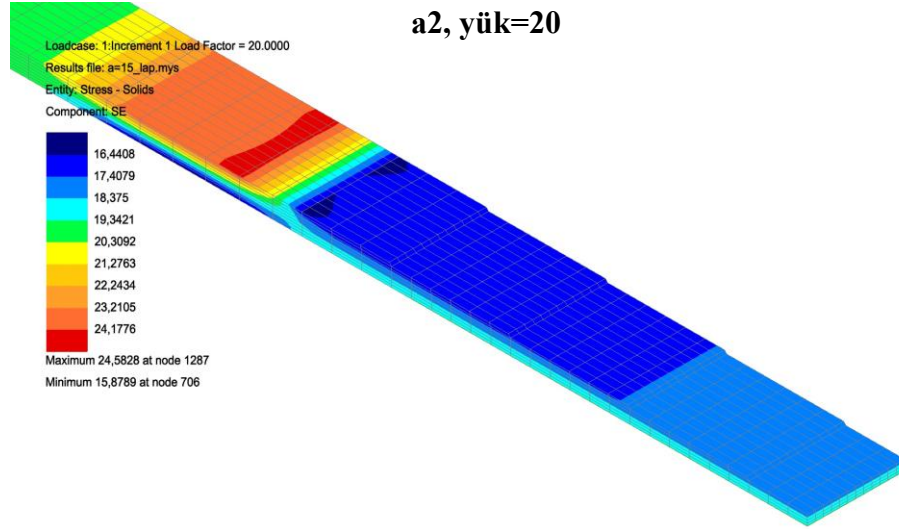
**a1, yük=221**



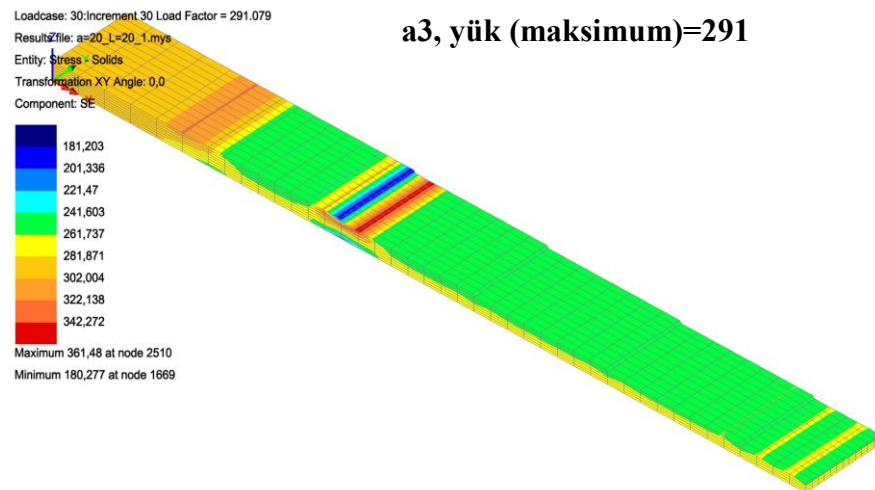
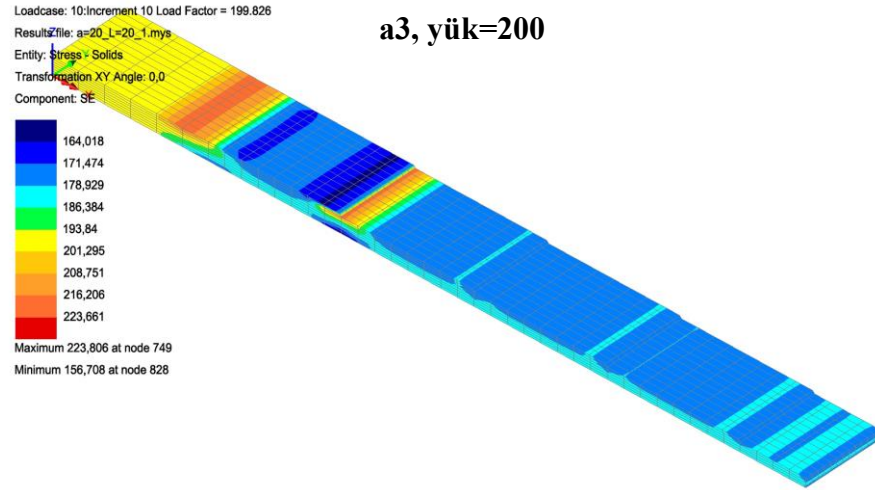
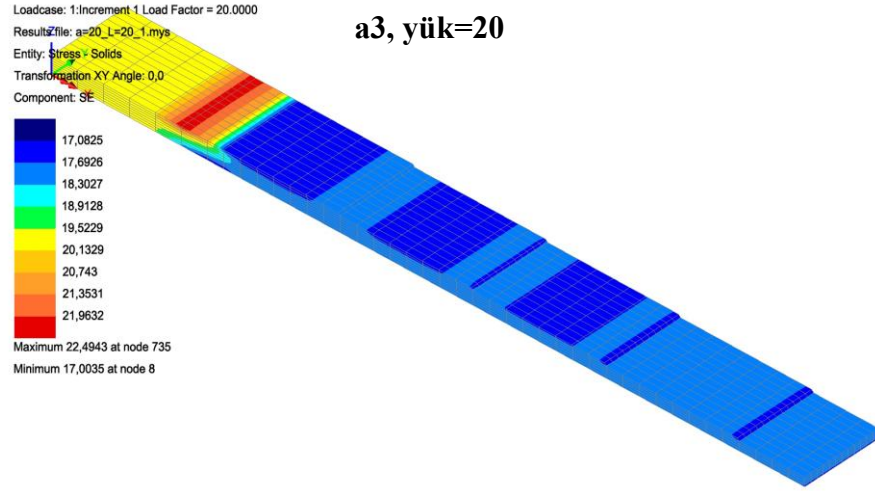
**a1, yük (maksimum)=336**



Şekil 4.7 a1 uzunluklu modelde farklı yüklerde basamak üzerindeki gerilme dağılımı



Şekil 4.8 a2 uzunluklu modelde farklı yüklerde basamak üzerindeki gerilme dağılımı (Şekilde gerilme akışını daha net görebilmek için yamalar gösterilmemiştir.)



Şekil 4.9 a3 uzunluklu modelde farklı yüklerde basamak üzerindeki gerilme dağılımı (Şekilde gerilme akışını daha net görebilmek için yamalar gösterilmemiştir.)

Yapılan analizlerde genel olarak yük arttıkça gerilme yoğunluğunun yamanın önündeki sürekli bölgeden yamaya doğru, yamada da farklı basamaklarda arttığı görülmüştür. Şekil 4.7 ve 4.9’da yamanın altında kalan basamaklarda da buna benzer bir dağılım gözükmemektedir. Fakat Şekil 4.8’da gerilme yaklaşık aynı bölgelerde aynı yoğunlukta kalarak ilginç bir sonuç ortaya koymaktadır. Malzemede akma/kırılma gerçekleşmemesi bu benzerliğin bir nedeni olarak düşünülebilir.

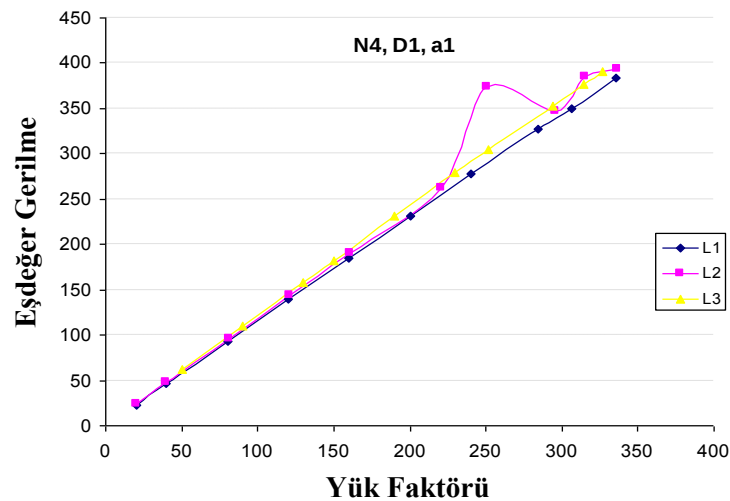
Sonuç olarak toplam yama boyutundan doğacak mali kazancı da hesaba katarak 15 mm olan basamak uzunluğumuzun optimum değerde olduğunu söyleyebiliriz.

#### 4.3.2 Bindirme Uzunluğu Etkisi

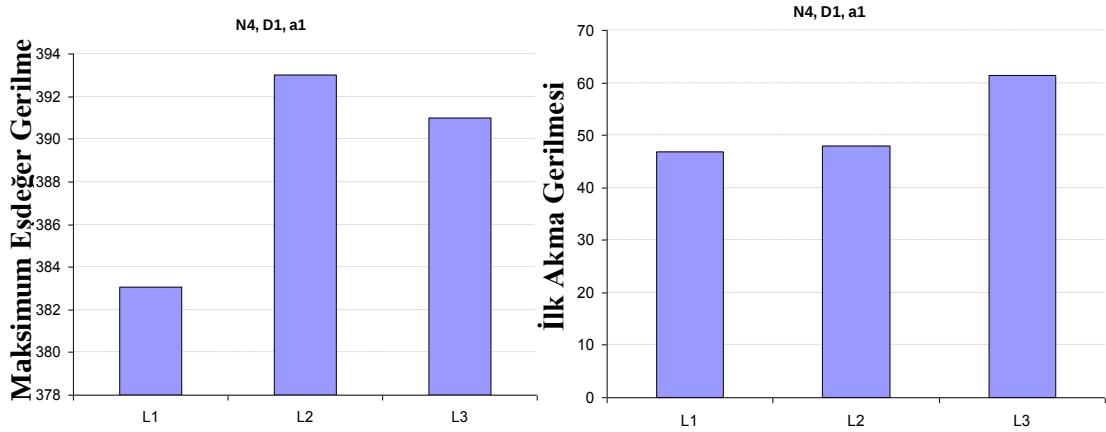
Bir diğer parametre de bindirme uzunluğudur. Bu mesafe basamaklı yamanın başlangıç bölgesinden ana parça üzerine uzanan uzunluk olarak seçilmiştir. Bir köprü görevi gören bu yama ana parçaya tutunarak gerilme akışını iyileştirmeye yarar.

Bindirme uzunluğu basamak uzunluğuna göre ayarlanmıştır. Her basamak uzunluğu için +5, -5 ve basamak uzunluğuna eşit olmak üzere üçer tanedir. Bu optimizasyon için üç farklı basamak uzunluğunda dokuz analiz yapılmıştır. Bu sınırlandırma optimum değerlerde olan D1 dizilimi ve dört basamaklı yama seçilerek gerçekleştirilmiştir.

*a1 uzunluğu için:*



Şekil 4.10 Bindirme uzunluklarının, a1 basamak uzunluğunda, eşdeğer gerilme ve taşınan yük için karşılaştırılması

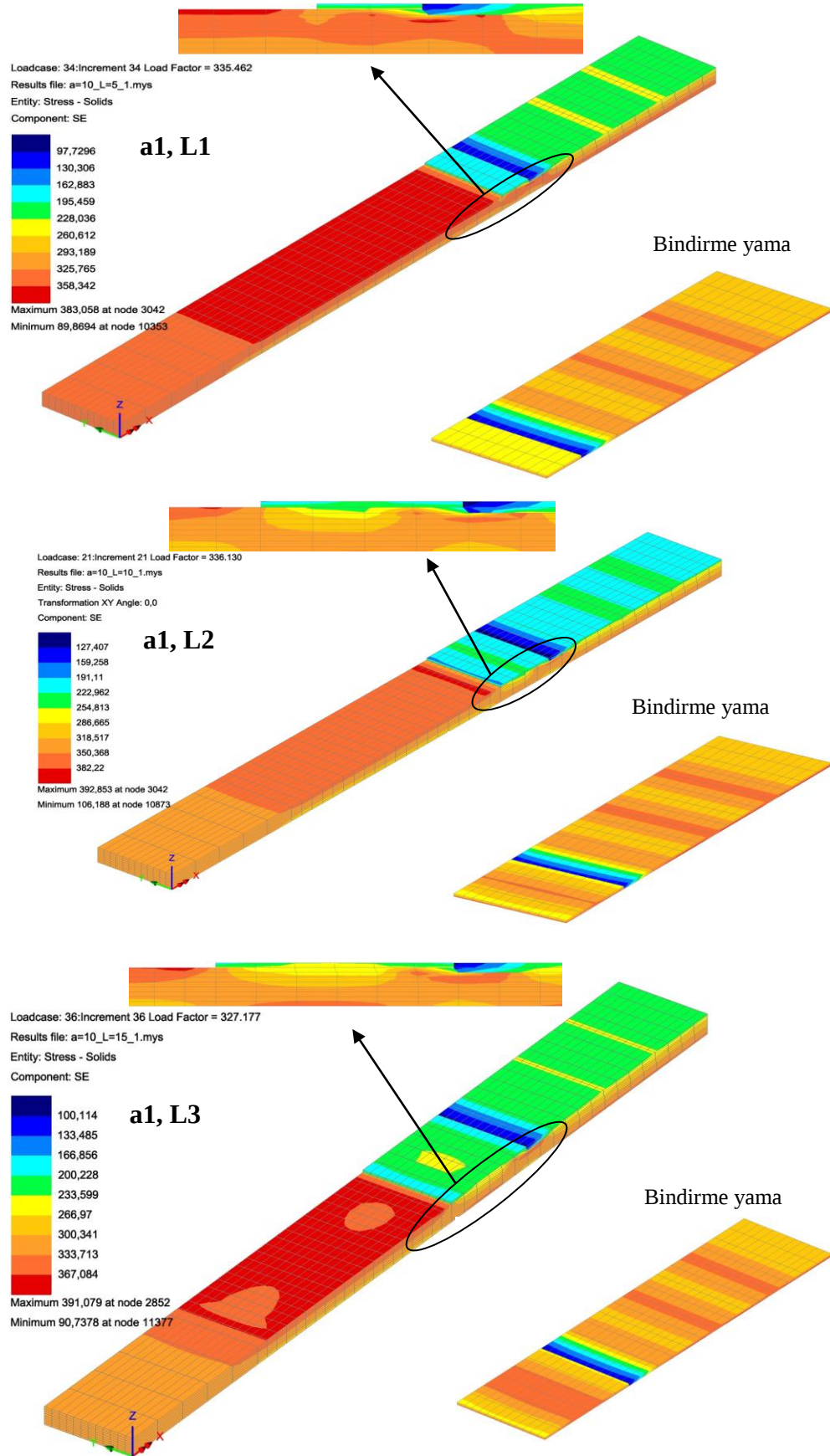


Şekil 4.11 Bindirme uzunluklarının, maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma gerilmesi cinsinden karşılaştırılması

Şekil 4.10'a bakıldığında a1 için verilen bindirme uzunluklarının aynı karakteristiği gösterdiğini söyleyebiliriz. Ancak bir noktadan sonra L2'de dalgalanmalar görülmüştür. Yaklaşık 250 MPa yük değerinde en büyük gerilmeyi barındıran L2 uzunluklu numune L1 ile neredeyse eşit olan maksimum yükü taşımayı başarmıştır. L3 ise aynı yük değerlerinde daha fazla gerilme meydana getirerek güvenilirliğini azaltmıştır.

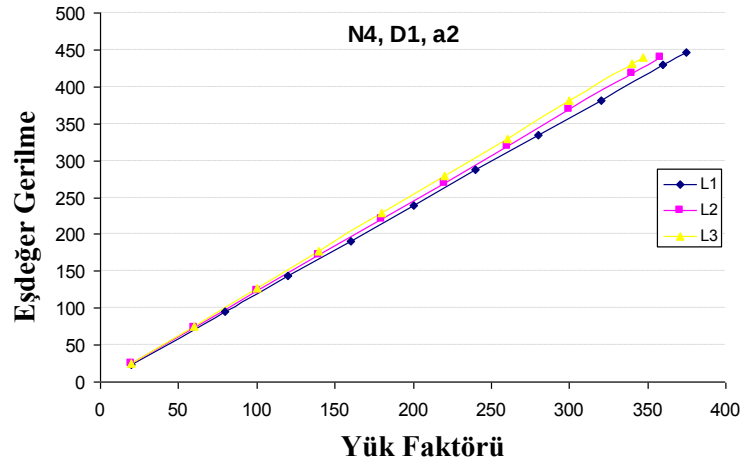
Şekil 4.11'de ise en büyük gerilmenin L2'de gerçekleştiğini ve ilk akma gerilmesinin en büyük L3'te meydana geldiğini görüyoruz.

Sonuç olarak a1 basamak uzunluğunda L1 ve L2 iyi performans gösterirken L3 gereksiz bir uzunluk olarak görülmektedir. Bindirme uzunluğunu basamak uzunluğuna eşit almak olumlu sonuç vereceği düşünülebilir ancak buna diğer basamak uzunlukları da incelendikten sonra karar verilebilir.

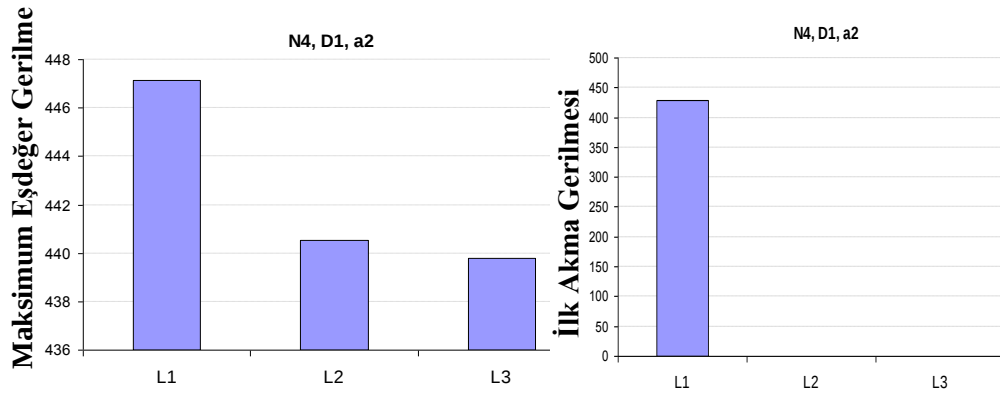


Şekil 4.12 a1 için maksimum yükte numune ve bindirme yama üzerinde oluşan gerilme dağılımı

*a2* uzunluğu için:



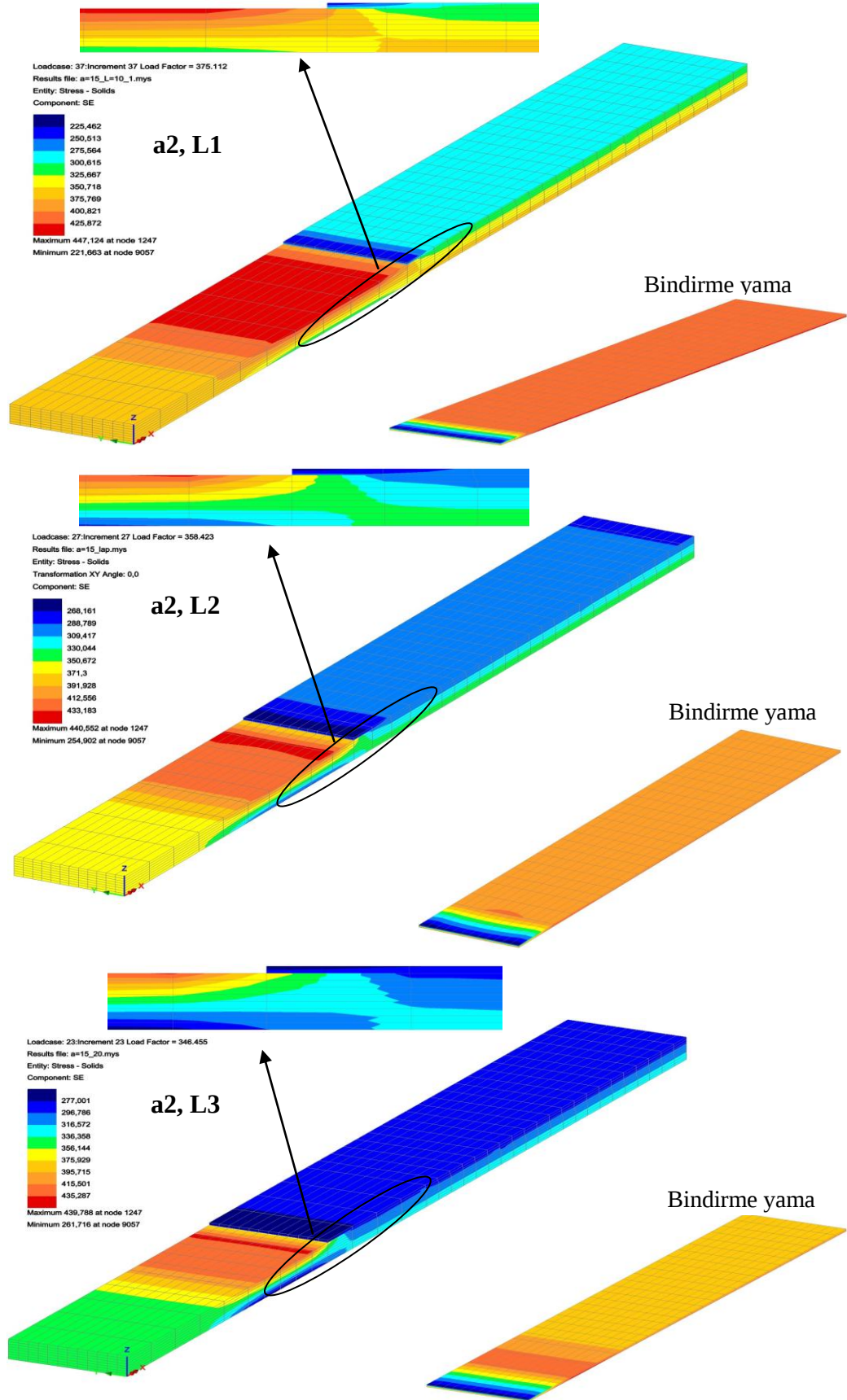
Şekil 4.13 Bindirme uzunluklarının, *a2* basamak uzunluğunda, eşdeğer gerilme ve taşınan yük için karşılaştırılması



Şekil 4.14 Bindirme uzunluklarının, maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma gerilmesi cinsinden karşılaştırılması

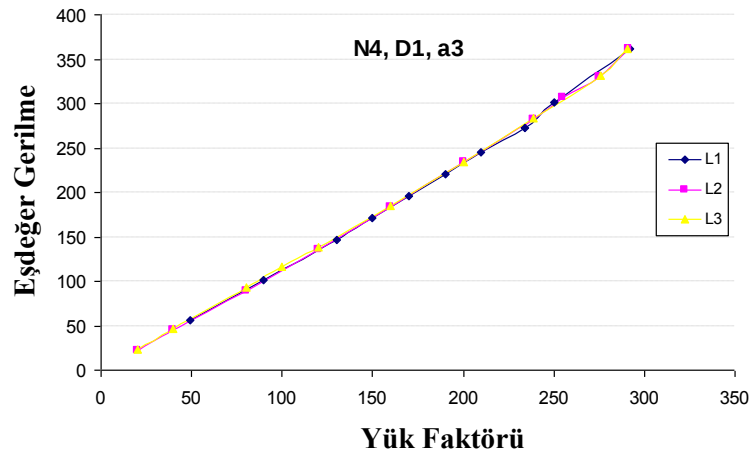
*a2* için verilen Şekil 4.13'te bindirme uzunlukları aynı karakteristiği göstermiştir. Numunelerde akma gerçekleşmemesi bu benzerliğe ölçüt olsa da maksimum gerilme değeri L1 uzunluğunda elde edilmiş ve tek akan numune de bu olmuştur. Gerilme değerleri birbirine çok yakın olduğundan taşınan yük miktarları önem kazanır. L1 en fazla yükü taşıdığından dayanımda öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak *a2* uzunluğunda L1'in iyi bir performans sergilemesi diğer uzunlukları gereksiz kılmıştır. L1 bu durum için seçilebilir.

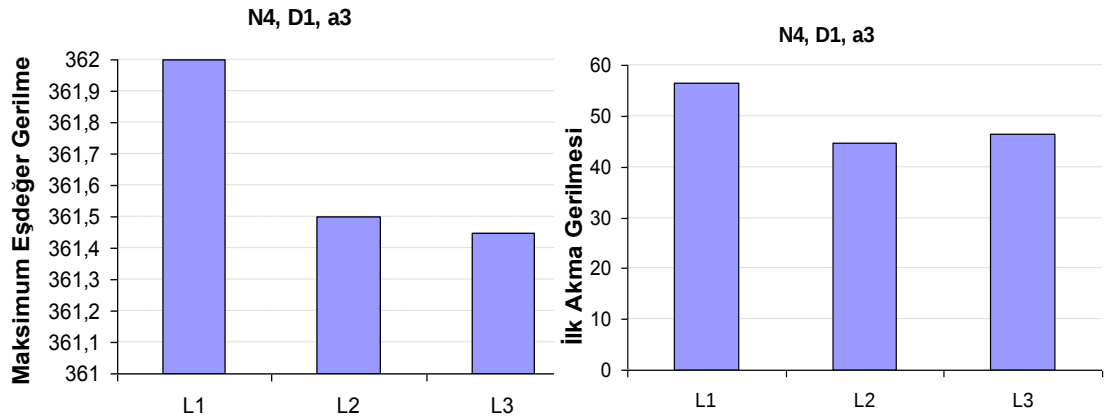


Şekil 4.15 a2 için maksimum yükte numune ve bindirme yama üzerinde oluşan gerilme dağılımı

*a3 uzunluğu için:*



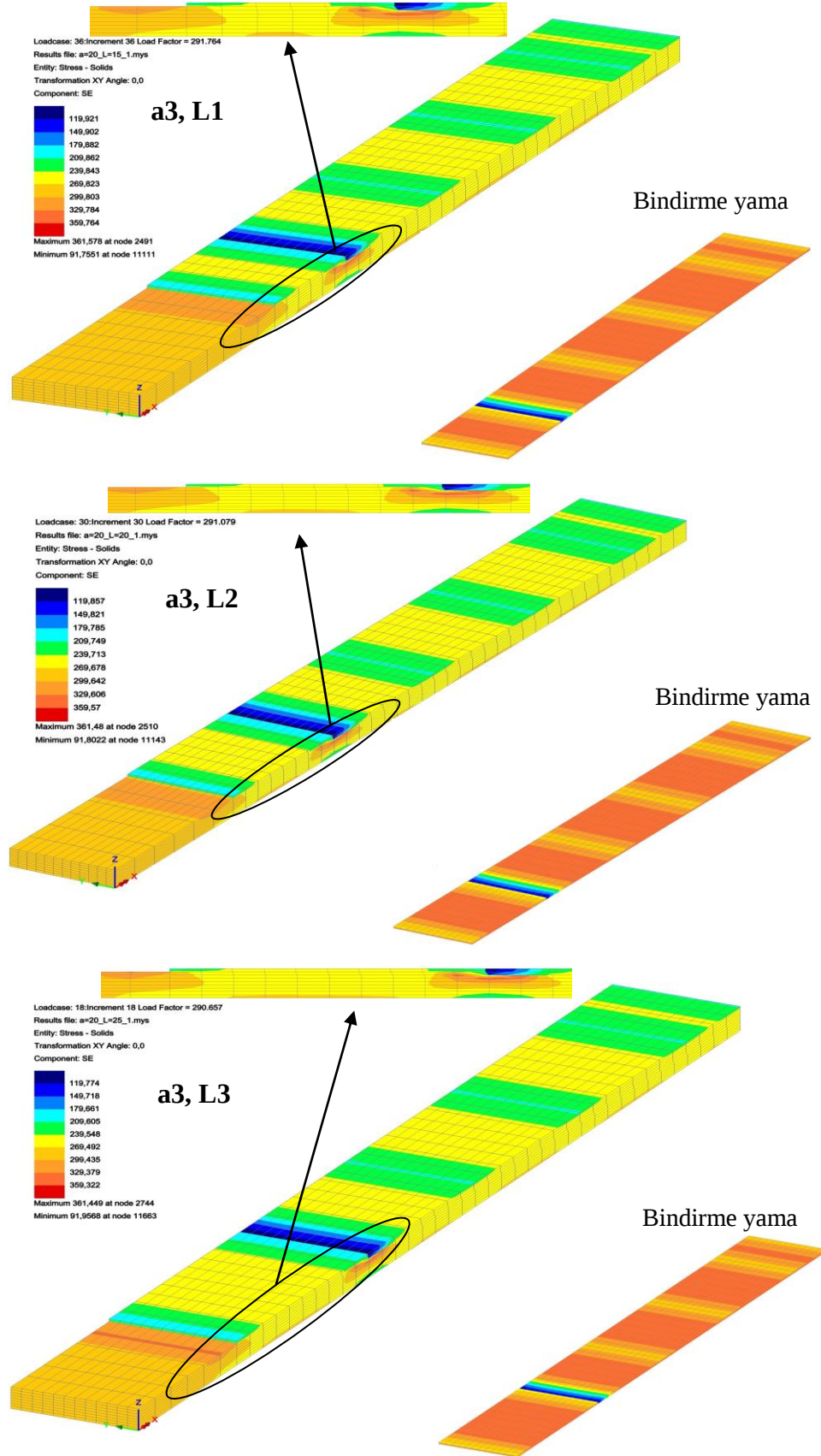
Şekil 4.16 Bindirme uzunluklarının, a3 basamak uzunluğunda, eşdeğer gerilme ve taşınan yük için karşılaştırılması



Şekil 4.17 Bindirme uzunluklarının, maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma gerilmesi cinsinden karşılaştırılması

Şekil 4.16’de görüldüğü gibi üç numunenin sonuçları çok yakın çıkmıştır. Bu durum bize basamak uzunluğu arttırıldığında bindirme uzunluğu etkisinin azaldığını göstermektedir. Şekil 4.16 ve 4.17 için karşılaştırma yapmak zor olsa da maksimum eşdeğer gerilmelerde L1’in öne çıktığını ve ilk akma gerilmesi değerlerinde de yine L1’in en yüksek değerde olduğunu görüyoruz

Sonuç olarak 20 mm basamak uzunluğunda bindirme uzunluğunun etkisi ihmal edilebilir. Fakat bir tercih söz konusu ise L2 bindirme uzunluğu seçilebilir.



Şekil 4.18 a3 için maksimum yükte numune ve bindirme yama üzerinde oluşan gerilme dağılımı

Genel itibariyle bindirme yama, basamak uzunluğuna eşit alındığında optimum değerlere ulaşmaktadır. Bu da L2'nin ideal olduğunu gösteriyor. L1 uzunluğu seçimi de uygun olacaktır.

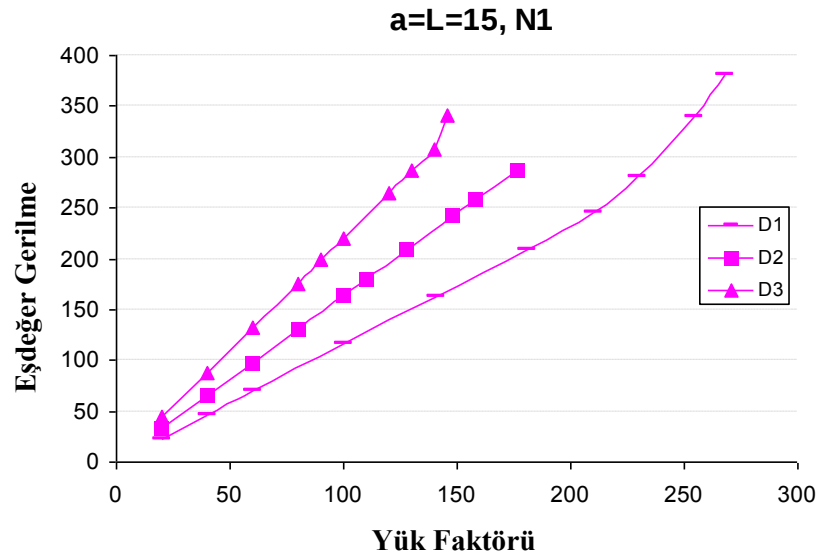
Demek ki bir onarımda çok uzun bindirmeler her zaman beklenen yönde sonuç vermeyebilir. Bindirme uzunluklarının yama geometrisine bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir.

#### 4.3.3 Dizilim Etkisi

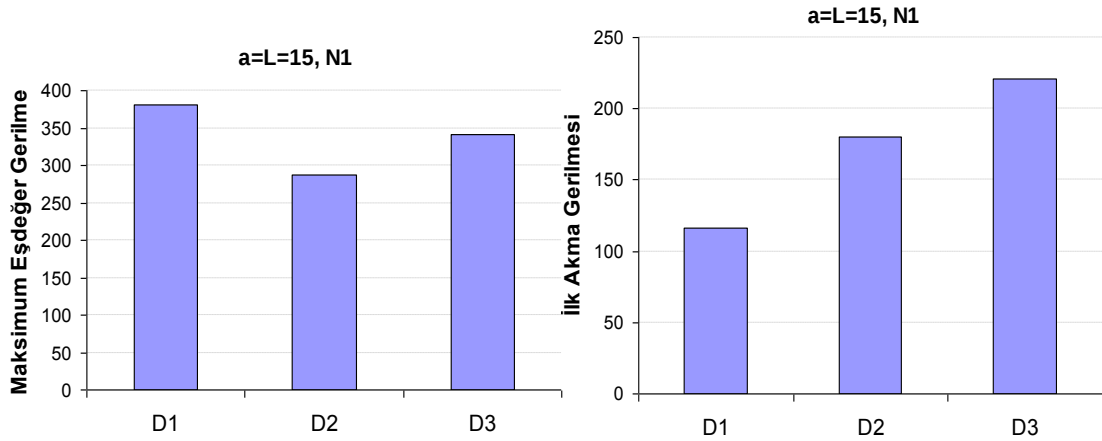
Bu çalışmada kullanılan numuneler farklı fiber oryantasyon açılarına göre dizilen tabakalarla oluşturulmuştur. Bu dizilimlerde yapılan karşılaştırmalar için elde edilen optimum basamak uzunluğu ve bindirme uzunluğu değerindeki ( $a=L=15$ ) numunede farklı basamak sayılarına karşılık gelen dizilimler kullanılmıştır.

*Bir basamaklı numuneler (N1) için dizilimlerin karşılaştırılması:*

Yapılan non-lineer analizlerde ilk olarak bir basamaklı modeller için elde edilen sonuçlara göre şu grafikler oluşturulmuştur:



Şekil 4.19 Bir basamaklı numunelerde eşdeğer gerilme-yük grafiği için dizilimin etkisi

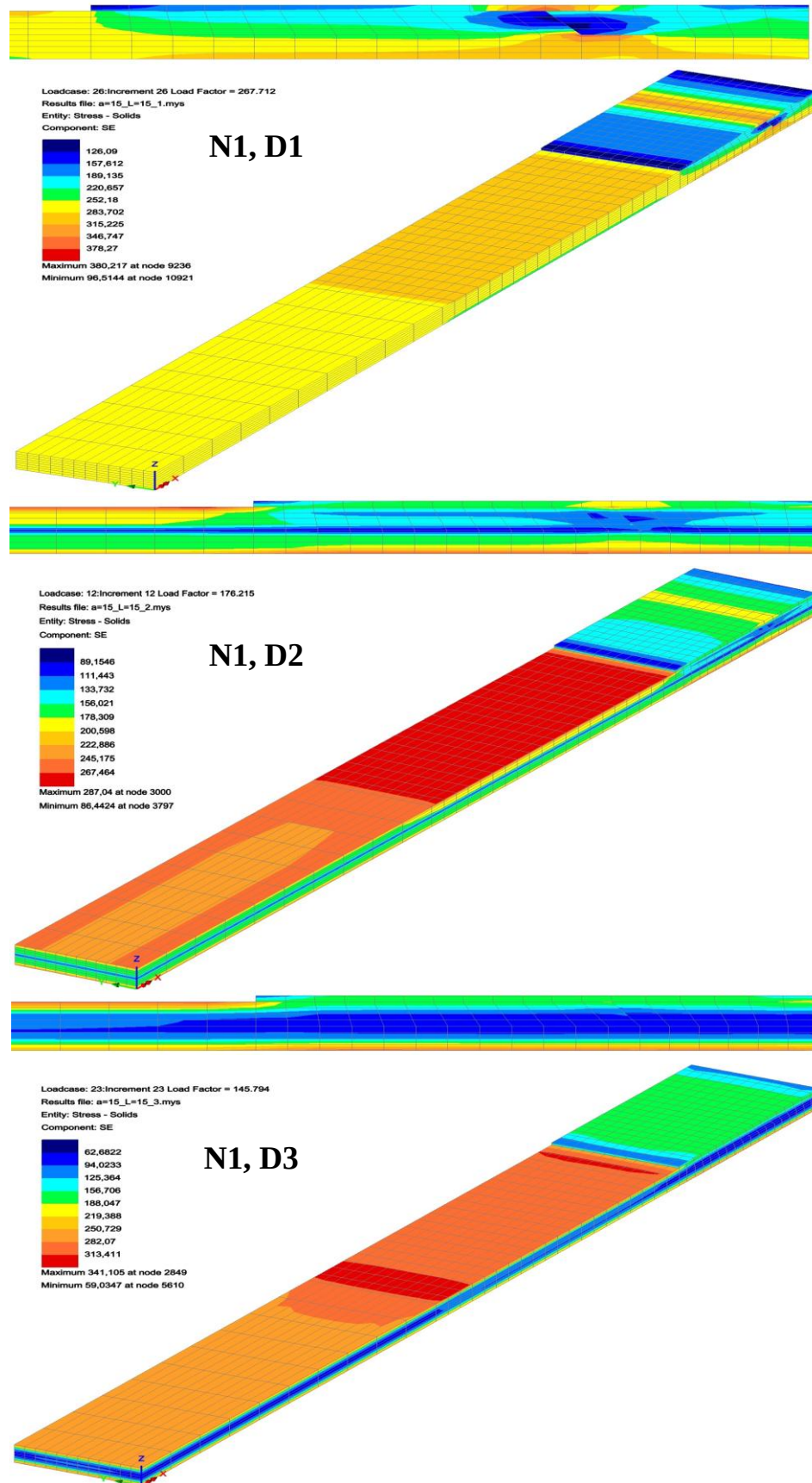


Şekil 4.20 Bir basamaklı numunelerde maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma gerilmesi değerleri için dizilimin etkisi

Şekil 4.19’a bakıldığında beklendiği gibi D1 kodlu dizilimli model maksimum yükü taşımış ve en büyük gerilmeyi meydana getirmiştir. D2 kodlu dizilim, D3’e göre daha fazla yük taşıırken gerilme değerleri daha düşük çıkmıştır. Bu önemli bir avantajdır. Bu durumlardan “sıfır derece oryantasyonlu tabakalar ne kadar çoksa o daha dayanıklıdır” sonucu çıkarılabilir.

Şekil 4.20’ye bakıldığında ise maksimum eşdeğer gerilmeler D1’de en fazla D2’de en düşüktür. Burada D3’ün D1’in maksimum eşdeğer gerilme değerine yaklaşması dayanıklılık açısından kötü bir durumdur. İlk akma gerilmeleri için de D3’ün daha büyük bir gerilme değerinde aktığı görülüyor.

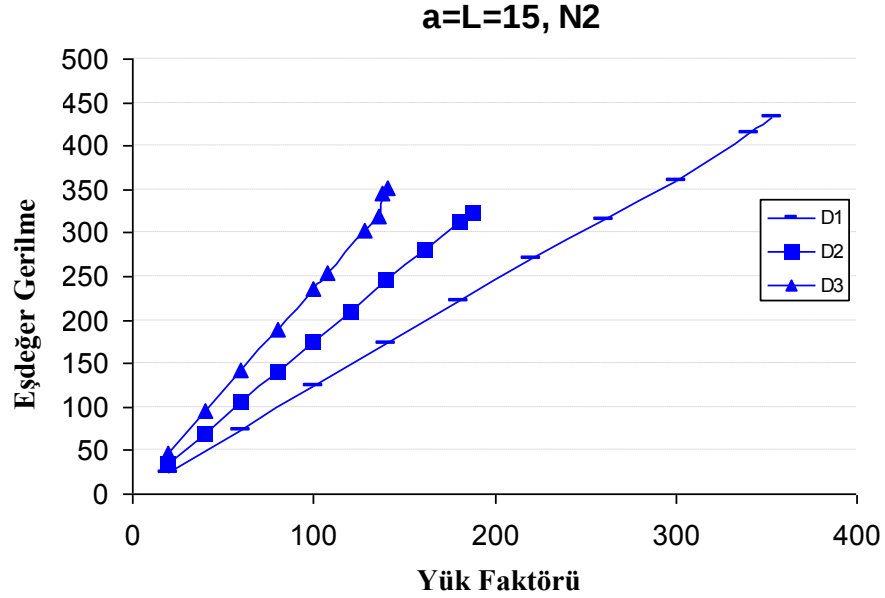
Bu sonuçlarda sadece sıfır dereceli yönler dayanım için yeterli görünse de yamalardan dolayı oluşan eğilme gerilmeleri ve kayma gerilmelerini taşıyan diğer oryantasyonlar da önem taşımaktadır.



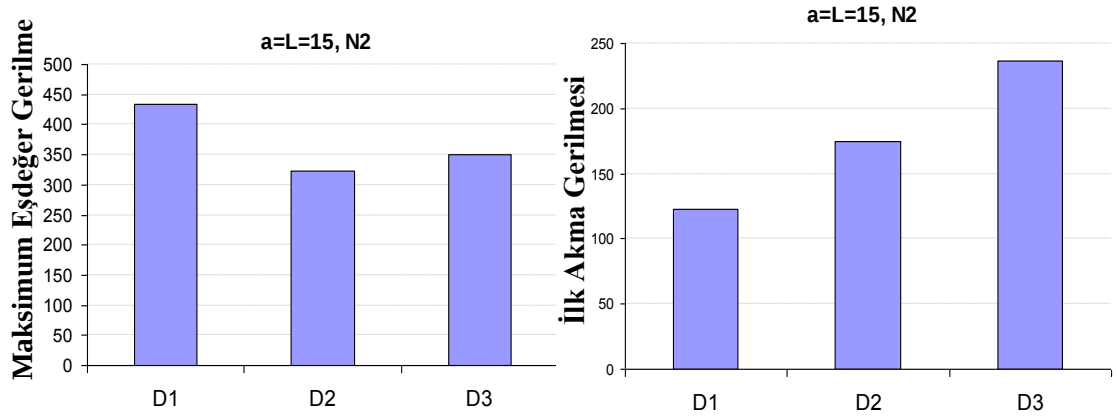
Şekil 4.21 N1’de maksimum yük için dizilimin gerilme dağılımına etkisi

*İki basamaklı numuneler (N2) için dizilimlerin karşılaştırılması:*

Yapılan non-lineer analizlerde iki basamaklı modeller için elde edilen sonuçlara göre şu grafikler oluşturulmuştur:

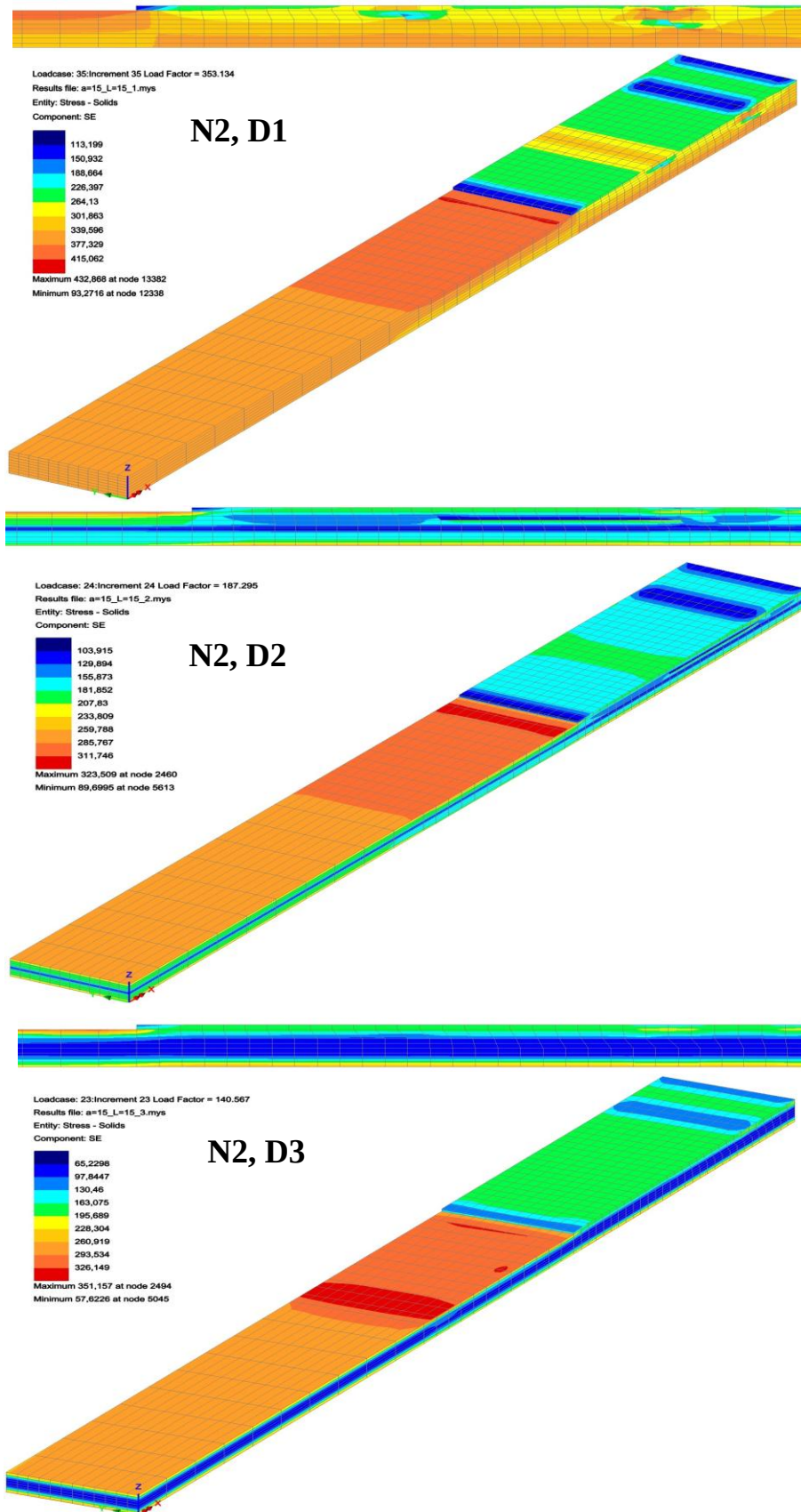


Şekil 4.22 İki basamaklı numunelerde eşdeğer gerilme-yük grafiği için dizilimin etkisi



Şekil 4.23 İki basamaklı numunelerde maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma gerilmesi değerleri için dizilimin etkisi

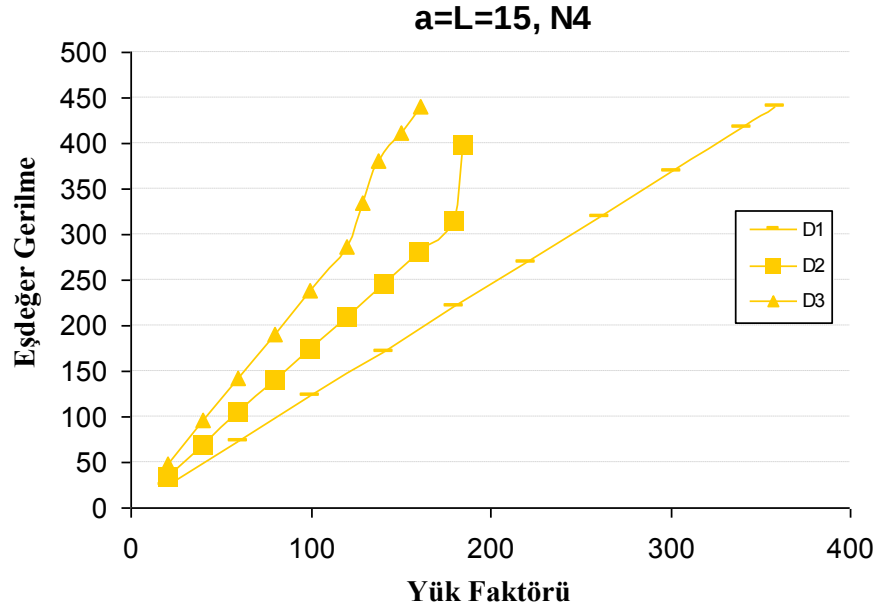
İki basamaklı modeller için oluşturulan Şekil 4.22 ve 4.23'te görülen sonuçlar bir basamaklı modellerdeki sonuçlara benzer çıkmıştır. Fakat iki basamaklıda değerlerin daha büyük olduğunu görüyoruz.



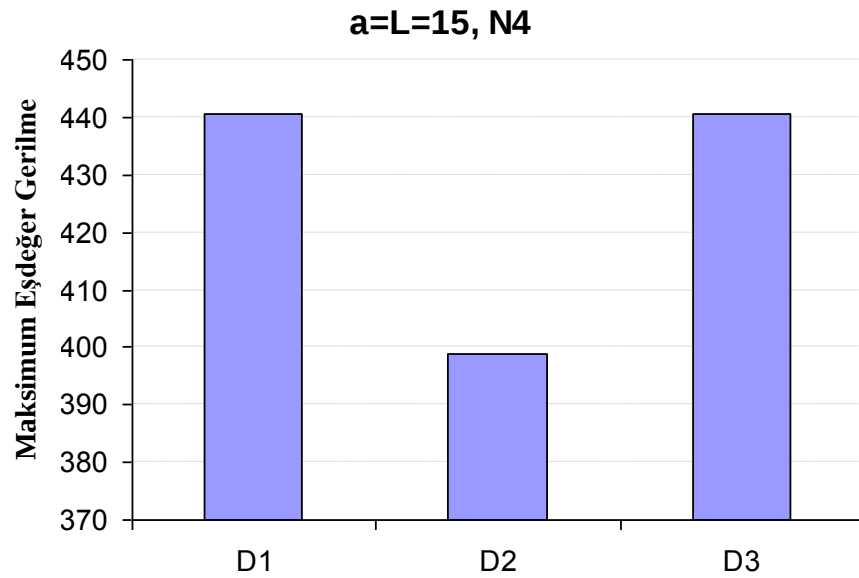
Şekil 4.24 N2’de maksimum yük için dizilimin gerilme dağılımına etkisi

Üç basamaklı numuneler (N3) için dizilimlerin karşılaştırılması:

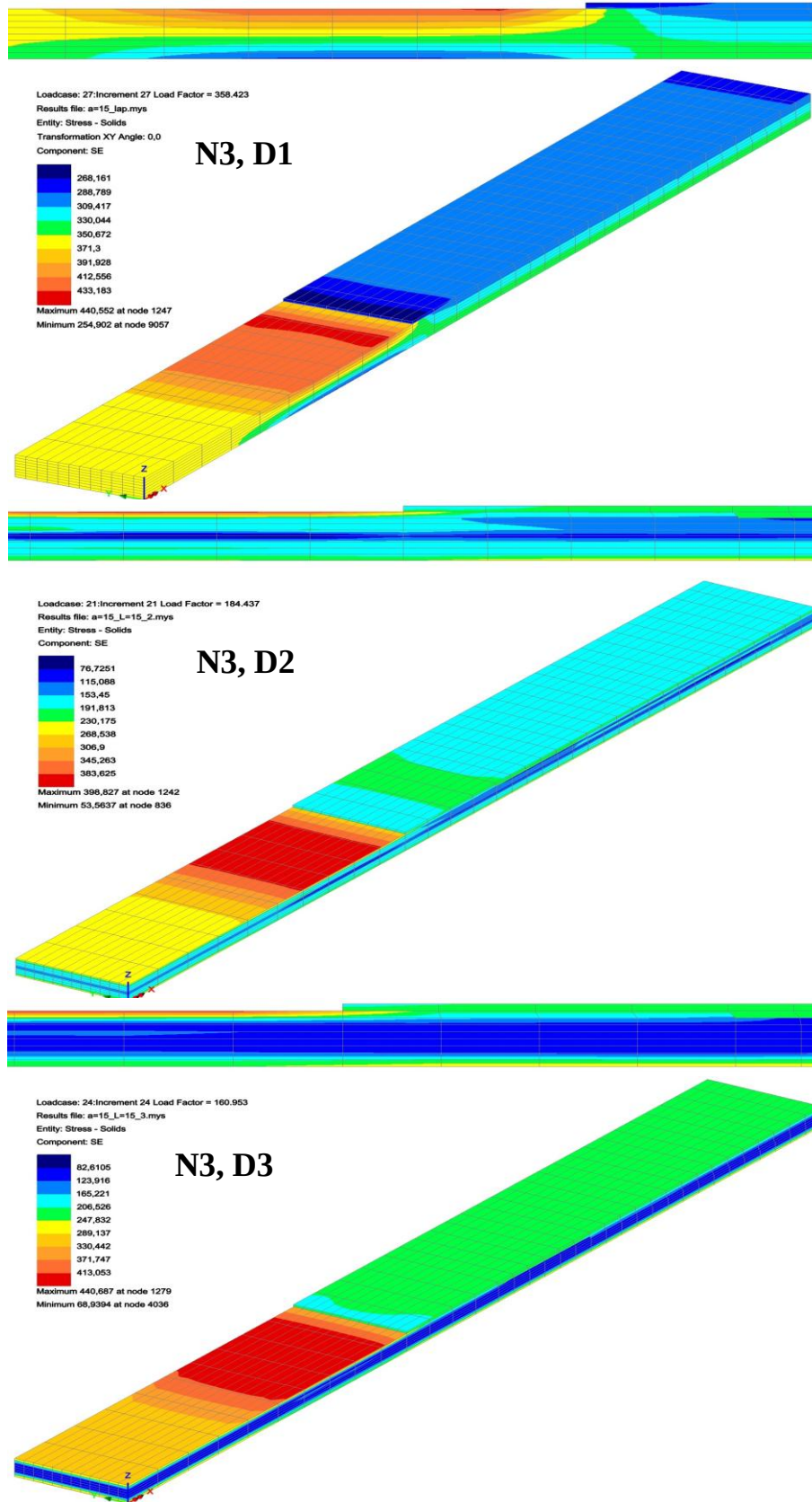
Yapılan non-lineer analizlerde üç basamaklı modeller için elde edilen sonuçlara göre şu grafikler oluşturulmuştur:



Şekil 4.25 Üç basamaklı numunelerde eşdeğer gerilme-yük grafiği için dizilimin etkisi



Şekil 4.26 Üç basamaklı numunelerde maksimum eşdeğer gerilme değerleri için dizilimin etkisi. Not: Bu durum için akma gerilmesi görülmemiştir.



Şekil 4.27 N3'de maksimum yük için dizilimin gerilme dağılımına etkisi

Grafiklerde görülüyor ki dizilimler gerilme açısından önemli farklılıklar arz ediyor. 1, 2 ve 4 basamaklı yama için gösterilen grafiklerde D1 kodlu dizilimin olduğu numunelerde daha fazla yük taşındığı ve bununla beraber daha fazla gerilme oluşturduğu gözlemleniyor. Bu durum özellikle 1 ve 2 basamaklı yama yapılmış numunelerde daha net göze çarpıyor. Buna karşılık 4 basamaklı yama numunesinde taşınan yükün fazla olmasına rağmen maksimum gerilme değeri D1 ve D3 kodlu dizilimlerde çok farklılık göstermemiştir. Maksimum gerilme değeri beklendiği gibi D1’de en yüksek D2’de en düşük çıkmıştır. İlk akma gerilmesi ise D3’te en yüksek olarak görünüyor fakat 4 basamaklı yama için hazırlanan numunede D1 ile D3 neredeyse eşittir.

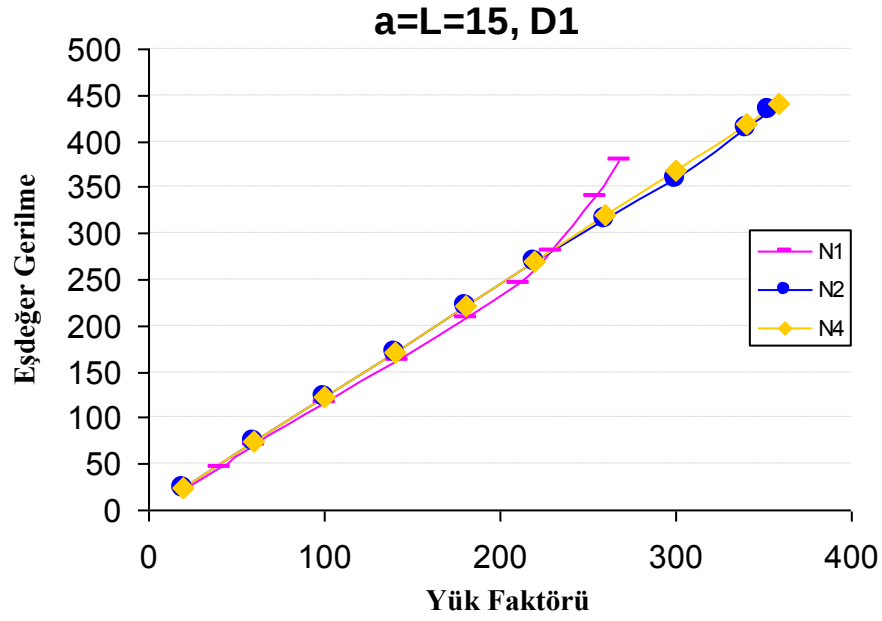
#### ***4.3.4 Basamak Sayısı Etkisi***

Onarım optimizasyonunda önemli bir değişken de basamak sayısıdır. Yama derinliği aynı olan modellere 1, 2 ve 4 basamaklı yamalar yapılarak incelenmiştir. Gerilme akışı açısından önemli olan basamak sayısı gelen yüke karşı oluşan gerilmenin sert geçişini engellemek için yapılan kademelerdir.

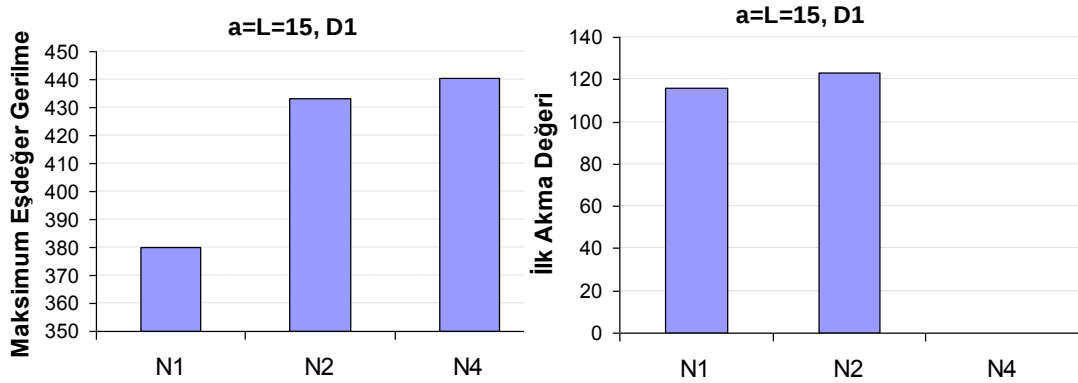
Bu bölümde 1,2 ve 4 basamaklı olan modeller, optimum bindirme uzunluğu, basamak uzunluğu seçilerek farklı dizilimler için analizler yapılarak karşılaştırılmıştır. 3 basamaklı olarak modeller hazırlanamamıştır. Çünkü 8 tabakalı olan modellerimize tek sayılarda basamak yapılamamaktadır. 1 basamaklı yamada 4 tabaka, 2 basamaklı yamanın her bir basamağında 2 tabaka ve 4 basamaklı yamanın her bir basamağında ise 1 tabaka bulunmaktadır.

#### ***D1 kodlu dizilim için basamak sayısı karşılaştırması:***

Yapılan non-lineer analizlerde D1 kodlu modeller için elde edilen sonuçlara göre şu grafikler oluşturulmuştur:

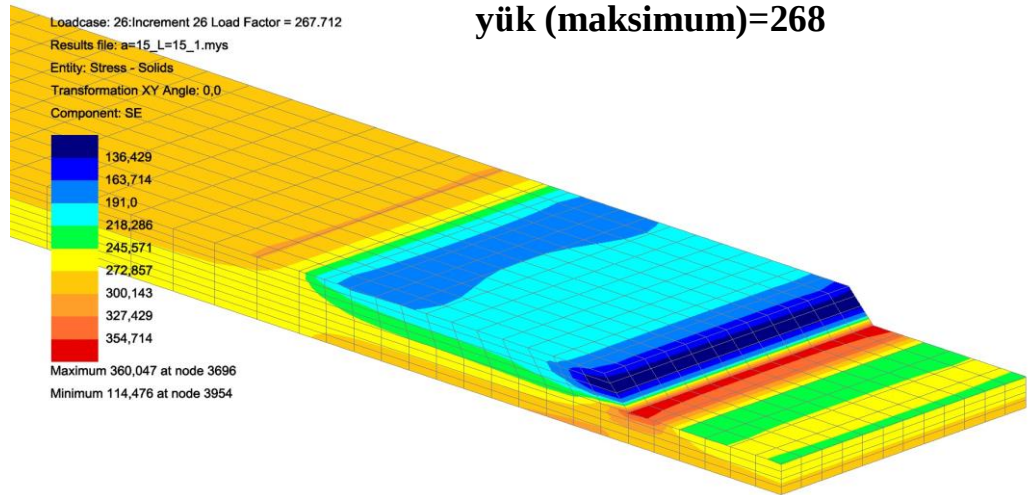
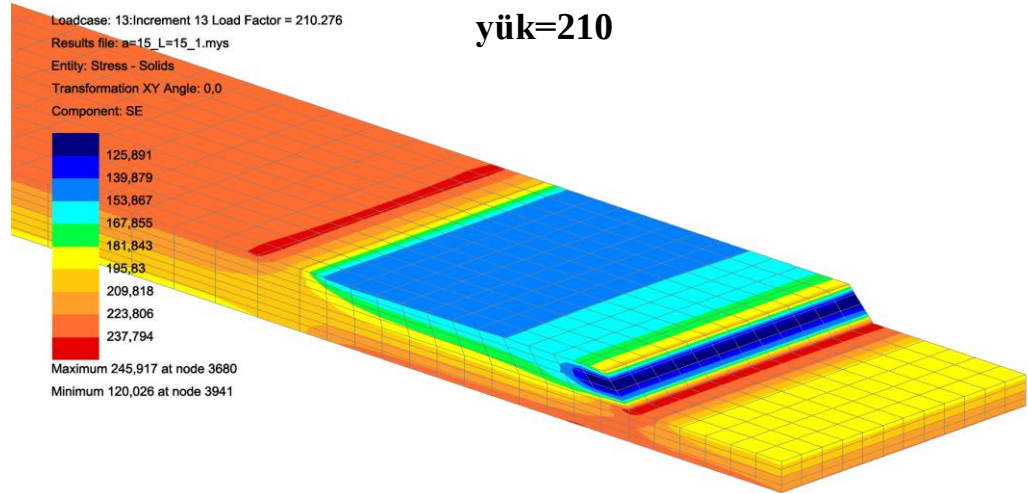
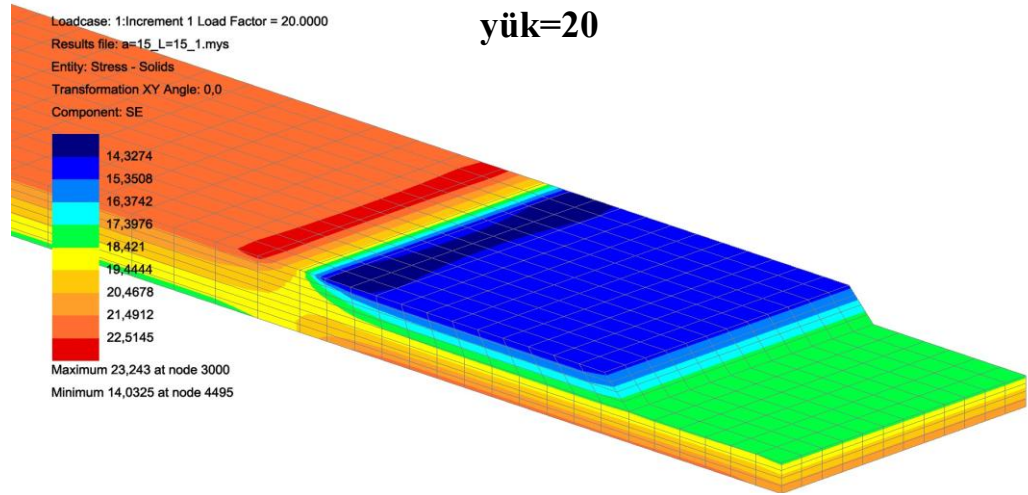


Şekil 4.28 D1 dizilimli numunelerde eşdeğer gerilme-yük grafiği için basamak sayısının etkisi

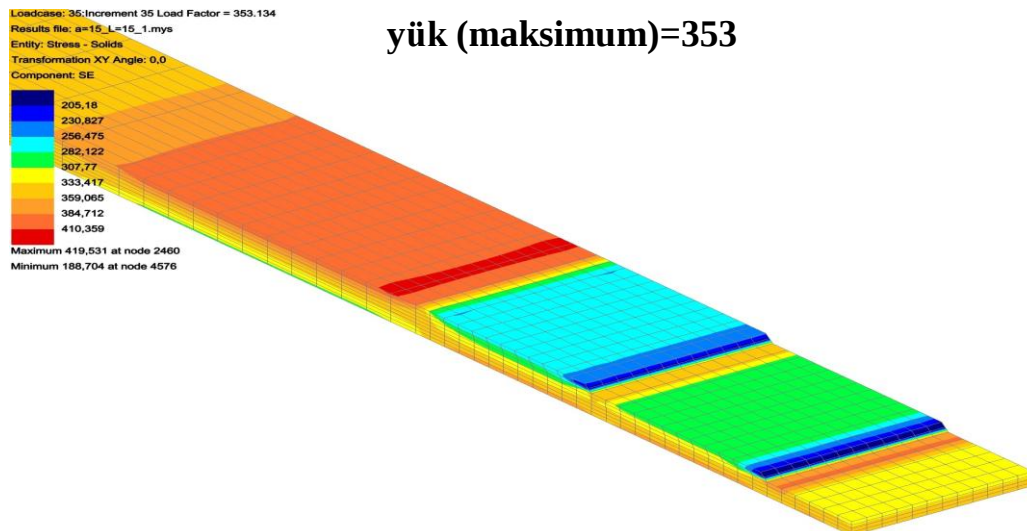
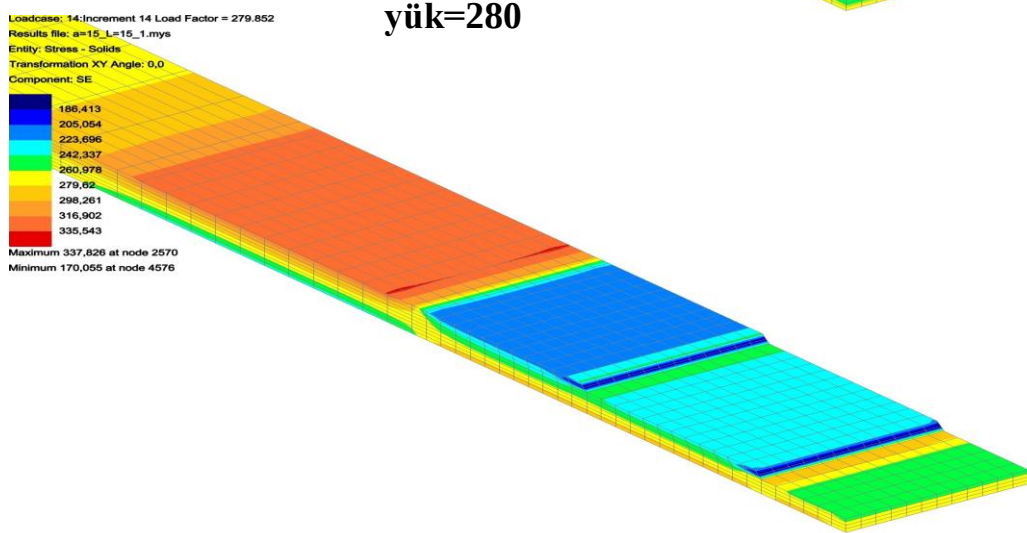
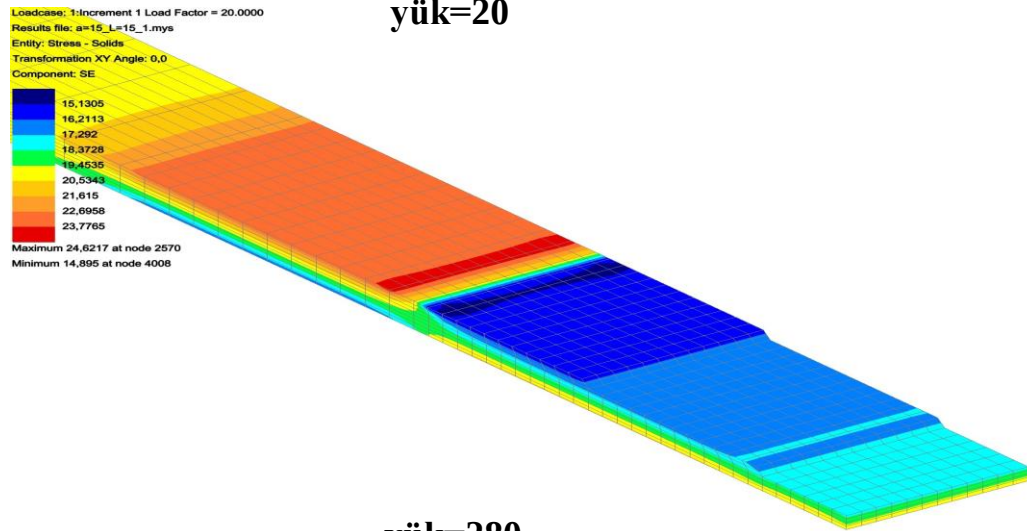


Şekil 4.29 D1 dizilimli numunelerde maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma gerilmesi değerleri için basamak sayısının etkisi

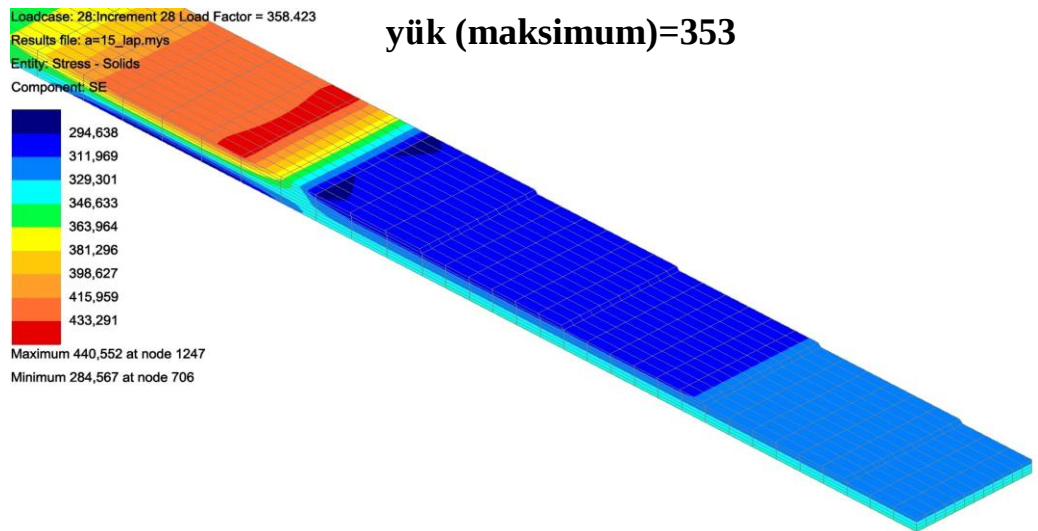
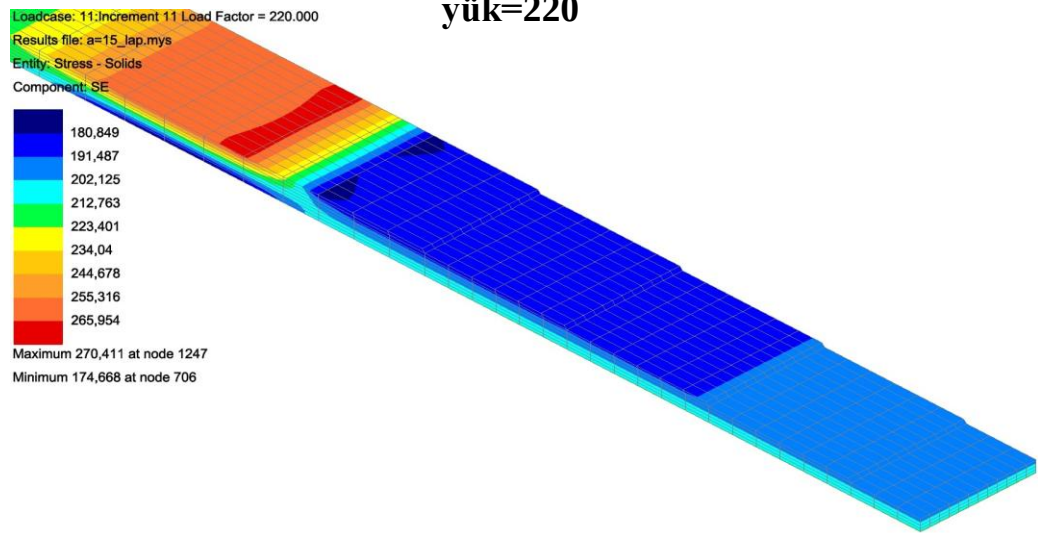
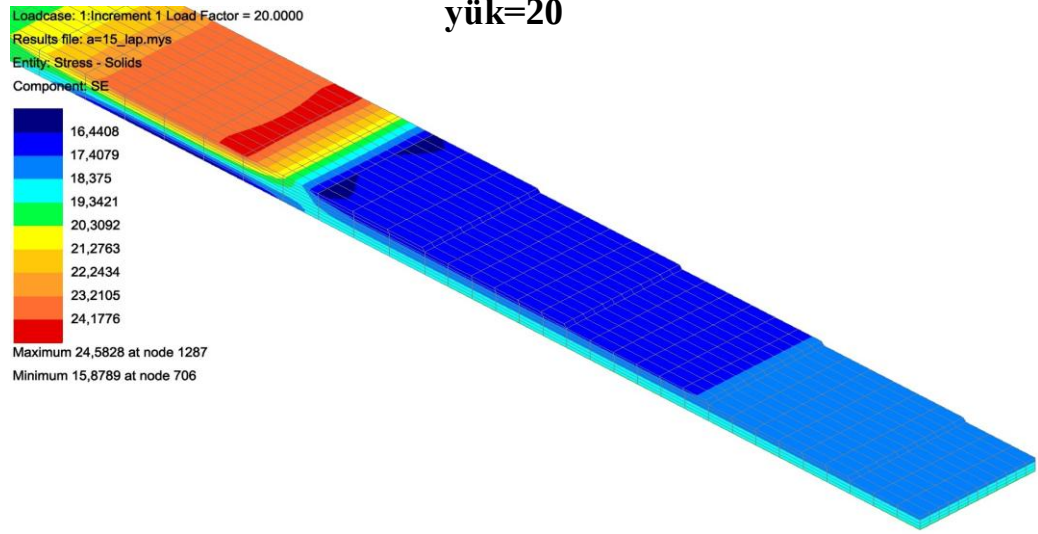
Şekil 4.28’de D1 diziliminde eşdeğer gerilme – yük grafiğini görmekteyiz. Bu grafikte bir basamaklı modelin dayanımının iki ve dört basamaklı modellere göre düşük olduğunu görüyoruz. Fakat iki ve dört basamaklı numuneler arasında çok büyük farklılıklar olmaması bize, iki basamaklı modelin pratikte kullanım için daha kolay olmasından dolayı tercih edilebilir olduğunu gösteriyor.



Şekil 4.30 Bir basamaklı ve D1 kodlu modelde farklı yükler için basamaklar üzerinde gerilme dağılımı



Şekil 4.31 İki basamaklı ve D1 kodlu modelde farklı yükler için basamaklar üzerinde gerilme dağılımı

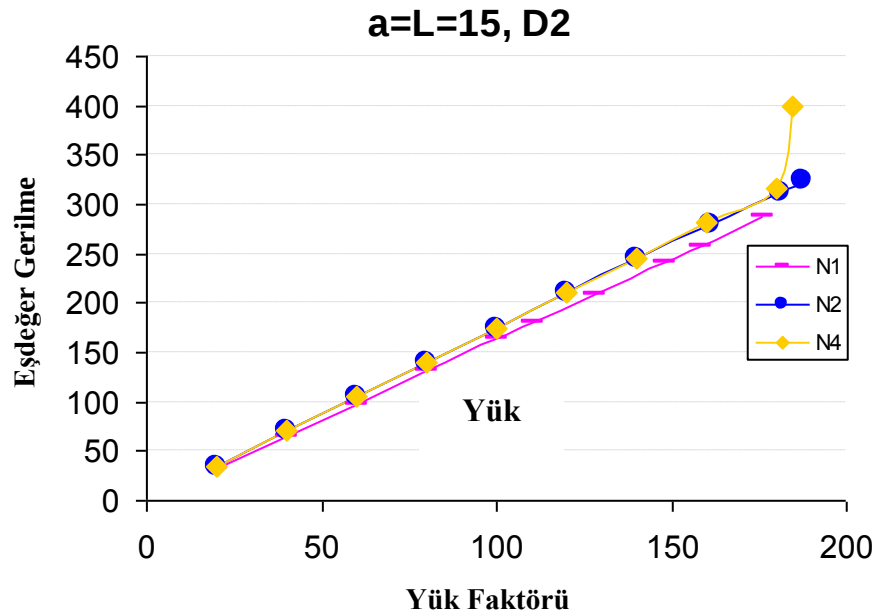


Şekil 4.32 Dört basamaklı ve D1 kodlu modelde farklı yükler için basamaklar üzerinde gerilme dağılımı

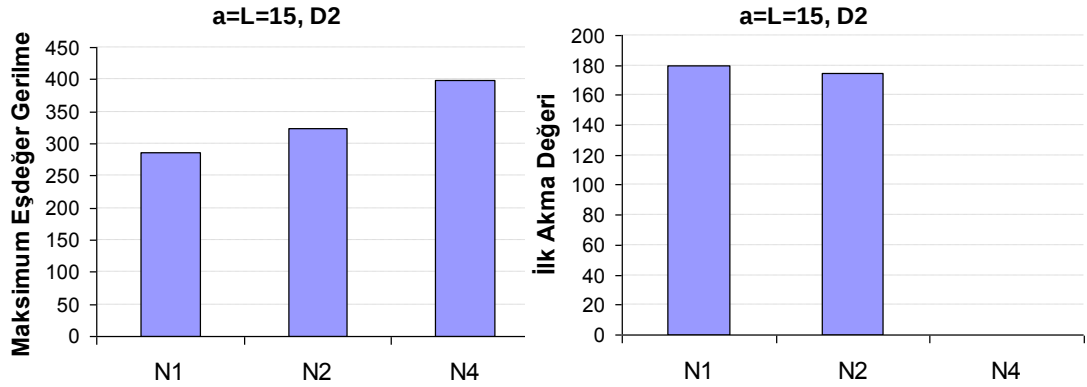
Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32’da sırasıyla 1,2 ve 4 basamaklı modellerde farklı yük değerlerinde basamaklar üzerinde oluşan gerilme dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılımlarda bir basamaklı numunelerde maksimum gerilme basamak üzerinde nasıl ilerlediğini ve dağılımını net olarak görebiliyoruz. İki basamaklıda bu kısmen görülürken dört basamaklıda maksimum gerilmenin yerinin değişmediği belli oluyor. Yani yama bölgelerinde neredeyse eşit gerilmeler homojen olarak dağılmış. Bu da bize dört basamaklı yamanın gerilmeyi yama bölgesinde eşit dağıtabildiği ve Şekil 4.29’teki grafikte görüldüğü gibi akma gerilmesi bile oluşturmada kontrollü bir geçiş sağladığını kanıtlıyor.

*D2 kodlu dizilim için basamak sayısı karşılaştırması:*

Yapılan non-lineer analizlerde D2 kodlu modeller için elde edilen sonuçlara göre şu grafikler oluşturulmuştur:



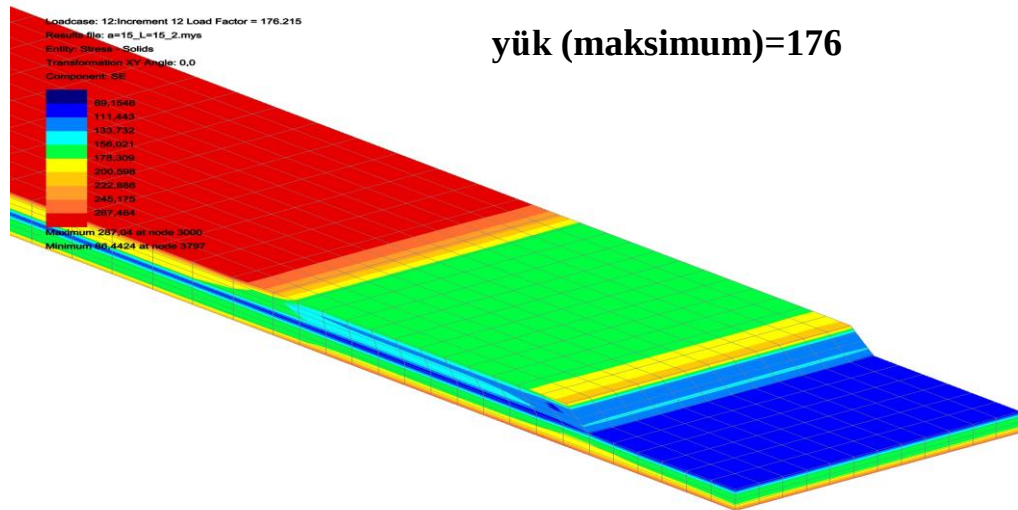
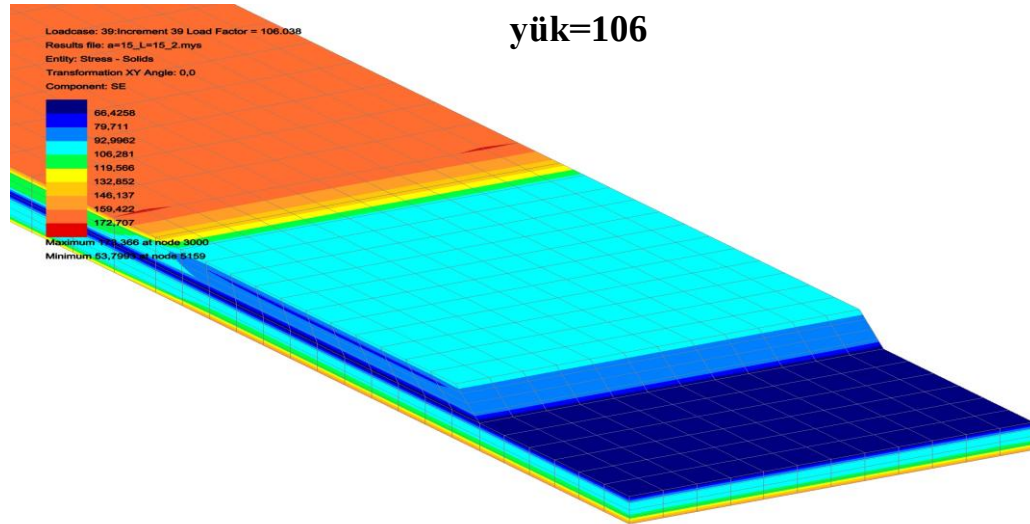
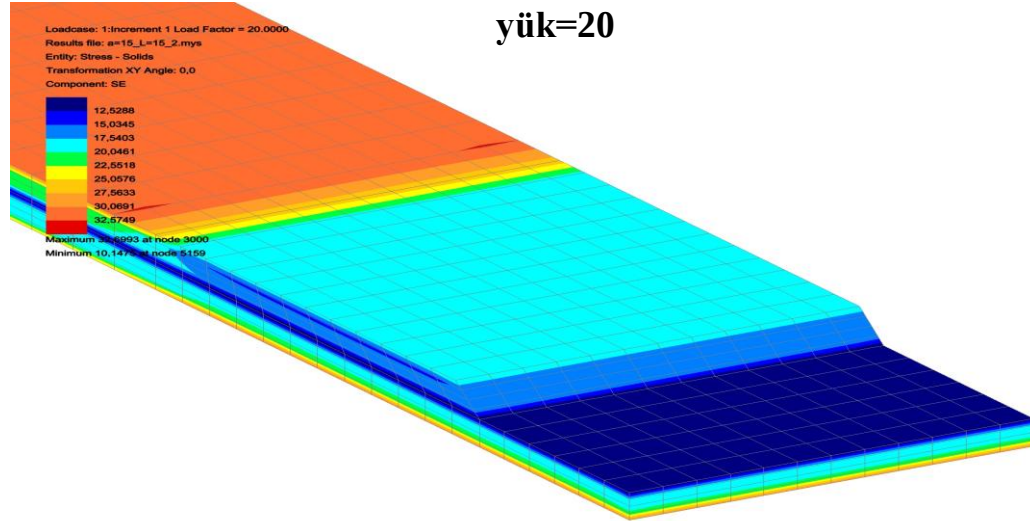
Şekil 4.33 D2 dizilimli numunelerde eşdeğer gerilme-yük grafiği için basamak sayısının etkisi



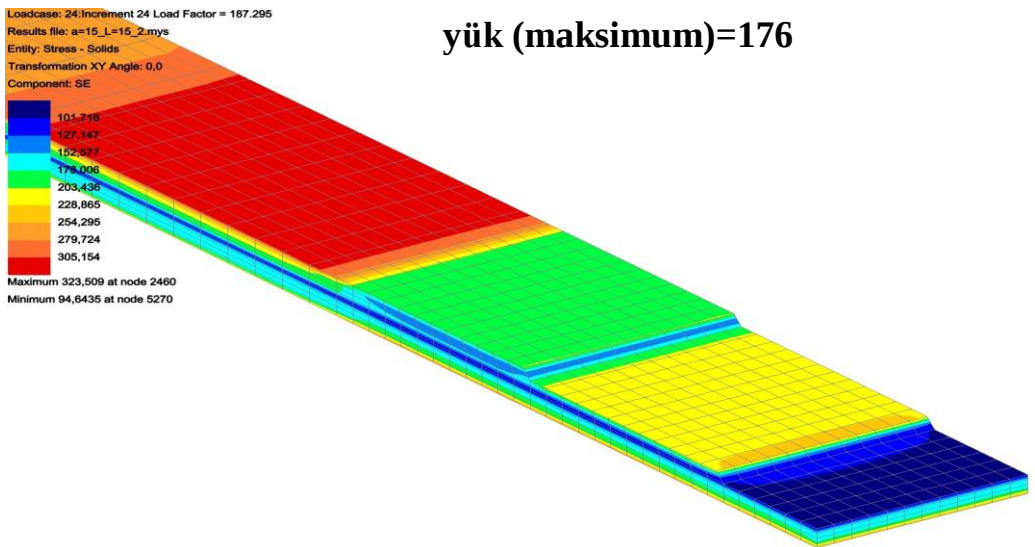
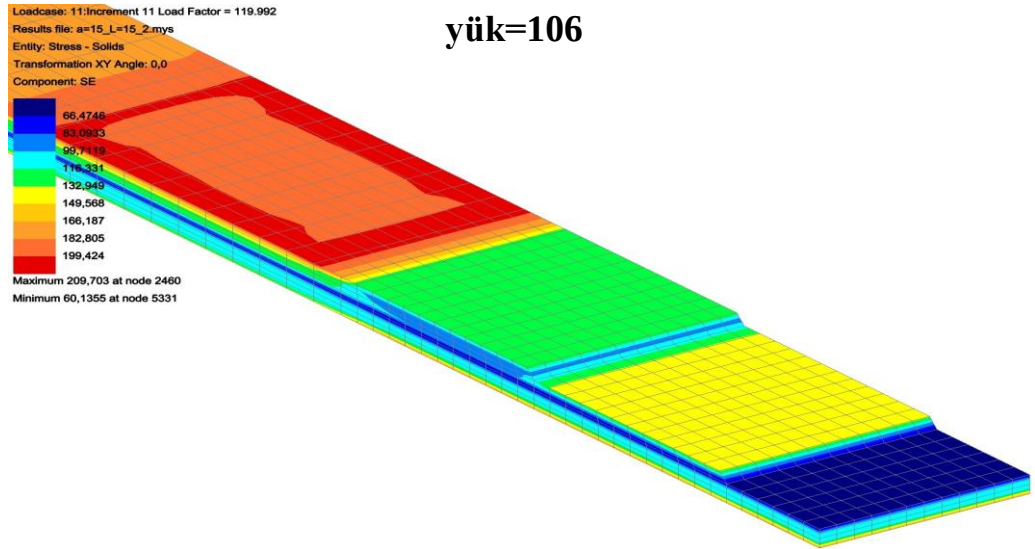
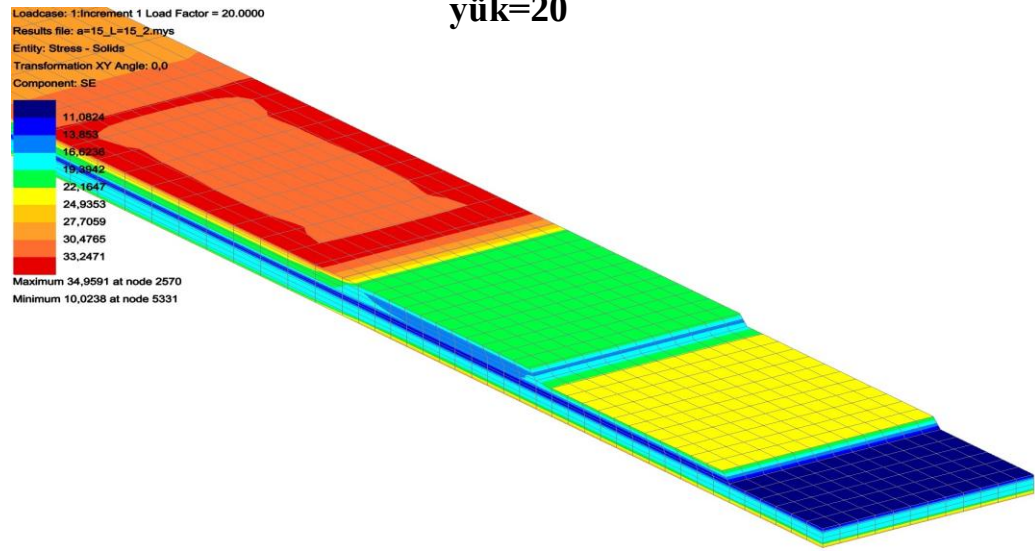
Şekil 4.34 D2 dizilimli numunelerde maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma gerilmesi değerleri için basamak sayısının etkisi

Şekil 4.33’da D2 diziliminde eşdeğer gerilme – yük grafiğini görmekteyiz. Bu grafikte bir basamaklı modelin diğerlerine göre daha az yük taşıdığını görmekteyiz. Fakat D1 dizilimli kadar büyük farklar göstermeyen bu dizilimde hatta dört basamaklı model iki basamaklıya göre daha az yük taşıyarak ve maksimum yükte ani bir gerilme artışıyla ilginç bir sonuç ortaya koymuştur. Bu durumda iki basamaklı model daha güvenli olarak gözükmektedir.

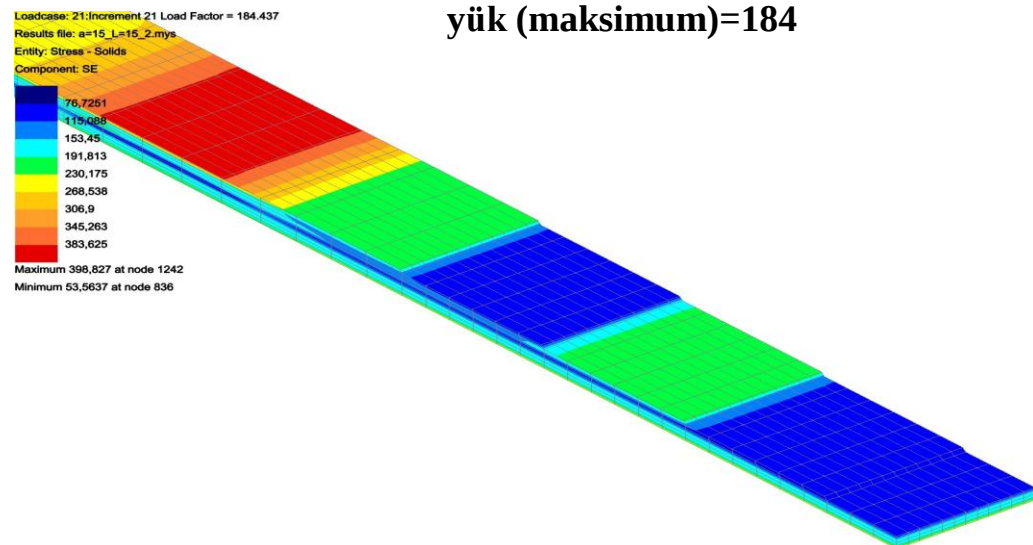
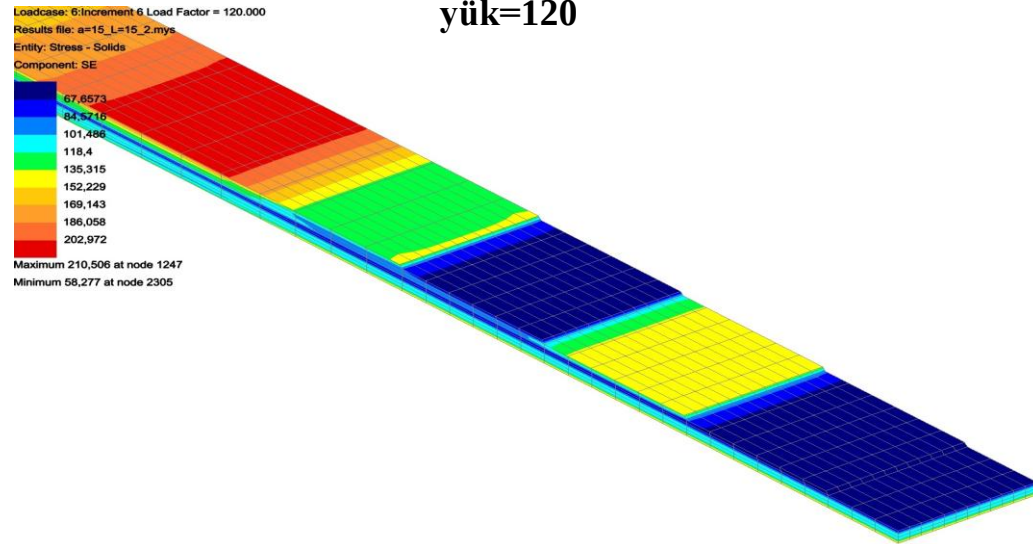
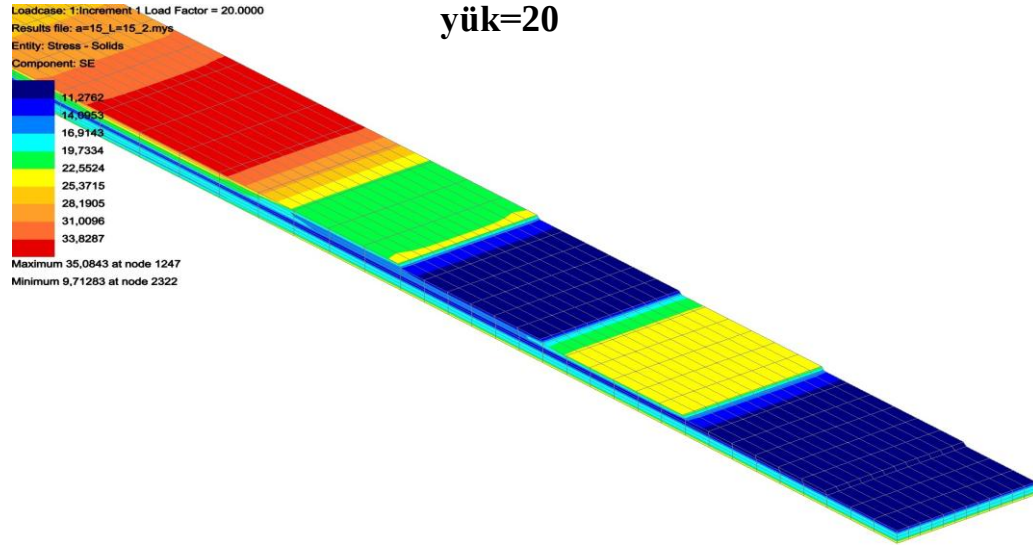
Şekil 4.34’de ise maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma değerlerini görmekteyiz. Burada dört basamaklı modelde çok büyük bir gerilme elde edilirken, iki ve bir basamaklıda azalan gerilme değerleri görüyoruz. Dört basamaklı modelde akma meydana gelmemesi bu modelin yükü düzenli bir biçimde yama bölgesine dağıldığını göstermektedir.



Şekil 4.35 Bir basamaklı ve D2 kodlu modelde farklı yükler için basamaklar üzerinde gerilme dağılımı



Şekil 4.36 İki basamaklı ve D2 kodlu modelde farklı yükler için basamaklar üzerinde gerilme dağılımı

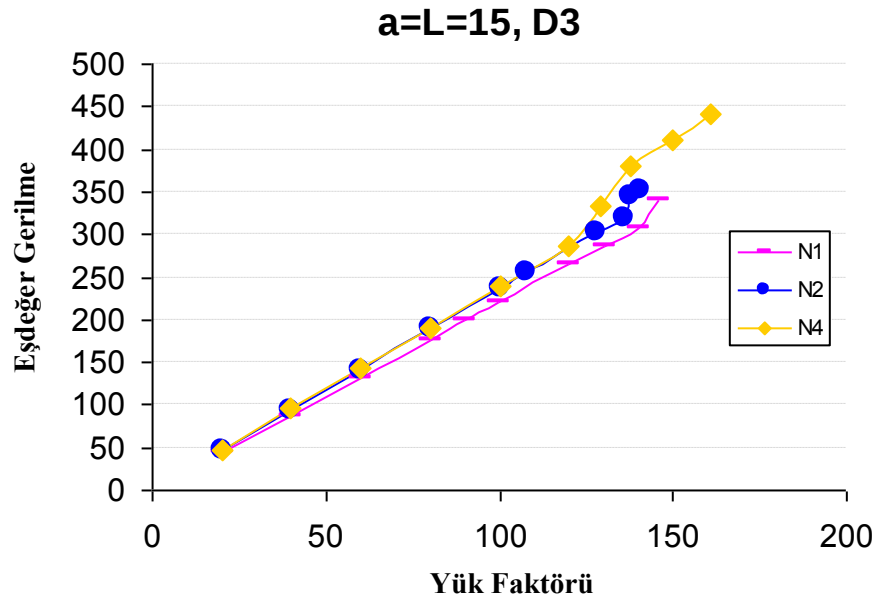


Şekil 4.37 Dört basamaklı ve D2 kodlu modelde farklı yükler için basamaklar üzerinde gerilme dağılımı

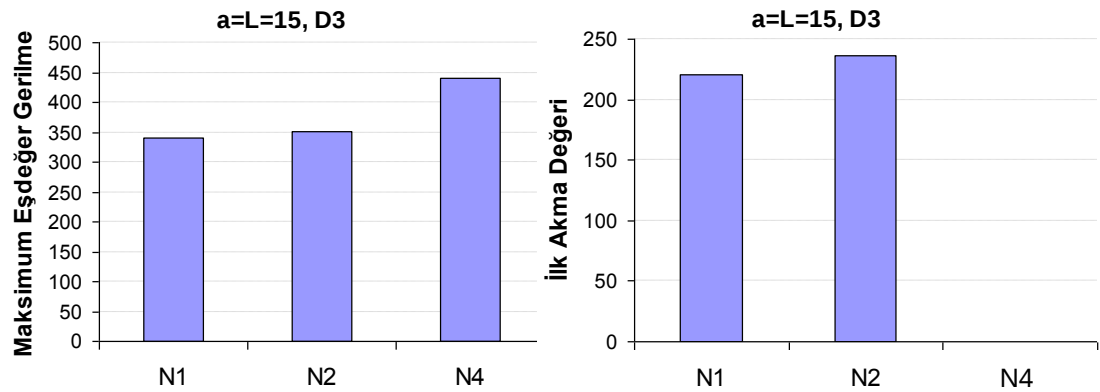
Şekil 4.35, 4.36 ve 4.37’de sırasıyla 1,2 ve 4 basamaklı modellerde farklı yük değerlerinde basamaklar üzerinde oluşan gerilme dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılımlar D2 kodlu dizilime sahip numuneler için gösterilmiştir. Sıfır ve doksan derece fiber oryantasyonlarından oluşan bu dizilimde basamaklara denk gelen tabakalarda  $90^\circ$ ’de düşük gerilmeler meydana gelmiştir.

*D3 kodlu dizilim için basamak sayısı karşılaştırması:*

Yapılan non-lineer analizlerde D3 kodlu modeller için elde edilen sonuçlara göre şu grafikler oluşturulmuştur:

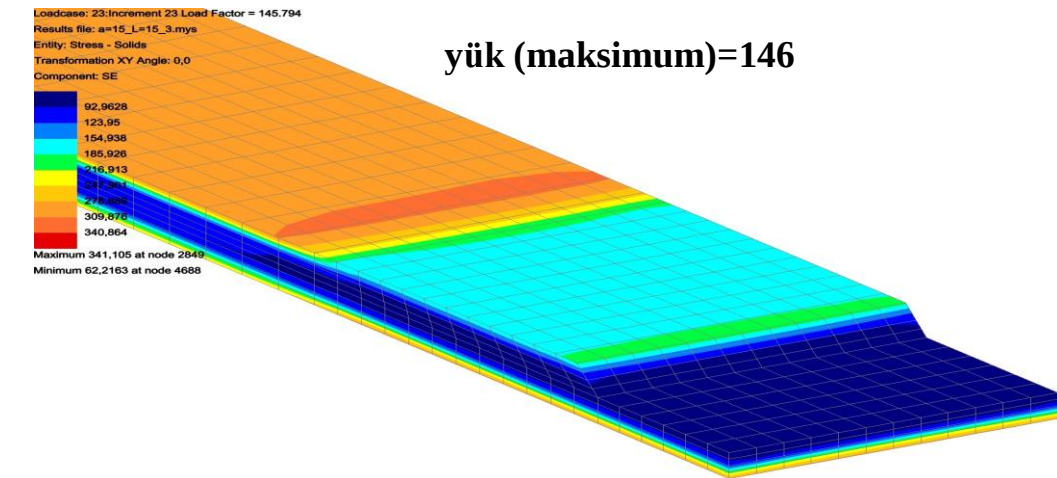
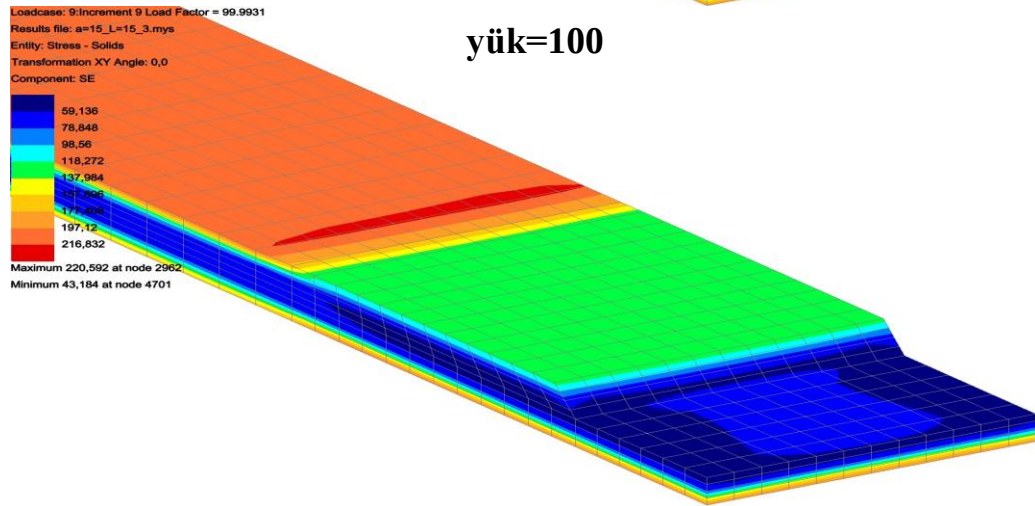
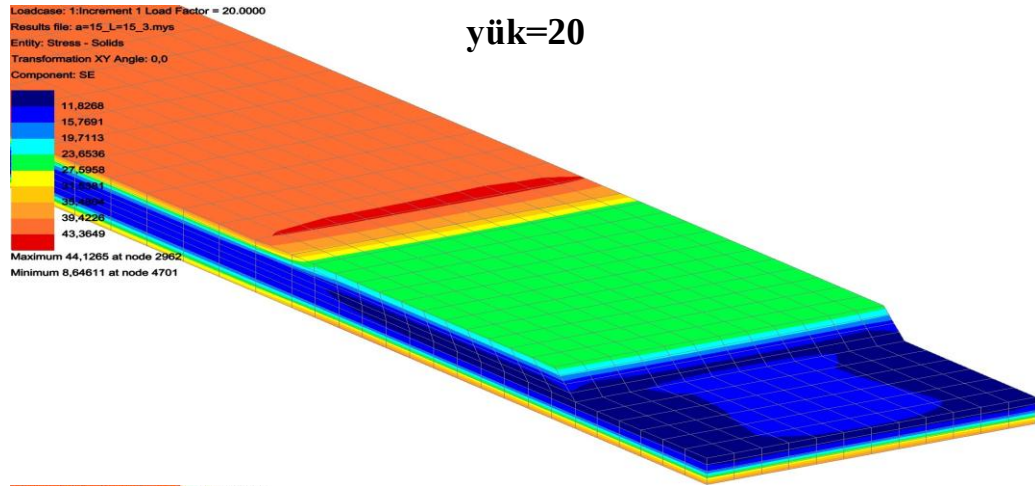


Şekil 4.38 D3 dizilimli numunelerde eşdeğer gerilme-yük grafiği için basamak sayısının etkisi

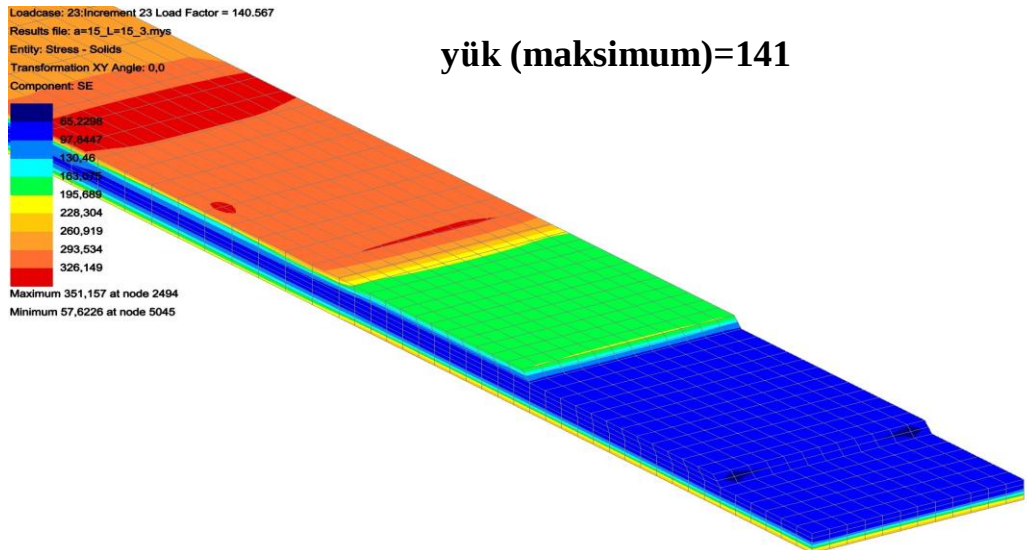
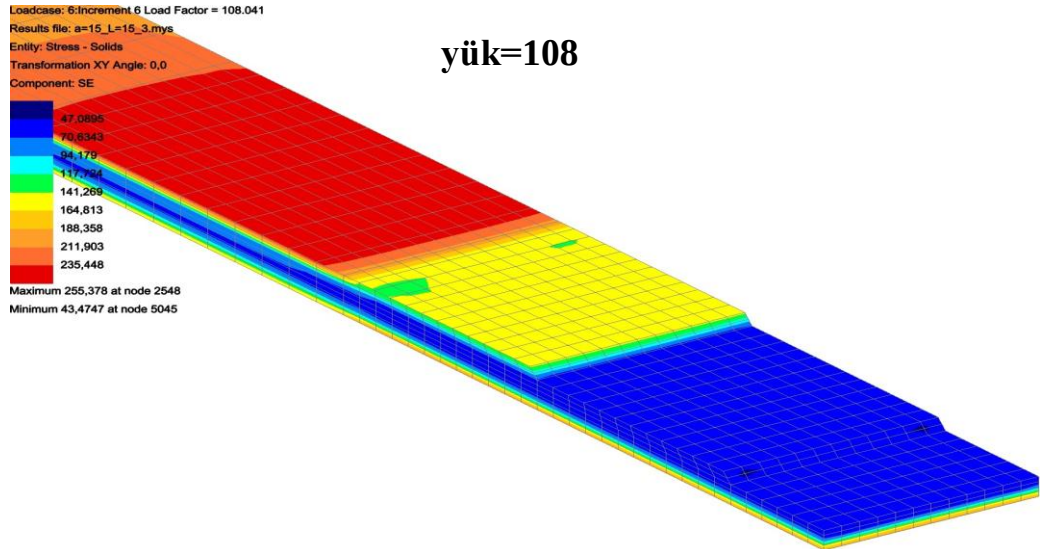
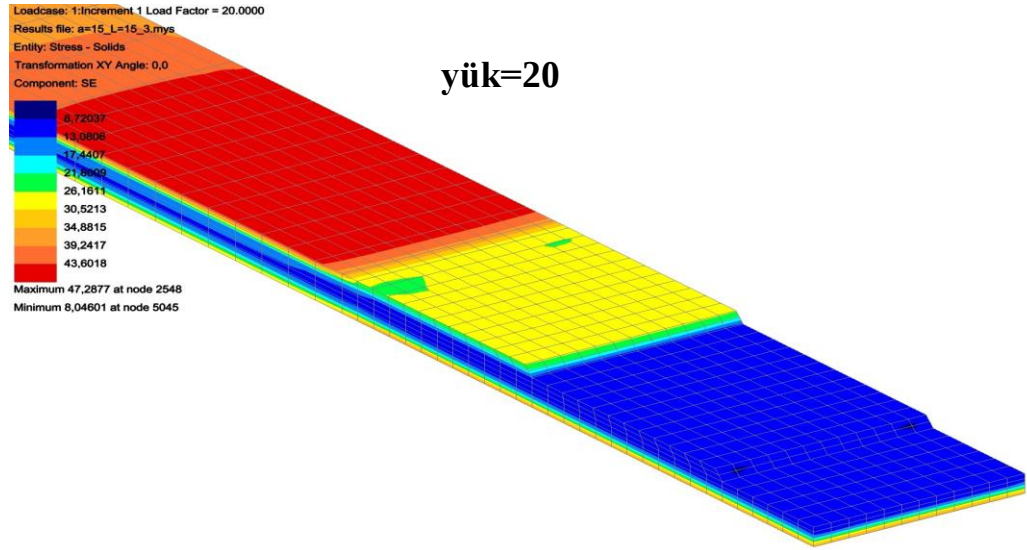


Şekil 4.39 D2 dizilimli numunelerde maksimum eşdeğer gerilme ve ilk akma gerilmesi değerleri için basamak sayısının etkisi

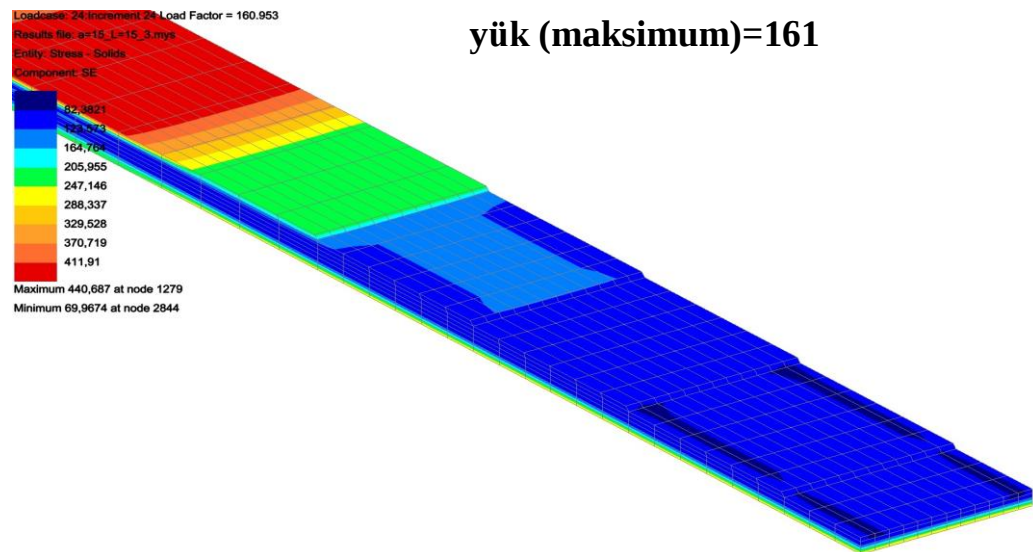
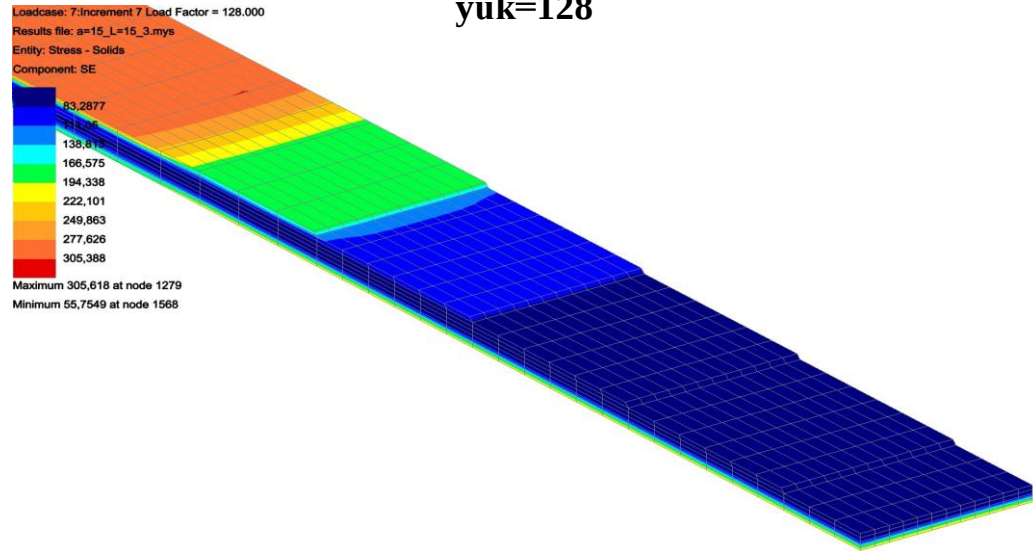
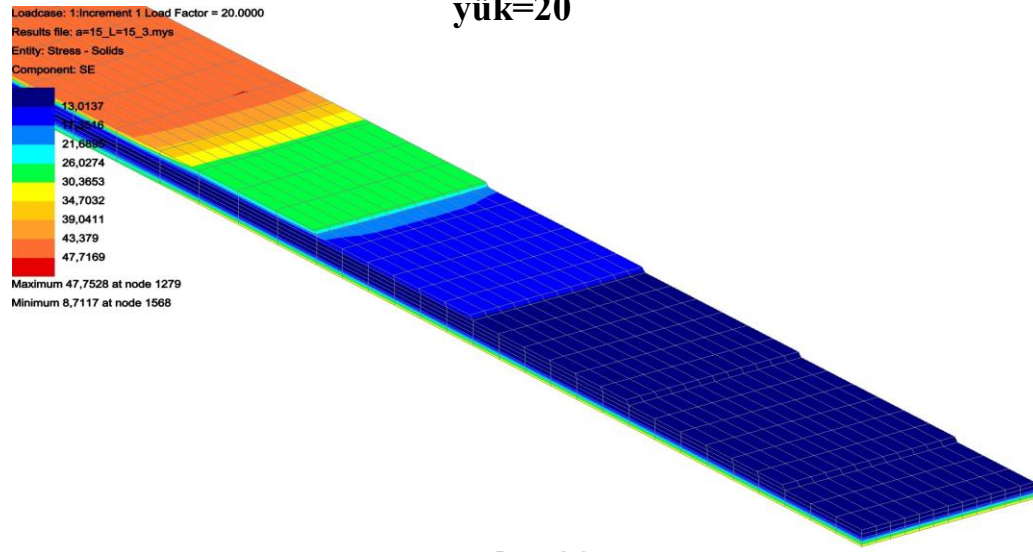
Şekil 4.38’de dört basamaklı modelin maksimum yük ve gerilmeyi taşıdığını görmekteyiz. Bir ve iki basamaklı modeller ise yakın değerlerde seyretmiştir. Şekil 4.39’da ise tekrar dört basamaklı modelde akma gerilmesi oluşmadığını görüyoruz.



Şekil 4.40 Bir basamaklı ve D3 kodlu modelde farklı yükler için basamaklar üzerinde gerilme dağılımı



Şekil 4.41 İki basamaklı ve D3 kodlu modelde farklı yükler için basamaklar üzerinde gerilme dağılımı



Şekil 4.42 Dört basamaklı ve D3 kodlu modelde farklı yükler için basamaklar üzerinde gerilme dağılımı

Basamak etkisi için bütün grafik ve şekillere bakılarak dört basamaklı yamanın gerilme aktarımında etkili olduğunu görüyoruz. Fakat iki basamaklı yama da dayanım açısından sorun teşkil etmemektedir. Üretim kolaylığı açısından iki basamaklı yama tercih edilebilir. Bir basamaklı yama kullanım kolaylığı açısından çok rağbet görse de maksimum taşınan yükün az olmasından dolayı uygun değildir.

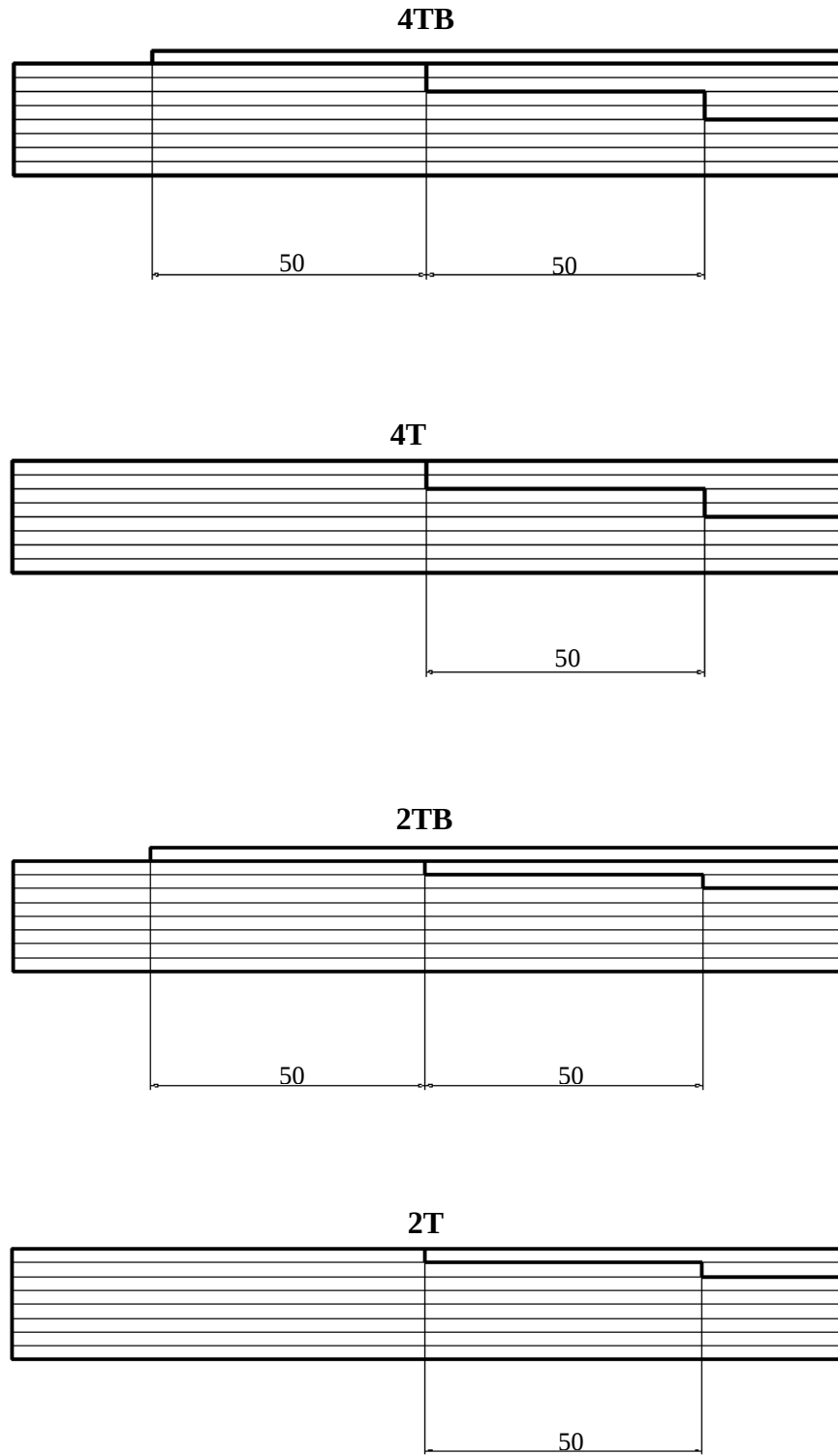
#### **4.4 Nümerik Analizlerin Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması**

LUSAS Programı'nda yapılan analizlerin tutarlılığını belirlemek için deneysel sonuçlara da ihtiyaç duyulduğundan bir kompozit plaka üretilip, uygun boyutlardaki çekme numuneleri kesilerek çekme deneyleri yapılmıştır. Deney aşamaları bu bölümde kısaca anlatılacaktır.

Bu bölümde analiz ve deneylerde dört farklı model karşılaştırılmıştır. Bunlar şekil 4.43'te de görüldüğü gibi;

1. Dört tabaka yamalı, dört tabaka sürekli ve bindirme yamalı model (4TB)
2. Dört tabaka yamalı, dört tabaka sürekli model (4T)
3. İki tabaka yamalı, altı tabaka sürekli ve bindirme yamalı model (2TB)
4. İki tabaka yamalı, altı tabaka sürekli model (2T) olarak sıralandırılır. Parantez içlerinde modellere verilen kodlar belirtilmiştir.

Bütün yamalar iki basamaklı olarak oluşturulmuştur. Basamak uzunlukları ve bindirme uzunlukları 50 mm boyutunda eşit olarak alınmış ve numune toplam boyutu 350 mm olarak belirlenmiştir. Önceki analizlerde kullanılan geometriden daha büyük değerler alınmasının nedeni yama oluşturmada yaşanan zorluklardan dolayıdır.

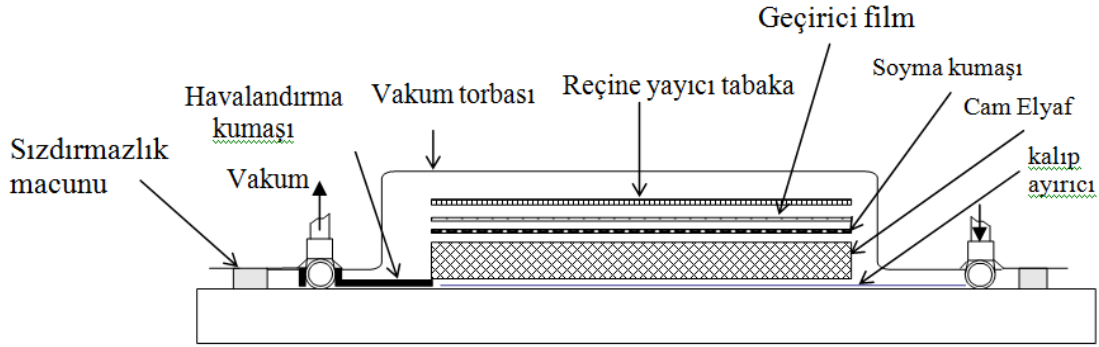


Şekil 4.43 Deneysel çalışmada kullanılan modellerin şematik gösterimi

#### 4.4.1 Üretim Aşaması

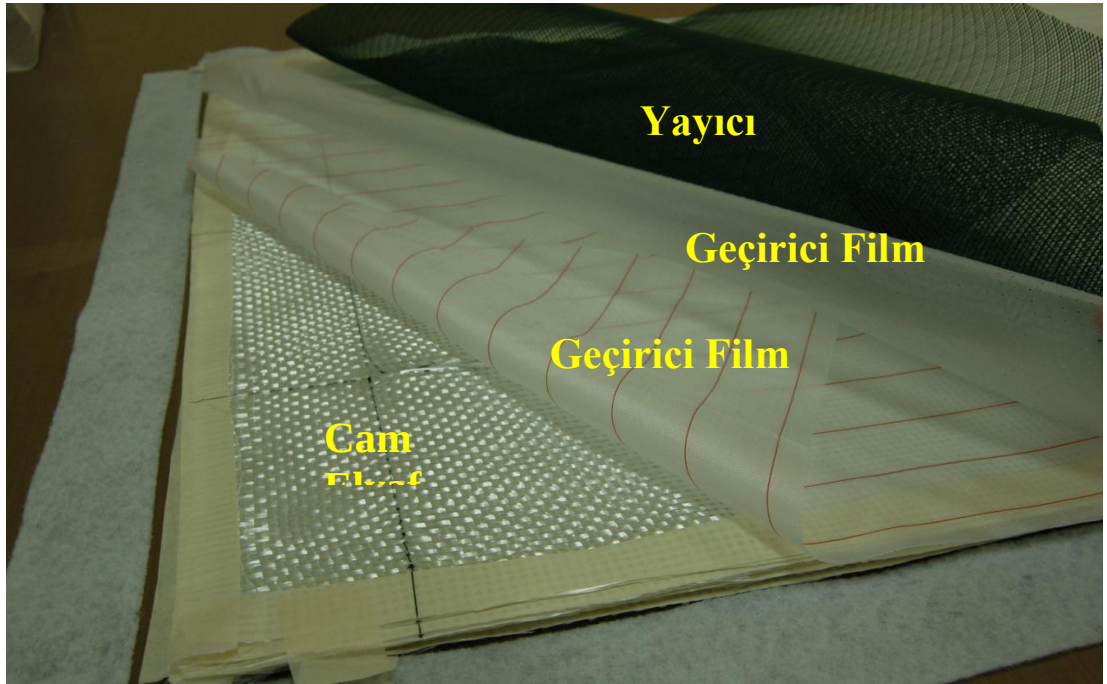
Deneyde kullanılacak numuneler için yamalar simule edilerek kompozit bir plaka üretilmiştir.

Bu üretimde “vakum destekli reçine infüzyon metodu” kullanılmıştır. Vakum destekli reçine infüzyon metodunda temel işlem kompoziti kalıptan ve vakum öğelerinden ayrılabilen şekilde vakum altında üretmektir. Vakum öğeleri şekil 4.44’ten de görüldüğü gibi kalıp ayırıcı, geçirgen film, soyma kumaşı ve vakum poşetidir.



Şekil 4.44 Vakum destekli reçine infüzyon sisteminin şematik gösterimi

Üretim kısaca kalıp ayırıcı sıvının kalıp yüzeyine sürülmesi ile başlar. Kompozit yüzeyinin kalıba yapışmaması için ek olarak üzerine teflon kumaş konur. Ardından elyaflar teflon üzerine dizilir. Üretim sonrası vakum poşeti, yayıcı film v.b. öğelerin kompozit yüzeyinde kalmaması için elyaf tabakalarının üzerine soyma kumaşı serilir. Soyma kumaşının üzerine yayıcı filmin yapışmasını engelleyen ve reçinenin homojen yayılmasını sağlayan geçirici film serilir. Son olarak yayıcı film bunların üzerine konulur.



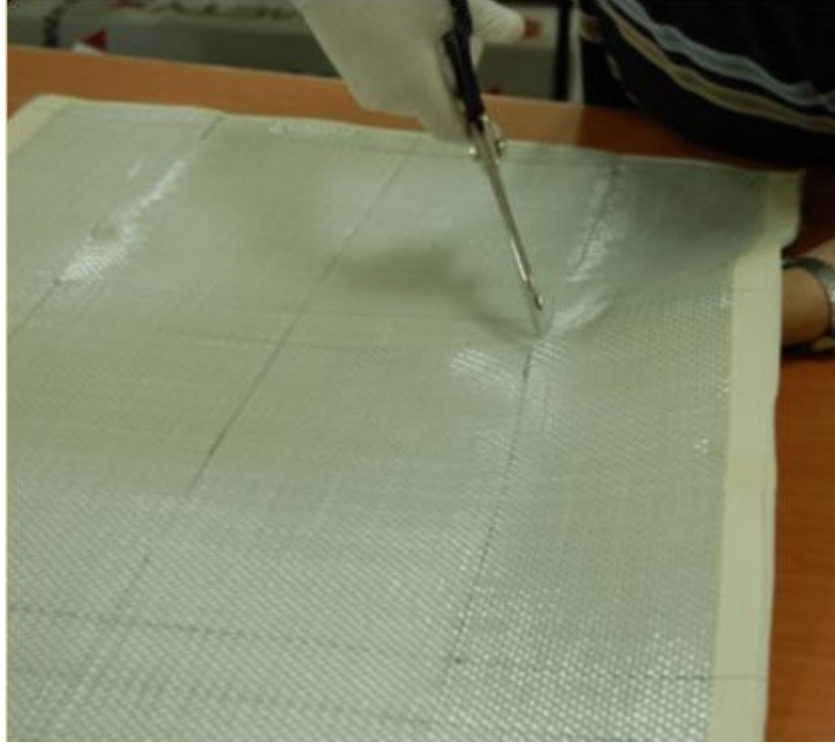
Şekil 4.45 Kompozit kısmın katmanları

Kumaşların dizimi bittikten sonra havalandırıcı kumaşlar tabakalar arası ile vakum yoluna bağlı olan spiral boru arasına konulur. Etrafına sızdırmazlık macunu çekilir ve vakum poşeti yerleştirilir. Bir süre vakum altında tutularak içerideki tüm havanın emilimi sağlanır ve ardından reçine verilerek kompozit pişmeye bırakılır.



Şekil 4.46 Vakum verilmiş sistem

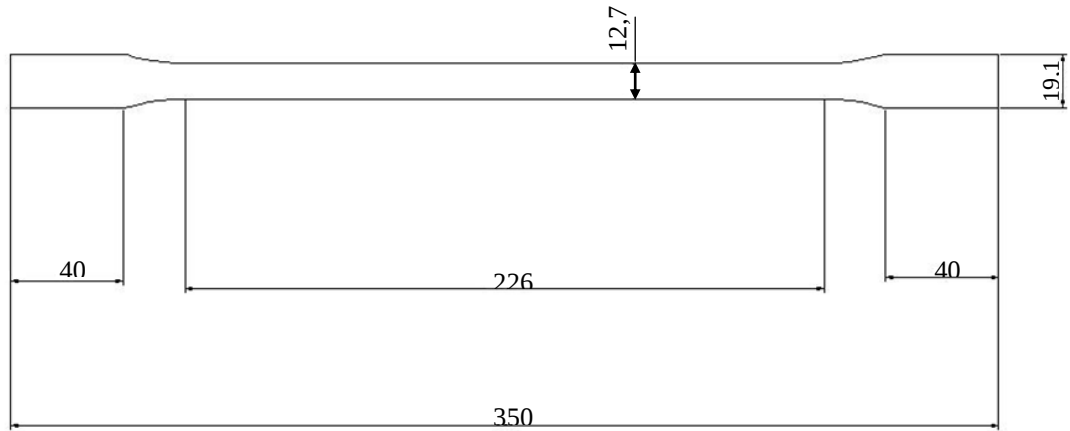
Bu yöntemle üretim yapılmadan önce elyaflar üzerinde süreksiz bölgeler oluşturularak yamalar oluşturulmuştur. Süreksiz bölgeler belli boyutlar için elyafların bir kısmının kesilmesi ile simule edilmiştir.



Şekil 4.47 Süreksiz yüzey elde edilişi

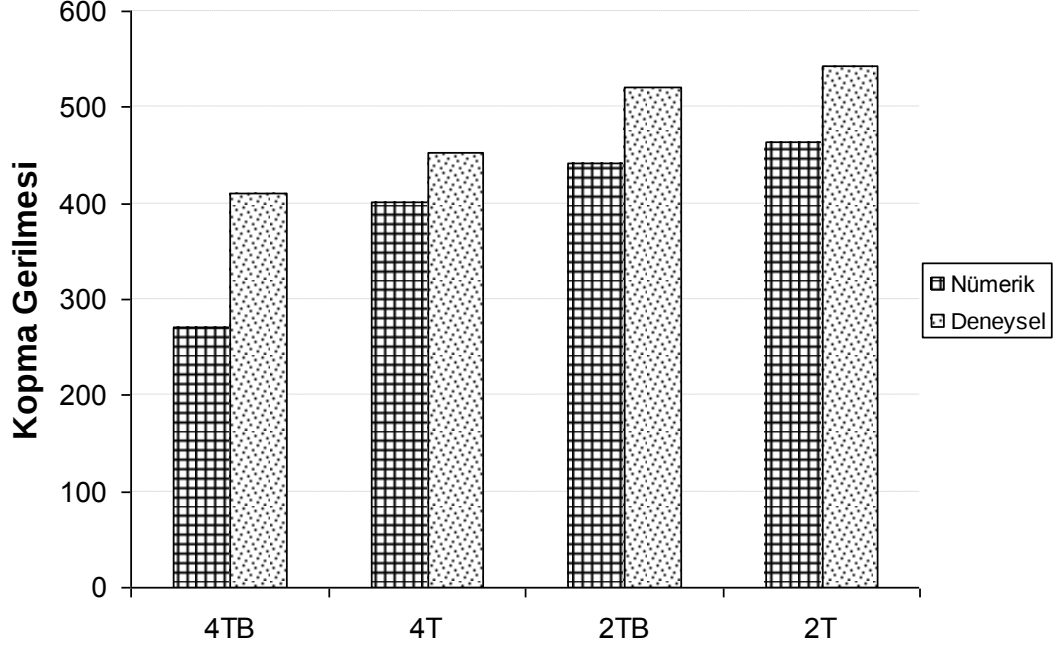
#### 4.4.2 Deneysel ve Nümerik Sonuçlar

Oluşturulan plakadan Şekil 4.46'deki boyutlarda çekme numuneleri çıkarılarak çekme deneyleri yapılmıştır.



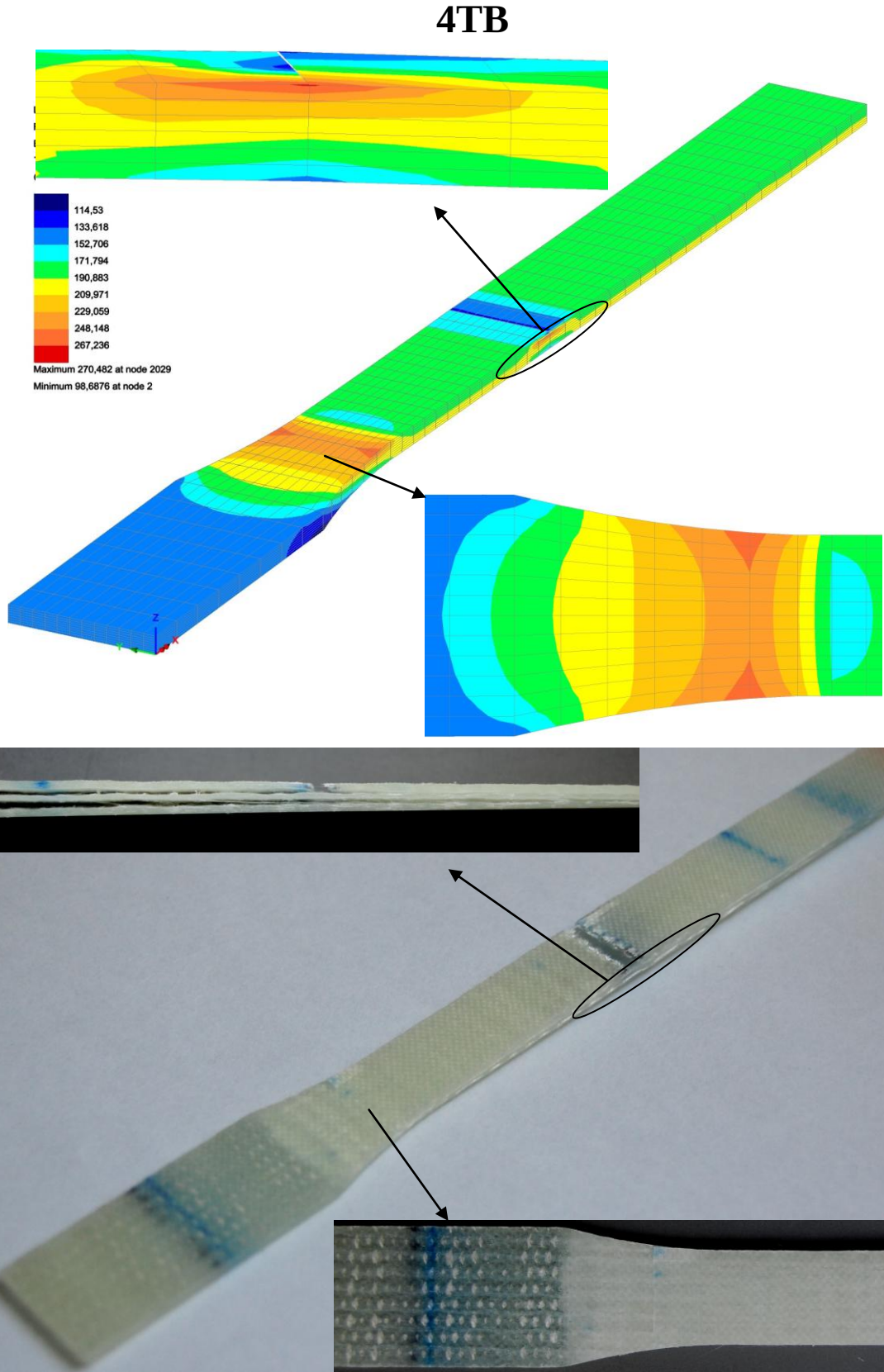
Şekil 4.48 Çekme numunesi boyutları

Yapılan deneyler ve analizler sonucunda Şekil 4.43'te gösterilen dört farklı model için karşılaştırma yapılmıştır. Kopma gerilmeleri açısından karşılaştırılan bu modellerin sonuçlarına göre Şekil 4.49 elde edilmiştir.

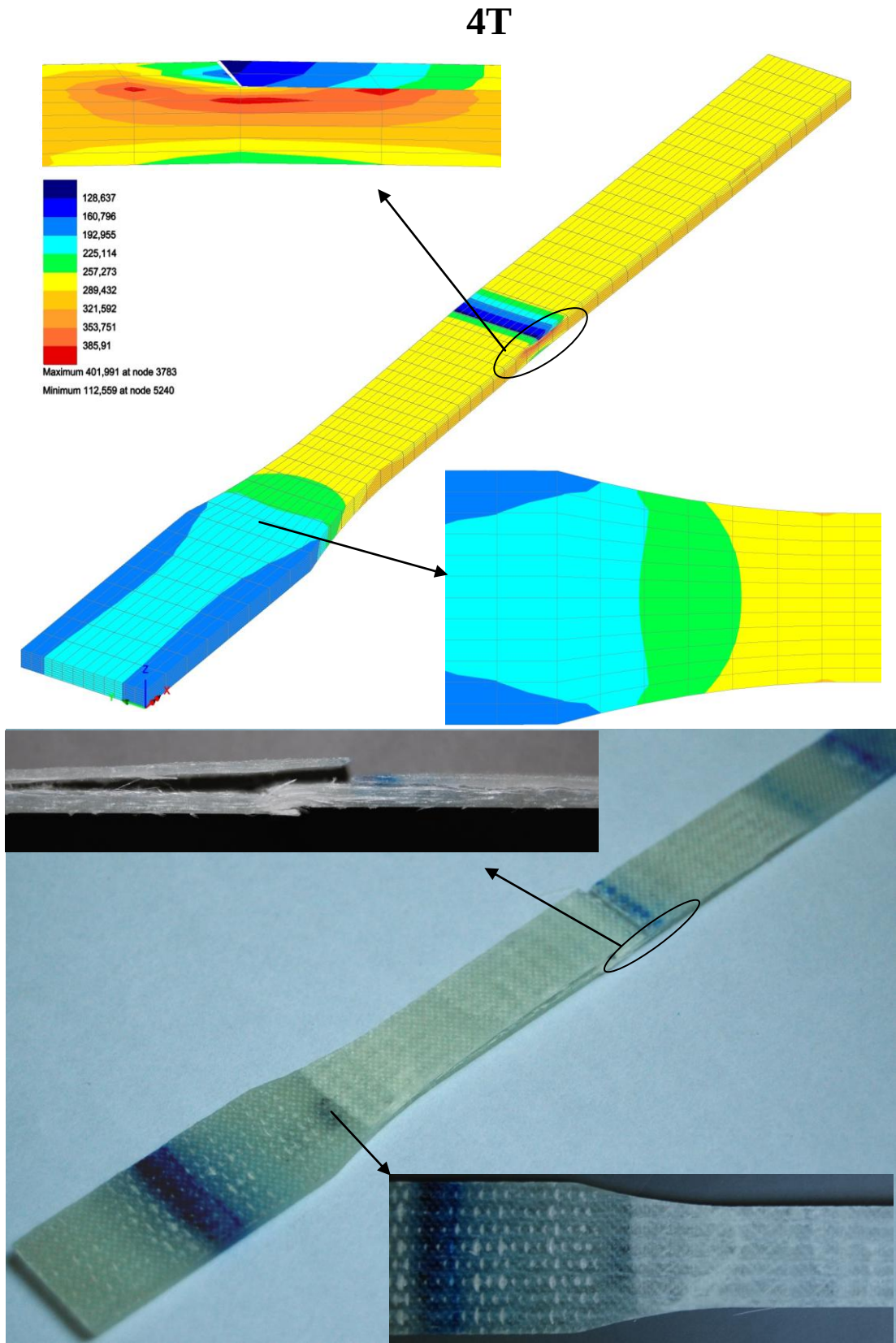


Şekil 4.49 Oluşturulan modellerin kopma gerilmelerinin deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması

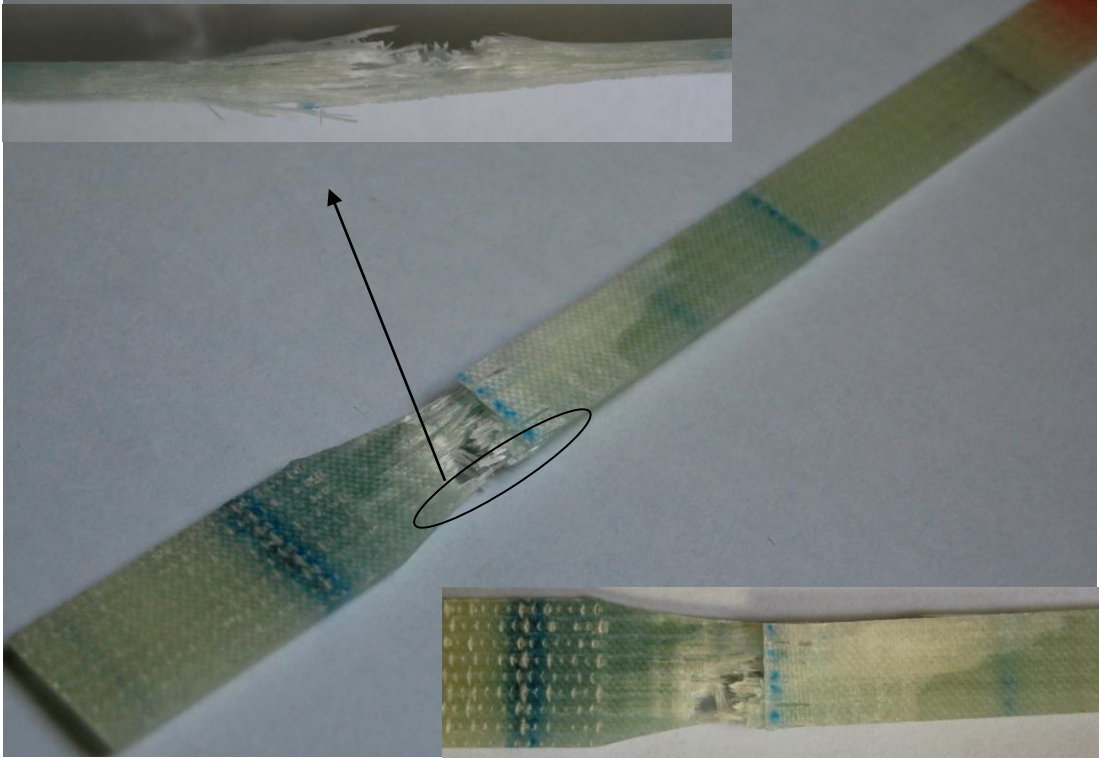
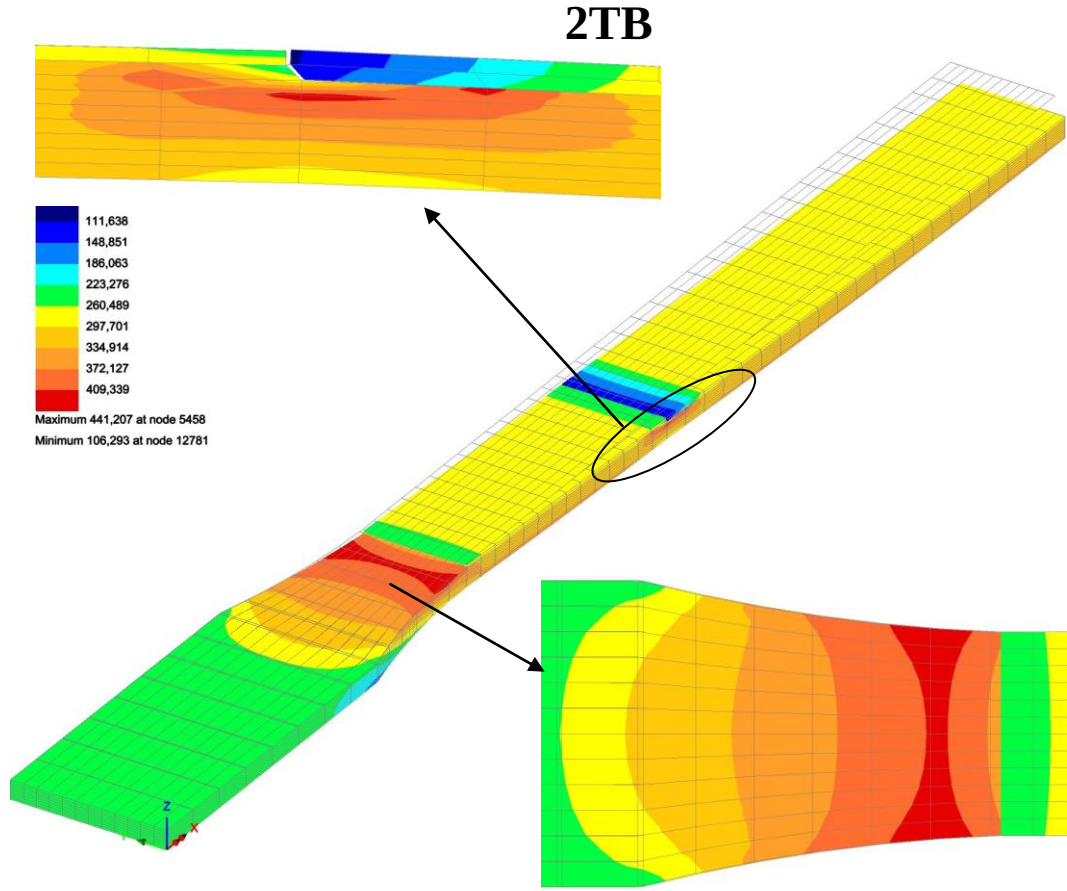
Elde edilen sonuçlarda nümerik değerler deneysel sonuçlarla aynı karakteristiği göstermektedir. İki tabakaya yama yapılan numuneler daha mukavimdir. Bindirme açısından bakıldığında ise beklenenin aksine bindirme yamalı numunelerde daha düşük kopma gerilmeleri gözlenmektedir. Bunun nedeni bindirme yamanın yapının aksel simetrisini bozmasından dolayı oluşan eğilme gerilmesidir. Eşdeğer gerilmeye büyük katkısı olan bu eğilme gerilmesinden dolayı malzememizin mukavemeti düşmüştür. Diğer bir taraftan nümerik veriler, deneysel sonuçlara yaklaşımıştır. Fakat 4TB kodlu numunede yaklaşık %30 bir fark görülürken diğerlerinde %15'in altında farklılık bulunmuştur. Bu farklılıkların sebepleri; sonlu elemanlar yönteminin hassasiyeti, analiz programında oluşturulan yapışma yüzeyinin gerçek yapışma yüzeyi arasındaki tutarlılık, üretilen yamalı plakadaki kusurlar gibi etkenler olabilir. Bu durumlara rağmen elde edilen sonuçların yapılan nümerik analizlerin tutarlılığını destekleyici değerlerde seyretmesi analizlerin ne denli doğru olduğunu ortaya koymaktadır.



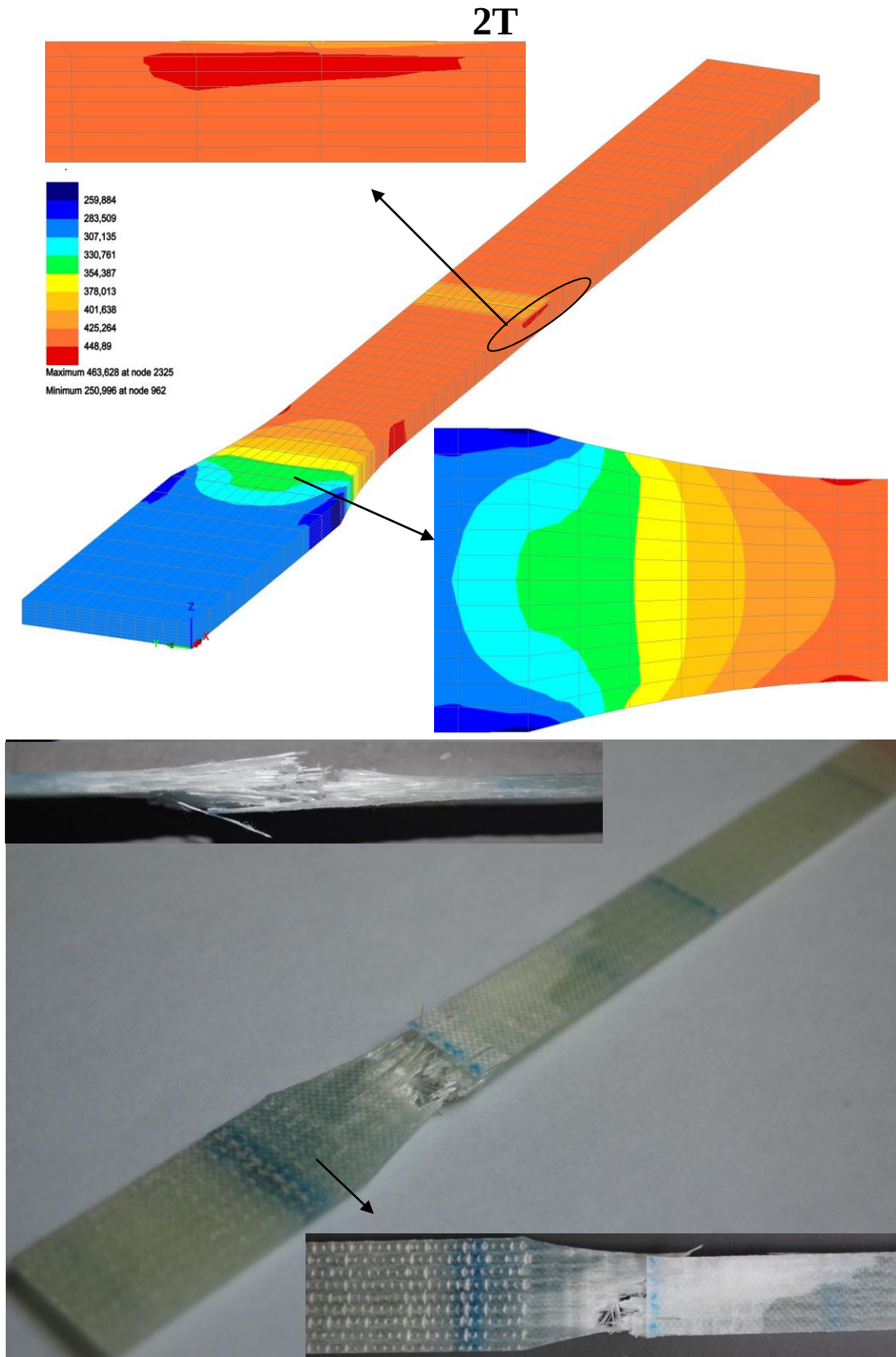
Şekil 4.50 4TB no'lu numunenin analiz ve deney sonucundaki gerilme etkileri



Şekil 4.51 4T no'lu numunelerin analiz deney sonucundaki gerilme etkileri



Şekil 4.52 2TB no'lu numunelerin analiz deney sonucundaki gerilme etkileri



Şekil 4.53 2T no'lu numunelerin analiz deney sonucundaki gerilme etkileri

Verilen deney sonrası fotoğraflarla analizde meydana gelen maksimum yüklerde oluşan gerilme dağılımı resimleri maksimum gerilme bölgesi açısından benzerlik göstermektedir. Bu durum da analizlerin doğruluğuna bir etki yapar.

Deney sonuçları ile nümerik analiz sonuçları arasındaki uyum, benzer problemlerin sunulan sonlu eleman modellemesi ile rahatlıkla analiz edilebileceği sonucunu ortaya koymaktadır.

## BÖLÜM BEŞ

### SONUÇLAR

Bu çalışmada hasarlı glass-epoksi kompozit plakların çekme yüküne karşı onarım optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Çeşitli parametrelerin değiştirilmesiyle elde edilen modeller nümerik ve deneysel bakımdan incelenerek karşılaştırmalar yapılmış ve aşağıda özetlenen sonuçlar ortaya çıkmıştır:

- Hasarsız modeller beklendiği gibi diğer modellere göre daha fazla yük taşımıştır.
- Yamalı modellerde maksimum gerilmeler yama bölgesinde veya yamaya yakın bölgelerde meydana gelmiştir.
- Nümerik olarak incelen dizilim etkisinde hasarsız modellerde beklendiği gibi en çok yükü D1 kodlu dizilim taşıırken, D2 ikinci ve D3 üçüncü sırada yer almıştır. Fakat D2 ve D3'te taşınan yüklerin farklı olmasına rağmen oluşan eşdeğer gerilmeler neredeyse eşittir.
- Eksenel yükleme şeklinde uygulanan non-lineer yük sonucunda x yönündeki normal gerilmenin etkisinin en fazla olduğu açıktır. Fakat yamadan dolayı meydana gelen eğilme ve kayma gerilmeleri göz önüne alındığında z yönündeki normal gerilme ve zx düzlemindeki kayma gerilmelerinin eşdeğer gerilmeye önemli ölçüde katkıda bulunduğu söylenebilir.
- Yapılan optimizasyonlarda ilk olarak basamak uzunluğu incelenmiştir. Diğer parametrelerin eşit tutulduğu analizlerde üç farklı boyut için karşılaştırma yapılmıştır ve a2 kodlu 15 mm olan uzunluk en çok yükü taşıırken en fazla gerilmeyi meydana getirmiştir. 10 mm uzunluklu modeller bu durumu takip ederken, 20 mm uzunluklu modeller en az yükü taşıyarak hasara uğramışlardır. Sonuç olarak uzun tutulan basamak uzunlukları erken hasar görürken, kısa tutulan uzunluklar da çok efektif olmamaktadır. Oluşturulan modeller için 15 mm uygun bir uzunluk olarak gözükmektedir.

- Bazı parametrelerin sabit tutulması ile gerçekleştirilen bindirme uzunluğu optimizasyonu belirlenen üç farklı basamak uzunluklarının +5, -5 ve basamak uzunluğuna eşit alınan bindirme uzunluklu modellerin analizleri ile oluşmuştur. Her basamak uzunluğunda farklı sonuçlar ortaya çıkmasına rağmen bindirme uzunluğunu basamak uzunluğuna eşit almak daha dayanıklı modellerin oluşmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra uzun tutulan basamaklar için kısa bindirme uzunlukları daha çok yük taşımıştır.
- Nümerik olarak incelenen dizilim etkisinde yamalı modellerde D1 kodlu dizilimin çekme yüküne karşı maksimum mukavemet gösterdiği görülmüştür. D3 kodlu dizilim de D1'e yakın değerlerde seyrederek efektif bir oryantasyon olduğunu ortaya koymuştur. Çekme yüklerine karşı zayıf kalan D2 kodlu numuneler farklı yükleri taşıması açısından tercih edilebilir.
- Basamak sayısı optimizasyonunda gerilme dağılımının en çok dört basamaklı modellerde homojen olduğu görülmüştür. İki basamaklı yama olan modeller de benzer davranış gösterdiğinden ve üretim kolaylığı sağladığından tercih edilebilir. Fakat bir basamaklı yama yapılan modellerde sert gerilme geçişleri gerilme yığılmalarına neden olduğundan ani hasarlar meydana gelmiştir.
- Deneysel ve nümerik numunelerin karşılaştırılmasında yama derinliği ve basamak sayısı etkisi, sabit tutulan bazı parametreler için incelenmiştir. LUSAS programının analiz sonuçları deneysel sonuçlara yakın çıkmıştır. Fakat derin yamalı bindirmeli numunelerde (4TB) deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki fark diğerlerine göre fazladır. Bunun nedeni de yapışma yüzeyinin simulasyonunun gerçek yapışma ile farklılığının diğer modellere göre fazla olmasıdır.
- Deneysel ve nümerik testlerin sonuçlarına göre yama derinliğinin az olduğu numuneler çekme yüklerine karşı daha dayanıklıdır. Bindirme yama konan numunelerin bindirmesiz numunelere göre daha az yük taşıması ilginç bir sonuç olarak ortaya çıkarmıştır. Bunun nedeni de bindirme yamadan dolayı oluşan eğilme etkileridir.

## KAYNAKLAR

- Ahn S-H, Springer G.S. (1998). Repair of composite laminates-I: test results. *Journal of Composite Materials*, 32: 1036–1074.
- Attia O., Kinloch A.J., Matthews F.L. (2003). The prediction of fatigue damage growth in impact-damaged composite skin/stringer structures. Part I: Theoretical modelling studies. *Composite Science and Technology*, 63:1463-1472
- Aymerich, F., Priolo, P., Sun, C.T., “Static and fatigue behaviour of stitched graphite/epoxy composite laminates”, *Composites Science and Technology*, 2003, 63: 907-917
- Bair D.L., Hudson P.O., Ghanimati G.R. (1991). Analysis and repair of damaged composite laminates. International SAMPE Symposium and Exhibition - How Concept Becomes Reality, 36: 2264–2278.
- Belhouari, M., Bouiadjra, B.B., Megueni A., Kaddouri K. (2004). Comparison of double and single bonded repairs to symmetric composite structures: a numerical analysis. *Journal of Composite Structures*, 65, 47-53.
- Belingardi G, Cavatorta MP, Paolino DS. (2008). Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 35: 609–619.
- Bennati, S., Valvo, P.S., (2006) “Delamination growth in composite plates under compressive fatigue loads”, *Composite Science and Technology*, 66, 248-254.
- Bleay, S.M., Loader, C.B., Hawyes, V.J., Humberstone, L., Curtis, P.T. (2001). A smart repair system for polymer matrix composites. *Journal of Composites: Part A*, 32, 1767-1776.
- Bohlmann, R. E., Renieri, G. D., Libeskind, M. (1981). Bolted field repair of graphite / epoxy wing skin laminates. *ASTM (American Society for Testing and Materials) STP*, 749, 97–116.

- Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S. (2005). Modelling single and double-lap repairs on composite materials. *Journal of Composites Science and Technology*, 65, 1948-1958.
- Charalambides, M. N., Hardouin, R., Kinloch, A. J., Matthews, F. L. (1998). Adhesively bonded repairs to fibre-composite materials I: experimental. *Journal of Composites: Part A*, 29A, 1371–1381.
- Charalambides, M.N., Kinloch, A.J., Matthews, F.L. (1998). Adhesively bonded repairs to fibre-composite materials II: finite element modelling. *Journal of Composites: Part A*, 29A, 1383–1396.
- Chue C-H., Liu T J-C. (1995). Effects of laminated composite patch with different stacking sequences on bonded repair. *Composites Engineering*, 5: 223–230.
- Defence Science and Technology Organisation (n.d.) [www.dsto.defence.gov.au](http://www.dsto.defence.gov.au)
- Fekirini, H., Bouiadjra, B. B., Belhouari, M., Boutabout, B., Serier, B. (2008). Numerical analysis of the performances of bonded composite repair with two adhesive bands in aircraft structures. *Journal of Composite Structures*, 82, 84-89.
- Ferreira, J.M., Pires J.T.B., Costa, J.D., Zhang, Z.Y.,Errajhi, O.A., Richardson, M., (2006) “Fatigue damage analysis of aluminized glass fiber composites”, *Materials Science and Engineering A*, 407, 1-6.
- Gama B.A., Cichanowski C., Gillespie J.W. Jr. (2003). Static and dynamic axial compression of scarf repaired thick section composite laminates. *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, 48 I: 814–825.
- Glass Repair To Aluminum (n.d.). Retrieved May 5, 2009, from <http://civil.queensu.ca/people/faculty/fam/research/images>
- Goren, A., Atas, C., (2008) Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding, *Archives of Materials Science and Engineering* 34 117-120.

- Her, S., Shie, D. (1998). The failure analysis of bolted repair on composite laminate. *International Journal of Solids and Structures*, 35(15), 1679-1693.
- Hu, F. Z., Soutis, C. (2000). Strength prediction of patch - repaired CFRP laminates loaded in comparison. *Journal of Composite Sciences and Technology*, 60, 1103-1114.
- Hosur, M. V., Vaidya, U. K., Myers, D., Jeelani, S. (2003). Studies on the repair of ballistic impact damaged S2 – glass / vinyl ester laminates. *Journal of Composite Structures*, 61, 281-290.
- Jain, L.K., Leong, K.H., Mai, Y.W., Tong, L., (1998) Effect of through-thickness stitching on the fatigue life of composite single-lap joints. *Applied Composite Materials*, 5:399-409.
- Keller, R.L. (2004). Challenges in composite maintenance and repair: A perspective. *International SAMPE Technical Conference, SAMPE 2004*: 3359–3372.
- Kessler, M.R., White, S.R. (2001). Self – activated healing of delamination damage in woven composites. *Journal of Composites: Part A*, 32, 683-699.
- Koh, Y.L., Rajic, N., Chiu, W.K., Galea, S. (1999). Smart structure for composite repair. *Journal of Composite Structures*, 47, 745-752.
- Leiborich, H., Sason, N., Simon, A., Gren, A. K. (1990). Repair of cracked aluminum aircraft structure with epoxy/epoxy patches. *Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials (Madrid, Spain)*, vol. 4. Cambridge: Woodhead, 461-468.
- Liu, X., Wang, G. (2007). Progressive failure analysis of bonded composite repairs. *Journal of Composite Structures*, 81, 331-340.
- LUSAS Software Modeller On-line Help (n.d.).
- Mazumdar, S. K. (2002). *Composite manufacturing - materials, product and engineering*. Florida: CRC Press.

- Mezierea, Y., Bunsella, A.R., Favrya, Y., Teissedrea, J.-C., Do, A.T., (2005)“Large strain cyclic fatigue testing of unidirectional carbon fibre reinforced epoxy resin”, *Composites: Part A*, 36, 1627-1636
- Marioli-Riga Z., Xenos D., Vrettos C. (2004). A standard analysis methodology for the stress analysis of repaired aircraft structures with the method of composite patch repair. *Applied Composite Materials*, 11: 191–203.
- Morais WA, Monteiro SN, d’Almeida JRM (2005). Evaluation of repeated low energy impact damage in carbon–epoxy composite materials. *Composite Structures*; 67: 307–315.
- Morais WA, Monteiro SN, d’Almeida JRM (2005). Effect of the laminate thickness on the composite strength to repeated low energy impacts. *Composite Structures*; 70: 223–228.
- Naboulsi, S., Mall, S. (1998). Nonlinear analysis of bonded composite patch repair of cracked aluminum panels. *Journal of Composite Structures*, 41, 303-313.
- Odi R.A., Friend C.M (2002). A comparative study of finite element models for the bonded repair of composite structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21: 311-332.
- Pang, J.W.C., Bond, I.P. (2005). A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self – healing and enhanced damage visibility. *Journal of Composites Science and Technology*, 65, 1791–1799.
- Philip Larson (2008) *The Air Force Research Laboratory Notes [AFRL]*
- Shivakumara, K., Chena, H., Abalib, F., Leb, D., Davis, C., (2006) A total fatigue life model for mode 1 delaminated composite laminates, *International Journal of Fatigue*, 28, 33-62
- Soutis, C., Duan, D - M., Goutas, P. (1999). Compressive behaviour of CFRP laminates repaired with adhesively bonded external patches. *Journal of Composite Structures*, 45, 289-301.

- Sugun BS, Rao RMVGK (2004). Impactor mass effects in glass–epoxy composites subjected to repeated drop tests. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23: 1547-1560.
- Tzetzis, D., Hogg, P.J. (2006). Bondline toughening of vacuum infused composite repairs. *Journal of Composites: Part A*, 37, 1239-1251.
- Tzetzis, D., Hogg, P. J. (2008). Experimental and finite element analysis on the performance of vacuum-assisted resin infused single scarf repairs. *Journal of Materials and Design*, 29, 436-449.
- Wang, C. H., Gunnion, A. J. (2008). On the design methodology of scarf repairs to composite laminates. *Journal of Composites Science and Technology*, 68, 35-46.
- Widagdo, D., Aliabadi, M.H. (2001). Boundary element analysis of cracked panels repaired by mechanically fastened composite patches. *Journal of Engineering Analysis with Boundary Elements*, 25, 339-345.
- Wilmarth, D. D. (1982). BREPAIR Bolted Repair Analysis Program. *Cambridge: Arthur D. Little Inc.*
- Yala, A.A., Megueni, A. (2008). Optimisation of composite patches repairs with the design of experiments method. *Journals of Materials and Design*.
- Zhang, H., Motipalli, J., Lam, Y.C., Baker, A. (1998). Experimental and finite element analyses on the post-buckling behaviour of repaired composite panels. *Journal of Composites: Part A*, 29A, 1463-1471 PII: S1359-835X(98)00030-X.
- Zhang, J. M. (2001). Design and analysis of mechanically fastened composite joints and repairs. *Journal of Engineering Analysis with Boundary Elements* 25, 431-441.