

YAPIŞTIRMA VE ÇİFT PİM BAĞLANTILI TABAKALI KOMPOZİT PLAKALARDA PİMLER ARASI MESAFE DEĞİŞİMİNİN GERİLMELERE ETKİSİ

*İlker ERZİNCANLI** 
*Semih BENLİ*** 

Alınma: 14.07.2021 ; düzeltme: 27.01.2022 ; kabul: 31.01.2022

Öz: Bu çalışmada çift pim bağlantısı uygulanmış ve epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmış cam fiber/epoksi tabakalı kompozit plakada farklı delik eksen pozisyonları için oluşan gerilmeler belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Analiz, modelleme ve çözüm için ANSYS (V19) sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Modelleme üç boyutlu olarak yapılmıştır. Model üzerine gerekli sınır şartları ve yüklemeler uygulanmıştır. Mevcut çalışmalardan farklı olarak, tabakalı kompozit plaka üzerindeki delik ve pim için kontak analizi yapılmış ve analiz bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Malzemeye çekme yükü uygulanarak, delik eksenlerinin kenara ve delik eksenleri arası mesafe oranları için modeller arasında meydana gelen gerilmeler belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada delik ekseninin kenara uzaklığının çapa oranı (E/D) 5, 4, 3, 2 seçilmiş ve delik eksenleri arası uzaklığın çapa oranı da (K/D) 5, 4, 3, 2 seçilmiştir. Çalışmanın sonuçlarında yapıştırıcı tabakasındaki gerilmeler delik eksenlerindeki değişimlerden yüksek oranda etkilenmediği görülmüştür. Kenara yakın delikteki aynı K/D değerleri için E/D değerlerindeki azalma, basma gerilmelerinde artışa neden olmuştur. Kenardan uzaktaki delikte ise aynı K/D değerleri için E/D değerlerindeki azalma ile çekme gerilmelerinde azalma görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırılmalı Bağlantı, Pimli Bağlantı, Tabakalı Kompozit, Sonlu Elemanlar, Tsai-Wu Hasar Kriteri, Kontak Analizi

The Effect of the Distance Between Pins on Stresses in Laminated Composite Plates with Bonding and Double Pin Connections

Abstract: In this study, the stresses for different hole axis positions in the glass fibre/epoxy laminated composite plate bonded with epoxy adhesive and double pin joint were determined and compared. ANSYS (V19) finite element software was used for analysis, modeling and solution. Modeling is done in three dimensions. Necessary boundary conditions and loads have been applied on the model. Unlike the current studies, contact analysis was performed for the hole and pin on the laminated composite plate and the analysis was carried out in this way. By applying a tensile load to the material, the stresses between the models for the ratio of the hole axes to the edge and the distance between the hole axes were determined and compared. In the study, the ratio of the distance from the hole axis to the diameter (E/D) was chosen as 5, 4, 3, 2 and the ratio of the distance between the hole axes to the diameter (K/D) was chosen as 5, 4, 3, 2. In the results of the study, it was seen that the stresses in the adhesive layer were not highly affected by the changes in the hole axes. For the same K/D values in the hole close to the edge, the decrease in the E/D values resulted in an increase in the compressive stresses. In the hole far from the edge, for the same K/D values, a decrease in the tensile stresses was observed with the decrease in the E/D values.

Keywords: Bonded Connection, Pin Connection, Layered Composite, Finite Element, Tsai-Wu Failure Criteria, Contact Analysis

* Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Aksaray, Türkiye

** Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Aksaray, Türkiye
İletişim Yazarı: İlker ERZİNCANLI (ilkererzincanli@aksaray.edu.tr)

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme iki veya daha fazla malzemenin, faydalı bir üçüncü malzeme oluşturmak için makroskopik bir ölçekte birleştirilmesini ifade etmektedir. Bir malzemenin makroskopik incelemesinin tanımı bileşenlerin çıplak gözle belirlenmesidir. Kompozit malzemelerin avantajı, iyi tasarlanmışlarsa, genellikle bileşenlerinin en iyi özelliklerini ve genellikle her iki bileşenin de sahip olmadığı bazı özellikleri sergilemeleridir. (Jones, 1999)

Yapıştırma bağlantı teknolojisi, özellikle ince metal veya kompozit tabakalar için güçlü bir birleştirme tekniğidir. Yapıştırma bağlantının üstünlüğü, yüksek yorulma direnci ve yüksek dayanım/ağırlık oranı gibi özelliklerde öne çıkmaktadır. Yapıştırma bağlantının dezavantajları ise yüzey ön temizleme işlemi gerektirmesi, uzun kürleme süresi, basınç ve ilave fikstür gereksinimi, birleştirme sonrası kontrolün zorluğu, yüksek sıcaklık ve neme duyarlılığı olarak sayılabilir. (Wahab, 2014)

Yapıştırma bağlantısının başarısı, yapıştırıcının yüzeye bağlanması, yani adhezyon kuvvetlerinin (moleküler kuvvetler) büyüklüğüne bağlıdır. Bu kuvvetler çok defa yapıştırıcının kendi mukavemetinden daha yüksektir. Bu nedenle kopma, yapıştırıcı ile yüzey arasında değil bizzat yapıştırıcıda meydana gelmektedir. (Cürgül, 1997)

Mekanik bağlantılar, bileşenlerin veya yapıların yük aktarma elemanlarıdır. Bu yapıların veya bileşenlerin performansı mekanik bağlantının davranışına bağlıdır. Mekanik bağlantı elemanları ile birleştirme, yapıların montajında yaygın bir uygulamadır ve bağlantı hasarı yapının erken bozulmasına neden olabileceğinden bağlantı mukavemeti tasarımda önemli bir özelliktir. Mekanik birleştirme, deliklerde stres konsantrasyonları sonucu hasara neden olabilecek perçin, pim veya cıvata kullanımıyla yapılan bağlantı türüdür. (Whitworth vd., 2008).

Soykok (2015) değişken yapıştırıcı bölgesi geometrilerinin ve yapıştırıcı ile doldurulmuş pim deliklerinin yapıştırma kompozit bağlantılar üzerindeki etkilerini analiz etmek için deneysel bir araştırma yapmıştır. Sonuç olarak açılan deliklerin bağlantı kalitesinde bir dereceye kadar bozulmaya neden olduğu görülmüştür. Bağlama yöntemine ve uç geometrisine bakılmaksızın test edilen tüm bağlantılar için hafif lif kopması gözlemlenmiştir.

Lee ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada farklı genişlik/çap (W/D), kenar/çap (E/D) oranları ve yapıştırıcı kalınlıklarına sahip 10 (on) adet karma bağlantı numunesi için mekanik, yapıştırma ve karma kompozit bağlantıların dayanımlarını değerlendirmişler ve karşılaştırmışlardır. Karma bağlantıların deneysel hasar yükleri, numunelerin tümü için yapıştırma bağlantılara ve mekanik bağlantılara göre en az iki kat daha yüksek bulunmuştur. İlave olarak bağlantıdaki yapıştırıcı hasarı mekanik hasardan önce meydana gelmiştir.

Okutan ve diğ. (2003) hasar mekanizmalarını karakterize etmek ve geometrik boyutların pimli bağlantıların dayanımları üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla cam/epoksi kompozitler üzerinde çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda delik kenar mesafesinin artırılması, kritik bir mesafeye kadar bağlantının taşıma gücünü arttırdığı ancak bir değer sonrasında herhangi bir iyileşmeye neden olmadığı görülmüştür. Azalan genişlik/çap oranı ile pim yatak mukavemeti azalmıştır. Numunenin genişliği azaldıkça, hasarın rulman hasarından ağ gerilimi hasarına dönüştüğü görülmüştür.

Whitworth ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada çekme ve basmada bağlantı elemanı deliği etrafındaki gerilme dağılımını belirlemek için iki boyutlu bir gerilme analizi kullanmışlardır. Çalışmada yatak mukavemeti delik çapının kenar mesafesine fonksiyonu olarak değerlendirildiğinde ve plaka genişliğinin delik çapının bir fonksiyonu olarak değerlendirildiğinde analizin deneysel verilerle tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Karakuzu ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada kenar mesafesi-delik çapı oranı (E/D), plaka genişliği-delik çapı oranı (W/D) ve iki delik arasındaki mesafe gibi geometrik parametrelerin etkilerini araştırmışlardır. Sayısal ve deneysel sonuçlar, pim bağlantılı dokuma cam vinilester laminatların nihai yük kapasitesinin E/D, W/D ve M/D oranları ile arttığını göstermiştir.

Yılmaz ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmada pim yüklü tek yönlü karbon fiber takviyeli polifenilen sülfür (PPS) matris kompozitlerin yatak performansını araştırmak için deneyler yapmışlardır. Çalışma sonucunda pim yükleme performansının laminatların lif oryantasyonu ve deformasyon özellikleri ile yakın ilişkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca, delik merkezinden (E) uç mesafesinin geometrik parametreleri ve plakanın (W) genişliği ve pim çapının (D), malzemelerin yük taşıma performansını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Li ve diğ. (2020) karbon fiber takviyeli bismaleimid (BMI) reçine kompozit laminatlardaki tek etkili bağlantıların gerilme özelliğinin test etmek için civatalı, yapıştırılmalı ve karma bağlantılı tek etkili bağlantı olan üç bağlantı konfigürasyonu hazırlamışlardır. Derzlerin tasarımında dizilim sırasının ve W/D oranının önemli olduğu görülmüştür. Test sonuçları, hibrit eklemlerdeki civataların yapıştırıcı hasarından sonra gerilme özelliğini artırabileceğini göstermiştir.

Saraç (2020) yaptığı çalışmada yapıştırılan boruların uç kısımlarındaki et kalınlığının ve bindirme boyunun bağlantı dayanımına etkisini araştırmıştır. Boru ucu et kalınlığını azaltmanın bindirme uçlarındaki gerilme yığılmalarını düşürerek bağlantı dayanımının artırdığı görülmüştür. Boru malzemesi bindirme ucu mesafesinin belirli mesafeden sonra yapıştırılan boru dayanımını dikkate değer biçimde azalttığı görülmüştür.

Arıkan ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada yapıştırıcı ile yapıştırılan tek bindirmeli bir bağlantının yük taşıma kapasitesini deneysel olarak belirlemişlerdir. Bu deneysel çalışmada, delik delme ve sıcaklığın etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak delik delmenin hasar yükünü artırdığı ve sıcaklık arttığında yük taşıma kapasitesinin azaldığını görülmüştür.

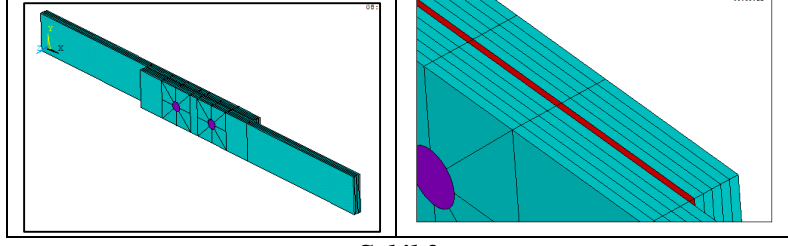
Yapılan çalışmada farklı delik eksenlerindeki tabakalı kompozit plakalarda çift pimli bağlantı sonucu uygulanan kuvvetle oluşan gerilmeler bulunmuş ve karşılaştırılmıştır. Tabakalı kompozit plaka 3 boyutlu olarak modellenmiş olup kontak analizi çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre farklı delik eksenlerinde oluşan gerilmeler karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Tabakalı kompozit malzemelerdeki çekme ve basma akma mukavemetleri de programa girilerek Tsai-Wu hasar kriterine göre malzeme analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında bağlantının tümünde ve yapıştırıcıda meydana gelen gerilmelerde analiz edilmiştir. Çalışmanın mevcut çalışmalardan farkı literatürdeki çalışmalarda tabakalı kompozit plakanın 2 boyutlu modellenmesine karşın 3 boyutlu olarak modellenmesi ve kontak analizinin çalıştırılmasıdır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada, tabakalı kompozit plakaların epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldığı ve yapıştırılan bu parçalara çift pim bağlantısı uygulandığı varsayılmıştır. Çift pimin yanında yapıştırıcı uygulanarak delik kenarlarında oluşacak gerilmelerin azaltılması hedeflenmiştir. Böylelikle yapıştırılmalı ve pimli karma bir bağlantı elde edilmiştir. Bu şekilde bağlantısı yapılan plakalarda delik eksenleri değiştirilerek farklı bağlantı alternatifleri hazırlanmıştır. Farklı delik eksenleri uygulanmış bağlantı alternatifleri üzerine çekme yükü uygulanması suretiyle ortaya çıkan gerilmeler incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

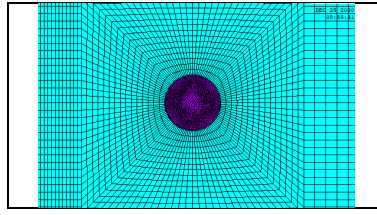
Problem tasarımı Şekil 1 'de görülmektedir. Tasarım ANSYS V 19.1 sonlu elemanlar yazılımı ile modellenerek oluşturulmuş olup çözümleme farklı delik eksenlerine göre yapılmıştır.



Şekil 2:

Tabakalı kompozit plakaların sonlu elemanlar modeli

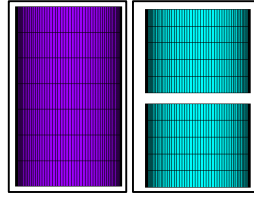
Modelleme işlemi sonrasında yapılan çalışmalarla ilgili literatür taraması yapılmış ve program için hazırlanan kullanıcı kılavuzları incelenerek uygun eleman tipleri belirlenmiştir.



Şekil 3:

Pim ve delik çevresi mesh yapısı

Tabakalı kompozit malzeme için eleman tipi SOLID185, yapıştırıcı ve pim için SOLID186 eleman tipi seçilmiştir. Kontak elemanı olarak pimin yüzeylerine TARGE170 delik yüzeylerine ise CONTA174 eleman tipi kullanılmıştır. Kontak elemanlarının atandığı yüzeyler Şekil 4 'te verilmiştir.



Şekil 4:

TARGE 170 ve CONTA 174 eleman atanan yüzeyler

Sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması sırasında plakaların ayrı ayrı dörtgen elemanlara bölünmesi ile yapıştırıcı, delik ve pim bölgeleri dâhil olmak üzere modelin tamamında düzgün dörtgen elemanlardan oluşan bir ağ yapısı oluşturulması sağlanmıştır. Ağ yapısı oluşturulması işlemi sonucunda model üzerinde 204911 eleman ve 94264 düğüm noktası meydana gelmiştir. Oluşturulan ağ yapısı ve detay resimleri Şekil 3 'te gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi yapıştırıcı ve delik çevrelerine yaklaşıldıkça eleman sayısı artmaktadır. Eleman sayısının artırılması ile bu bölgelerde daha hassas bir çözümlene yapılabilmesine olanak sağlanmaktadır.

Analizde alt plaka ucundan X, Y ve Z yönlerinde, pim alt ve üst yüzeylerine Z yönünde ve üst plakanın çekme kuvveti uygulanan yüzeyine Y ve Z yönünde sınır koşulu uygulanmıştır. Üst plakanın serbest ucundan tüm modellerde 1,6 kN 'luk yük uygulanmış ve analiz bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde 1 nolu deliğin plaka kenarına göre uzaklığı ve iki delik arasındaki mesafeye göre Tablo 3 'teki varyasyonlar modellenmiş ve sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Kullanılacak model eksen arası mesafe kombinasyonları

Model adı	E	K	E/D	K/D
Model 1	25 mm	25 mm	5	5

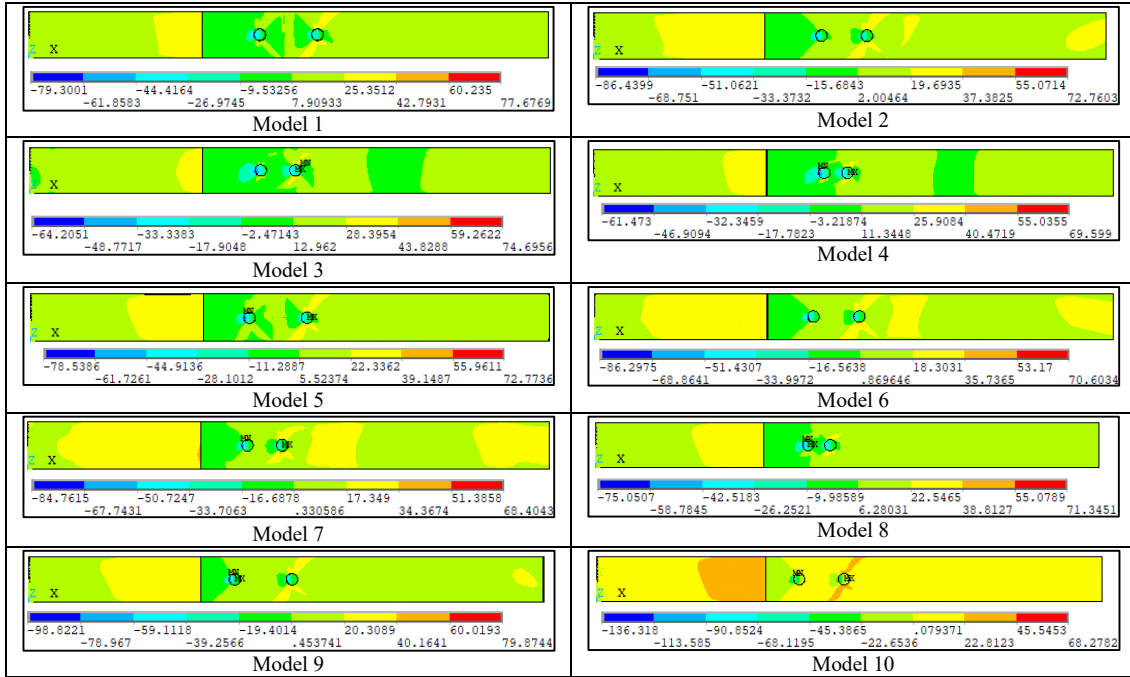
Model 2	25 mm	20 mm	5	4
Model 3	25 mm	15 mm	5	3
Model 4	25 mm	10 mm	5	2
Model 5	20 mm	25 mm	4	5
Model 6	20 mm	20 mm	4	4
Model 7	20 mm	15 mm	4	3
Model 8	20 mm	10 mm	4	2
Model 9	15 mm	25 mm	3	5
Model 10	15 mm	20 mm	3	4
Model 11	15 mm	15 mm	3	3
Model 12	15 mm	10 mm	3	2
Model 13	10 mm	25 mm	2	5
Model 14	10 mm	20 mm	2	4
Model 15	10 mm	15 mm	2	3
Model 16	10 mm	10 mm	2	2

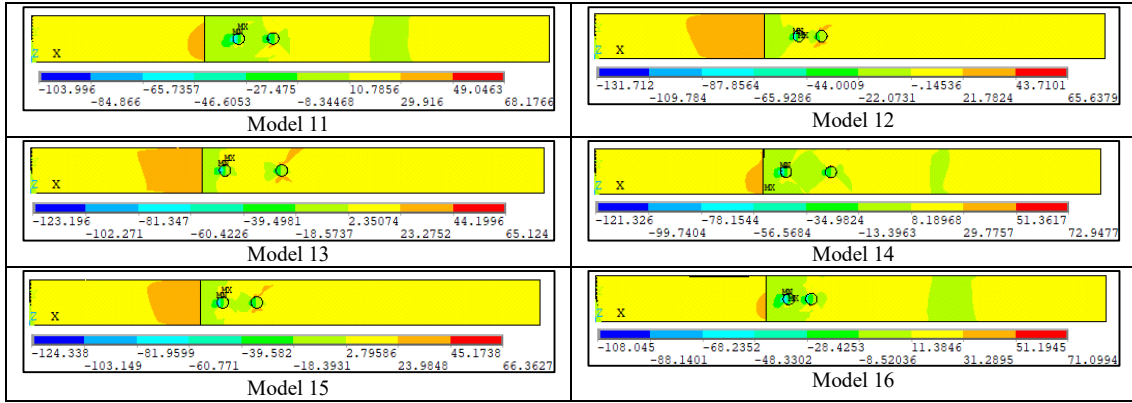
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Çekme Yüğü Sonucu Modelin Tamamında Elde Edilen Bulgular

Oluşturulan modellerin analizi sonucu modelin tamamı için çekme yönü olan X yönünde ve Von Mises gerilme değeri incelenmiştir.

Şekil 5 'te çekme yükü uygulanması sonucu bağlantının tamamı için X yönündeki gerilmelerin görselleri verilmiştir.

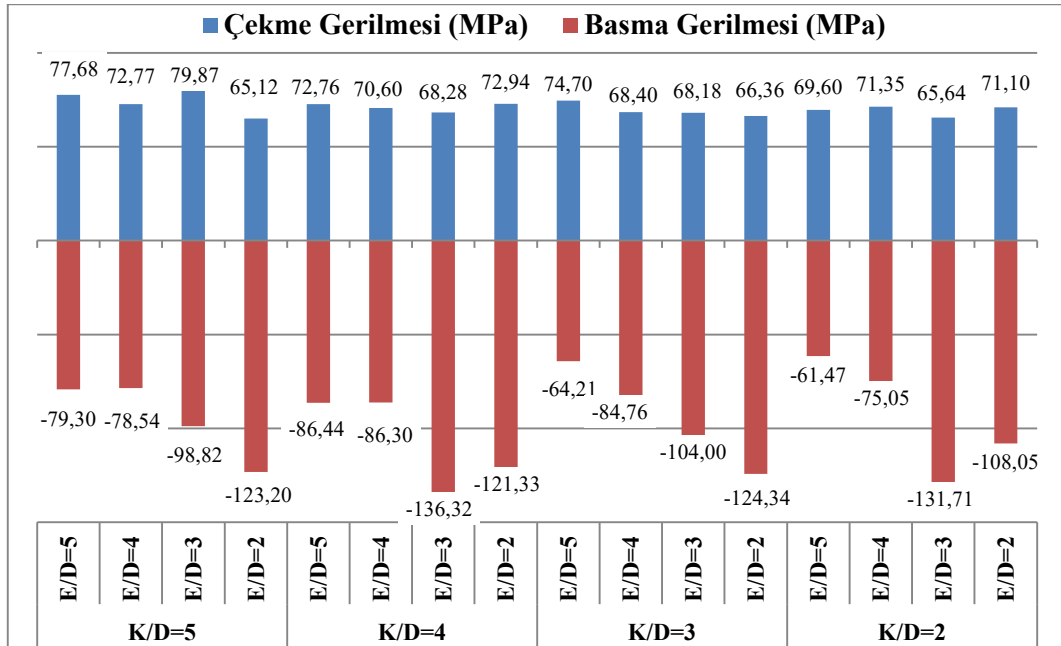




Şekil 5:

Çekme yükü uygulanması sonucu bağlantının tamamı için X yönündeki gerilmelerin görselleri

Şekil 6 'da X yönünde oluşan normal gerilmelerin maksimum ve minimum değerleri grafikler halinde verilmiştir.

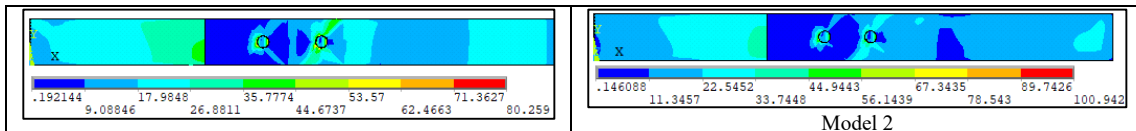


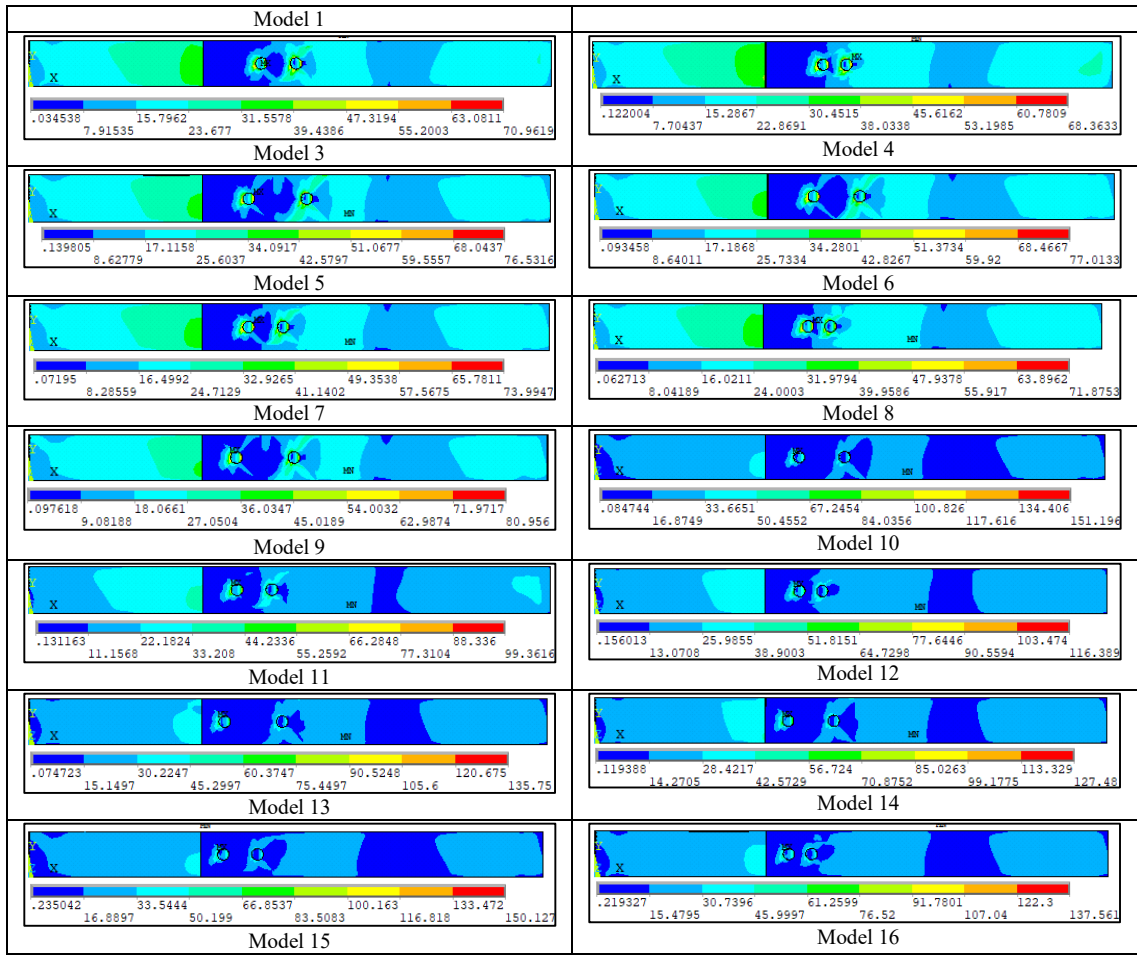
Şekil 6:

Çekme yükü uygulanması sonucu bağlantının tamamı için X yönünde maksimum normal gerilmelerin grafiksel gösterimi

Oluşturulan 16 model arasında modelin tamamındaki X yönündeki normal gerilme değerleri incelendiğinde E/D oranının azalmasıyla E/D oranı 3 ve 2 için basma gerilmelerinde belirgin bir artış görülmüştür. E/D oranı 5, 4 ve 3 iken K/D oranı 4 durumunda maksimum basma gerilmesi görülmüştür. E/D oranı 2 iken ise K/D oranı 3 durumunda maksimum basma gerilmesi görülmüştür.

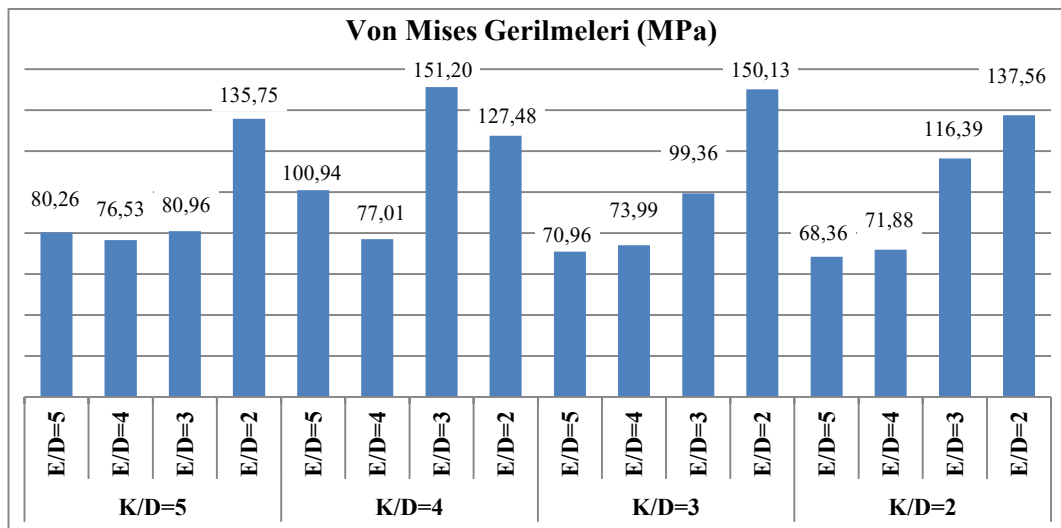
Şekil 7 'de çekme yükü uygulanması sonucu bağlantının tamamı için Von Mises gerilmelerinin görselleri verilmiştir.





Şekil 7:

Çekme yükü uygulanması sonucu bağlantının tamamı için Von Mises gerilmelerinin görselleri
Oluşturulan modellerin analizi sonucu Von Mises gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri Şekil 8 'de grafikler halinde verilmiştir.



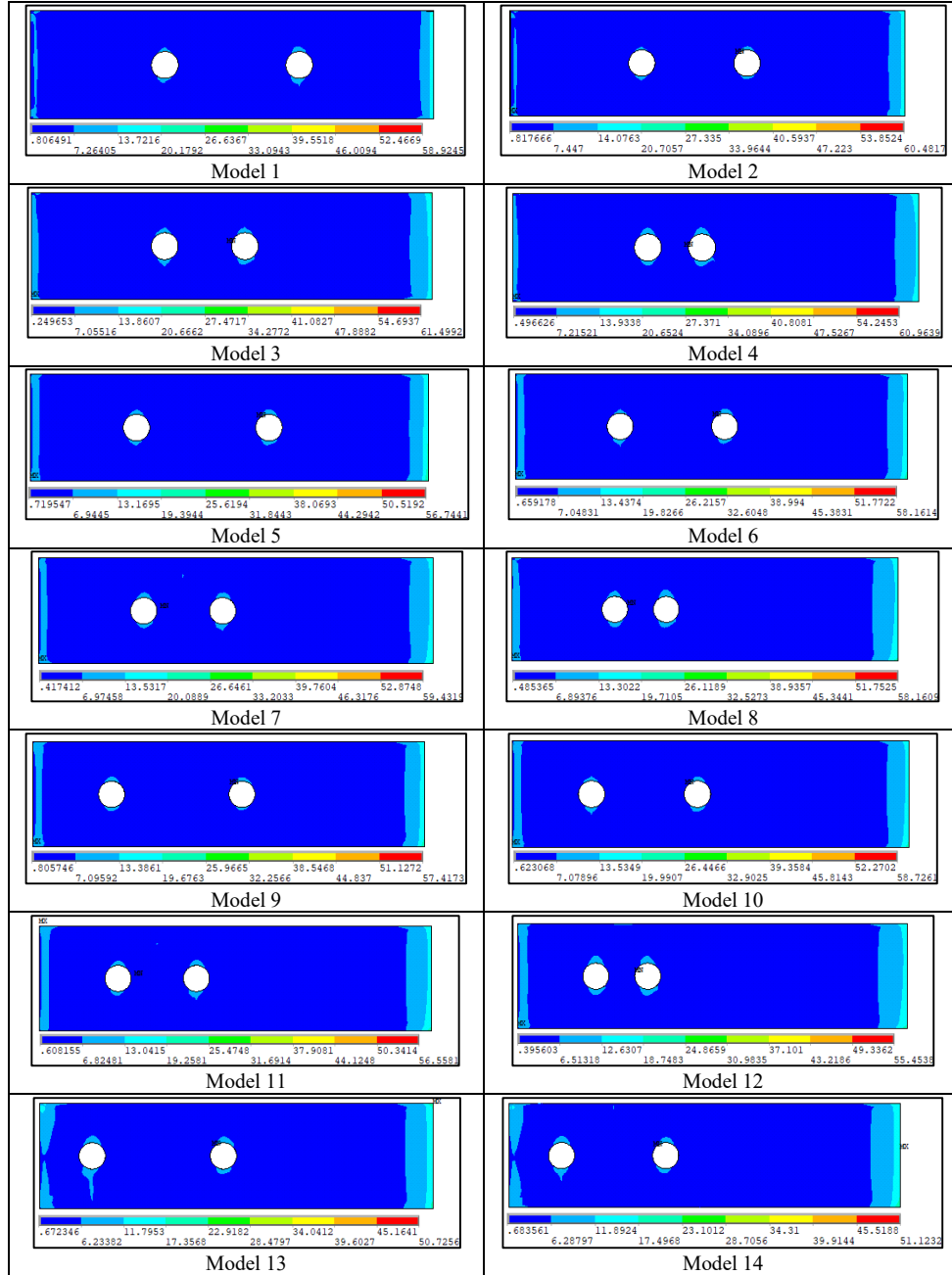
Şekil 8:

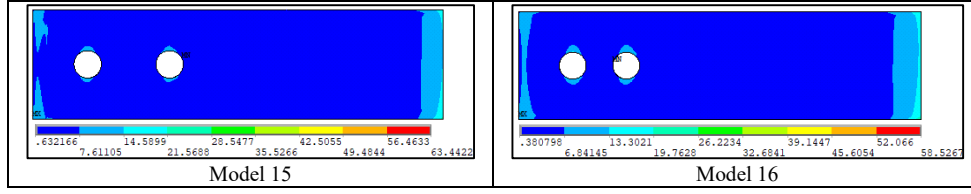
Çekme yükü uygulanması sonucu bağlantının tamamı için Von Mises gerilmelerin grafiksel gösterimi

Oluşturulan 16 model arasında modelin tamamındaki Von Mises gerilme değerleri incelendiğinde X yönündeki gerilmelere benzer şekilde E/D oranının azalmasıyla E/D oranı 3 ve 2 için Von Mises gerilmelerinde belirgin bir artış görülmüştür. E/D 5, 4 ve 3 değerleri için K/D oranı 4 durumunda maksimum Von Mises gerilmesi görülmüştür.

3.2. Çekme Yüğü Sonucu Yapıştırıcı Tabakasındaki Bulgular

Oluşturulan modellerin analizi sonucu yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri çıkarılmış ve Şekil 9 'da gerilme dağılımlarının görselleri verilmiştir.





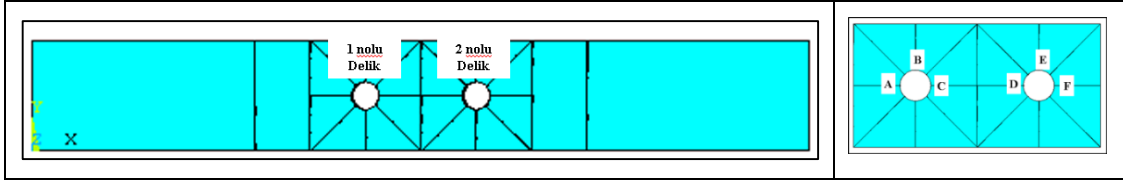
Şekil 9:

Yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri

Yapıştırıcıdaki Von Mises gerilme değerleri Şekil 9 'da gerilmelerin görselleri halinde verilmiştir. Yapıştırıcı tabakasında minimum Von Mises gerilmesi Model 13 'te 50.73 MPa, maksimum Von Mises gerilmesi Model 3 'te 61.50 MPa bulunmuştur.

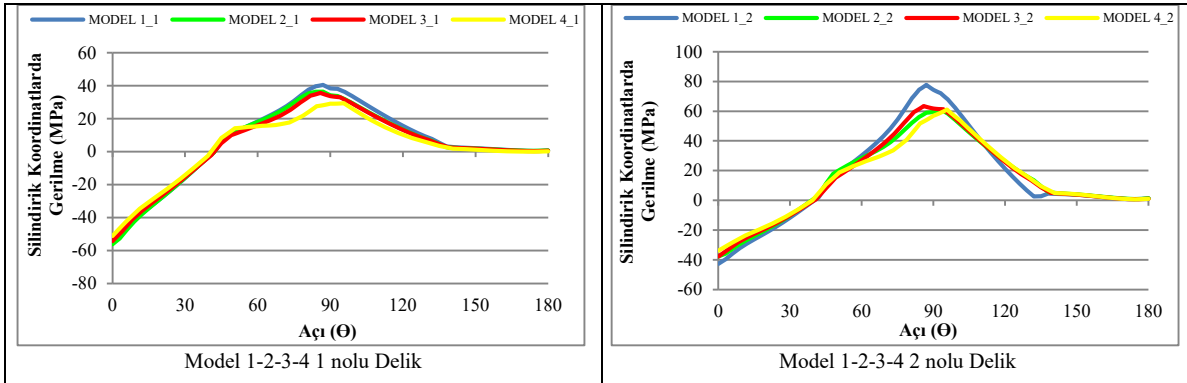
3.3. Çekme yükü sonucu bağlantıda delik bölgeleri için elde edilen bulgular

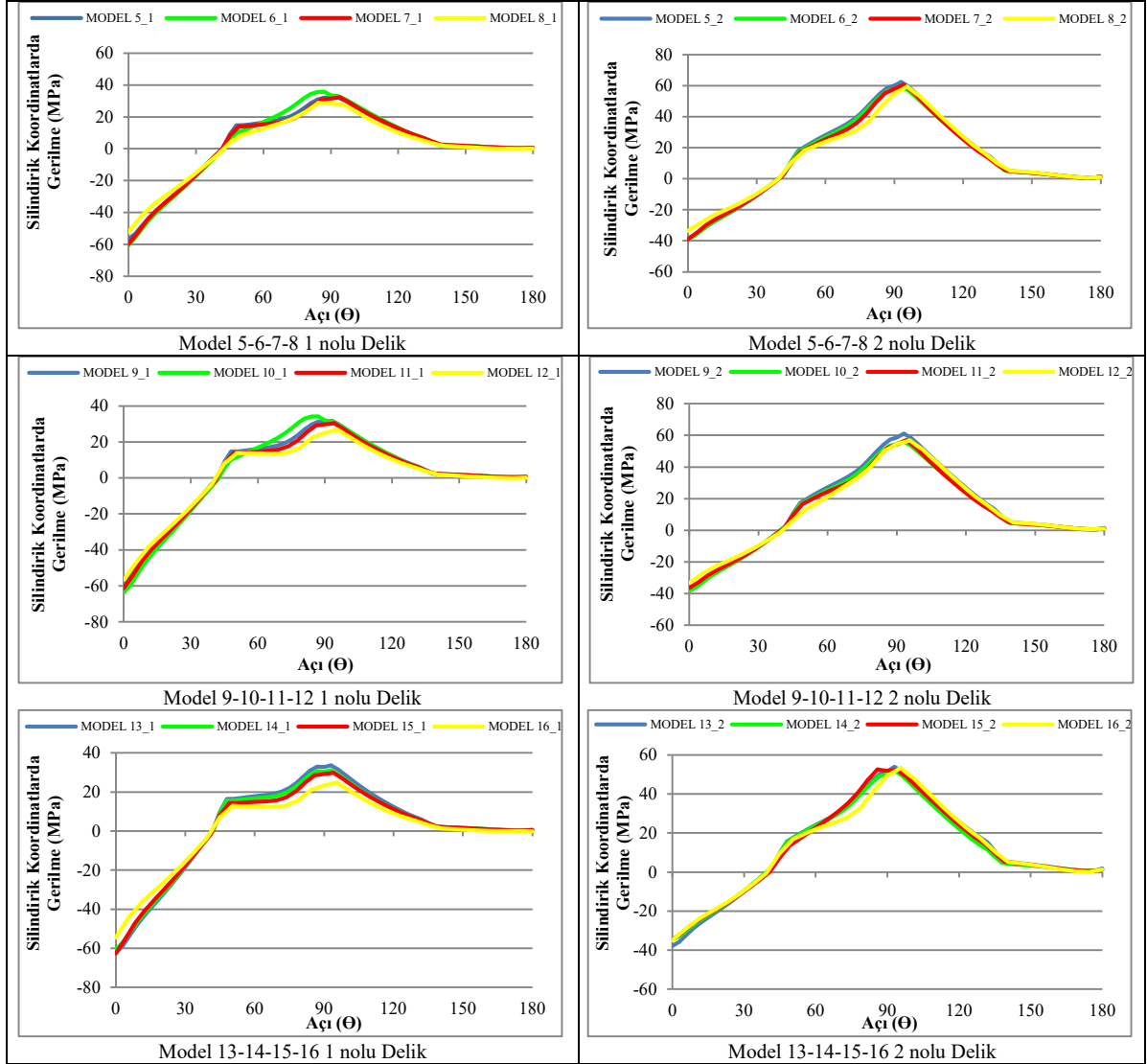
Şekil 10 'da delik bölgeleri için gerilmelerin tanımlandığı doğrultular verilmiştir. Gerilmeler Şekil 10 'de gösterilen A-C ve D-F doğrultuları tanımlanarak hesaplanmıştır. Bu doğrultular boyunca dönme açısı A ve D noktalarında $\theta = 0^\circ$, B ve E noktalarında $\theta = 90^\circ$, C ve F noktalarında $\theta = 180^\circ$ olacak şekilde tanımlanmıştır. Deliklerin adlandırılması plakanın sabitlenmiş olan kısmına ve çekme yükünün uygulandığı kısma yakınlığına göre yapılmıştır. Plakanın sabitlenmiş olan ucuna yakın olan delik 1 nolu delik olarak adlandırılmış, plakanın çekme yükünün uygulandığı kısmına yakın olan delik ise 2 nolu delik olarak adlandırılmıştır. (Şekil 10)



Şekil 10:

Deliklerin numaralandırılması ve gerilmelerin tanımlandığı doğrultular



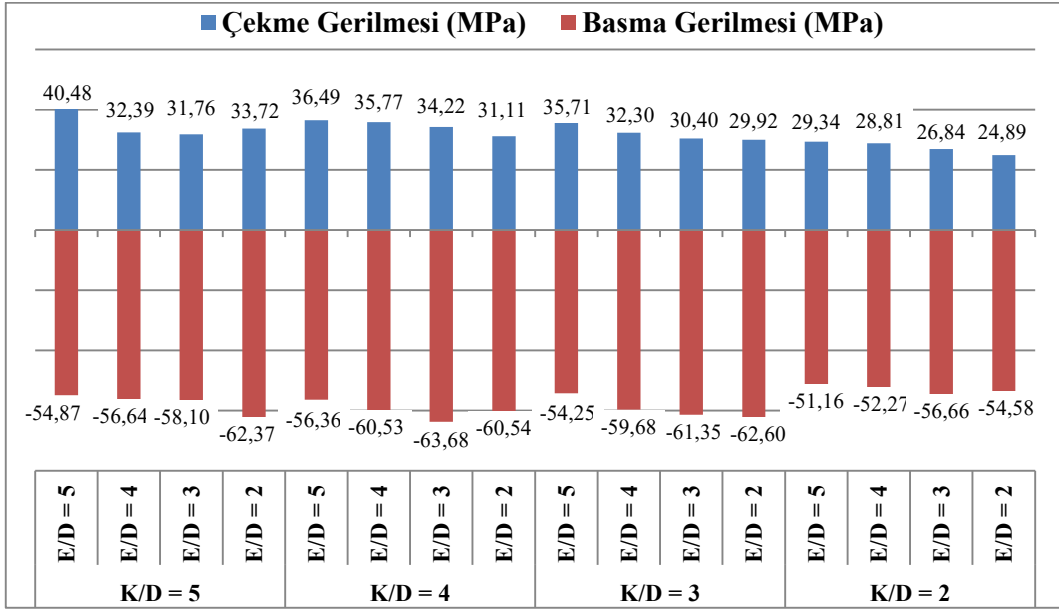


Şekil 11:

Çekme yükü uygulanması sonucu deliklerde A-C ve D-F boyunca silindirik koordinatlarda x yönünde oluşan normal gerilmelerin grafiksel gösterimi

Oluşturulan 16 model arasında 1 ve 2 nolu delik etrafındaki silindirik koordinatlarda normal gerilme değerleri incelendiğinde 1 nolu delikte basma gerilmelerinin, 2 nolu delikte çekme gerilmelerinin daha etkili olduğu görülmüştür.

Çekme yükü sonucu 1 nolu delikte oluşan çekme ve basma gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri Şekil 12 'de grafikler halinde verilmiştir.

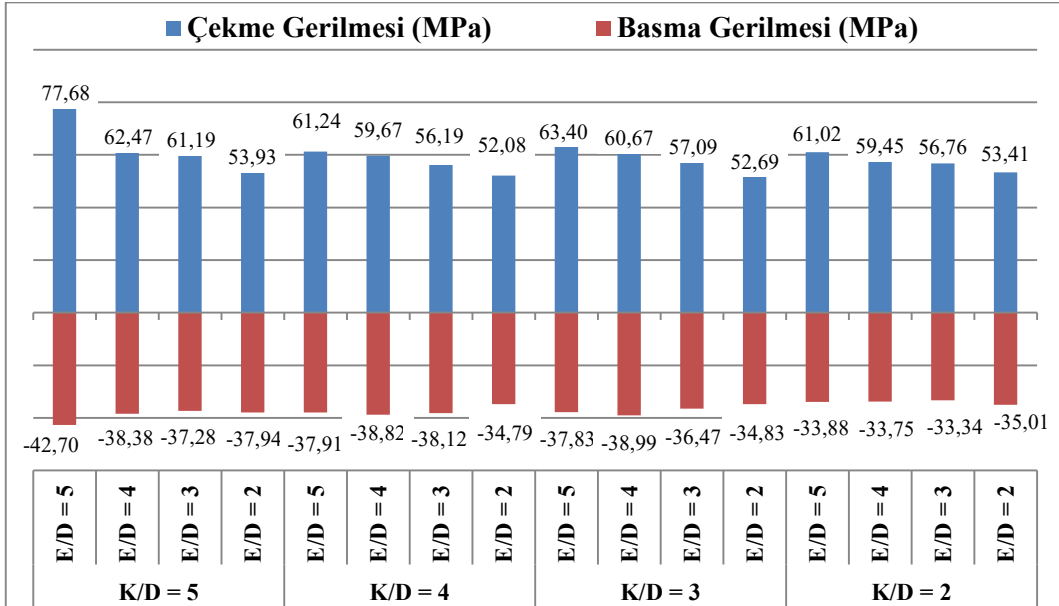


Şekil 12:

Çekme yükü uygulanması sonucu deliklerde 1 nolu delikte A-C boyunca silindirik koordinatlarda oluşan maksimum ve minimum normal gerilmeler

1 nolu delikte aynı K/D değerleri için E/D değerlerinin azalmasıyla basma gerilmelerinde artış görülmüştür. E/D 5, 4 ve 3 değerleri için K/D oranı 4 durumunda silindirik koordinatlarda maksimum basma gerilmesi görülmüştür. Minimum basma gerilmesi 51.16 MPa ile E/D=5 ve K/D=2 için, maksimum basma gerilmesi ise 63.68 MPa ile E/D=3 ve K/D=4 için görülmüştür.

Çekme yükü sonucu 2 nolu delikte oluşan çekme ve basma gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri Şekil 13 'te grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 13:

Çekme yükü uygulanması sonucu deliklerde 2 nolu delikte D-F boyunca silindirik koordinatlarda oluşan maksimum ve minimum normal gerilmeler

2 nolu delikte de aynı K/D değerleri için E/D değerlerinin azalmasıyla çekme gerilmelerinde azalma görülmüştür. E/D 5, 4, 3 ve 2 değerleri için K/D oranı 5 durumunda

silindirik koordinatlarda maksimum çekme gerilmesi görülmüştür. Minimum çekme gerilmesi 52.08 MPa ile $E/D=2$ ve $K/D=4$ için, maksimum çekme gerilmesi ise 77.68 MPa ile $E/D=5$ ve $K/D=5$ için görülmüştür.

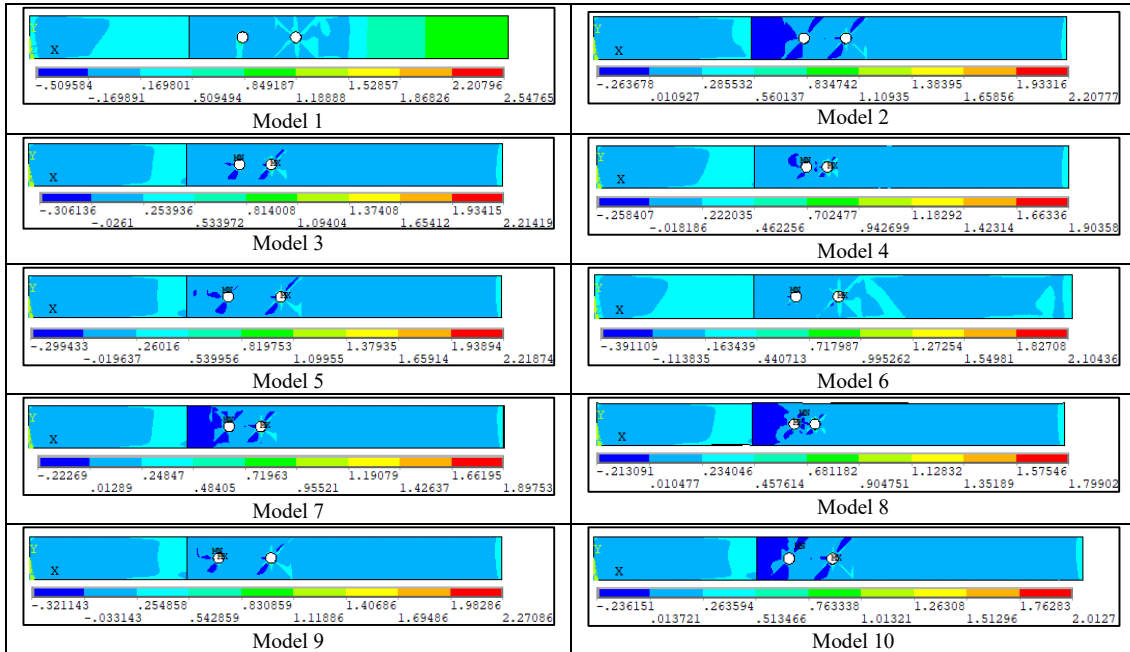
3.4. Kompozit Plakalarda Tsai-Wu Dayanım Endeksi

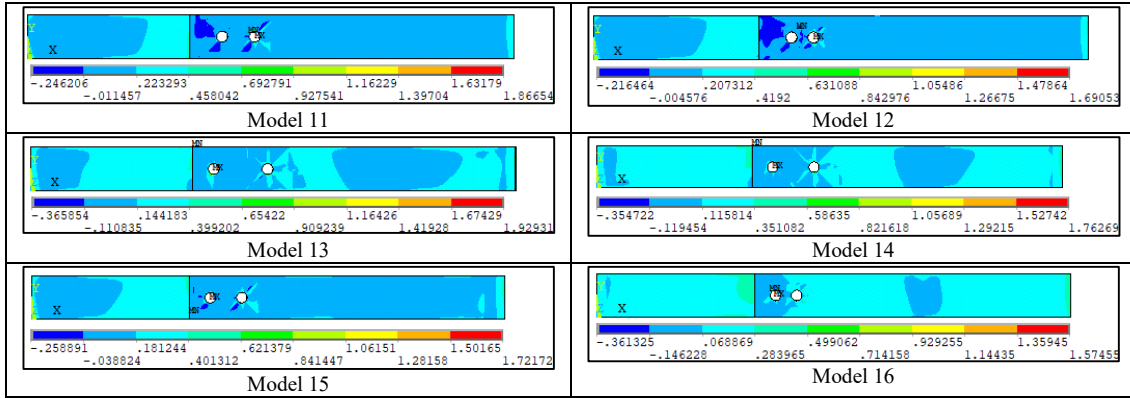
Tsai-Wu hasar kriteri, çekme ve basmada farklı mukavemetlere sahip olan anizotropik kompozit malzemeler için yaygın olarak kullanılan bir malzeme hasar teorisidir. Tsai-Wu kriteri tabakalı kompozit plakalarda, deneysel olarak belirlenmiş malzeme mukavemet parametrelerine göre malzeme hasarını tahmin etmek için kullanılır.

Tablo 4. Cam elyaf/epoksi tabakalı kompozit plaka dayanım özellikleri (Kishore ve diğ., 2009).

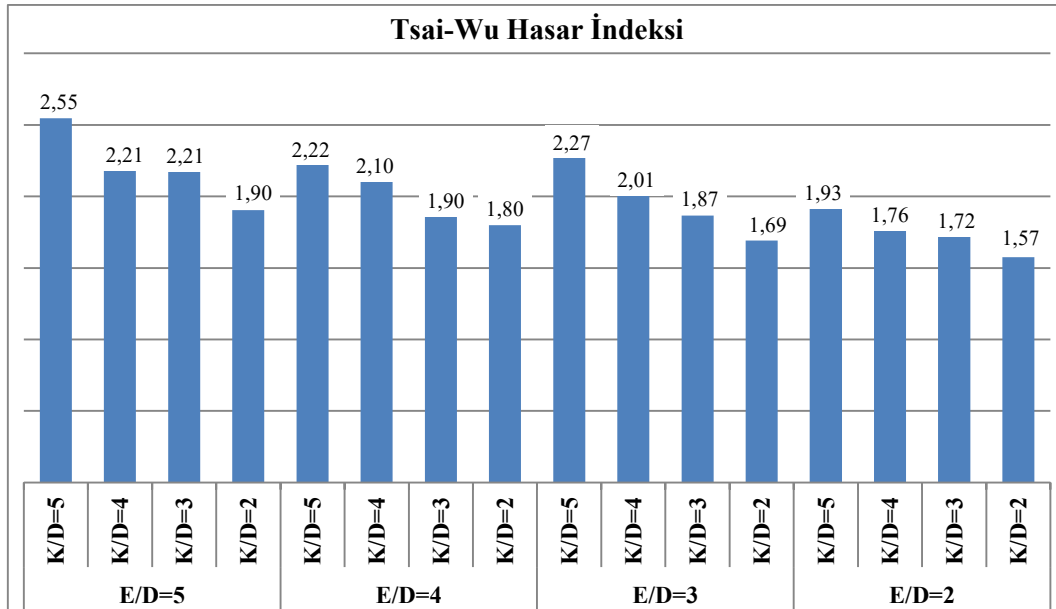
Cam elyaf/epoksi Plaka Dayanım Özellikleri	
X Yönünde Çekme Dayanımı	500 MPa
X Yönünde Basma Dayanımı	300 MPa
Y Yönünde Çekme Dayanımı	22.5 MPa
Y Yönünde Basma Dayanımı	60 MPa
Z Yönünde Çekme Dayanımı	22.5 MPa
Z Yönünde Basma Dayanımı	60 MPa
1-2 Düzlemi Kesme Dayanımı	45 MPa
2-3 Düzlemi Kesme Dayanımı	30 MPa
1-3 Düzlemi Kesme Dayanımı	45 MPa

Çalışmada delinmiş tabakalı kompozit plaka ve delik çevrelerinde bu hasar kriterine göre değerlendirme yapılmıştır. Bu kriter gereğince yapılan değerlendirme sonucu oluşan görseller Şekil 14 'te verilmiştir.





Şekil 14:
Kompozit tabakalı plakalarda hesaplanan Tsai-Wu Hasar İndeksi



Şekil 15:
Kompozit tabakalı plakalarda hesaplanan Tsai-Wu Hasar İndeksi grafiği

Tsai-Wu Hasar indeksi K/D oranı 5 'ten 2 'ye doğru azaldıkça azalmaktadır. Genel dağılımda yine E/D oranı 5 'ten 2 'ye doğru yaklaşıldıkça hasar indeksinin yine azaldığı görülmektedir.

3.5. Tartışma

Oluşturulan 16 model arasında modelin tamamındaki X yönündeki normal gerilme ve Von Mises gerilme değerleri incelendiğinde E/D oranının azalmasıyla E/D oranı 3 e kadar X yönünde görülen gerilmeler artmış, 3 ile 2 arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Tüm modeller için E/D oranı 5, 4 ve 3 iken K/D oranı 4 durumunda maksimum gerilme görülmüştür.

Yapıştırıcı tabakasında minimum Von Mises gerilmesi Model 13 'te 50.73 MPa, maksimum Von Mises gerilmesi Model 3 'te 61.5 MPa bulunmuştur.

Oluşturulan 16 model arasında 1 ve 2 nolu delik etrafındaki silindirik koordinatlarda normal gerilme değerleri incelendiğinde 1 nolu delikte basma gerilmelerinin, 2 nolu delikte çekme gerilmelerinin daha etkili olduğu görülmüştür.

1 nolu delikte aynı K/D değerleri için E/D değerlerinin azalmasıyla basma gerilmelerinde artış görülmüştür. Okutan yaptığı çalışmada W/D veya E/D oranlarının artmasıyla yatağın

taşıma gücünün arttığını görmüştür. Sonuçlar bu çalışmayla tutarlıdır. (2003) E/D 5, 4 ve 3 değerleri için K/D oranı 4 durumunda silindirik koordinatlarda maksimum basma gerilmesi görülmüştür. Minimum basma gerilmesi 51.16 MPa ile E/D=5 ve K/D=2 için, maksimum basma gerilmesi ise 63.68 MPa ile E/D=3 ve K/D=4 için görülmüştür.

2 nolu delikte de aynı K/D değerleri için E/D değerlerinin azalmasıyla çekme gerilmelerinde azalma görülmüştür. E/D 5, 4, 3 ve 2 değerleri için K/D oranı 5 durumunda silindirik koordinatlarda maksimum çekme gerilmesi görülmüştür. Minimum çekme gerilmesi 52.08 MPa ile E/D=2 ve K/D=4 için, maksimum çekme gerilmesi ise 77.68 MPa ile E/D=5 ve K/D=5 için görülmüştür.

Tsai-Wu Hasar indeksi K/D oranı ve E/D oranını 5 'ten 2 'ye doğru azalmasıyla azalmıştır. Hasar indeksi 1 'e yaklaştıkça kompozit malzemenin daha güvenilir olduğu anlamına gelmektedir.

4. SONUÇLAR

Yapıştırıcı tabakasındaki gerilmeler delik eksenlerindeki değişimden yüksek oranda etkilenmemiştir.

Oluşturulan modellerde delik etrafındaki silindirik koordinatlarda normal gerilme değerleri incelendiğinde 1 nolu delikte basma gerilmelerinin, 2 nolu delikte çekme gerilmelerinin daha etkili olduğu görülmüştür.

Belirtilen tür kompozit malzeme kullanımında delik eksenlerine göre Tsai-Wu hasar indeksine göre en güvenilir modelin E/D ve K/D 2 olan model olduğu görülmüştür.

1 nolu delikte aynı K/D değerleri için E/D değerlerinin azalmasıyla basma gerilmelerinde artış meydana gelmektedir.

2 nolu delikte de aynı K/D değerleri için E/D değerlerinin azalmasıyla çekme gerilmelerinde azalma meydana gelmektedir.

Tsai-Wu Hasar indeksi K/D oranı ve E/D oranını 5 'ten 2 'ye doğru azalmasıyla azalmıştır. Tabakalı kompozit plakanın hasara uğrama ihtimali bu oranların azalması ile azalmaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

İlker Erzincanlı çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi, kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk, Semih Benli çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi, kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk.

KAYNAKLAR

1. Arıkan, V. Doğan, A. Doğan, T. Sabancı, E. ve Al-Shamary A.K.J. (2015) Effects of Temperature and Hole Drilling on Adhesively Bonded Single-Lap Joints, *The Journal of Adhesion*, 91, 177-185.
2. Cürgül, İ. (1997) Makina Elemanları 1, Cilt I, *Kocaeli Üniversitesi Yayınları*, Kocaeli.
3. Jones, R.M. (1999) *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, Inc., Philadelphia.
4. Karakuzu, R. Çalışkan, C. R. Aktaş, M. ve İçten, B.M. (2008) Failure behavior of laminated composite plates with two serial pin-loaded holes, *Composite Structures*, 82, 225-234.
5. Kishore, A.N. Malhotra, S.K. ve Prasad N.S. (2009) Failure analysis of multi-pin joints in glass fibre/epoxy composite laminates, *Composite Structures*, 91, 266-277.
6. Lee, Y.H. Lim, D.W. Choi, J.H. Kweon, J.H. ve Yoon, M.K. (2010) Failure load evaluation and prediction of hybrid composite double lap joints, *Composite Structures*, 92, 2916-2926.
7. Li, X. Tan, Z. Wang, L. Zhangb, L. Xiaob, Z. Luo, H. (2020) Experimental investigations of bolted, adhesively bonded and hybrid bolted/bonded single-lap joints in composite laminates, *Materials Today Communications*, 24.
8. Okutan B. ve Karakuzu R. (2003) The strength of pinned joints in laminated composites, *Composites Science and Technology*, 63, 893-905
9. Saraç İ. (2020) Çekme Yüğü Uygulanmış Boru Yapıştırma Bağlantılarında Bindirme Uç Geometrisinin Bağlantı Dayanımına Etkisinin Araştırılması, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8, 4, 733-744.
10. Soykok, İ.F. (2015) End geometry and pin-hole effects on axially loaded adhesively bonded composite joints, *Composites Part B*, 77, 129-138.
11. Wahab, M.A. (2014) *The Mechanics of Adhesives in Composite and Metal Joints*, DEStech Publications Inc, Pennsylvania.
12. Whitworth, H. Aluko, O. ve Tomlinson, N. (2008) Application of the point stress criterion to the failure of composite pinned joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 1829-1839.
13. Yılmaz, T. ve Sınmazçelik, T. (2007) Investigation of load bearing performances of pin connected carbon/polyphenylene sulphide composites under static loading conditions, *Materials and Design*, 28, 520-527.