

Çift Pimli ve Yapıştırılmalı Kompozit Plakalarda Farklı Yapıştırıcı Türleriyle Gerilme Analizi

Semih BENLİ¹, İlker ERZİNCANLI^{2*}

ÖZET: Bu çalışmada çift pim bağlantısı uygulanmış ve farklı yapıştırıcı türleri ile yapıştırılmış ve farklı oryantasyon açılarında tabakalı kompozit plakada gerilme analizleri incelenmiştir. 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 uygulanmış, malzeme ve delik bölgelerinde farklı yapıştırıcı türleriyle ve buna ilave olarak tabakalı kompozit plakada farklı oryantasyon açılarında modeller arasında meydana gelen gerilmeler belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler, pim bağlantısı, yapıştırma bağlantısı, kontak analizi, gerilme analizi

Stress Analysis of Double Pinned and Adhesively Bonded Composite Plates with Different Adhesive Types

ABSTRACT: In this study, double pin connection was applied and stress analysis of layered composite plate bonded with different types of adhesive was investigated. ANSYS (V19) finite element software was used for analysis, modeling and solution. Modeling was done in 3D. Various boundary conditions and loads were applied on the model. Unlike the existing studies, contact analysis was performed for the hole and the pin on the layered composite plate and analysis was carried out in this way. Tensile load was applied to the material and the stresses between the different adhesive types and models were determined in the material and hole regions.

Keywords: Composite materials, pin connection, bonding connection, contact analysis, stress analysis

¹Semih BENLİ (Orcid ID: 0000-0003-0763-9838), Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

²İlker ERZİNCANLI (Orcid ID: 0000-0002-7416-9963), Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Aksaray, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: İlker ERZİNCANLI, e-mail: ilkererzincanli@aksaray.edu.tr

Bu çalışma İlker ERZİNCANLI'nın Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir

GİRİŞ

Yapıştırıcı, iki yüzeyi bir arada tutarak kalıcı olarak birleştiren kuvvetli bir madde olarak tanımlanır. Yapışkan malzeme alt ve üst tabakalara yapışır ve aralarındaki kuvvetleri aktarır. Genel olarak, bağ tahrip edilmedikçe yapıştırılmış tabakalar kopmaz. Tipik bir yapışkan bağlanmış bağlantının bir örneği Şekil 1 'de gösterilmiştir. (Wahab 2014)



Şekil 1. Tipik bir yapıştırılmalı bağlantı

Yapıştırılmalı bağlantı teknolojisi, özellikle ince metal veya kompozit tabakalar için güçlü bir birleştirme tekniğidir. Yapıştırılmalı bağlantının üstünlüğü, yüksek yorulma direnci ve yüksek dayanım / ağırlık oranı gibi özelliklerde öne çıkmaktadır. Yapışkan ile yapıştırılmış bağlantı farklı malzemelerden oluştuğundan, yapısal analizi karmaşıktır ve analizde birçok özel husus ve varsayım gerektirir. Örneğin, yapışkanlar ince tabakaları birleştirmek için kullanıldığında, termal ve mekanik yüklerde büyük deformasyon davranışı beklenir. (Wahab 2014)

Kompozitlerin ayrı bir malzeme sınıfı olarak tanımlanması, cam elyaf takviyeli polimerler gibi çok fazlı kompozitlerin 20. Yüzyılın ortalarında, tasarım ve mühendislik çalışmalarına uygun şekilde üretilmesiyle başlamıştır. Ahşap, saman takviyeli kilden yapılan kerpiç, deniz kabukları ve hatta çelik gibi alaşımlar binlerce yıldır bilinen çok fazlı malzemeler olmasına rağmen, farklı malzemeleri üretim sırasında bir araya getirme kavramının herkesçe kabul edilmesinden sonra kompozitler; metal seramik ve polimerlerin yanında yeni bir malzeme grubu olarak sayılmaya başlanmıştır. (Callister and Retwisch 2014)

Özel ve ark., (2014) yaptıkları çalışmada, çekme yükü altında farklı alt ve üst tabakaların konfigürasyonları ile birlikte yapıştırılan tek tesirli bindirme bağlantısı (SLJ) geometrisinin mekanik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda kompozit plakanın dizilim sırasının hasar yükünü etkilediği ve yapıştırma uzunluğundaki artışın her iki bağlantı türünde de yük taşıma kapasitesini artırdığı görülmüştür. Kishore ve ark., (2009) yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışma ile sonuçları doğrulayarak, tek yönlü cam elyaf / epoksi kompozit plakalarda çok pimli bağlantılar için hasar modları ve hasar yükleri elde etmeyi amaçlamışlardır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar, E / D , S / D ve P / D oranlarının çoklu pimli bağlantılarının tasarımındaki etkisini göz önünde bulundurmanın önemini göstermiştir. Ayanak ve ark., (2015) yaptıkları çalışmada paralel çift pim uygulanmış ve yapıştırılmış kompozit plakaların çekme yükü altındaki gerilme analizlerini incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda gerilmelerin pim deliği çevresinde oluşması nedeniyle oluşan gerilme yığılmaları oluşabilecek bir hasarın öncelikle paralel pim delikleri çevresinde oluşmasına sebep olacağı görülmüştür. Çitil ve ark., (2012) yaptıkları çalışmada farklı kalınlık ve farklı bindirme uzunluğunda plakaları farklı türdeki kapaklarla yapıştırarak bağlantı numuneleri hazırlamışlardır. Çalışmanın sonucunda yapıştırılan alanın artmasıyla yapıştırıcı tarafından taşınan yük artmış ve kapak kalınlığının artmasıyla taşınan yükün azaldığı görülmüştür. Karakuzu ve

ark., (2008) yaptıkları çalışmada çift paralel rijit pim tarafından çekme kuvvetine maruz kalan iki paralel dairesel delikli lamine dokuma cam-vinilester kompozit plakadaki hasar modunu, hasar yükünü ve yatak mukavemetini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda kesme hasar modlarının ve yatak mukavemet değerlerinin doğrudan E/D oranı ile ilişkili olduğu bulunmuştur. M/D ve K/D oranları sabitken, yatak mukavemeti artan E/D oranı ile artmıştır. He (2010) yaptığı çalışmada yapıştırma ile bağlantılı plakalarda kullanılan yapıştırıcıların Elastisite modülü ve Poisson oranının etkisini incelemek için farklı değerleri nümerik olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda yapıştırıcının elastisite modülü ve poisson oranının çekme yükü sonucu oluşan maksimum gerilmeyi etkilediği görülmüştür. Naveenraj ve ark., (2019) cam epoksi malzemede seri bağlantı ile cıvata bağlantısı uygulamış ve çekme yükü uygulayarak deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışma sonucunda cıvata sayısındaki artış ile kompozit plakanın dayanımının azaldığı görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada maksimum hasarın E/D 13.75 için görüldüğü en az hasarın ise E/D 5.5 için görüldüğü belirlenmiştir. Kiral (2010) yaptığı çalışmada cam epoksi fiber kompozit malzemede pim çapını değiştirerek pimin deliğe sıkı ve boşluklu geçmenin etkisini incelemiştir. Çalışma sonunda pim ve delik arasındaki boşluk ve girişimin, mekanik olarak tutturulmuş bağlantıların hasar yükü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Okutan ve ark., (2003) pim bağlantılı yüklenmiş tabakalı kompozitlerin tepkisini incelemek için bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışma sonunda $0^\circ / \pm 45^\circ$ oryantasyon açısındaki tabakalı kompozit plakanın dayanımı $90^\circ / \pm 45^\circ$ 'e göre daha yüksek bulunmuş ve maksimum delik gerilmesi E/D oranı 3 ve daha büyük değerler için bulunmuştur. Şen ve ark., (2008) deneysel olarak, cam elyaf takviyeli epoksi lamine kompozit plakalardaki mekanik olarak sabitlenmiş cıvatalı bağlantıların hasar modunu ve taşıma mukavemetini belirlemek için bir araştırma yapmışlardır. Sonuçlar, hasar modlarının ve yatak kuvvetlerinin ön yüklerin artmasından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Aldaş ve ark., (2011) yaptıkları çalışmada karma bağlantı uygulanmış farklı metal plakalarda meydana gelen gerilmeler incelenmiştir. Alüminyum-alüminyum karma bağlantılarda meydana gelen gerilmeler en düşük değerlerde meydana gelirken, en yüksek gerilmelerin alüminyum-çelik karma bağlantılarda meydana geldiği görülmüştür. Pakdil ve ark., (2009) yaptıkları çalışmada, ön yük momentleri altında cıvata ve delik boşluğu bulunan cam-epoksi tabakalı kompozit cıvatalı bağlantılarda hasar ilerlemesini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, hasar gelişimine bağlı olarak hasar modunun ve yatak dayanımının hem malzeme parametrelerinden hem de geometrik parametrelerden büyük oranda etkilendiğini göstermektedir. Zhou ve ark., (2016) yaptıkları çalışmada pim profillerinin çekme yüküne maruz kalan pim yüklü tek tesirli bağlantıların gerilim konsantrasyonu ve yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda kompozit tek tesirli plakalar üzerinde farklı delik profillerinin incelenmesi sonucu oval şekilde olan pim profilinin gerilme yığılmaları açısından daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Aydın ve ark., (2011) epoksi ve akrilik bazlı yapıştırıcıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 2 adet epoksi bazlı 2 adet akrilik bazlı olmak üzere 4 farklı yapıştırıcı ile yapıştırılmış numunelere çekme testi uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda Erde GTR adlı akrilik bazlı yapıştırıcının şekil değiştirme oranı yaklaşık olarak % 0.085 olarak diğer yapıştırıcılardan daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Beylergil ve ark., (2011) yapmış oldukları çalışmada tek tesirli yapıştırılmalı plakada pim bağlantılarında pim malzemesi olarak cam fiber malzemesi kullanarak çekme kuvveti altında yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeleri incelemiştir. Deneysel çalışmayı ANSYS sonlu elemanlar programı ile de analiz ederek nümerik çalışmayı da gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda fiberlerin varlığının bindirme yüzeyinde gerilme değerlerini düşürdüğü sonucuna varmışlardır.

Yapılan çalışmada farklı özellikteki yapıştırıcılarla ve çift pimli bağlantı sonucu farklı oryantasyon açılara sahip tabakalı kompozit plakalara uygulanan kuvvet sonucu oluşan gerilmeler bulunmuştur. Tabakalı kompozit plaka 3 boyutlu olarak modellenmiş olup kontak analizi çalıştırılmıştır. Elde edilen

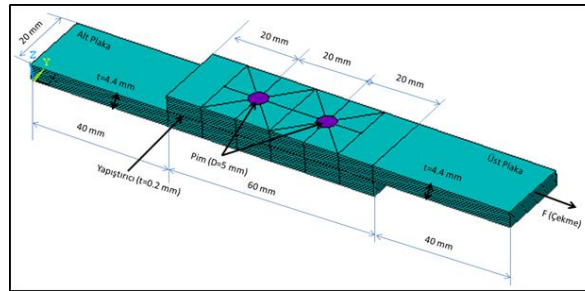
sonuçlara göre farklı yapıştırıcı türleriyle oluşan gerilmeler karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Farklı yapıştırıcı türlerinin delik etrafındaki gerilme yığılmalarına etkisi de bu şekilde incelenmiştir. Tabaklı kompozit malzemelerdeki çekme ve basma akma mukavemetleri de programa girilerek Tsai Wu hasar kriterine göre malzeme analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında bağlantının tümünde ve yapıştırıcıda meydana gelen gerilmelerde analiz edilmiştir. Çalışmanın mevcut çalışmalardan farkı tabakalı kompozit plakanın 3 boyutlu olarak modellenmesi ve 16 tabakalı kompozit bir plakada kontak analizinin çalıştırılmasıdır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Problemin Tanımı

Bu çalışmada, tabakalı kompozit plakaların farklı yapıştırıcı ve plaka varyasyonlarının üç farklı yapıştırıcı türü ile yapıştırıldığı ve yapıştırılan bu parçalara çift pim bağlantısı uygulandığı varsayılmıştır. Çift pim kullanılarak delik kenarlarında oluşacak gerilmelerin azaltılması hedeflenmiştir. Bu bağlantı şekliyle yapıştırılmalı ve pimli karma bir bağlantı elde edilmiştir. Bağlantısı yapılan plakalarda karbon epoksi ve cam epoksi malzemeleri kullanılarak farklı plaka alternatifleri hazırlanmıştır. Farklı malzemeler üzerine çekme yükü uygulanması suretiyle ortaya çıkan gerilmeler incelenmiştir.

Problem tasarımı Şekil 2 'de görülmektedir. Tasarım ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile modellenerek oluşturulmuş olup çözümleme değişik malzeme özelliklerine göre ayrı ayrı yapılmıştır. Çalışmada ANSYS V19.1 versiyonu kullanılmıştır.



Şekil 2. Bağlantı Model Resmi

Malzeme ve Özellikleri

Karbon Epoksi plaka 16 tabakalı ve $[45^\circ/-45^\circ]_8$, $[0^\circ/0^\circ]_8$, $[30^\circ/-30^\circ]_8$ oryantasyon açlarına sahiptir. Cam Epoksi plaka 16 tabakalı ve $[45^\circ/-45^\circ]_8$, $[0^\circ/0^\circ]_8$, $[30^\circ/-30^\circ]_8$ oryantasyon açısına sahiptir. Mekanik özellikleri Çizelge 1 'de verilmiştir.

Çizelge 1. Karbon Epoksi (Özel ve ark., 2014) ve Cam Epoksi (Kishore ve ark., 2009) Tabakalı Kompozit Plaka Mekanik Özellikleri

	Karbon Epoksi Plaka	Cam Epoksi Plaka
E ₁₁	141 600 MPa	E ₁₁ 26 000 MPa
E ₂₂	10 700 MPa	E ₂₂ 6 000 MPa
E ₃₃	10 700 MPa	E ₃₃ 6 000 MPa
V ₁₂	0.268	V ₁₂ 0.3
V ₂₃	0.495	V ₂₃ 0.5
V ₁₃	0.268	V ₁₃ 0.3
G ₁₂	3 880 MPa	G ₁₂ 3 120 MPa
G ₂₃	2 680 MPa	G ₂₃ 2 000 MPa
G ₁₃	3 880 MPa	G ₁₃ 3 120 MPa

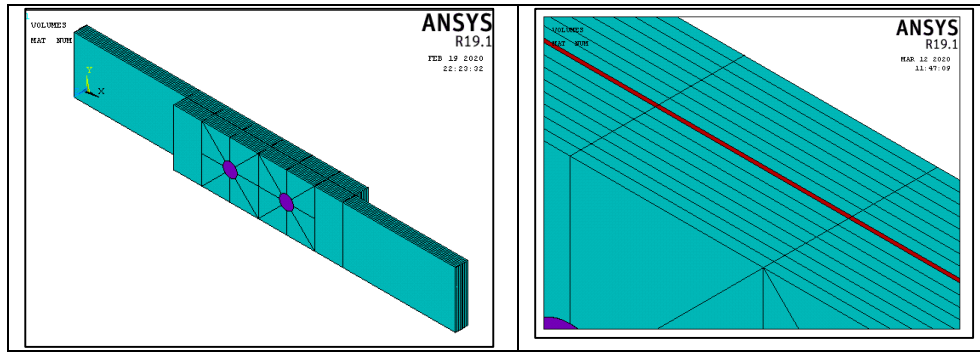
Yapıştırıcıların mekanik özellikleri Çizelge 2 'de verilmiştir.

Çizelge 2. Yapıştırıcı 1 (Liao ve ark., 2013), Yapıştırıcı 2 (Apalak ve ark., 2003) ve Yapıştırıcı 3 mekanik özellikleri (Sayman 2012)

	Yapıştırıcı 1		Yapıştırıcı 2		Yapıştırıcı 3
E (MPa)	670	E (MPa)	3 300	E (MPa)	5 000
ν	0.4	ν	0.3	ν	0.35

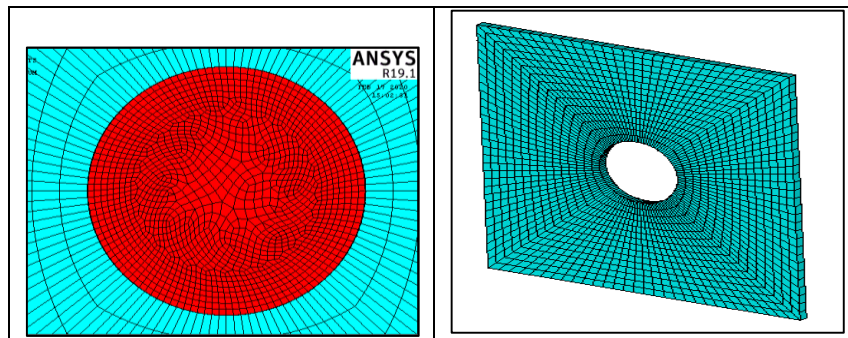
Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Çalışmada ANSYS 19.1 sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. ANSYS sonlu elemanlar yazılımı daha önce yapılan akademik çalışmalarda birçok kez kullanılmış olması ve deneysel sonuçlarla tutarlı sonuçlar elde edilmiş olması sebebiyle tercih edilmiştir. Çalışmada öncelikle problemin katı modeli oluşturulmuştur. Modelde kompozit tabakalar her bir oryantasyon açısı için ayrı ayrı modellenip birleştirilmiştir. Oluşturulan katı model Şekil 3 'te görülmektedir.



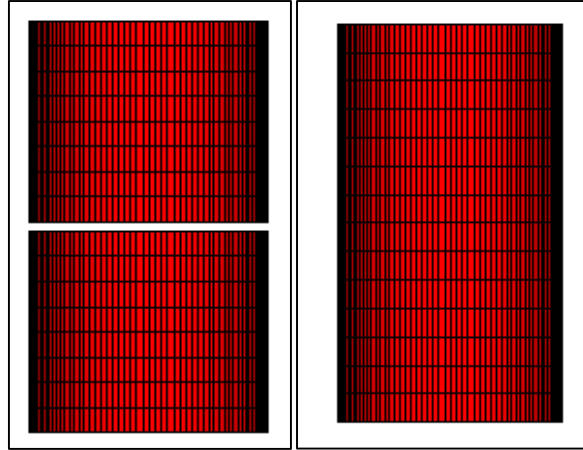
Şekil 3. Tabakalı Kompozit Plakaların Sonlu Elemanlar Modeli

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



Şekil 4. Pim ve Delik Çevresi Mesh Yapısı

Kompozit malzeme yapıştırılmış ve iki adet pimle de sabitlenerek karma bağlantı oluşturulmuştur. Tabakalı kompozit malzeme için eleman tipi SOLID185, yapıştırıcı ve pim için SOLID186 eleman tipi seçilmiştir. Kontak elemanı olarak pim yüzeylerine TARGE170 delik yüzeylerine ise CONTA174 eleman tipi kullanılmıştır.



Şekil 5. TARGE 170 ve CONTA 174 eleman atanan yüzeyler

Sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması sırasında, yapıştırıcı, delik ve pim bölgeleri dahil olmak üzere modelin tamamında düzgün dörtgen elemanlardan oluşan bir ağ yapısı oluşturulması sağlanmıştır. Bu plakaların ayrı ayrı dörtgen elemanlara bölünmesi ile sağlanmıştır. Ağ yapısı oluşturulması işlemi sonucunda model üzerinde 358140 eleman ve 499037 düğüm noktası meydana gelmiştir. Oluşturulan ağ yapısı ve detay resimleri Şekil 4 'te gösterilmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, yapıştırıcı ve delik çevrelerine yaklaşıldıkça eleman sayısı artmaktadır. Eleman sayısının artırılmasının sebebi bu bölgelerde daha hassas bir çözümlene yapılabilmesine olanak sağlamasıdır.

Analizde alt plaka ucundan X, Y ve Z yönlerinde sınır koşulu uygulanmıştır. Pim alt ve üst yüzeylerine Z yönünde sınır koşulu verilmiştir. Üst plakanın çekme kuvveti uygulanan yüzeyine Y ve Z yönünde sınır koşulu uygulanmıştır. Üst plakanın serbest ucundan tüm modellerde 2 kN 'luk yük uygulanmış ve analiz çalıştırılmıştır.

Analizlerde alt ve üst tabaka malzemesi yapıştırıcı türü ve oryantasyon açılarına göre Çizelge 3 'teki varyasyonlar modellenmiş ve sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.

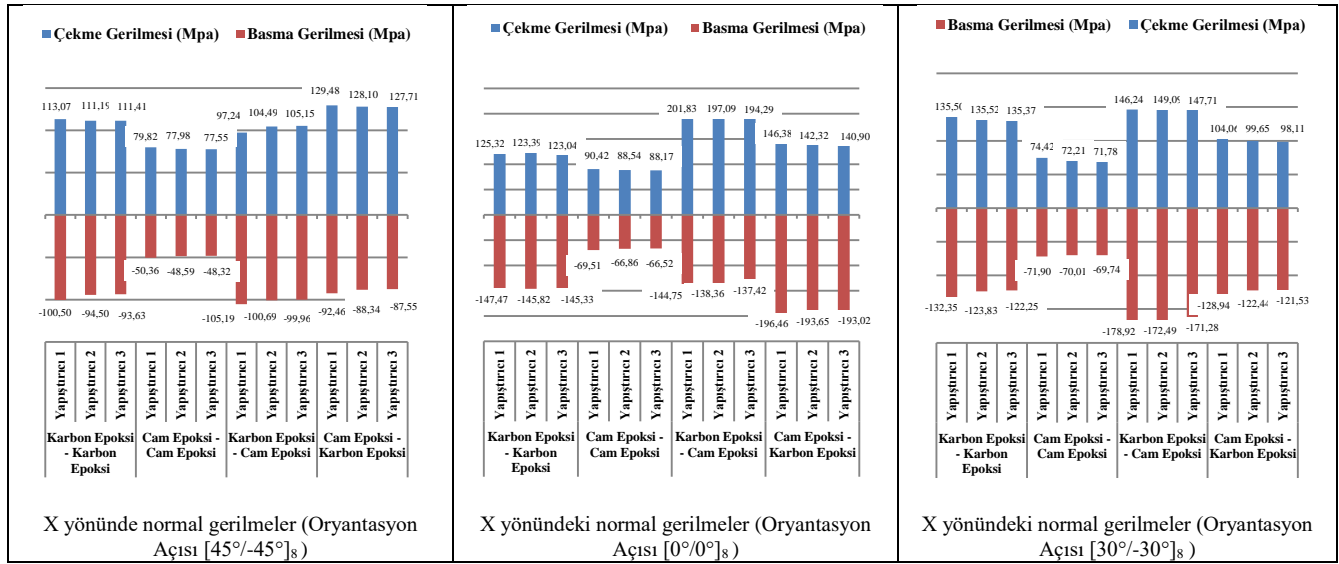
Çizelge 3. Kullanılacak malzeme ve yapıştırıcı kombinasyonları

Yapıştırıcı Türü	Alt Plaka	Üst Plaka	Model adı	Oryantasyon Açılı	Model adı	Oryantasyon Açılı	Model adı	Oryantasyon Açılı
Yapıştırıcı 1			Model 1		Model 13		Model 25	
Yapıştırıcı 2	Karbon	Karbon	Model 2		Model 14		Model 26	
Yapıştırıcı 3	Epoksi	Epoksi	Model 3		Model 15		Model 27	
Yapıştırıcı 1			Model 4		Model 16		Model 28	
Yapıştırıcı 2	Cam	Cam	Model 5		Model 17		Model 29	
Yapıştırıcı 3	Epoksi	Epoksi	Model 6		Model 18		Model 30	
Yapıştırıcı 1			Model 7	45°/-45°	Model 19	0°/0°	Model 31	30°/-30°
Yapıştırıcı 2	Karbon	Cam	Model 8		Model 20		Model 32	
Yapıştırıcı 3	Epoksi	Epoksi	Model 9		Model 21		Model 33	
Yapıştırıcı 1			Model 10		Model 22		Model 34	
Yapıştırıcı 2	Cam	Karbon	Model 11		Model 23		Model 35	
Yapıştırıcı 3	Epoksi	Epoksi	Model 12		Model 24		Model 36	

BULGULAR VE TARTIŞMA

Oluşturulan modellerin analizi sonucu modelin tamamında çekme yönü olan X yönünde ve Von Mises gerilme değerleri incelenmiştir.

Şekil 6 'da X yönünde oluşan normal gerilmeler grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 6. Çekme yükü uygulanması sonucu bağlantının tamamı için x yönünde maksimum normal gerilmelerin grafiksel gösterimi

Oluşturulan 36 model arasında modelin tamamındaki X yönündeki normal gerilme değerleri incelendiğinde her oryantasyon açısı için minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri Çizelge 4, 5 ve 6 'da verilmiştir.

Çizelge 4. X yönündeki [45°/-45°]₈ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme Değeri
Minimum Çekme		Cam epoksi	Cam epoksi	3	77.55 MPa
Maksimum Çekme	[45°/-45°] ₈	Cam epoksi	Karbon epoksi	1	129.48 MPa
Minimum Basma		Cam epoksi	Cam epoksi	3	48.32 MPa
Maksimum Basma		Karbon epoksi	Cam epoksi	1	105.19 MPa

Çizelge 5. X yönündeki [0°/0°]₈ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri

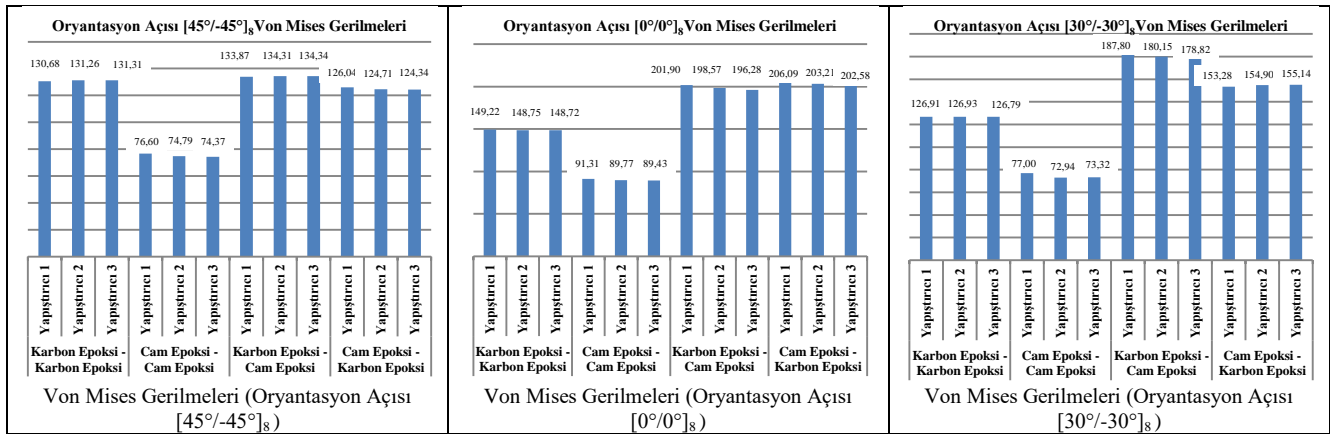
	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme Değeri
Minimum Çekme		Cam epoksi	Cam epoksi	3	88.17 MPa
Maksimum Çekme	[0°/0°] ₈	Karbon epoksi	Cam epoksi	1	201.83 MPa
Minimum Basma		Cam epoksi	Cam epoksi	3	66.52 MPa
Maksimum Basma		Cam epoksi	Karbon epoksi	1	196.46 MPa

Çizelge 6. X yönündeki $[30^\circ/-30^\circ]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri

Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme Değeri
Minimum Çekme	Cam epoksi	Cam epoksi	3	71.78 MPa
Maksimum Çekme	Karbon epoksi	Cam epoksi	2	149.09 MPa
Minimum Basma	Cam epoksi	Cam epoksi	3	69.74 MPa
Maksimum Basma	Karbon epoksi	Cam epoksi	1	178.92 MPa

X yönündeki maksimum çekme gerilmelerine göre değerlendirme yapılırsa en yüksekten düşüğe doğru sıralandığında $[0^\circ / 0^\circ]_8$ için 201.83 MPa , $[30^\circ / -30^\circ]_8$ için 149.09 MPa ve $[45^\circ / -45^\circ]_8$ için 129.48 MPa şeklinde bir dağılım elde edilmiştir. Basma gerilmelerinde de 196.46 MPa, 178.92 MPa ve 105.19 MPa ile yine aynı dizilim sırasında görülmüştür.

Oluşturulan modellerin analizi sonucu Von Mises gerilmeleri çıkarılmış ve Şekil 8 'de grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 8. Çekme yükü uygulanması sonucu bağlantının tamamı için Von Mises gerilmelerin grafiksel gösterimi

Oluşturulan 36 model arasında modelin tamamındaki Von Mises gerilme değerleri incelendiğinde her oryantasyon açısı için minimum ve maksimum gerilmeler Çizelge 7 'de verilmiştir.

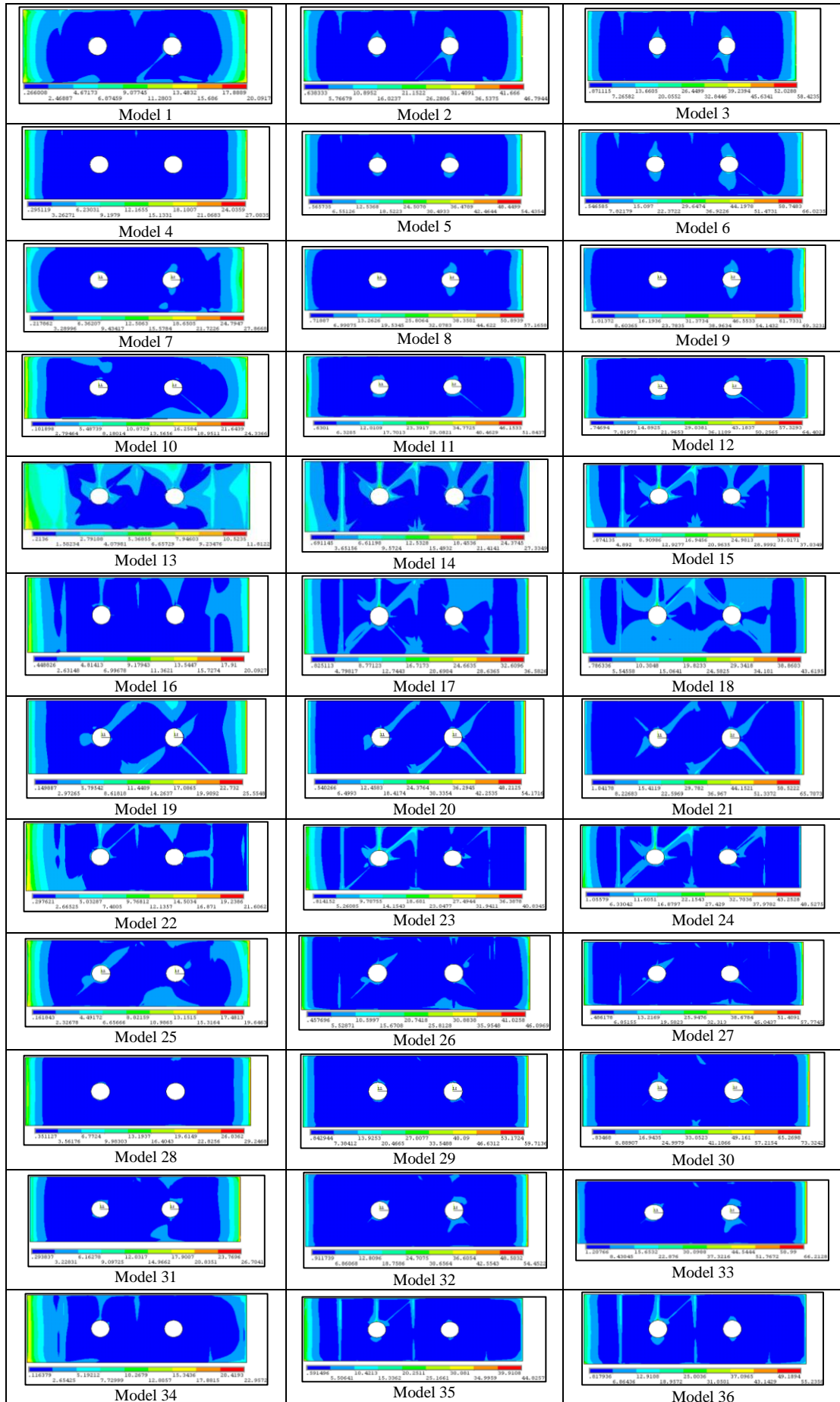
Çizelge 7. Minimum ve maksimum Von Mises gerilmeleri

Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme Değeri
Minimum Von Mises	Cam Epoksi	Cam Epoksi	3	74.37 MPa
Maksimum Von Mises	Karbon Epoksi	Cam Epoksi	3	134.34 MPa
Minimum Von Mises	Cam Epoksi	Cam Epoksi	3	89.43 MPa
Maksimum Von Mises	Cam Epoksi	Karbon Epoksi	1	206.09 MPa
Minimum Von Mises	Cam Epoksi	Cam Epoksi	2	72.94 MPa
Maksimum Von Mises	Karbon Epoksi	Cam Epoksi	1	187.80 MPa

Maksimum Von Mises gerilmelerine göre değerlendirme yapılırsa en yüksekten düşüğe doğru sıralandığında X yönündeki gerilmelere benzer şekilde $[0^\circ / 0^\circ]_8$ için 206.09 MPa, $[30^\circ / -30^\circ]_8$ için 187.80 MPa ve $[45^\circ / -45^\circ]_8$ için 134.34 MPa şeklinde bir dağılım elde edilmiştir.

Çekme Yükü Sonucu Yapıştırıcı Tabakasındaki Bulgular

Oluşturulan modellerin analizi sonucu yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri çıkarılmış ve Şekil 9 'da gerilme dağılımlarını gösteren resimler halinde verilmiştir.



Şekil 9. Yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri

Yapıştırıcıdaki Von Mises gerilme değerleri Şekil 9 'da soldan sağa doğru aynı varyasyonun yapıştırıcının Elastisite modülü artışına göre dizilmiştir. Yapıştırıcıdaki Elastisite modülü artışı ile Von Mises gerilmeleri de artmıştır.

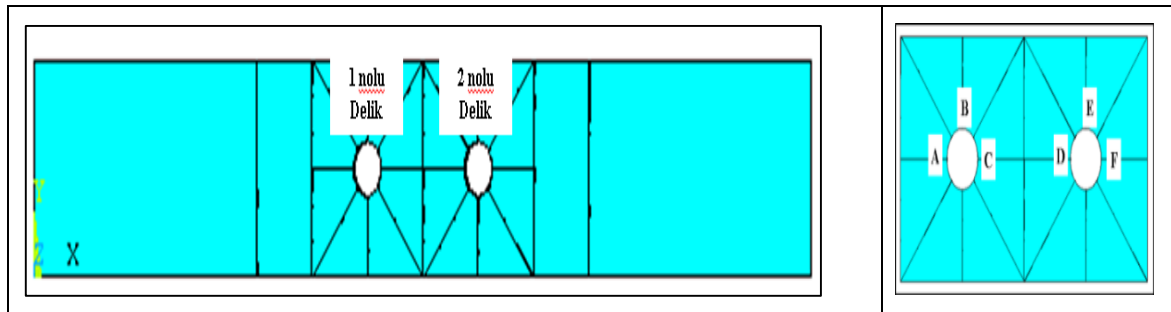
Yapıştırıcı tabakasındaki Von Mises gerilme değerleri incelendiğinde, minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri Çizelge 8 'de verilmiştir.

Çizelge 8. Yapıştırıcıda oluşan minimum ve maksimum Von Mises gerilmeleri

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme Değeri
Minimum Von Mises	[45°/-45°] _s	Karbon epoksi	Karbon epoksi	1	20.09 MPa
Maksimum Von Mises		Karbon epoksi	Cam epoksi	3	69.32 MPa
Minimum Von Mises	[0° / 0°] _s	Karbon epoksi	Karbon epoksi	1	11.81 MPa
Maksimum Von Mises		Karbon epoksi	Cam epoksi	3	65.71 MPa
Minimum Von Mises	[30°/-30°] _s	Karbon epoksi	Karbon epoksi	1	19.65 MPa
Maksimum Von Mises		Cam epoksi	Cam epoksi	3	73.32 MPa

Çekme yükü sonucu bağlantıda delik bölgeleri için elde edilen bulgular

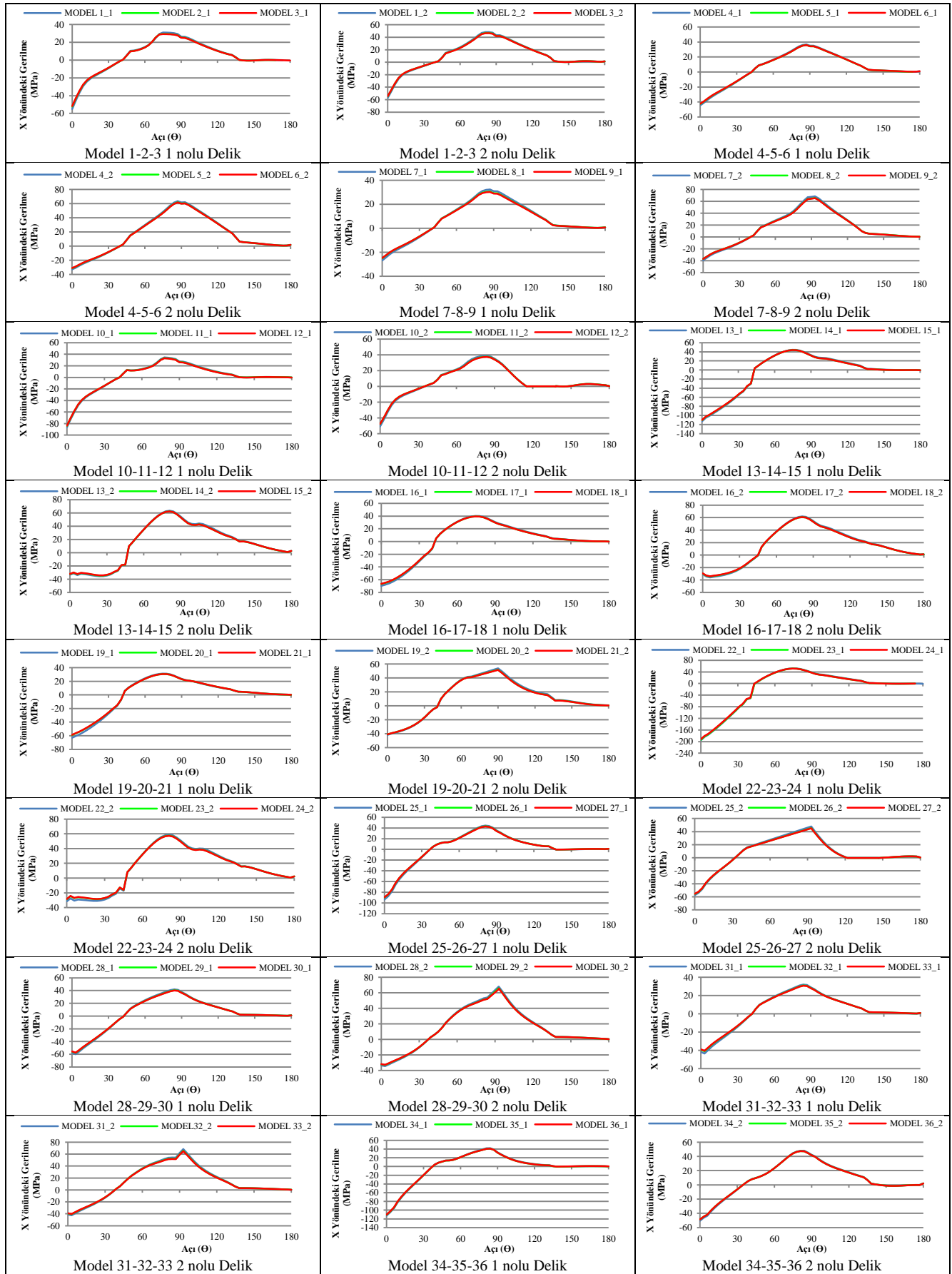
Şekil 10 'da delik bölgeleri için gerilmelerin tanımlandığı doğrultular verilmiştir. Gerilmeler Şekil 10 'de gösterilen A-C ve D-F doğrultuları tanımlanarak hesaplanmıştır. Bu doğrultular boyunca dönme açısı A ve D noktalarında $\theta = 0^\circ$, B ve E noktalarında $\theta = 90^\circ$, C ve F noktalarında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



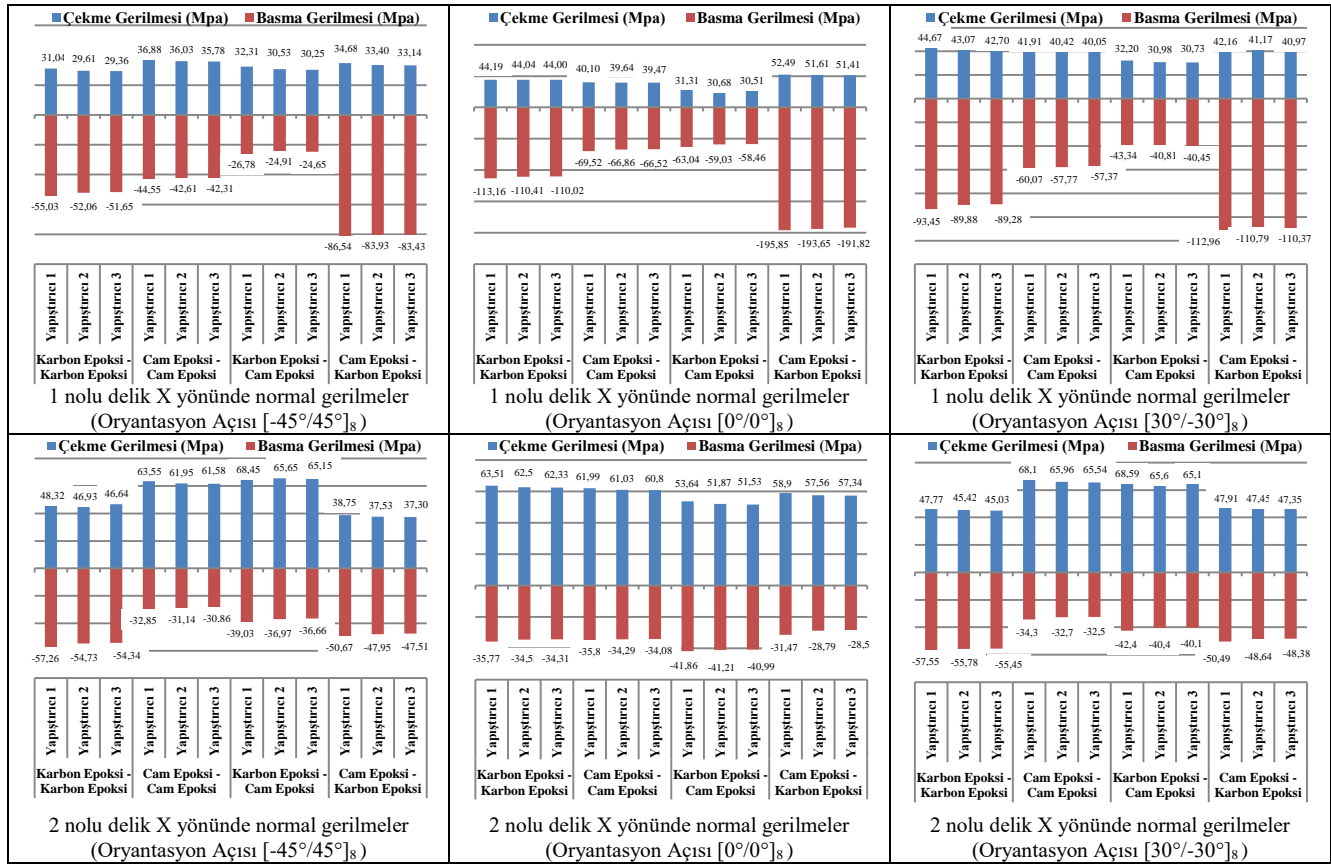
Şekil 10. Deliklerin numaralandırılması ve gerilmelerin tanımlandığı doğrultular

Şekil 11 'deki gerilme değerleri incelendiğinde Elastisite modülü 670 MPa olan yapıştırıcı ile 3300 MPa olan yapıştırıcı arasında delik çevrelerinde oluşan gerilmeler artış göstermiş 3300 MPa ile 5000 MPa yapıştırıcılar arasında fark ihmal edilebilir seviyede görülmüştür. Model 1, model 2 ve model 3 için değerlendirilecek olursa 1 nolu delikte silindirik koordinatlarda maksimum basma gerilmeleri sırasıyla 55.03 MPa, 52.06 MPa ve 51.65 MPa olarak bulunmuştur.

Deliklerde çekme yükü sonucu oluşan çekme ve basma gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri Şekil 12 'de grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 11. Çekme yükü uygulanması sonucu deliklerde A-C ve D-F boyunca silindirik koordinatlarda x yönünde oluşan normal gerilmelerin grafiksel gösterimi



Şekil 12. Çekme yükü uygulanması sonucu deliklerde 1 ve 2 nolu deliklerde A-C ve D-F boyunca silindirik koordinatlarda x yönünde oluşan maksimum ve minimum normal gerilmeler

Oluşturulan 36 model arasında 1 ve 2 nolu delik etrafındaki silindirik koordinatlarda X yönünde normal gerilme değerleri incelendiğinde üst plakanın çekme yüküne maruz kalması sonucu delik kenarlarında özellikle 1 nolu delikte basma yükünün daha etkili olduğu görülmüştür. Bulunan maksimum basma gerilmeleri Çizelge 9 'da verilmiştir.

Çizelge 9. 1 nolu delik etrafındaki silindirik koordinatlarda X yönünde oluşan maksimum basma gerilmeleri

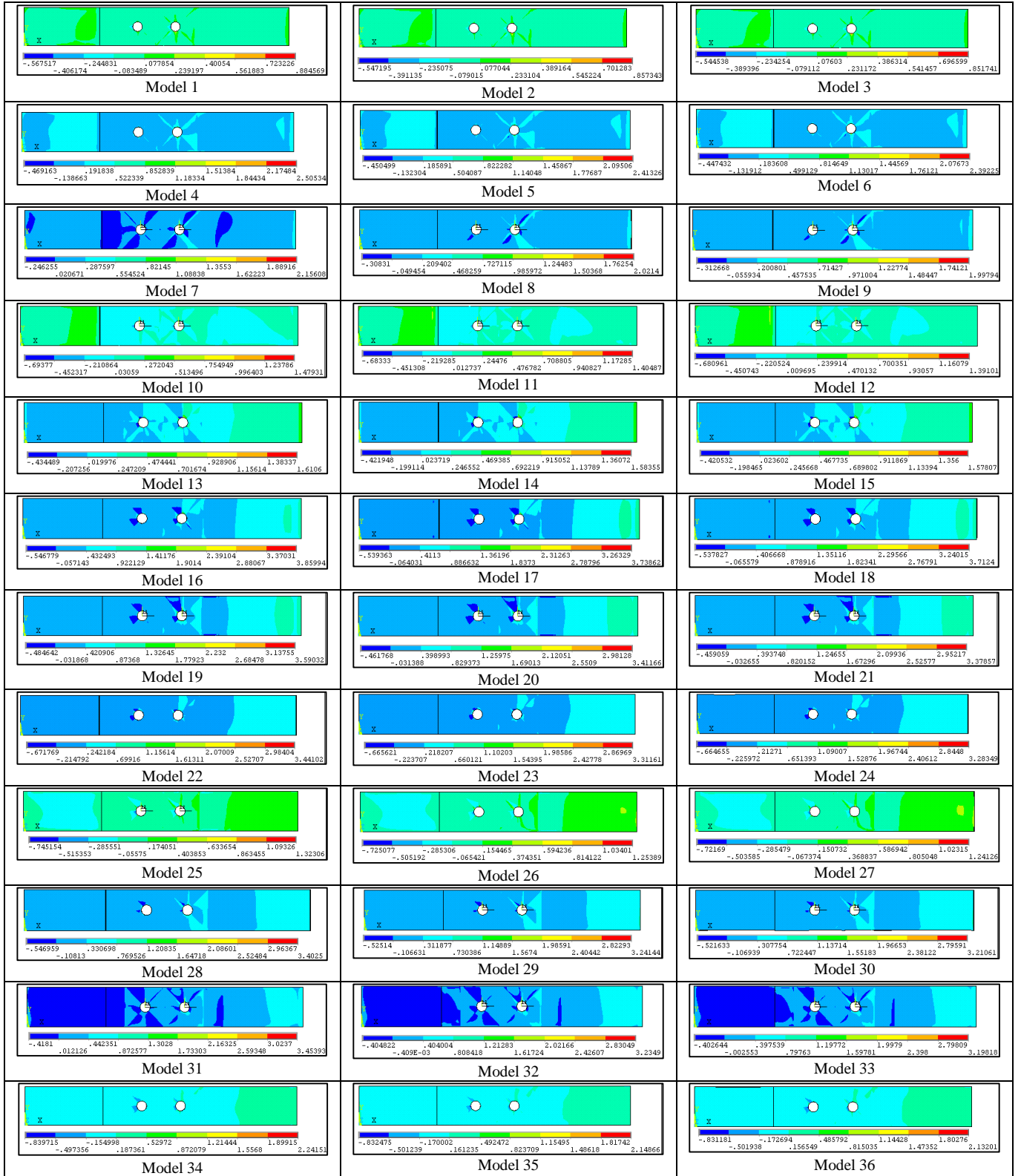
	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme Değeri
Maksimum Basma	[45° / -45°] ₈	Cam epoksi	Karbon epoksi	1	86.54 MPa
Maksimum Basma	[0° / 0°] ₈	Cam epoksi	Karbon epoksi	1	195.85 MPa
Maksimum Basma	[30° / -30°] ₈	Cam epoksi	Karbon epoksi	1	112.96 MPa

1 nolu delik etrafındaki silindirik koordinatlarda X yönünde maksimum basma gerilme değerlerine göre değerlendirme yapılırsa en yüksekte düşüğe doğru sıralandığında [0° / 0°]₈ için 195.85 MPa, [30° / -30°]₈ için 112.96 MPa ve [45° / -45°]₈ için 86.54 MPa şeklinde bir dağılım elde edilmiştir.

Kompozit Plakalarda Tsai-Wu Strength Endeksi

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

Çalışmada delinmiş tabakalı kompozit plaka ve delik çevrelerinde bu hasar kriterine göre değerlendirme yapılmıştır.



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

Tsai Wu hasar kriterine göre değerlendirme yapıldığında ise çekme gerilmesine göre Model 1,2 ve 3 olarak adlandırılan alt plaka karbon epoksi, üst plaka karbon epoksi, yapıştırıcı 1,2 ve 3 oryantasyon açısı $[45^\circ / -45^\circ]_8$ olan modelin Tsai Wu hasar kriteri 1'in altında bulunmuş diğer modellerde 1'in üzerindedir. Basma gerilmesi açısından değerlendirildiğinde ise tüm modellerin delik çevresinde gerilme artışı nedeniyle hasar kriteri 1'in altında bulunmuştur.

Yapıştırıcı Elastisite modülünün artışıyla yapıştırıcıda Von Mises gerilmelerinin de arttığı görülmüştür. Kırkayak (2019) yaptığı çalışmada yapıştırıcıda belli bölgelerde oluşan Von Mises gerilmeleri azaltmak için Elastisite modülü düşük yapıştırıcı kullanmış ve sonuçlarında daha düşük o bölgelerde daha düşük gerilmeler elde etmiştir. Bu sonuçlar uyumludur.

Çalışmada 3 farklı epoksi türü yapıştırıcı ile birleştirilmiş tabakalı kompozit plakalar arasında delik çevresi gerilme değerleri incelendiğinde Elastisite modülü 670 MPa olan yapıştırıcı ile 3300 MPa olan yapıştırıcı arasında delik çevrelerinde oluşan gerilmeler artış göstermiş 3300 MPa ile 5000 MPa yapıştırıcılar arasında fark ihmal edilebilir seviyede görülmüştür.

Delik çevresinde görülen maksimum basma gerilmeleri değerlendirildiğinde en düşük $[45^\circ / -45^\circ]_8$ oryantasyon açısına sahip modellerde en yüksek ise $[0^\circ / 0^\circ]_8$ oryantasyon açısına sahip modellerde bulunmuştur. Genel dağılıma bakıldığında da en yüksekten düşüğe doğru sıralandığında $[0^\circ / 0^\circ]_8$, $[30^\circ / -30^\circ]_8$ ve $[45^\circ / -45^\circ]_8$ şeklinde bir dağılım elde edilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları Karakılıç ve arkadaşlarının (2016) bulduğu sonuçlar ile benzerdir. Özellikle 0° - 45° fiber takviye açıları için gerilme yığılması faktörü düşmüştür.

Tsai Wu hasar kriterine göre değerlendirme yapıldığında ise çekme gerilmesine göre Model 1,2 ve 3 olarak adlandırılan alt plaka karbon epoksi, üst plaka karbon epoksi, yapıştırıcı 1,2 ve 3 oryantasyon açısı $[45^\circ / -45^\circ]_8$ olan modelin Tsai Wu Failure kriteri 1'in altında bulunduğu için bu çekme yükünde güvenli olduğu görülmüştür. Diğer modeller bu yük altında Tsai Wu hasar kriteri 1'in üzerinde bulunduğu için çekme gerilmesi altında hasara uğrayabilir. Aynı modellerin farklı oryantasyon açılarındaki durumlarına bakılacak olursa delik etrafındaki gerilmeler modelin tamamındaki gerilme dağılımlarına benzer şekilde en güvenli modelden en az güvenli modele doğru $[45^\circ / -45^\circ]_8$, $[30^\circ / -30^\circ]_8$ ve $[0^\circ / -0^\circ]_8$ dizilimine göre sıralanabilir. Basma gerilmesi açısından değerlendirildiğinde ise tüm modellerin hasar kriteri 1 'in altında bulunmuştur ve güvenli bölgededir.

SONUÇ

Bu çalışmada 3 farklı epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmış ve aynı zamanda çift pim ile bağlantı yapılmış aynı veya farklı cinsten ve farklı oryantasyon açılara sahip tabakalı kompozit plakalardan oluşan otuz altı farklı modelde meydana gelen gerilme değerleri ve dağılımları incelenmiştir. Çalışmada bağlantı üç boyutlu olarak modellenmiş ve kontak analiz yapılmıştır. Oluşturulan bu modele 2 kN çekme yükü uygulanmış ve tabakalarda ve delik çevrelerinde meydana gelen gerilmeler incelenmiştir. Buna ilave olarak hasar kriterlerinden Tsai-Wu hasar kriterine göre sonuçlar incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Yapıştırılmalı bağlantılarda Yapıştırıcı Elastisite modülündeki artış ile birlikte bir noktaya kadar delik çevrelerinde gerilmeyi azaltmaya etkisi olup bir noktadan sonra etkisi artış oranında artmamaktadır. Bu nedenle yapıştırıcı seçiminde Elastisite modülünün yanında yapıştırıcının diğer özellikleri daha çok önem kazanmaktadır.

Kullanılan kompozit malzemenin fiber oryantasyon açısı 0° 'den 45° 'ye doğru arttıkça delik çevrelerinde oluşan maksimum basma gerilmeleri azalmaktadır.

Tsai Wu hasar indeksine göre değerlendirme yapıldığında alt plaka karbon epoksi üst plaka karbon epoksi ve $[45^\circ / -45^\circ]_8$ dizilimine sahip modellerin bu çekme yükünde hasara karşı en güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Bu da karbon epoksi malzemenin dayanımının yüksek olması ve dizilim açısındaki artışın gerilmeyi düşürmesi nedeni ile beklendiği gibidir.

KAYNAKLAR

- Aldaş K, Şen F, 2011. Karma Bağlantı Uygulanmış Farklı Metal Plakalarda Meydana Gelen Gerilmelerin İncelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8 (2): 1-12
- Alyanak İ, Şen F, 2015. Paralel Çift Pim Uygulanmış ve Yapıştırılmış Karma Bağlantılı Kompozit Plakaların Çekme Yüğü Altında Gerilme Analizi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2: 11-23
- Apalak M K, Aldaş K, Şen F, 2003. Thermal non-linear stresses in an adhesively bonded and laser-spot welded single-lap joint during laser-metal interaction. *Journal of Materials Processing Technology*, 1–19.
- Aydın S, Solmaz M, Turgut A, 2011. Epoksi ve Akrilik Bazlı Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 383-388
- Beylergil B, Cunedioğlu Y, Aktaş A, 2011. Experimental and Numerical Analysis of Single Lap Composite Joints with Inter-adherent Fibers. *Composites: Part B*, 42: 1885-1896
- Callister W D, Retwisch D G, 2015. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği. Nobel Akademik Yayıncılık
- Çitil Ş, Temiz Ş, Özel A, 2012. Çekmeye Maruz Ara Boşluklu Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Analizi. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5 (2): 173-190
- He X, 2010. Effect of Mechanical Properties of Adhesives on Stress Distributions in Structural Bonded Joints. *Proceedings of the World Congress on Engineering London: International Association of Engineers*: 1168-1172
- Karakılıç S, Özbay M, Adin H, 2016. Dairesel delikli kompozit levhalarda gerilme yığılımlarının incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7 (1): 113-128
- Karakuzu R, Taylak N, İçten B M, Aktaş M, 2008. Effects of geometric parameters on failure behavior in laminated composite plates with two parallel pin-loaded holes. *Composites Structures*, 85: 1-8
- Kırkayak L, 2019. Yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımına Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25 (1): 27-33
- Kiral B G, 2010. Effect of the clearance and interference-fit on failure of the pin-loaded composites. *Materials and Design*, 31: 85-93
- Kishore A N, Malhotra S K, Prasad N S, 2009. Failure analysis of multi-pin joints in glass fibre/epoxy composite laminates. *Composite Structures*, 91: 266-277
- Liao L, Huang C, Sawa T, 2013. Effect of adhesive thickness, adhesive type and scarf angle on the mechanical properties of scarf adhesive joints. *International Journal of Solids and Structures*, 50: 4333-4340.
- Naveenraj A, Karthick R, Baskaran P, 2020. Tensile Strength Analysis of Serially Pinned Joints in E-Glass Composite Plates. *Material Today: Proceedings*, 21: 78-82
- Okutan B, Karakuzu R, 2003. The strength of pinned joints in laminated composites. *Composites Science and Technology*, 63: 893-905
- Özel A, Yazıcı B, Akpınar S, Aydın M D, Temiz Ş, 2014. A Study on the Strength of Adhesively Bonded Joints with Different Adherents. *Composites: Part B*, 62: 167-174
- Pakdil M, Şen F, Sayman O, 2009. Damage Development in Bolted Composites with Clearance Subjected to Preload. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 1 (4): 52-66
- Sayman O, 2012. Elasto-plastic stress analysis in an adhesively bonded single-lap joint. *Composites: Part B*, 43: 204-209.
- Şen F, Pakdil M, Sayman O, Benli S, 2008. Experimental failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload. *Materials and Design*, 29: 1159-1169
- Turan K, Kaman M O, Gür M, 2010. Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Fiber Takviye Açısının Hasar Tipine Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (2): 213-220
- Wahab M A, 2014. *The Mechanics of Adhesives in Composite and Metal Joints*. Pennsylvania. DEStech Publications Inc
- Zhou Y, Fei Q, Tao J, 2016. Profile design of loaded pins in composite single lap joints: From circular to non-circular. *Results in Physics*, 6: 471-480.