



Paralel Çift Pim Uygulanmış ve Yapıştırılmış Karma Bağlantılı Kompozit Plakaların Çekme Yükü Altında Gerilme Analizi

İrfan ALYANAK¹, Faruk ŞEN^{2*}

¹ Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray

² Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Teknoloji Fak. Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Muğla

(Alınış Tarihi:4 Ocak 2015 Düzeltme Tarihi:12 Şubat 2015 Kabul Tarihi:24 Şubat 2015)

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, üç boyutlu karma bağlantılı kompozit plakaların çekme yükü altında gerilme analizinin yapılmasıdır. Karma bağlantı iki paralel pim ve yapıştırıcı tabakasının birlikte uygulanması ile meydana getirilmiştir. Yapıştırıcı tabakası epoksi türü bir yapıştırıcıdır. Plakaları meydana getiren kompozit malzeme ise çelik fiberlerle takviye edilmiş alüminyum matrisine sahip metal matris kompozittir. Üç boyutlu modelleme ve sonrasında yapılan gerilme analizleri için ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Dolayısıyla gerilme analizi sonlu elemanlar metodu (FEM) ile gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu olarak modellenen karma bağlantı üzerine probleme ve geometriye uygun olacak şekilde gerekli yapısal sınır şartları uygulanmıştır. Karma bağlantı üzerinde meydana getireceği farklı değerlerdeki gerilmeleri oluşturmak amacıyla, 100, 200, 300, 400 ve 500 N değerlerinde çekme yükleri üç boyutlu modele uygulanmıştır. Karma bağlantıya etki ettirilen beş farklı değerdeki çekme yükleri tesiriyle, kompozit plakalar ve yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan gerilmeler ve dağılımları bulunmuştur. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları, karma bağlantı üzerindeki çekme gerilmelerinin değerleri ve dağılımlarının, etki ettirilen çekme yükü miktarının değişimine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. En düşük çekme gerilme değerleri etki ettirilen en düşük çekme yükü olan 100 N için hesaplanırken, en yüksek çekme gerilmeleri etki ettirilen en yüksek çekme kuvveti olan 500 N için elde edilmiştir

Anahtar Kelimeler: Kompozit plaka; Gerilme analizi; Karma bağlantı; FEM; ANSYS

Stress Analysis of Hybrid Jointed Composite Plates Applied Two Parallel Pins and Adhesive Bonding under Tensile Loading

ABSTRACT

The goal of this study achieves of stress analysis of three dimensional composite plates bonding with hybrid joints under tensile loading. Hybrid joint was designed using two parallel pins and an adhesive layer with together. Adhesive layer was assumed as a kind of epoxy resin. Meanwhile, composite material structured as upper and lower plates was aluminum metal matrix reinforced by steel fibers. ANSYS finite element code was used both three dimensional modeling process and then stress analyses. For that reason stress analysis was performed using finite element method (FEM). Structural boundary conditions which are suitable both problem and geometry were applied on three dimensional hybrid joint model. Different values of tensile loadings as 100, 200, 300, 400 ve 500 N were carried out on three dimensional models, since its different values may occur dissimilar magnitudes of stresses on hybrid joint model. Stress distributions and their values on both composite plates and adhesive layer were obtained with these five different applied tensile loadings on hybrid joint. Results of three dimensional finite element analysis point out that both distributions and magnitudes of stresses were changed by changing applied tensile loadings. The lowest tensile stresses were calculated for the lowest tensile loading as 100 N, while the uppermost tensile stresses were computed for the highest tensile loading as 500 N

Keywords: Composite plate; Stress analysis; Hybrid Joint; FEM; ANSYS

* Sorumlu yazar : faruksen@mu.edu.tr (F Şen)

Tel : (252) 2115122

1. Giriş

Günümüzde metaller gibi klasik malzemelerin birçok özelliği gelişen teknolojinin ihtiyaçları için yeterli olmayınca, daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimine başlanmasıyla bu konuda hızlı bir gelişme sürecine girilmiştir. Kompozit malzemeler maliyetlerinin düşürülmesi, verimliliğinin artırılmasıyla taşımacılık, inşaat malzemeleri, havacılık, uzay ve savunma sanayi vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. [1]. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif tasarımlarda kullanımında büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır [2].

Endüstride yapıştırıcıların kullanılması yeni olmakla birlikte, meydana gelen fiziksel ve kimyasal gelişmeler sonucunda gün geçtikçe önemi artmaktadır. Günümüzde çeşitli endüstri kuruluşlarında yapıştırıcılar tercih edilmektedir. Gün geçtikçe dayanım ve uzama kabiliyeti artarak yorulma dayanımları da iyileştirilmiştir [3]. Malzemelerin yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi, mekanik bağlantı elemanları kullanılmasına kıyasla önemli avantajlar sağlar. Yapıştırıcı yük ve gerilimi tüm birleşim yüzeyine yayarak statik ve dinamik yüklerin düzgün dağılmasını sağlar, gerilmenin belli noktalarda yoğunlaşmasını engeller. Dolayısıyla yapıştırıcı ile gerçekleştirilmiş bir bağlantı, bükülme ve titreşime, mekanik yöntemle yapılan bir bağlantıdan daha dayanıklıdır [4]. Genel olarak yapıştırıcı bağlantıların mukavemeti; birleşen parçaların büyüklüğüne, kalınlığına, geometrisine, elastik modülüne, yapıştırıcının kayma modülüne, bindirme uzunluğuna, yapıştırılacak yüzeylerin hazırlığına ve yapıştırma bağlantılarının maruz kalacağı şartlara bağlıdır [5].

Yapıştırıcı veya pimli tek tesirli bindirme bağlantılarında nümerik çözümler için sonlu elemanlar metodundan (FEM) yararlanılmaktadır. Çünkü yapısal, katı ve akışkanlar mekaniği ile ilgili problemlerin analizlerinin gerçekleştirilmesinde, FEM yaklaşık olarak son kırk yıldır çok geniş bir uygulama alanı bulan önemli bir metod haline gelmiştir [6].

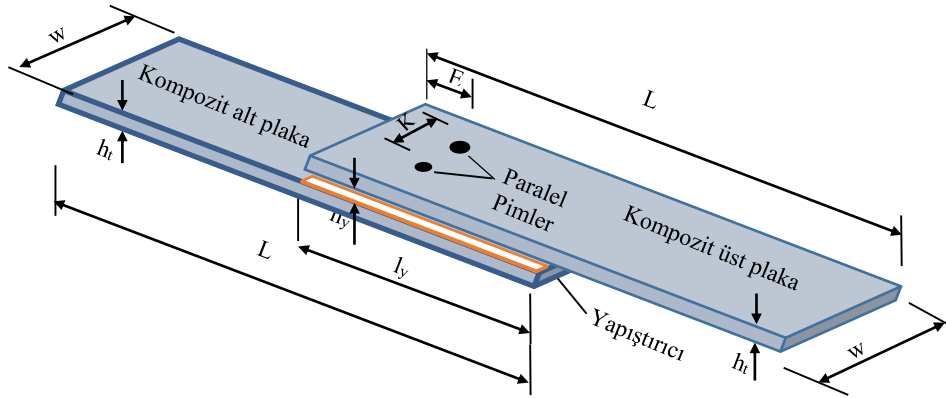
Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların analitik analizinin ilk çalışmaları Volkersen [7] tarafından yapılmıştır. Volkersen çalışmasında, tek bindirme bağlantısında yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımını, yapıştırılan iki malzemenin çok direngen olduğunu ve çekme yükü altında deforme olduğunu, yüklemeye dolay eğilmediğini kabul ederek açıklamıştır. Kaya [8] sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çekme kuvveti altında tek ve çift yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirmelerde gerilme analizini araştırmıştır. Model statik olarak ele alınmış ve daha sonra çalıştığı dinamik çalışmaların temelini oluşturmuştur.

Ceylan [9] yaptığı çalışmada, değişik yüklemelere maruz, fiber takviyeli kompozit malzemelerin, cıvata bağlantılı, yapıştırma bağlantılı ve hem cıvatalı hem de yapıştırılmalı bindirme bağlantılarındaki gerilme durumları, yapıştırıcı cinsi ve kalınlığı değiştirilerek sonlu elemanlar metodu kullanarak nümerik çözümler oluşturmuştur. Çitil [10] tarafından yapılan çalışmada, özellikle uçak ve otomotiv sektöründe gerek parçaların birleştirilmesinde ve gerekse hasara uğramış parçaların tamirinde kullanılan çift takviyeli yapıştırma bağlantısının gerilme analizi sonlu eleman modeli kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlarda yapıştırılan malzemenin alın altına yapıştırılmasının, parça ve kapak kalınlığının ve bindirme uzunluğunun hasar yükü ve gerilme dağılımı üzerine önemli etkileri olduğu görülmüştür. Şen ve Aldaş [11], çift örtü kullanarak yapıştırılmış metal levhalarda meydana gelen ısı gerilmelerin araştırıldığı çalışmada, sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Apalak ve ark. [12], yapıştırma ve nokta kaynağını kombine ederek oluşturdukları karma bağlantılarda sıcaklık dağılımı ve sıcaklık tesiriyle meydana gelen ısı gerilmeleri bulmuşlardır. Sıcaklık dağılımını, geliştirdikleri Fortran programını kullanarak, ısı gerilmeleri ise ANSYS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak bulmuşlardır. Aldaş ve Şen [13], (2012) yaptıkları çalışmada, tek pim bağlantısı ve yapıştırıcı tabakasının birlikte kullanılmasıyla oluşturmuş oldukları karma bağlantıda ısı gerilme analizini gerçekleştirmişlerdir. Çözüm için sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılmıştır.

Bu çalışmada, metal-matrisli iki kompozit plakaya iki paralel pim ve epoksi yapıştırıcı tabakası uygulayarak bir karma bağlantı oluşturulmuştur. Bu karma bağlantı çekme yüküne maruz bırakılmış ve çekme yükü tesiri ile plakalarda ve yapıştırıcı tabakasında meydana gelen gerilmeler elde edilmiştir. Modelleme ve çözümler üç boyutlu olarak yapılmıştır.

2. Karma bağlantı problemi

Üç boyutlu olarak modellenen karma bağlantı Şekil 1’de şematik olarak çizilmiştir. Bu çizimden açıkça görüldüğü gibi metal matris kompozit plakalar arasında bir epoksi yapıştırıcı tabakası oluşturulmuştur. Yapıştırıcı bağlantısına ek olarak iki adet birbirine paralel pim kullanılarak bir karma bağlantı elde edilmiştir. Şekil 1’de şematik olarak gösterilen karma bağlantının üç boyutlu modellenmesinde, $L=120$ mm uzunluk, $w=30$ mm genişlik ve $h=4$ mm kalınlığa sahip plakalar kullanılmıştır. Paralel pimlerin her birinin çapı $D_1=D_2=5$ mm, yapıştırıcı tabakasının bindirme uzunluğu $l_y=60$ mm, kalınlığı $h_y = 0,2$ mm, üst kompozit plakanın serbest ucunun paralel pimlerin merkezine uzaklığı $E=30$ mm, paralel pimlerin ikisinin merkezleri arasındaki mesafe $K=15$ mm’dir [14].



Şekil 1. Paralel çift pimli-yapıştırıcılı karma bağlantı

Üç boyutlu modelleme aşamasında alt ve üst plaka olarak modellenen çelik tellerle takviye edilmiş alüminyum metal matris kompozit malzemeye ait mekanik özellikler Çizelge 1’de listelenmiştir [15]. Bu kompozit malzemenin üretimi ve mekanik özellikleri deneysel olarak Sayman [15] tarafından elde edilmiştir. Bağlantıda kullanılan yapıştırıcının epoksi türü bir yapıştırıcı olduğu kabul edilmiş ve bu yapıştırıcının mekanik özellikleri Çizelge 2’de listelenmiştir [12]. Karma bağlantının modellenmesi ve gerilme analizinin gerçekleştirilmesinde günümüzde farklı alanlarda ve değişik problemlerin çözümünde sıklıkla tercih edilen ANSYS 10.0 klasik [16] sonlu elemanlar programından faydalanılmıştır.

Çizelge 1. Alüminyum metal matrisli kompozitin malzeme özellikleri [15]

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	α_1 ($1/^\circ\text{C}$)	α_2 ($1/^\circ\text{C}$)
85000	74000	30000	0,2	$18.5 \cdot 10^{-6}$	21.10^{-6}

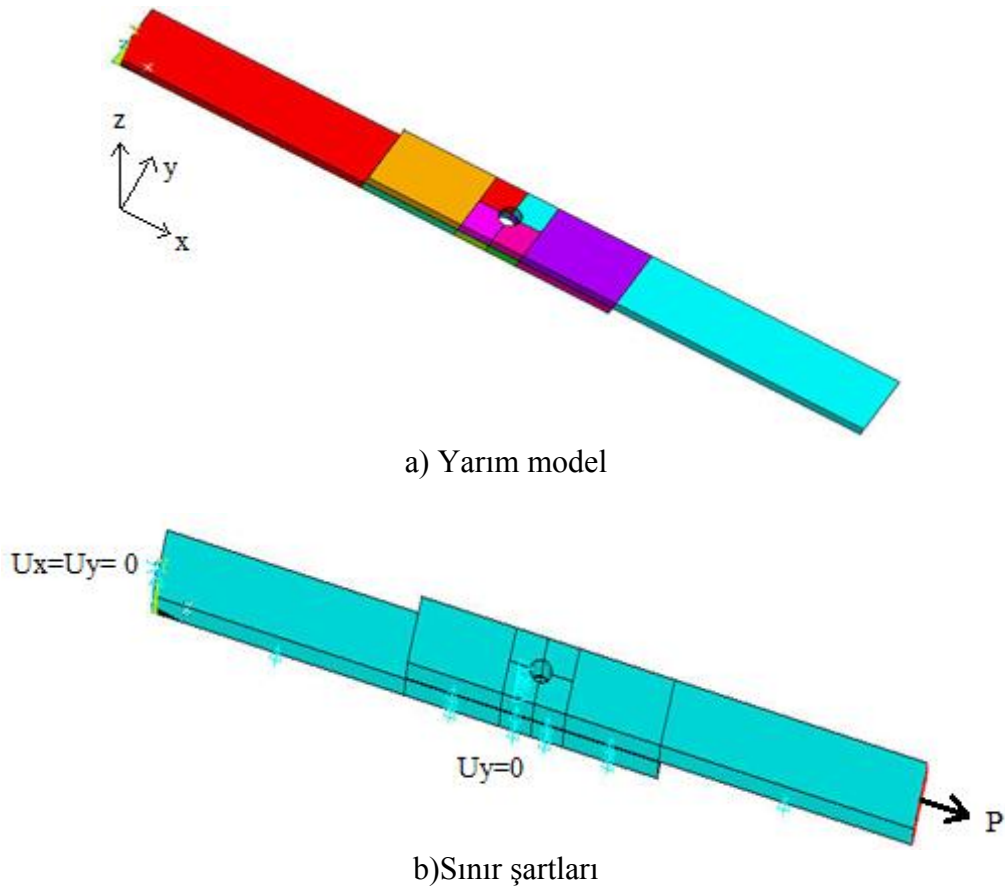
Analiz sürecinde öncelikli olarak epoksi ile yapıştırılmış ve paralel çift pim uygulanmış karma bağlantının üç boyutlu katı modeli çizilmiştir. Bağlantı çift paralel pimlidir ve y-eksenine göre simetriktir. Dolayısıyla, Şekil 2.a’da görüldüğü şekilde simetri ekseninden ayrılmış olarak yarım model elde edilmesi yeterli olmuştur. Simetri sınır şartı olarak bağlantının simetri yüzey alanına uygulanmıştır ($u_y=0$). Üç boyutlu katı modelin oluşturulmasından sonra, bu yarım model üzerine uygun sınır şartları uygulanmıştır. Sınır şartlarının uygulanması Şekil 2.b’de gösterilmektedir. Kısaca, alt plakanın serbest

ucu ankastre hale getirilmiş ve $\frac{1}{2}$ model oluşturulduğundan simetri sınır şartı simetri eksenini boyunca tüm yüzeylere uygulanmıştır ($U_y=0$). Pim deliğine pimin temas ettiği yüzeyde pim sınır şartı ($U_x=0$) uygulanmıştır. Çözümde, düzlem gerilme durumu dikkate alınmıştır.

Çizelge 2. Epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri [12]

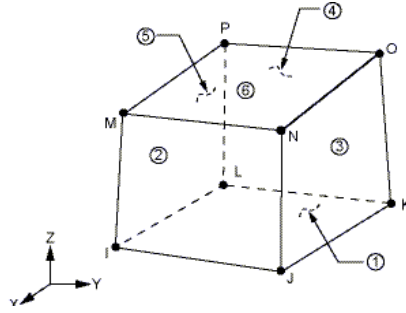
E (MPa)	ν	α ($1/^\circ\text{C}$)	ρ (kg/m^3)
3300	0.30	43.3	1264

Katı modelin oluşturulması ve sınır şartlarının uygulanmasından sonra modelin sonlu elemanlara bölme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için eleman tipi olarak Şekil 3'te çizilen SOLID 185 eleman tipi tercih edilmiştir [16].

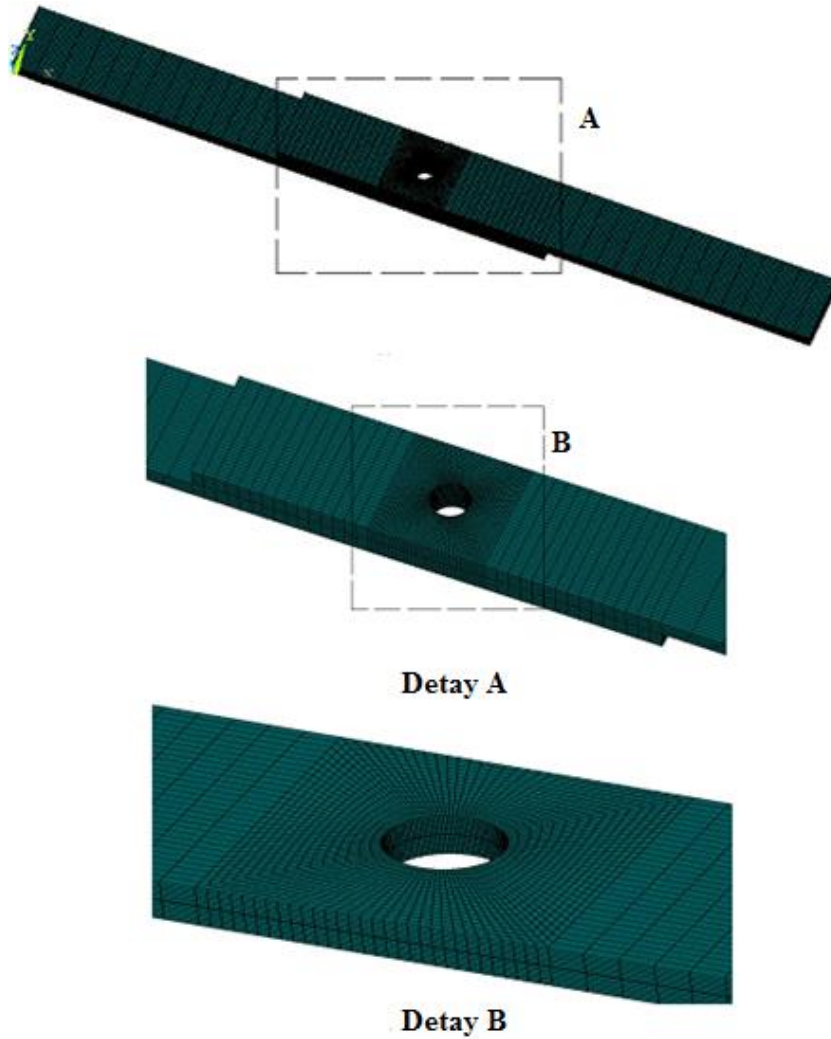


Şekil 2. Üç boyutlu katı model

Uygun eleman tipinin seçiminden sonra üç boyutlu karma bağlantı modeli üzerinde sonlu elemanlar ağı yapılandırılmıştır. Modelin sonlu elemanlara bölünmüş hali Şekil 4'te gösterilmiştir. Yarım modelin sonlu elemanlara bölme işlemi sonucunda, model üzerinde 10800 eleman ve 14250 düğüm noktası oluşturulmuştur. Son olarak karma bağlantıya farklı değerlerde sadece çekme yükleri etki ettirilmiştir. Uygulanan bu çekme yüklerinin etkisiyle üç boyutlu karma bağlantı üzerinde çekme gerilmelerinin oluşması sağlanmıştır. Uygulanan çekme yükü değerleri sırasıyla 100, 200, 300, 400 ve 500 N'dur.



Şekil 3. SOLID 185 eleman tipi [16]



Şekil 4. Modelin sonlu elemanlar ağı

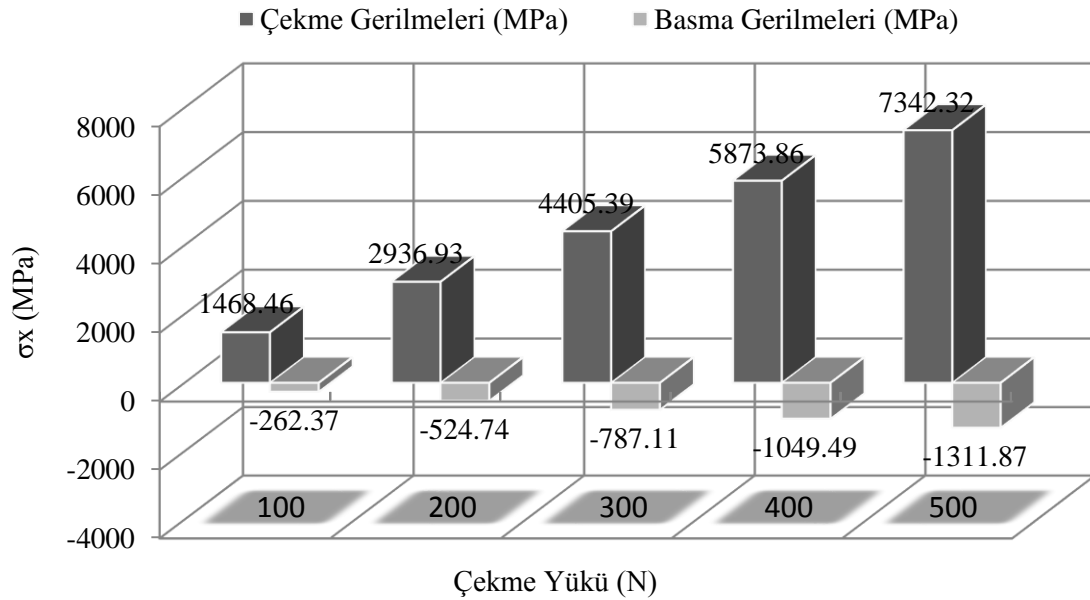
3. Analiz Bulguları

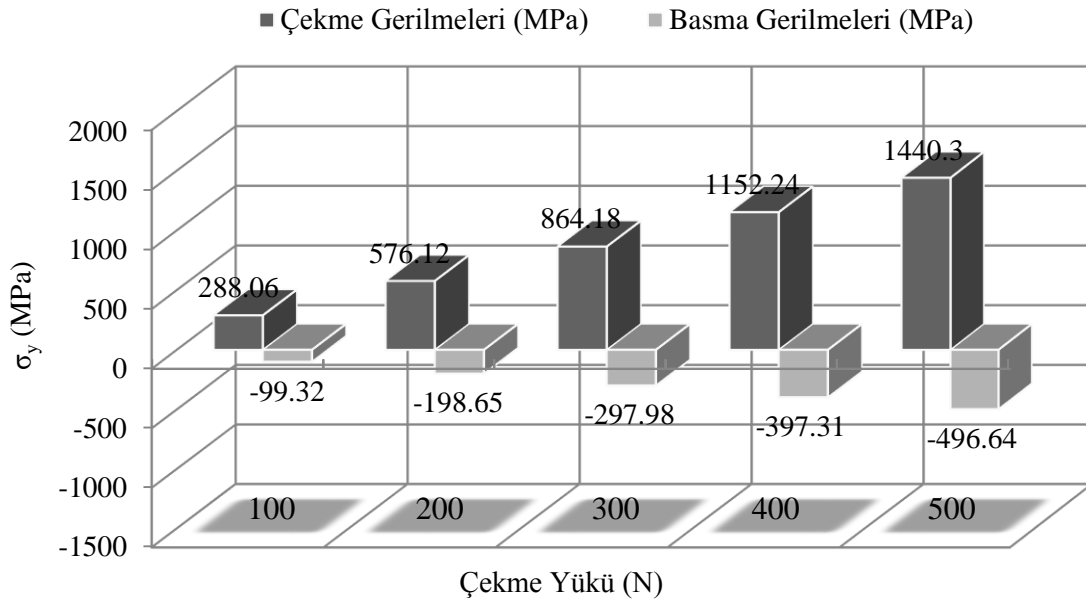
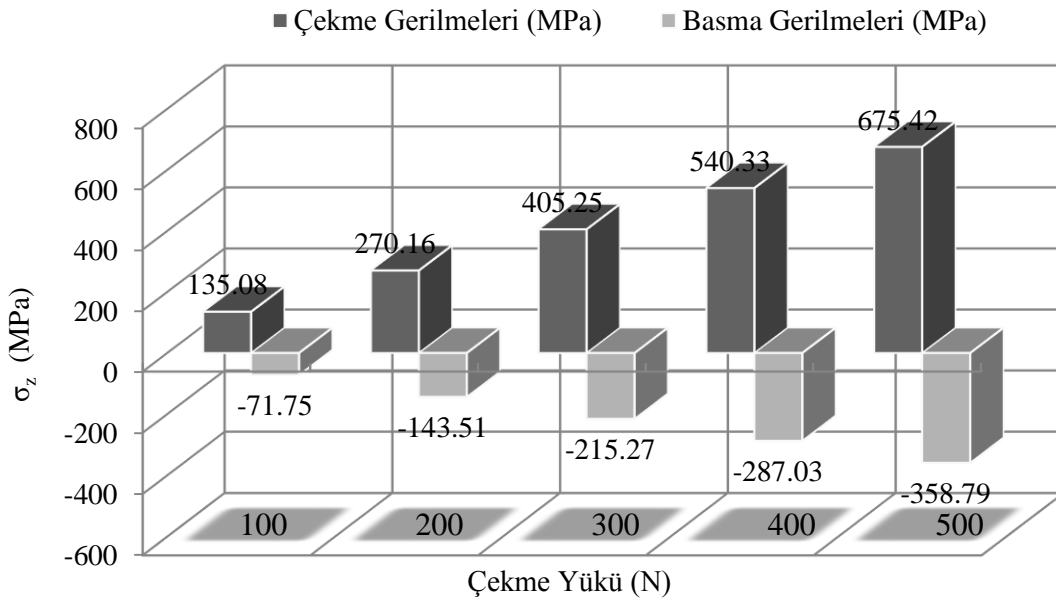
Uygulanan her bir çekme yükü için yapıştırılmış ve paralel çift pim bağlantısı uygulanmış karma bağlantıdan elde edilen normal gerilmelerin maksimum değerleri Çizelge 3’te listelenmiştir. Üç boyutlu karma bağlantıya etki ettirilen çekme yükü etkisiyle karma bağlantı üzerinde oluşan normal çekme gerilmelerin maksimum değerleri, σ_x , σ_y ve σ_z şeklinde sırasıyla Şekil 5, 6 ve 7’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3. Uygulanan çekme yüklerinin tesiriyle meydana gelen normal gerilmeler

Çekme Yüğü (N)	Gerilme Formu	Normal gerilmeler (MPa)		
		σ_x	σ_y	σ_z
100	Çekme	1468,46	288,06	135,08
	Basma	-262,37	-99,32	-71,75
200	Çekme	2936,93	576,12	270,16
	Basma	-524,74	-198,65	-143,51
300	Çekme	4405,39	864,18	405,25
	Basma	-787,11	-297,98	-215,27
400	Çekme	5873,86	1152,24	540,33
	Basma	-1049,49	-397,31	-287,03
500	Çekme	7342,32	1440,30	675,42
	Basma	-1311,87	-496,64	-358,79

Elde edilen gerilmeler incelendiğinde, çekme gerilmelerin basma ve çekme şeklinde değişiklikler gösterdiği gözlenmiştir. Çizelge ve şekillerden görüldüğü gibi çekme normal gerilmelerin mutlak değer olarak maksimum değerleri, çekme yükü artışına bağlı olarak artış göstermektedir. Bu nedenle, karma bağlantı için elde edilen en düşük normal gerilmeler uygulanan 100 N çekme yükü için elde edilirken, en yüksek değerli normal gerilmeler 500 N çekme yükü altında bulunmuştur. Farklı değerlerdeki yüklemenin, gerilmeler üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla 5 farklı çekme yükü uygulanmıştır.

**Şekil 5.** σ_x

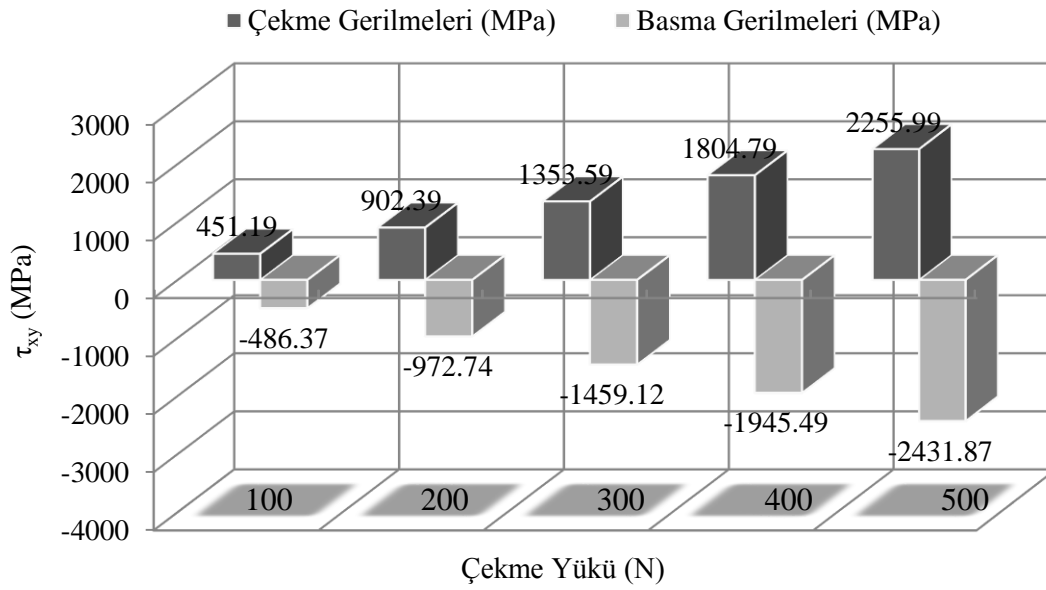
Şekil 6. σ_y Şekil 7. σ_z

Çekme yükü artışına bağlı olarak, normal gerilmelerde meydana gelen artış grafiklerde açıkça görülebilmektedir. σ_x çekme ve basma gerilmelerinin σ_y ve σ_z çekme ve basma gerilmelerinden çok daha büyük değerlerde olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni karma bağlantıya uygulanan çekme yükünün x-yönünde etki ediyor olmasıdır. 500 N çekme yükü uygulandığında en yüksek değerli çekme gerilmesinin değeri 7342,32 MPa ve mutlak değer olarak en yüksek basma gerilmesi değeri ise -1311,87 MPa ve x-yönü için elde edilmiştir. Ayrıca en düşük çekme ve basma gerilmeleri z-yönünde ve 100 N'luk çekme yükü altında sırası ile 135,08 MPa ve -71,75 MPa olarak bulunmuştur.

Normal gerilmelerde olduğu gibi, farklı çekme yükleri uygulandığında üç boyutlu karma bağlantı üzerinde elde edilen kayma gerilmelerinin (τ_{xy} , τ_{yz} , ve τ_{xz}) maksimum değerleri Çizelge 4'te listelenmiş ve grafiksel olarak sırasıyla Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da çizilmiştir.

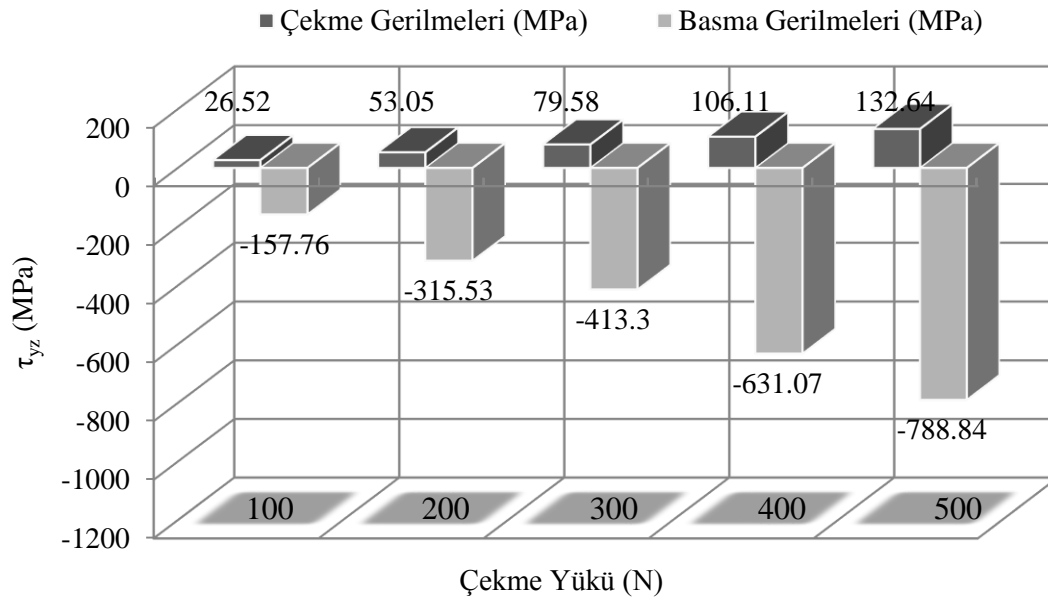
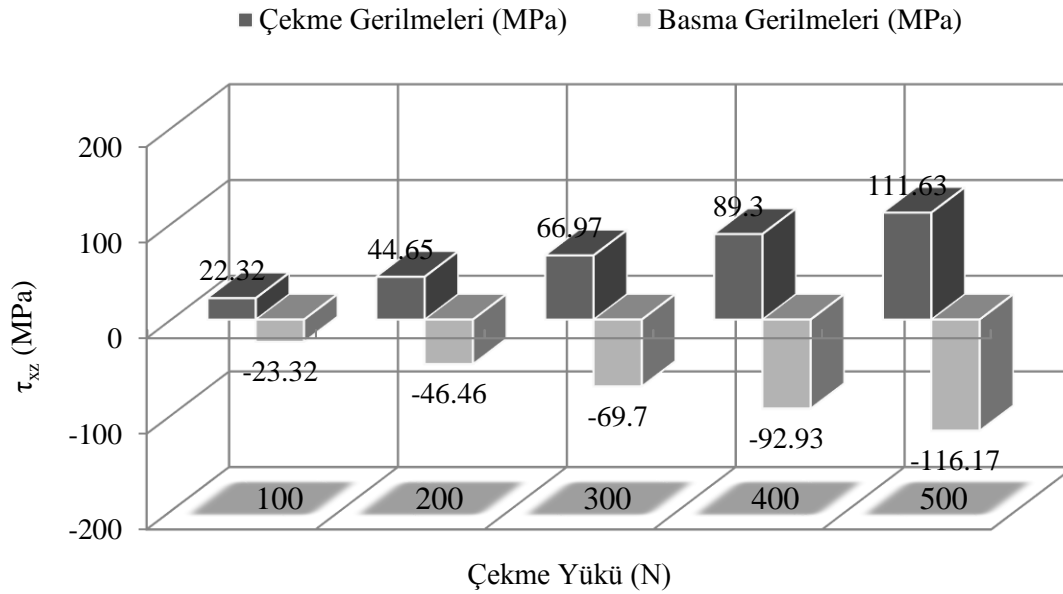
Çizelge 4. Farklı çekme yükleri için elde edilen kayma gerilmeleri (τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz})

Çekme Yüğü (N)	Gerilme Formu	Kayma gerilmeleri (MPa)		
		τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
100	Çekme	451,19	26,52	22,32
	Basma	-486,37	-157,76	-23,23
200	Çekme	902,39	53,05	44,65
	Basma	-972,74	-315,53	-46,46
300	Çekme	1353,59	79,58	66,97
	Basma	-1459,12	-473,30	-69,70
400	Çekme	1804,79	106,11	89,30
	Basma	-1945,49	-631,07	-92,93
500	Çekme	2255,99	132,64	111,63
	Basma	-2431,87	-788,84	-116,17

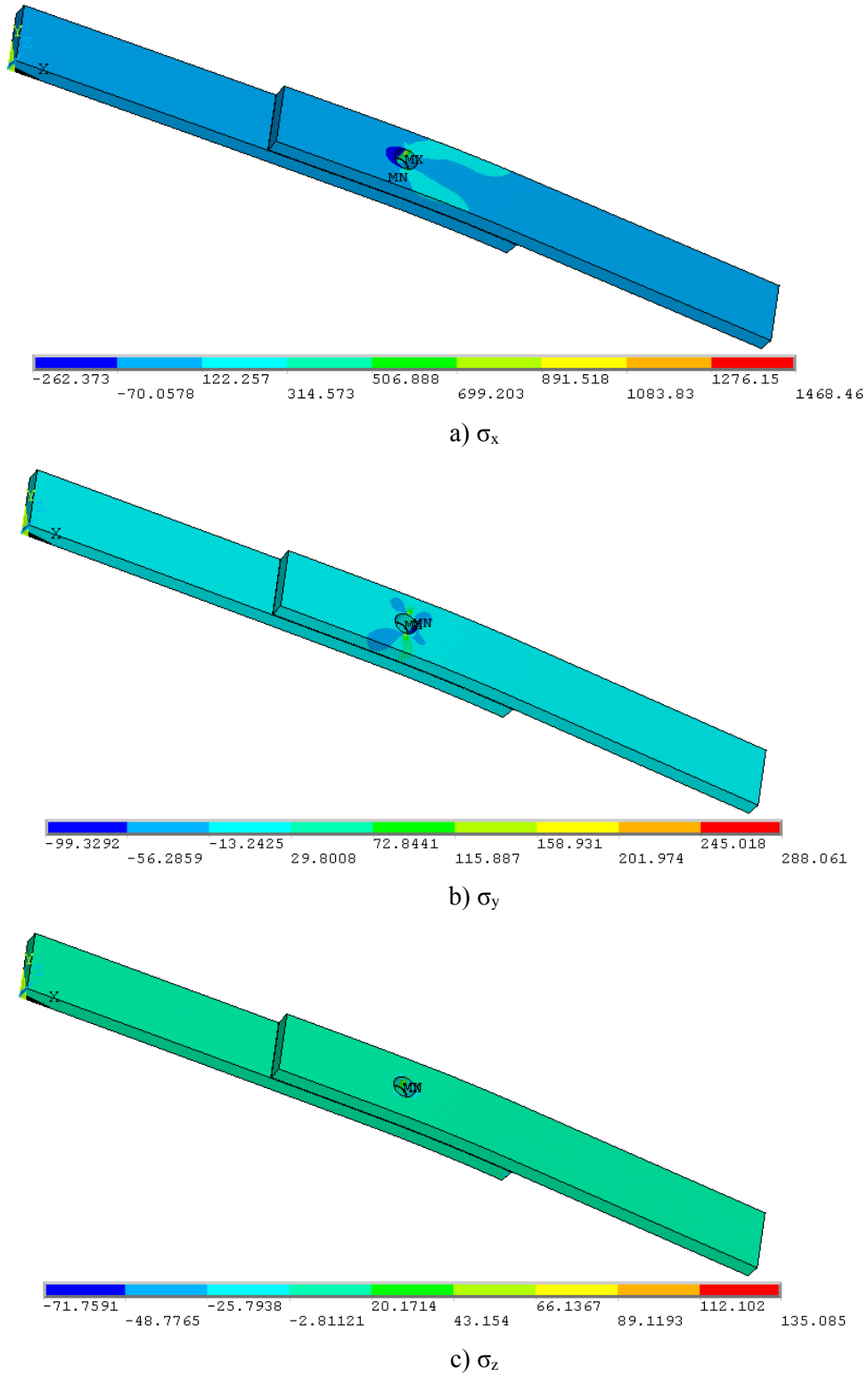


Şekil 8. τ_{xy} kayma gerilmesi

Şekil

Şekil 9. τ_{yz} kayma gerilmesiŞekil 10. τ_{xz} kayma gerilmesi

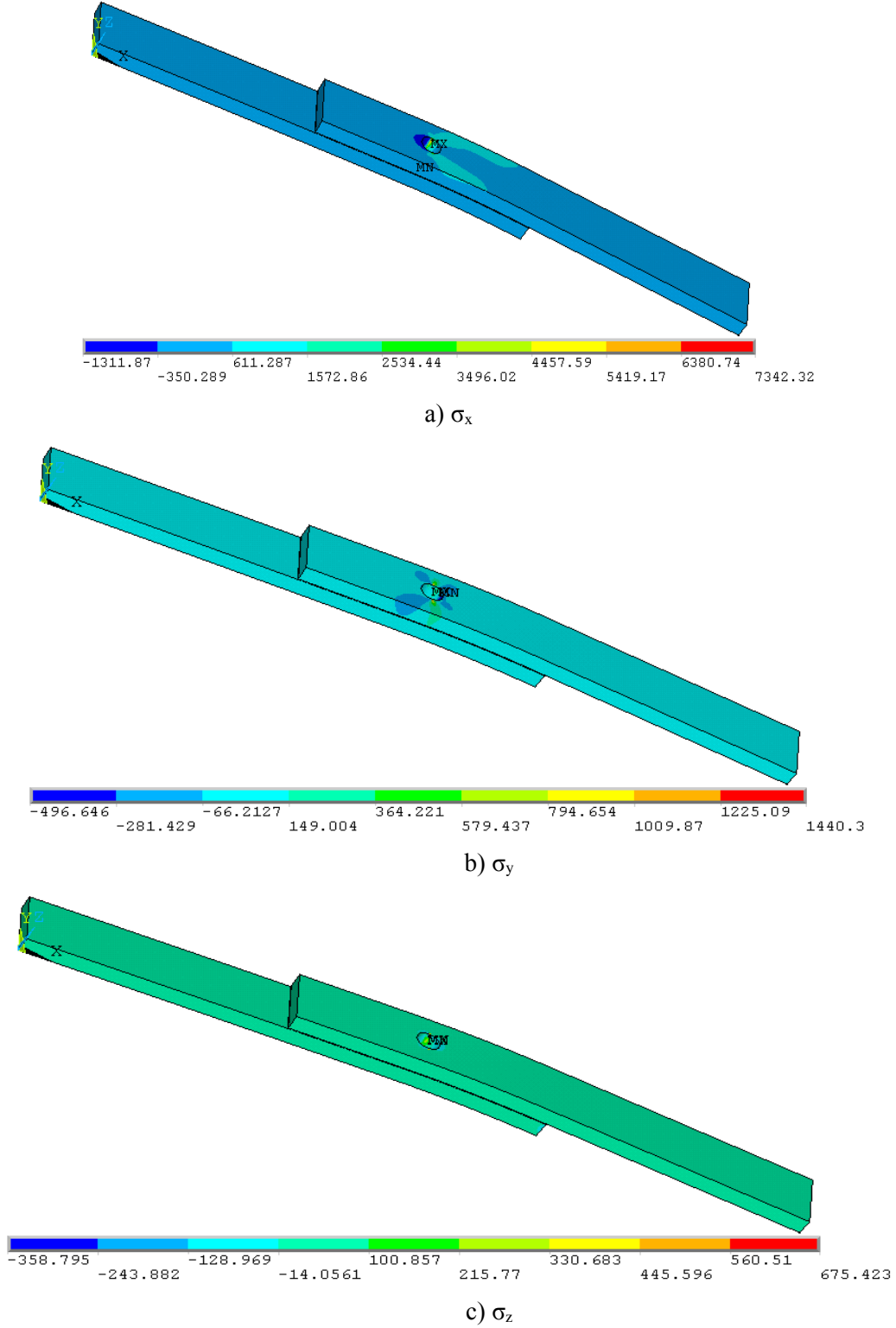
Kayma gerilmelerinin maksimum değerlerinin çekme yükü artışına bağlı olarak artış gösterdiği anlaşılmaktadır. τ_{xy} gerilme değerleri τ_{yz} , ve τ_{xz} gerilmelerden çok daha büyük değerlerde meydana gelmiştir. Ayrıca τ_{xz} kayma basma gerilme değerlerindeki diğerlerinden daha düşük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Normal gerilmelerle benzer şekilde en yüksek kayma gerilmeleri 500 N çekme yükü uygulandığında hesaplanmıştır. Örneğin en yüksek değerli kayma çekme gerilmesinin değeri $\tau_{xy}=2255,99$ MPa ve en yüksek basma gerilmesi değeri ise $\tau_{xy}=-2431,87$ MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca en düşük kayma çekme ve basma gerilmelerinin 100 N luk çekme yükü altında meydana geldiği gözlenmiştir. Tüm analizler neticesinde elde edilen en düşük kayma çekme gerilmesi $\tau_{xz}=22,32$ MPa ve en düşük kayma basma gerilmesi ise $\tau_{xz}=-23,23$ MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11. 100 N çekme yükü etkisi ile hesaplanan normal gerilme dağılımları (MPa)

Şekil 11 ve 12’de sırasıyla 100 ve 500 N çekme yüklerinin etkisiyle üç boyutlu karma bağlantı üzerinde oluşan normal gerilmelerin dağılımları gösterilmiştir. Bu şekiller ile daha büyük çekme yükünde daha büyük değerli gerilmeler meydana geldiği açıkça görülmektedir. Ayrıca model üzerindeki

pim deliklerinin çevrelerinde çok yüksek değerlerde çekme gerilmelerinin meydana geldiği anlaşılmaktadır. Özellikle deliklerin pim sınır şartı uygulanmış bölgelerinde yüksek değerli basma gerilmeleri oluşmuştur. Çekme ve basma gerilmelerinin mutlak değer büyüklükleri karşılaştırıldığında çekme gerilmelerinin daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 12. 500 N çekme yükü etkisi ile hesaplanan normal gerilme dağılımları (MPa)

4. Sonuçlar

Sadece farklı değerlerde çekme yükleri uygulanmış ve uygulanan bu çekme yüklerinin etkisiyle üç boyutlu karma bağlantıda meydana gelen gerilmelerin analiz edildiği bu çalışmada bazı önemli sonuçlar kısaca şu şekilde özetlenebilir.

1. Çekme, basma ve kayma gerilmelerin değerleri, çekme yükü artışına bağlı olarak artmaktadır. Dolayısıyla, modellenen karma bağlantı için en düşük çekme gerilmeleri uygulanan 100 N çekme yükü için elde edilirken, en yüksek değerli gerilmeler 500 N çekme yükü etkisindeyken hesaplanmıştır.
2. σ_x çekme ve basma gerilme değerlerinin σ_y ve σ_z gerilme değerlerinden çok daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Bunun başlıca sebebi ise, karma bağlantıya uygulanan çekme yükünün x-yönünde etki ediyor olmasıdır.
3. Çözüm sonrasında elde edilen şekiller incelendiğinde, her üç yönde model yüzeyinde genelde basma gerilmeleri olduğu gözlenmiştir. Fakat en büyük değerli basma gerilmeleri ve yüksek değerlikli çekme gerilmeleri pim delikleri civarında meydana gelmiştir.
4. Çentik etkisinden dolayı, pim deliklerinin çevrelerinde yüksek değerlerde gerilmeler olduğu görülmektedir. Eş gerilme eğrileri veya konturları incelendiğinde gerilme yığılmalarının olduğu delik etrafındaki bu bölgeler rahatlıkla görülmüştür.
5. Modellenen metal matris kompozit plakaların ve epoksi türü yapıştırıcının farklı mekanik özellikleri sebebiyle, üç boyutlu karma bağlantı modeli üzerinde farklı şekillerde ve yüksek değerlerde gerilmeler oluşmuştur.
6. Gerilmelerin pim deliği çevresinde yoğunlaşması ve delik çevresinde meydana gelen bu gerilme yığılmalarının karma bağlantıda oluşabilecek muhtemel bir hasarın öncelikle paralel pim delikleri çevresinde oluşmasına sebep olabileceğini göstermiştir.

Kaynaklar

- [1] Madenci E, Shkarayev S, Sergeev B, Opliger D.W. and Shyprykevich, P. Analysis of composite laminates with multiple fasteners. Solids Structures 1997;2:1793-1811.
- [2] URL-1. http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf (Erişim Tarihi:02.03.2013)
- [3] Şekercioğlu T. Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi. Doktora tezi, Denizli: Pamukkale Üniversitesi; 2001.
- [4] Loctite Global Tasarım Elkitabı. Erasmusdruck GmbH, Mainz, Germany; 2005.
- [5] Solmaz MY. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik analiz ve tasarımları. Doktora tezi. Elazığ: Fırat Üniversitesi; 2008.
- [6] Mackerle J. Finite element analysis and simulation of adhesive bonding, soldering and brazing: A bibliography (1976-1996). Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering 1997;5:159-185.
- [7] Volkersen O. Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten nietverbindungen mit konstanten laschenquerschnitten. Luftfahrtforschung 1938;15: 41-47.
- [8] Kaya A. Investigation of stress distributions in adhesive-bonded lap joint. Ph.D. thesis. İzmir: Dokuz Eylül University; 1991.
- [9] Ceylan, D. Civatalı ve yapıştırıcı kompozit bağlantılarda gerilme analizi. Yüksek lisans tezi. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi; 2005.
- [10] Çitil Ş. Kapakları parça içine gömülü çift takviyeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek lisans tezi. Erzurum: Atatürk Üniversitesi; 2010.

- [11] Şen F, Aldaş K. Sıcaklık değişiminin yapıştırılmalı ve pimli alüminyum plakalardaki gerilmeler üzerine etkisi. TÜBAV Bilim Dergisi 2010;3:323-329.
- [12] Apalak MK, Aldas K, Şen F. Thermal non-linear stresses in an adhesively bonded and laser-spot welded single-lap joint during laser-metal interaction. Journal of Materials Processing Technology 2003;142:1-19.
- [13] Aldaş K, Şen F. Karma bağlantılı kompozit plaklarda farklı sıcaklıklar etkisiyle oluşan gerilmelerin analizi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2012; 3:21-30.
- [14] Alyanak İ. Yapıştırılmış ve paralel çift pim uygulanmış kompozit plakaların analizi. Yüksek Lisans Tezi. Aksaray: Aksaray Üniversitesi; 2013.
- [15] Sayman O. Elastic-plastic and residual stresses in symmetric aluminum metal-matrix laminated plates under a linear thermal loading. Journal of Thermal Stresses 2003;26:391-406.
- [16] ANSYS, Swanson Analysis System Inc., Houston, PA, USA.