

KONİK YÜZEYLİ MALZEMELERİN YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE MEKANİK DAVRANIŞLARIN İNCELENMESİ

Ünal KOCA^{*1}, Şemsettin TEMİZ²

¹⁻² İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya, 44280, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 07.01.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 17.03.2022 DOI: 10.54365/adyumbd.1054779

ÖZET

Bu çalışmada, yapıştırma bağlantılarının mukavemeti üzerine normal ve kayma gerilmelerinin etkilerini daha iyi anlamak üzere koniklik açısının değişimi ile ara yüzeyde oluşacak normal ve kayma gerilmelerin değiştiği uç uca konik yapıştırma bağlantı geometrisi incelendi. Alüminyum ve yapı çeliği olmak üzere yapıştırılan iki malzeme farklı açılarda konik yapıştırma yüzeyleri DP810 yapısal yapıştırıcı kullanılarak elde edilen uç uca bağlantının (butt joint) sayısal analizi yapıldı. Analizlerde von Mises akma ve kırılma kriteri kullanılarak bağlantıların aynı yapışma yüzeylerine karşılık farklı açılar için hasar yükleri belirlendi. Ayrıca aynı yüke karşılık bütün yapışma yüzeyleri için gerilme dağılım grafikleri elde edilerek mukayeseleri yapıldı. Konik bağlantı geometrisinde açı ve çap değeri arttıkça bağlantının hasar yükleri artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma Bağlantıları; Hasar Analizi; Akma ve Kırılma Kriteri.

JOINING CONICAL MATERIALS WITH ADHESIVE AND INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIORS

ABSTRACT

In this study, in order to better understand the effects of normal and shear stresses on the strength of the adhesive joints, the end-to-end conical adhesive joint geometry, in which the normal and shear stresses that will occur at the interface change with the change of the taper angle, was investigated. Conical bonding surfaces of two materials, aluminum and structural steel, at different angles, numerical analysis of the butt joint obtained by using DP810 structural adhesive was performed. In the analysis, failure loads were determined for the same adhesion surfaces of the joints at different angles by using the von Mises yield and fracture criteria. In addition, stress distribution graphs were obtained for all adhesion surfaces against the same load and their comparisons were made. As the angle and diameter of the conical joint geometry increased, the joint damage loads increased.

Keywords: Adhesive Joints; Failure Analysis; Yield Criteria.

1. Giriş

Malzemelerin birleştirilerek farklı özelliklerinden faydalanılması günlük yaşamda ve endüstride uzun yıllardan beri gerçekleşmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte, üretilen yeni nesil ve karmaşık malzemelerin gelişmesi, imalat ve birleştirme tekniklerinin de gelişmesini gerektirmiştir. İmalat sanayinde plastik teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, mekanik ve termal birleştirmelerin (cıvata, lehim, kaynak ve perçin vs.) konvansiyonel bağlantı tiplerine ek olarak yapıştırıcıların kullanım miktarı artış göstermektedir. Geçmiş yıllarda, daha az kuvvete maruz kalan ve daha az emniyet gerektiren günlük kullanım malzemelerinin imalatında kullanılan

*1 e-posta: ukoca@outlook.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5095-7324> (Sorumlu Yazar)

² e-posta: semsettin.temiz@inonu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6737-3720>

yapıştırıcılar, günümüzde daha fazla dayanımın gerektiği ve güvenliğin yüksek önem arz ettiği mühendislik alanlarında da artış gösteren bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte imalat malzemelerinin gelişmesi, çeşitlerinin artması ve birleştirilmesiyle birlikte, birleştirme çeşitleri arasında yapıştırıcılar, ağırlığa minimum etkileri, farklı malzemelerin birleştirilmesi, sızdırmazlık, birlikte çalışan parçaların sürtünmesiyle gerçekleşecek fretting korozyonu ve farklı tür metallerin birleştirilmesiyle oluşacak galvanik korozyonu engellemesi, sönümleyebilme kabiliyeti gibi avantajlar sağladığından tercih edilmektedir[1-8].

Yaygın kullanım alanı bulan yapısal yapıştırıcılar, güvenilirlik, mekanik özelliklerin belirlenmesi ve tekrar zorluğu ile tekniğin kabullenilmesi bakımından engel oluşturmuştur. Bu durum tasarımda istenilen mekanik özelliklerin araştırılması ve tespiti üzerine araştırmaların artmasına sebep olmuştur. Malzeme seçimi, hasar koşullarının belirlenmesi, kalite durumu ve yüklü halde gerilme dağılımı gibi yapıştırma bağlantısının tasarımını etkileyen faktörlerin belirlenmesinde, mekanik özelliklerin doğru biçimde tespiti oldukça önemlidir[9-12].

Bu sebeple yapıştırıcıların ve yapıştırma bağlantılarının geliştirilmesi, araştırılması ve mekanik özelliklerinin tespiti büyük önem kazanmıştır[4].

Temiz ve diğ. tarafından yapılan bir araştırmada, araştırmacılar film türü yapıştırıcı ile gerçekleştirdikleri tek etkili yapıştırma bağlantılarında, malzeme kalınlığı ve bindirme uzunluğu değişiminin bağlantı mukavemetine etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Yapılan analizler sonucunda bindirme uçlarındaki soyulma gerilmelerinin hasar oluşturmada önemli etkilerinin olduğu sonucuna ulaşmışlardır[13].

Bir diğ. araştırma, Nemes ve Lachaud tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar çift bindirmeli yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların, mekanik özelliklerini incelemiştir. Bindirme uzunluğundaki artışın yapıştırıcıda meydana gelen maksimum kayma gerilmesinin şiddetine etkisinin olmadığını, bu uzunluğun ortalarına doğru kayma gerilmesi değerinde azalma meydana geldiği ve kayma gerilmesinin en yüksek değerine bağlantının uç bölgelerinde ulaştığı sonucuna varmışlardır[14].

Bir diğ. araştırmada ise Lee ve diğ. yapıştırıcının kullanılan bağlantıda uygun koşulların oluşması için yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tek başına bilinmesinin yeterli olmadığına ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki ara yüz davranışının bilinmesi gerektiğine inanmaktadırlar. Geniş bir uygulama yelpazesine sahip yapışkan bölge (cohesive zone) sayısal modelini kullanarak sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır[15].

Bir diğ. araştırmada ise Yang ve diğ. tekli bindirme ile yapıştırılan kompozit bağlantılarında, analitik bir model geliştirerek yapışkan gerilme dağılımlarını belirlemeye çalışmışlardır. Bu modelde yapışkan von Mises akma kriterine göre elastik-tam plastik, kompozit numuneler ise lineer elastik kabul edilmiştir. Yapıştırılmış kompozit plakaların genel denklemlerinin türetilmesinde, tabakalanmış anizotropik plaka teorisini uygulamışlardır. Bu model nümerik olarak analiz edilip sonuçların doğru olduğunu göstermişlerdir[16].

Bu çalışmada, yapıştırma bağlantıların mukavemeti üzerine normal ve kayma gerilmelerinin etkilerini daha iyi anlamak üzere koniklik açısının değişimi ile ara yüzeyde oluşacak normal ve kayma gerilmelerin değişmesine imkân veren bir geometri olan uç uca konik yapıştırma bağlantı geometrisi incelendi. Alüminyum ve yapı çeliği olmak üzere yapıştırılan iki malzeme farklı açılarda konik yapıştırma yüzeyleri DP810 yapısal yapıştırıcı kullanılarak elde edilen uç uca bağlantının (butt joint) sayısal analizi yapıldı.

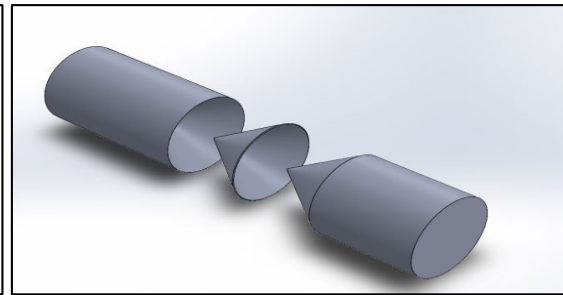
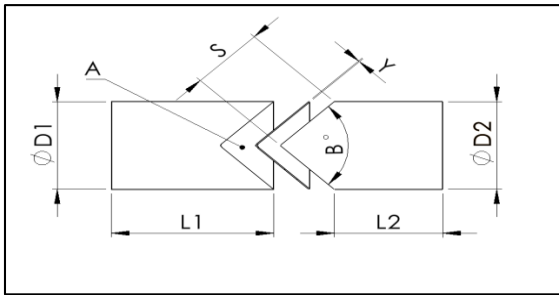
2. Yöntem

Bu çalışma kapsamında, nümerik analizler için sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerin yapıldığı ANSYS 20.2 WORKBENCH paket programı kullanılmıştır. Çalışmada yapıştırıcı kullanılarak konik yüzey geometrisine sahip metallerin birleştirilmesi ve meydana gelecek hasar yükünün, gerilmelerin, birleştirilen parçaların geometrilerinin ve yüzey alanlarının yapıştırma

performansına etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Kullanılan metaller Yapısal çelik ve AA 2024 T3, yapıştırıcı ise DP810 endüstriyel yapıştırıcıdır. Bu materyaller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde modellenmiş olan üç boyutlu tasarımların çizim detayları ve yine materyallere ait çeşitli mekanik değerler alt başlıklarda verilmiştir.

2.1. Konik Bağlantı Detayları

Şekil 1 yapıştırıcı ile birleştirilmiş konik bağlantılarının teknik resmi, Çizelge 1’de ise bu bağlantıların ölçüleri ve SolidWorks 16 paket programı kullanılarak oluşturulan konik yüzey geometri bağlantıların katı modeli Şekil 2 gösterilmiştir.



Şekil 1. Konik geometri bağlantının teknik resmi.

Şekil 2. Konik yüzey geometri bağlantı katı modeli.

Çizelge 1. Konik yüzey geometri bağlantıların ölçüleri.

B (°)	D1 (mm)	D2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	Y (mm)	S (mm)	A (mm ²)
20,36	10	10	47,83	20	0,2	28,28	444,22
40,56	14	14	38,94	20	0,2	20,2	444,13
69,9	18	18	30	20	0,2	15,71	444,21
90	20	20	30	20	0,2	14,14	444,29
165,2	23,68	23,68	30	20	0,2	11,94	444,15
180	23,78	23,78	30	30	0,2	0	444,29

2.2. Materyallere ait mekanik özellikler

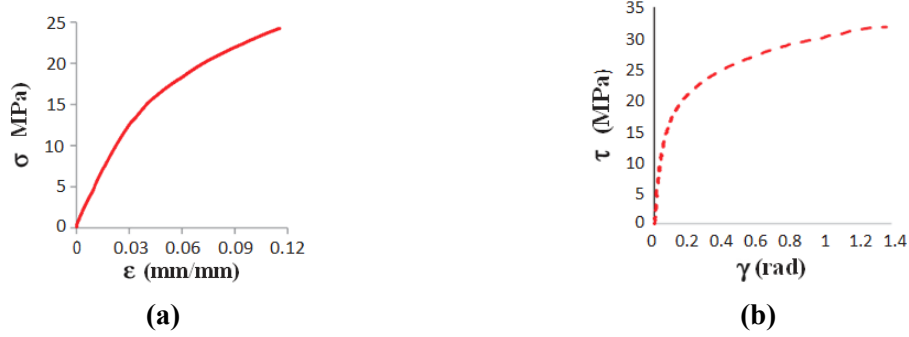
Yapısal çelik ve Alüminyum alaşımı 2024 T3’ün mekanik özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Yapısal çelik ve Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.

	Yapısal çelik	Alüminyum alaşımı
Young Modülü	200 GPa	73,1 GPa
Poisson Oranı	0,30	0,3
Yoğunluk	7,85e-06 kg/mm ³	2,768e-06 kg/mm ³
Kayma Modülü	76,923 GPa	28 GPa
Akma Dayanımı	250 MPa	385 MPa
Çekme Mukavemeti	460 MPa	427,90 MPa

Yapıştırıcı olarak, pek çok alanda tamir ve birleştirme amacıyla kullanılan, nemli çevre şartlarına karşı dirençli ve nemden dolayı dayanımlarında azalma söz konusu olmayan, 3M

Scotch-Weld firmasının ürettiği DP810 yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcının mekanik özellikleri Şekil 3 ve Çizelge 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Yapıştırıcının mekanik özellikleri: a. DP810 için çekme gerilimi-gerinim eğrisi, b. DP810 için kayma gerilimi-gerinim eğrisi[17].

Çizelge 3. Yapıştırıcının mekanik özellikleri [17].

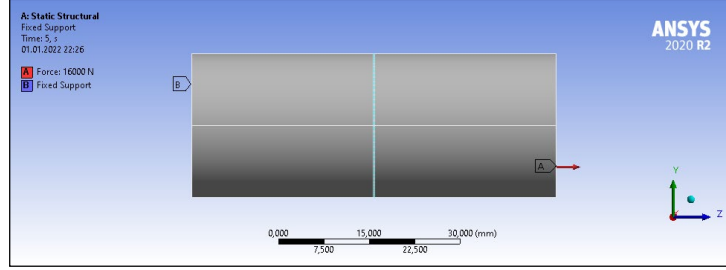
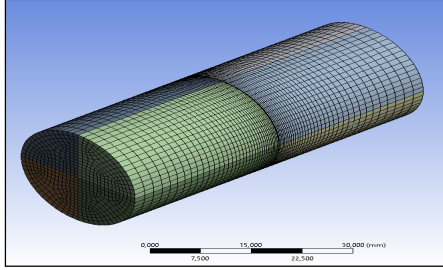
Dp810 için mekanik özellikler	
Elastiklik Modülü, E [MPa]	497.76 ± 28.75
Poisson oranı, ν	0.35
Akma Mukavemeti (Normal), σ_y [MPa]	15.38 ± 3.48
Kopma Mukavemeti, σ_f [MPa]	20.07 ± 2.61
Kopma Uzaması (Normal), ϵ_f (%)	0.078 ± 0.02
Kayma Modülü, G [MPa]	184.35 ± 28.75
Akma Mukavemeti (Kayma), τ_y [MPa]	15.28 ± 4.8
Kopma Mukavemeti(Kayma), τ_f [MPa]	29.73 ± 2.02
Kopma Uzaması(Kayma), γ_f (%)	0.12 ± 0.008
Tokluk(Normal Doğrultuda), G_n^0 [N/mm]	0.78
Tokluk(Kayma Doğrultusunda), G_s^0 [N/mm]	1.78

2.3. Nümerik Çalışma

Nümerik çalışma, bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş çeşitli hasar verilerin elde edilmesi üzerine kuruludur. Bu başlık altında çalışmanın nasıl ilerlediği, elde edilen verilere, çeşitli görsel sunumlara ve elde edilen verilerin karşılaştırmalı grafiklerine yer verilmiştir.

Analizler için SolidWorks 16 paket kullanılarak oluşturulan modeller, ANSYS 20.2 WORKBENCH içerisine aktarılıp, Şekil 3 te gerilme şekil değiştirme diyagramları verilen elasto-plastik malzeme tanımlanması gerçekleştirildikten sonra bağlantılar düzenlenmiştir. Ardından modeller sonlu elemanlara bölünmüştür ve sınır şartları uygulanmıştır. Tüm modeller; bir uçtan ankastre olup diğer uçtan çekme kuvveti ile zorlanmıştır ve non lineer analizler bu

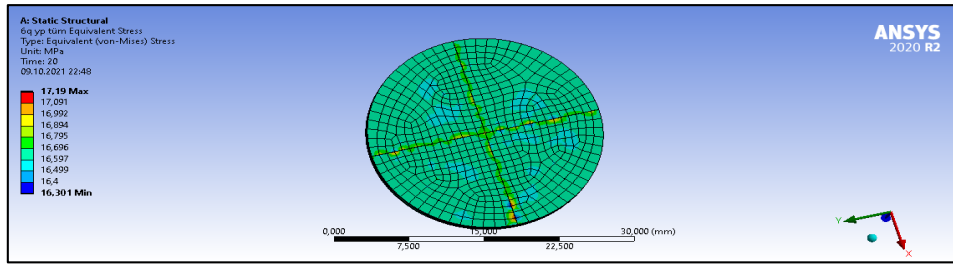
şekilde gerçekleştirilmiştir. Hasar yüklerinin belirlenmesinde von-Mises akma kriteri kullanılarak bağlantıda kullanılan malzemelerde oluşan en büyük eşdeğer gerilme o malzemenin hasar gerilmesine eşit olduğu yük hasar yükü olarak belirlenmiştir. Şekil 4’de modelin meshlenmiş hali, Şekil 5’de uygulanan sınır şartları gösterilmektedir.



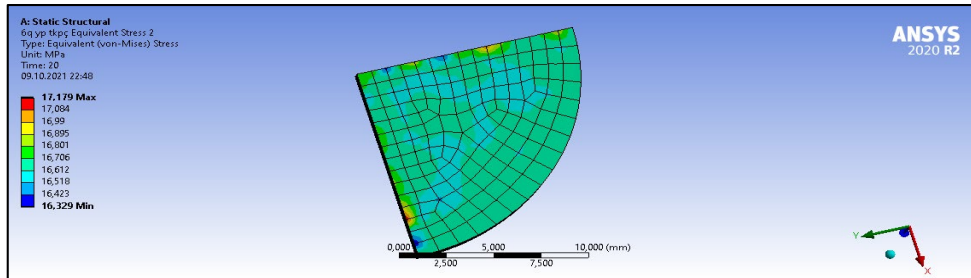
Şekil 4. Modelin meshlenmiş hali.

Şekil 5. Modele uygulanan sınır şartları.

Analizler yapılırken oluşturulan üç boyutlu modeller silindirik yapıştırma bağlantısının simetrik yapısından dolayı tam model ve çeyrek model arasında alınan sonuçlarda fark olup olmadığını gözlemleyebilmek için analizler çeyrek modeller için tekrarlandı. Analizlerde uygulanan kuvvet, tam model ve çeyrek model arasında 4/1 oranında fark olacak şekilde uygulanmıştır. Analiz yapıldıktan sonra tam ve çeyrek modelin sonuçları arasında çok küçük fark olduğundan analizlere çeyrek modellerle devam edilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7’de tam ve çeyrek modelde yapıştırıcıda oluşan von Mises akma kriterine göre alınan sonuçlar verilmiştir.

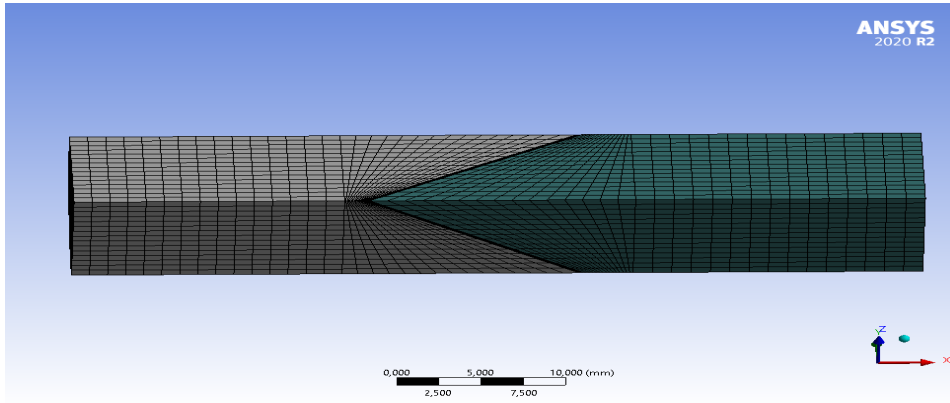


Şekil 6. Tam model yapıştırıcıda meydana gelen gerilme durumu.



Şekil 7. Çeyrek model yapıştırıcıda meydana gelen gerilme durumu.

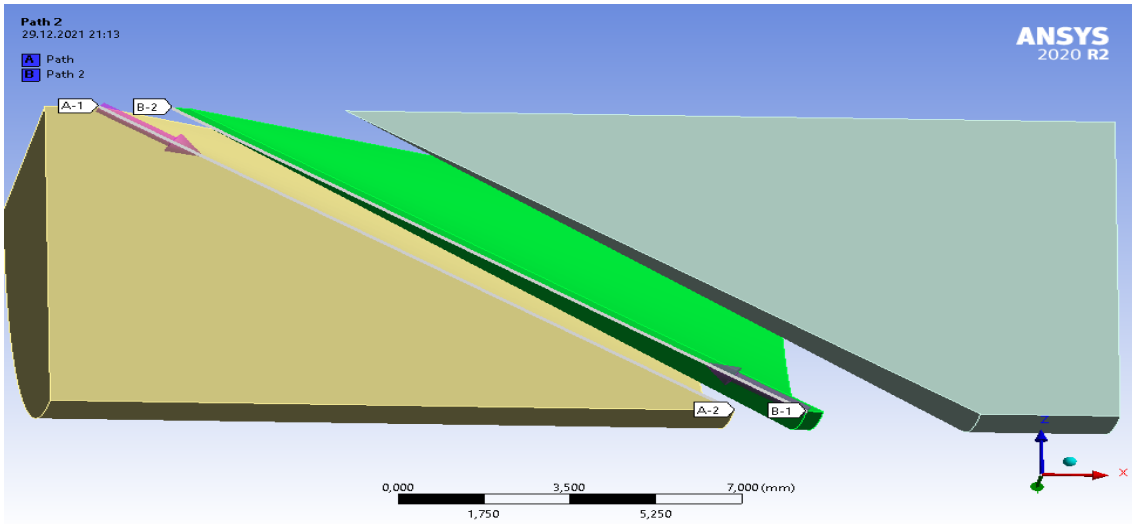
Analizlerde kullanılan çeyrek modelin meshlenmiş hali Şekil 8’de verilmiştir. Meshlerdeki düğüm ve elaman sayısı kritik noktadaki gerilmelerin değişmediği gözlemlenene kadar artırılmıştır.



Şekil 8. Çeyrek modelin meshlenmiş hali.

3. Araştırma Bulguları

Bu bölümde, yapıştırma bağlantılarının sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçları değerlendirilmiştir. Nümerik analizlerde incelemek üzere bütün modellerde 2 adet gerilme hattı oluşturulmuştur. Hatlar hasarın ilk olarak gerçekleştiği yerler referans alınarak oluşturulmuştur. Bu hatlar Şekil 9'da ki gibidir.



Şekil 9. Nümerik analizlerde incelenen gerilme hatları.

Çeyrek modellerde analizler tekrar gerçekleştirilerek yapıştırıcıda meydana gelen hasar yükleri tespit edilmiştir. Hasar yüklerinin hangi kuvvette gerçekleştiğini görmek adına analiz eşit adımlarla gerçekleştirilmiş ve en düşük kuvvette elde edilen hasar yükü tespit edilmiştir. Çizelge 4'de hasar yükleri verilmiştir. Bu hasar yüklerinden yola çıkarak geometrilerin mukayese edilebilmesi açısından en düşük hasar yükünün 1 adım öncesi olan yük (480 N) değerinde parçalar üzerinde oluşan gerilmelerin grafikleri çizilmiştir.

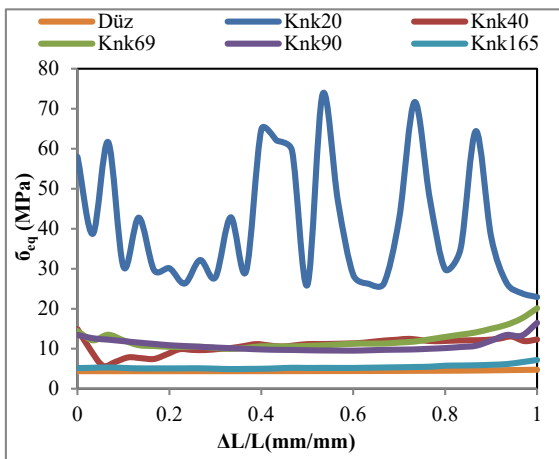
Çizelge 4. Alüminyum alaşımı-DP810 ve Yapısal Çelik - DP810 için hasar yükü değerleri.

GEOMETRİ	Alüminyum Alaşımı 2024, T3 - DP810 KUVVET (N)	Yapısal Çelik - DP810 KUVVET (N)
DÜZ 4/1	3760	4240
KONİK20 4/1	720	560
KONİK40 4/1	720	880
KONİK69 4/1	1200	1360
KONİK90 4/1	2080	2080
KONİK165 4/1	3520	3920

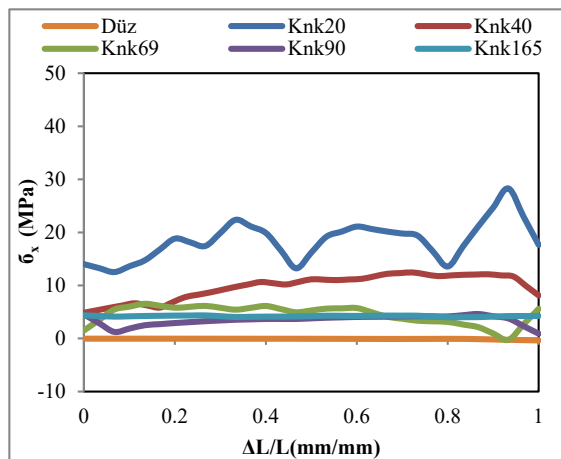
3.1. Alüminyum Alaşımı İle Yapılan Yapışma Bağlantılarının Nümerik Analizi

3.1.1. Al-Dp810 Konik geometrilerin P1 hattı boyunca gerilme dağılımları

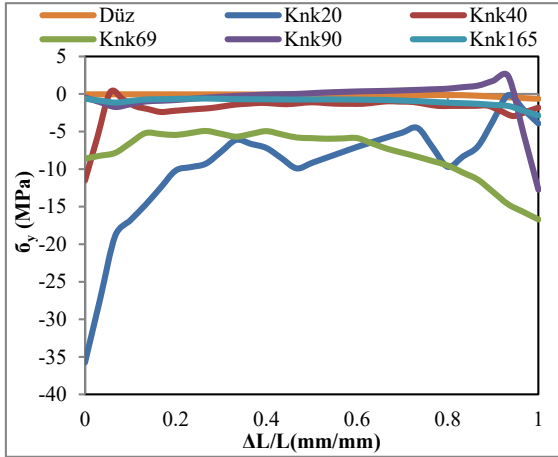
Şekil 10, 11, 12 ve 13'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda birbirine yakın seyrederken, geometrilerdeki B açısının azalmasıyla konikliğin artması nedeniyle konik20 geometrisinde gerilmelerin hat üzerindeki her noktada birbirinden farklı ve diğer geometrilerden daha yüksek gerilmeye sebep olduğu görülmüştür. Hattın başlangıç ve bitiş noktalarında gerilme değerleri yükselmekte orta hatlarda ise düşük bir seyir izlemektedir. Normal gerilmeler incelendiğinde koniklik açısının azalması ile yani konikliğin artması ile σ_x değeri giderek artmaktadır. Bunun nedeni düz bağlantıda teorik σ_x gerilmesi 1 (480 N /444,29 mm²=1.08) Mpa civarında olması gerekir. Şekil 11'de düz bağlantı için σ_x gerilmesi bu değerle uyumlu çıkmıştır. Fakat konikliğin artması ile bağlantı bölgesinde nispeten tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçilmektedir ve bu durum normal gerilmelerin artmasına sebep olur. Yine Şekil 11'deki σ_x gerilmeleri incelendiğinde konikliğin artması ile σ_x gerilmesini buna paralel arttığı görülmektedir.



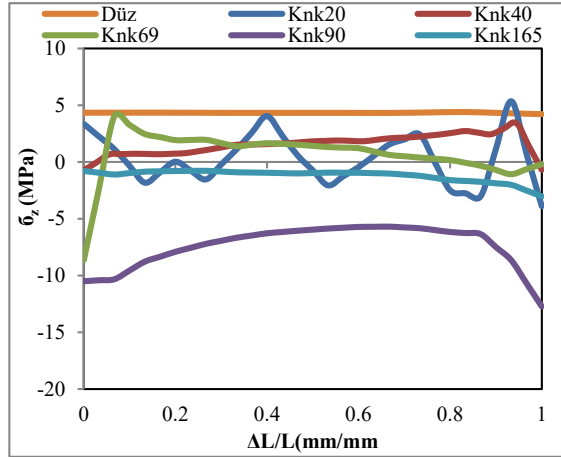
Şekil 10. Konik geo. P1 hattı boyunca σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları(Al-Dp810).



Şekil 11. Konik geo. P1 hattı boyunca σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları(Al-Dp810).



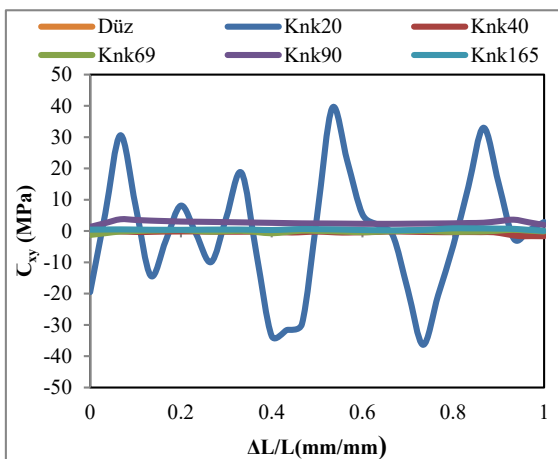
Şekil 12. Konik geo. P1 hattı boyunca σ_y (MPa) normal gerilme dağılımları (Al-Dp810).



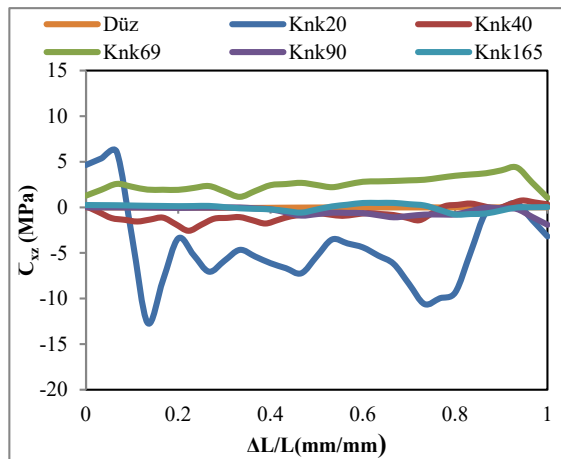
Şekil 13. Konik geo. P1 hattı boyunca σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları (Al-Dp810).

Şekil 12'deki σ_y gerilmelerin bağlantı tipine göre değişimi de konikliğin artması ile tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçişe uygun şekilde giderek artmıştır. Ayrıca x eksenini doğrultusunda çekmeye maruz bağlantıda σ_x gerilmelerin çeki karakterli olmasına karşın σ_y ve σ_z gerilmelerin bası karakterli olması bağlantı bölgesinin x doğrultusunda çekmeye karşılık diğer eksenlerdeki daralmadan kaynaklanmaktadır. Şekil 10'daki eşdeğer gerilmeler incelendiğinde konikliğin artması ile ara yüzeyde oluşan normal ve kayma gerilmelerin artmasına paralel olarak eş değer gerilmeler de artmıştır.

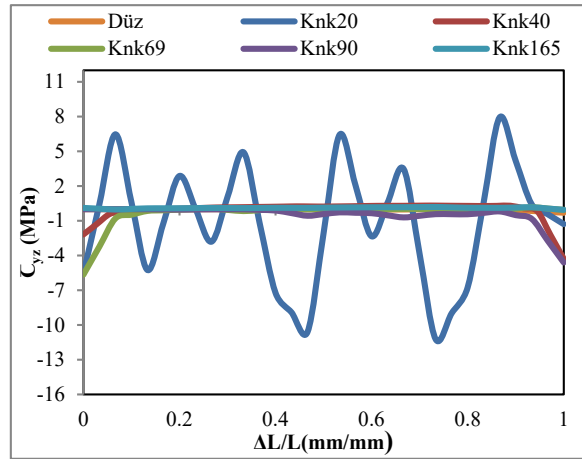
Şekil 14, 15 ve 16'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca C_{xy} , C_{xz} , C_{yz} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde C_{xy} , C_{xz} , C_{yz} kayma gerilmeleri hat boyunca konik geometriler için benzer ve düşük değerler almıştır ve bununla birlikte konik20 normal gerilmelerde olduğu gibi kayma gerilmelerinde de hattın her noktasında farklı ve diğer geometrilerden daha yüksek gerilmelere sahiptir. Özellikle konikliğin artması ile kayma gerilmeleri giderek artmıştır. Bunun nedeni bağlantı bölgesinde konikliğin artması ile ara yüzeyler kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine daha fazla maruz kalmaktadır.



Şekil 14. Konik geo. P1 hattı boyunca C_{xy} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Al-Dp810).



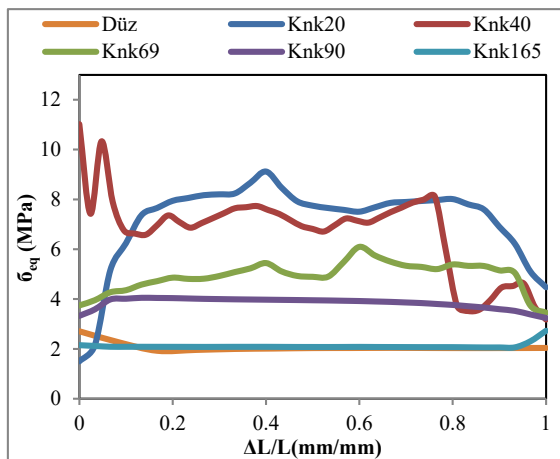
Şekil 15. Konik geo. P1 hattı boyunca C_{xz} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Al-Dp810).



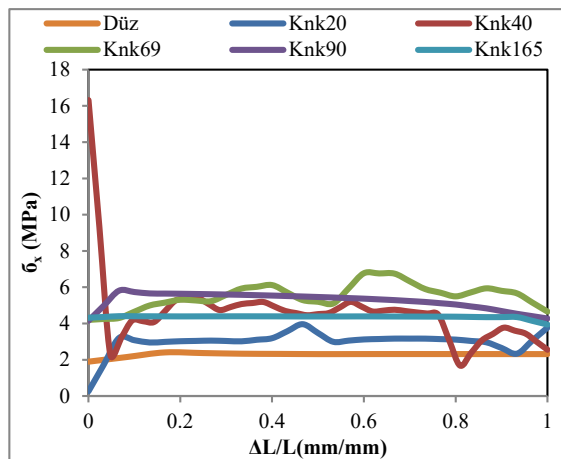
Şekil 16. Konik geo. P1 hattı boyunca C_{yz} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Al-Dp810).

3.1.2. Al-Dp810 Konik geometrilerin P2 hattı boyunca gerilme dağılımları

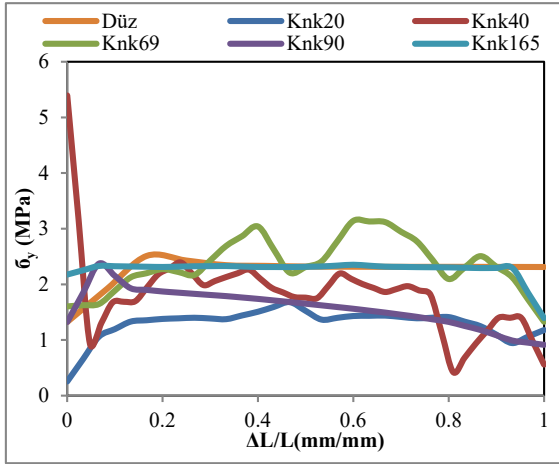
Şekil 17, 18, 19 ve 20'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda birbirine yakın ama farklı değerler almaktadır. Konik40 için gerilme değerleri hattın başında diğer geometrilerden daha yüksek değerler almıştır ve hattın sonuna doğru azalarak devam etmiştir. Konik20 için gerilme değerleri hattın başlangıcında en düşük değerleri almasına karşın hattın sonlarında bir miktar artış göstermektedir ve en yüksek gerilme değerine σ_{eq} eşdeğer gerilme değerinde ulaşmıştır. En yüksek σ_z normal gerilme değeri düz geometridedir. Daha önce de ifade edildiği gibi konikliğin artması ile çok eksenli gerilme durumu oluşmakta ve bu durum ara yüzeyde hem yapıştırılan malzemede hem de yapıştırıcı yüzeyinde oluşan normal ve kayma gerilmelerini arttırmaktadır. Artan normal ve kayma gerilmeleri de eşdeğer gerilmelerin artmasına neden olmaktadır.



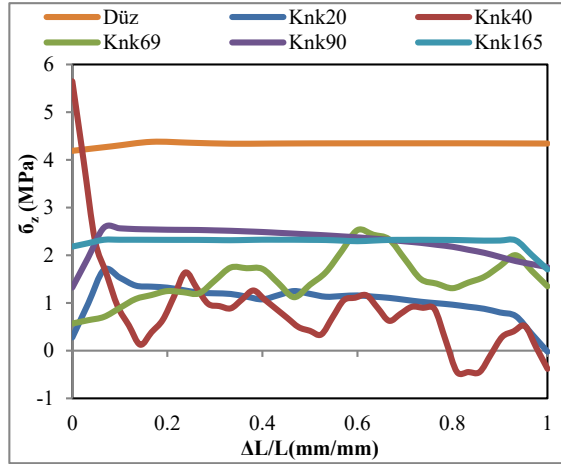
Şekil 17. Konik geo. P2 hattı boyunca σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları (Al-Dp810).



Şekil 18. Konik geo. P2 hattı boyunca σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları (Al-Dp810).

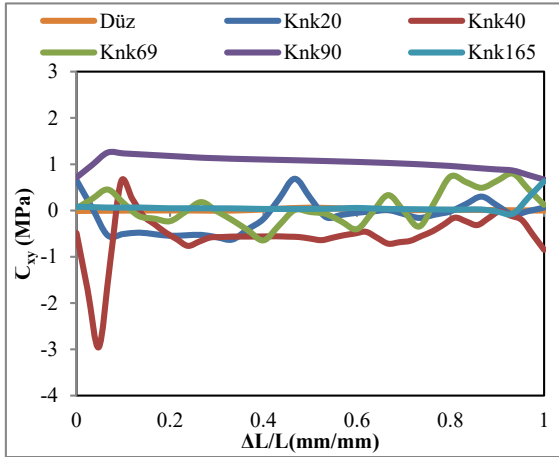


Şekil 19. Konik geo. P2 hattı boyunca σ_y (MPa) normal gerilme dağılımları (Al-Dp810).

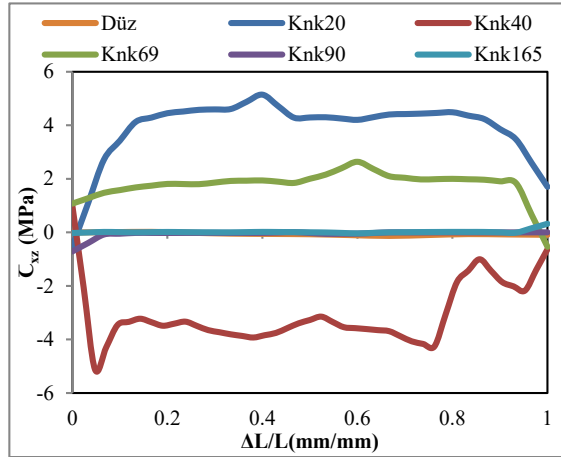


Şekil 20. Konik geo. P2 hattı boyunca σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları (Al-Dp810).

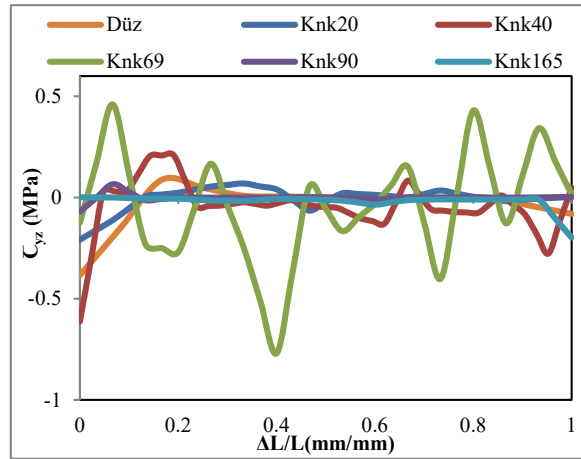
Şekil 21, 22 ve 23'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca C_{xy} , C_{xz} , C_{yz} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 19 incelendiğinde C_{xy} kayma gerilmesi genel olarak hat boyunca küçük farklarla seyretmektedir. Şekil 20 incelendiğinde C_{xz} kayma gerilmeleri incelendiğinde hat üzerinde oluşan gerilmeler geometriler arasında farklı ama değişmeyen değerlerle seyretmektedir. Şekil 21 incelendiğinde C_{yz} kayma gerilmeleri hat başlangıcında farklı değerler vermekteyken hattın ortalarına doğru yakın değerler vermektedir. Konik69'un bazı noktalarda tepe ve çukur noktası oluşturduğu görülmektedir. Gerilmeler incelendiğinde koniklik açısının azalması ile yani konikliğin artması ile kayma gerilmeleri giderek artmıştır. Bunun nedeni bağlantı bölgesinde konikliğin artması ile ara yüzeyler kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine daha fazla maruz kalmaktadır.



Şekil 21. Konik geo. P2 hattı boyunca C_{xy} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Al-Dp810).



Şekil 22. Konik geo. P2 hattı boyunca C_{xz} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Al-Dp810).

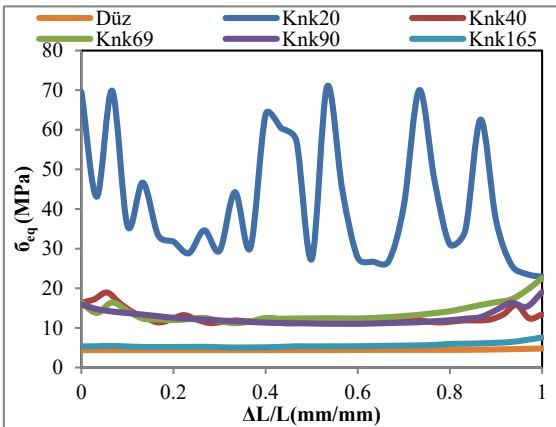


Şekil 23. Konik geo. P2 hattı boyunca C_{yz} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Al-Dp810).

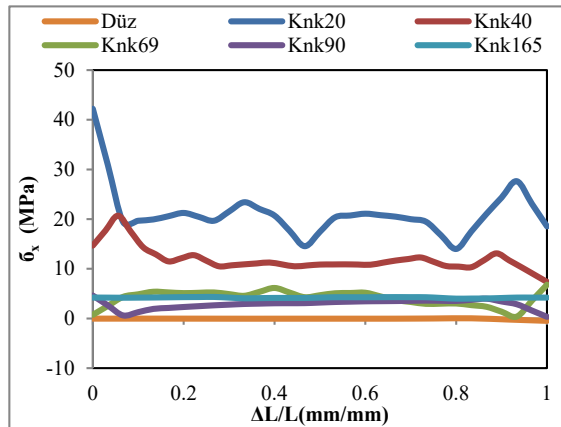
3.2. Yapısal Çelik İle Yapılan Yapışma Bağlantılarının Nümerik Analizi

3.2.1. Y.Çelik-Dp810 Konik geometrilerin P1 hattı boyunca gerilme dağılımları

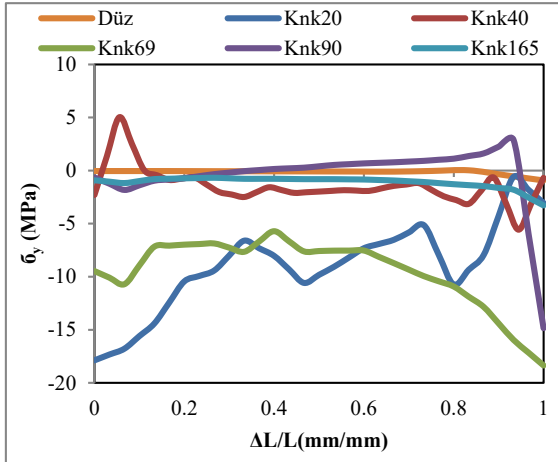
Şekil 24, 25, 26 ve 27'de Yapısal çelik tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler alüminyum gerilme grafiklerine görünüm bakımından benzemekle birlikte gerilme değerleri ve hat üzerinde oluşan gerilmelerdeki artma ve azalma miktarı çelikte daha fazladır. Şekil 22 incelendiğinde konik20'nin σ_{eq} normal gerilmeleri hat boyunca değişkendir. Bununla birlikte konik20 hat üzerinde çukur ve tepe noktaları oluşturmuştur. Şekil 25 incelendiğinde konik90'nun σ_z gerilme değerleri negatif yönde diğer geometrilerden daha yüksek seviyededir. Konikliğin artması ile bağlantı bölgesinde tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçilmektedir ve bu durum normal gerilmelerin artmasına sebep olur. Bununla birlikte x eksenini doğrultusunda çekmeye maruz bağlantıda σ_x gerilmelerin çeki karakterli olduğu halde σ_y ve σ_z gerilmelerin bası karakterli olması bağlantı bölgesinin x doğrultusunda çekmeye karşılık diğer eksenlerdeki daralmadan kaynaklanmaktadır.



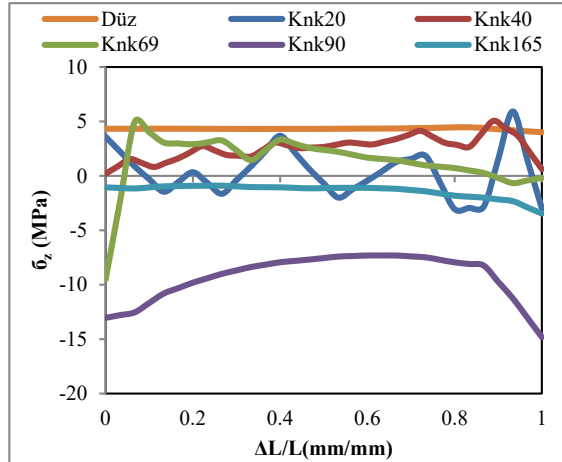
Şekil 24. Konik geo. P1 hattı boyunca σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).



Şekil 25. Konik geo. P1 hattı boyunca σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).

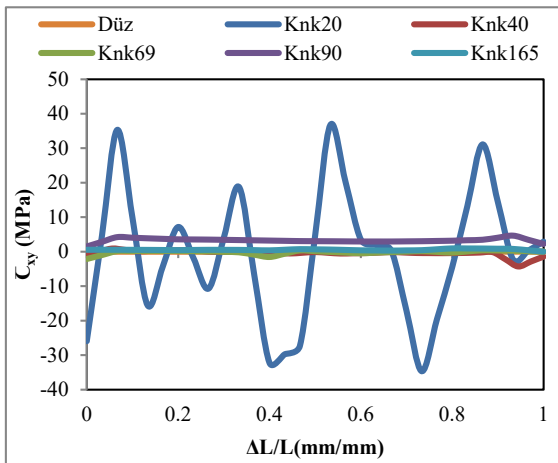


Şekil 26. Konik geo. P1 hattı boyunca σ_y (MPa) normal gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).

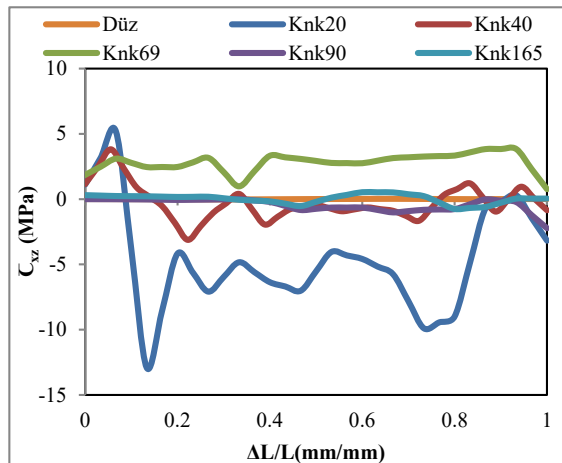


Şekil 27. Konik geo. P1 hattı boyunca σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).

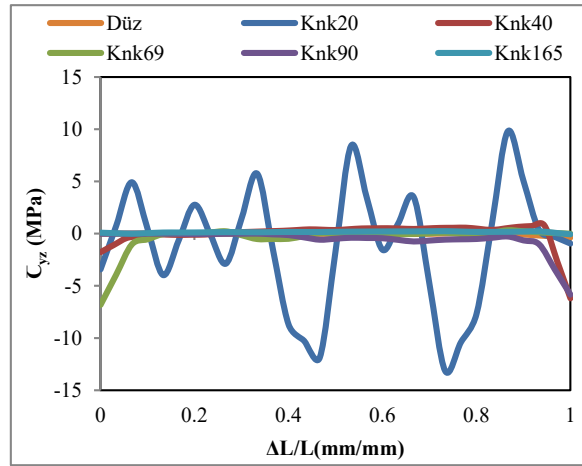
Şekil 28, 29 ve 30'da Yapısal çelik tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca C_{xy} , C_{xz} , C_{yz} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilme değerleri alüminyum gerilme değerlerine benzemektedir fakat alüminyuma göre hat üzerinde bazı noktalarda biraz daha yüksektir. Hat üzerindeki bazı noktalarda ise alüminyuma nazaran sapma miktarı fazladır. Şekil 27 incelendiğinde konik40 için C_{xz} kayma gerilmeleri alüminyumdaki C_{xz} kayma gerilmelerinden farklı olduğu görülmektedir. Hattın başlangıç ve bitiş noktalarında yakın değerler, hattın ortalarına doğru az bir değişkenlik göstermiştir. Şekil 28 incelendiğinde C_{yz} kayma gerilmeleri hat boyunca birbirine yakın değerlerle devam ederken hattın sonuna doğru sapsmaktadır. Konik20'nin bazı noktalarda tepe ve çukur noktası oluşturduğu görülmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi gerilmeler incelendiğinde konikliğin artması ile kayma gerilmeleri giderek artmıştır. Bunun nedeni artan koniklik sebebiyle ara yüzeyler kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine daha fazla maruz kalmaktadır.



Şekil 28. Konik geo. P1 hattı boyunca C_{xy} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).



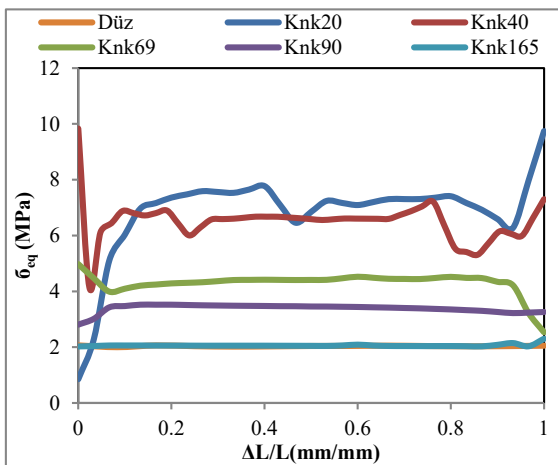
Şekil 29. Konik geo. P1 hattı boyunca C_{xz} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).



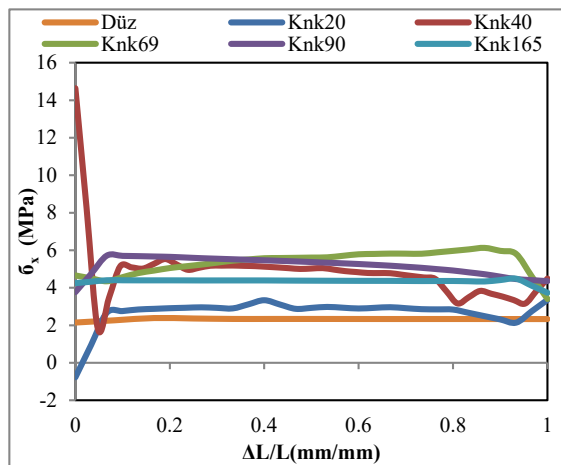
Şekil 30 : Konik geo. P1 hattı boyunca C_{yz} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).

3.2.2. Y.Çelik-Dp810 Konik geometrilerin P2 hattı boyunca gerilme dağılımları

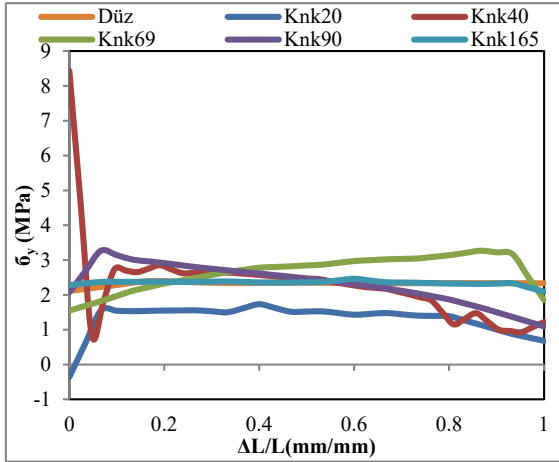
Şekil 31, 32, 33 ve 34'de Yapısal çelik tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca $\bar{\sigma}_{eq}$, $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$, $\bar{\sigma}_z$ gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda birbirine yakın ama farklı değerler almaktadır. Konik40 için gerilme değerleri hattın başında diğer geometrilerden daha yüksek değerler almıştır ve hattın sonuna doğru azalarak devam etmiştir. Şekil 29 incelendiğinde Konik20 için gerilme değerleri hattın başlangıcında en düşük değerleri almasına karşın hatta artarak devam etmiştir. $\bar{\sigma}_{eq}$ eşdeğer gerilme değerleri konik20 ve konik40 hariç diğer geometriler eşit değerlerle devam etmektedir. Koniklik açısının azalması konikliğin artmasına sebep olur bu durum tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçişe sebep olmaktadır. Dolayısıyla durum ara yüzeyde yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı yüzeyinde oluşan normal ve kayma gerilmelerini arttırmaktadır. Normal ve kayma gerilmelerindeki bu artış eşdeğer gerilmelerin artmasına neden olmaktadır.



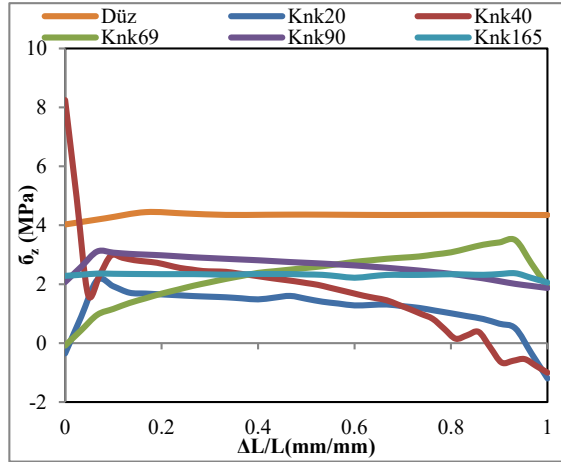
Şekil 31. Konik geo. P2 hattı boyunca $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).



Şekil 32. Konik geo. P2 hattı boyunca $\bar{\sigma}_x$ (MPa) normal gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).



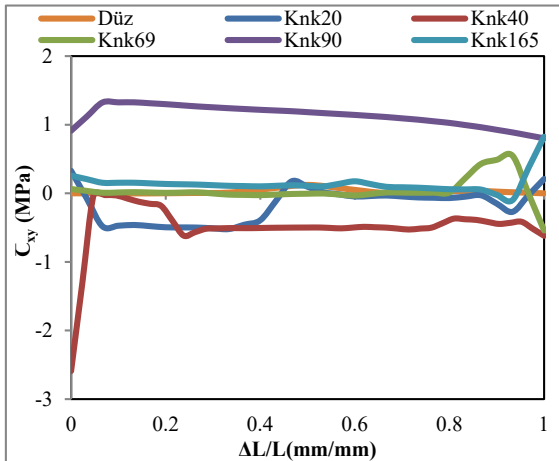
Şekil 33. Konik geo. P2 hattı boyunca σ_y (MPa) normal gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).



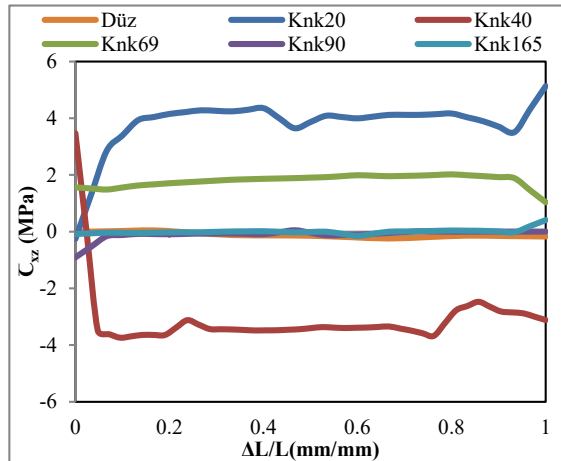
Şekil 34. Konik geo. P2 hattı boyunca σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).

Şekil 35, 36 ve 37'de Yapısal çelik tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca C_{xy} , C_{xz} , C_{yz} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 33 incelendiğinde C_{xy} kayma gerilmesi genel olarak hat boyunca küçük farklarla seyretmektedir. Şekil 34 incelendiğinde C_{xz} kayma gerilmeleri incelendiğinde hat üzerinde oluşan gerilmeler kararlı devam etmektedir. Şekil 35 incelendiğinde C_{yz} kayma gerilmeleri hat başlangıcı haricinde belirgin bir aralıkta değer almaktadır. Daha önce de ifade edildiği gibi ara yüzeylerin kesme kuvvetlerine daha fazla maruz kalmasına konikliğin artışı sebep olmuştur. Artan kesme kuvvetleri kayma gerilmelerini arttırmıştır.

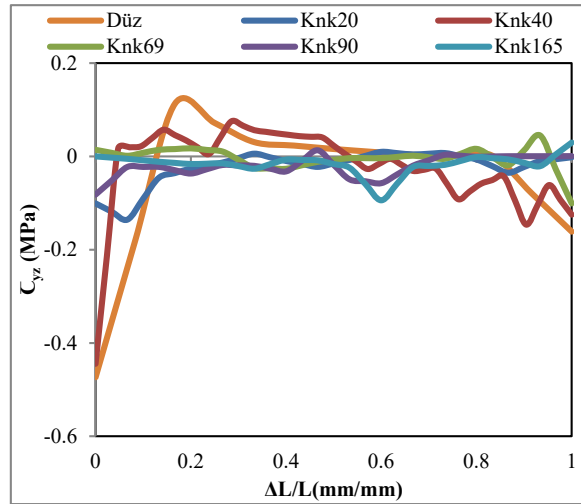
Ayrıca yapııştırılan malzemeler açısından bakıldığında, yapııştırıcı ile yapııştırılan çelik malzemelerde oluşan gerilmelerin, yapııştırıcı ile yapııştırılan alüminyum malzemelerde oluşan gerilmelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni beraber hareket eden yapııştırıcı-çelik ara yüzeylerinde oluşan şekil değiştirmelerin, yapııştırıcı-alüminyum ara yüzeyinde oluşan şekil değiştirmelerine göre daha uyumsuz olmalarındandır.



Şekil 35. Konik geo. P2 hattı boyunca C_{xy} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).



Şekil 36. Konik geo. P2 hattı boyunca C_{xz} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).



Şekil 37. Konik geo. P2 hattı boyunca C_{yz} (MPa) kayma gerilme dağılımları (Y.Çelik-Dp810).

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, yapıştırma bağlantılarının mukavemeti üzerine normal ve kayma gerilmelerinin etkilerini daha iyi anlamak üzere koniklik açısının değişimi ile ara yüzeyde oluşacak normal ve kayma gerilmelerin değiştiği uç uca konik yapıştırma bağlantı geometrisi incelendi. Alüminyum ve yapı çeliği olmak üzere yapıştırılan iki malzeme farklı açılarda konik yapıştırma yüzeyleri DP810 yapısal yapıştırıcı kullanılarak elde edilen uç uca bağlantının (butt joint) sayısal analizi yapıldı. Çekme kuvveti etkisinde yapıştırıcıda meydana gelecek hasar yükünün, gerilmelerin, birleştirilen parçaların geometrilerinin ve yüzey alanlarının yapıştırma performansına etkileri nümerik olarak araştırılmıştır ve sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Koniklik açısının azalması yani konikliğin artması ile yapışma alanları sabit kalmak şartıyla, tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçilmekte ve bu durum da, gerilmelerin konikliğe bağlı olarak artmasına neden olmaktadır.
- Konikliğin artmasıyla ara yüzey normal kuvvetlerden daha ziyade kesme kuvvetlerine maruz kalmakta, buda kayma gerilmelerinin artmasına neden olmaktadır.
- Konik geometrilerde, koniklik açısının artması ile hasar yükünün artmakta olduğu görülmüştür.
- Yapıştırılan malzeme açısından; yapıştırıcı ile yapıştırılan çelik malzemelerde oluşan gerilmelerin, yapıştırıcı ile yapıştırılan alüminyum malzemelerde oluşan gerilmelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni beraber hareket eden yapıştırıcı-çelik ara yüzeyinde oluşan şekil değiştirmelerin, yapıştırıcı-alüminyum ara yüzeyinde oluşan şekil değiştirmelerine göre daha uyumsuz olmalarındandır.
- Yapısal çelik bağlantısının, Alüminyum alaşımı bağlantısından daha fazla hasar yükü taşıdığı görülmüştür.
- Birleştirmelerin çekme kuvvetleri altındaki davranışları incelendiğinde; Düz geometrinin daha fazla çekme yükü taşıdığı görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Baldan, A., (2012), Adhesion phenomena in bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 38, p. 95–116.
- [2] Gursel, A., (2019). Fundamentals in adhesive bonding design for complex structures and conditions. *Journal of Advanced Technology Sciences*, 8 (1) p. 1-10.
- [3] Şekercioğlu, T., (2018), Makine Elemanları Hesap Şekillendirme, Birsen yayın evi, 96-97.
- [4] Çalik, A., (2008), Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarda gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [5] Aydın, M. D., TEMİZ, Ş., & ÖZEL, A. (2004). Yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlendiği deneysel yöntemler. *Mühendis ve Makina*, 45(536), 18-24.
- [6] Ayaz, Y., Çitil, Ş., & Temiz, Ş. (2014). Çekmeye maruz ara parçalı çift takviyeli yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(1).
- [7] Saraç, İ., Adin, H., & Temiz, Ş. (2021). A research on the fatigue strength of the single-lap joint joints bonded with nanoparticle-reinforced adhesive. *Welding in the World*, 65(4), 635-642.
- [8] Sülü, İ. Y., & Temiz, Ş. (2020). Mechanical behavior of composite pipes joined with non-embedded and embedded adhesive layers. *Materials Testing*, 62(12), 1228-1234.
- [9] Jeandrou, J.P., (1991), Analysis and Design Data for Adhesively Bonded Joints. *Int.J.Adhesion and Adhesives*, 11(2), 71-79.
- [10] Aydın, M.D., (2003), Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Tek Tesirli Bindirme Bağlantısının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- [11] Solmaz, M.Y., (2008), Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [12] Çitil, Ş. (2018). Experimental and numerical investigation of adhesively bonded curved lap joints under three-point bending. *Mechanics*, 24(6), 824-832.
- [13] Temiz, Ş., Özel, A., Aydın, M.D., (2005), The effect of adherend thickness on the failure of adhesively bonded single lap joints, *J Adhes Sci Technol*, Cilt 19, Sayı 8, ss. 705-718.
- [14] Nemes, O., Lachaud F., (2010), Double-lap adhesive bonded-joints assemblies modeling, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30, pp. 288–297.
- [15] Lee, M. J., Cho, T. M., Kim, W. S., Lee, B. C., & Lee, J. J. (2010). Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(5), 322-328.
- [16] Yang, C., Huang, H., Tomblin, J. S., & Sun, W. (2004). Elastic-plastic model of adhesive-bonded single-lap composite joints. *Journal of Composite Materials*, 38(4), 293-309.
- [17] Çitil, Ş., Bozkurt, İ., & Aydın, M. D. (2019). Experimental and 3D non-linear stress analysis of adhesively bonded pipes with curved-surface lap joints. *The Journal of Adhesion*, 95(5-7), 515-528.