

Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Yapıştırma Bağlantılarında İç Kademenin Bağlantı Hasar Yüküne Etkisi: Deneysel ve Sayısal Analiz

Ahmet ÇALIK^{1,2*}, Salih AKPINAR³

¹Yükseköğretim Kurulu, Üniversiteler Mh., 1600. Cad. No:10, 06800 Çankaya, Ankara

²Mersin Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 33343 Yenişehir, Mersin

³Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum

^{1,2}<https://orcid.org/0000-0001-7425-4546>

³<https://orcid.org/0000-0003-3247-991X>

*Sorumlu yazar: ac@mersin.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 17.01.2022

Kabul tarihi: 04.05.2022

Online Yayınlanma: 12.12.2022

Anahtar Kelimeler:

Yapıştırma bağlantı

Bağlantı tasarımı

İç kademeli bindirme bağlantı

Eğilme momenti

ÖZ

Havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde kullanılan kompozit veya farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde büyük avantajlarından dolayı sıklıkla tercih edilen birleştirme yöntemlerinden biri yapıştırıcıyla birleştirme yöntemidir. Yapıştırıcıyla birleştirme yönteminde sıklıkla kullanılan bağlantı tipi ise tek tesirli bindirme bağlantı tipidir. Tek tesirli bindirme bağlantısının hasar yükünü artırmak için kullanılan yöntemlerden biri bindirme bölgesinin geometrik yapısının değiştirilmesidir. Sunulan çalışmada farklı iç kademe uzunluklarına sahip tek tesirli bindirme bağlantıların dört nokta eğme yükü altında mekanik özellikleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada yapıştırılan malzeme olarak sıklıkla havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve yapıştırıcı olarak ise çift bileşenli DP460 yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. Sonuç olarak, tek tesirli bindirme bağlantıların bindirme bölgesinde iç kademe yapılması bağlantıda oluşan çatlağın ilerlemesini engellediğinden dolayı, bağlantının eğme yükünü artırmaktadır. Ayrıca bağlantının eğme yükündeki artış oranı bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki iç kademe uzunluğuna göre değişmektedir. Sonlu elemanlar analiz çalışmasında yapıştırıcı tabakası cohesive zone model (CZM) ile modellenmesi, deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

The Effect of Internal Step on Joint Damage Load in Adhesive Joints Subject to Four Point Bending Load: Experimental and Numerical Analysis

Research Article

Article History:

Received: 17.01.2022

Accepted: 04.05.2022

Published online: 12.12.2022

Keywords:

Adhesively bonded joint

Joint design

Internal step-lap joint

Bending moment

ABSTRACT

Adhesive bonding is one of the most preferred joining methods due to its great advantages in joining composite or different types of materials used in the aerospace and automotive industries. The type of joint that is frequently used in the adhesive bonding method is the single-acting overlap joint type. One of the methods used to increase the damage load of the single-acting lap joint is to change the geometric structure of the bond lap region. The mechanical characteristics of single-step lap joints with varied internal step lengths were studied experimentally and numerically under four-point bending force in this work. In the experimental study, AA2024-T3 aluminum alloy, which is often used in the aerospace and automotive industries, and double-component DP460 structural adhesive was used as the adhesive. As a result, internal staggering of single-step lap joints increases the bending load of the joint, since it prevents the propagation of crack formed in the joint. In addition, the rate of increase in the bending load of the connection varies according to the length of the inner stage at the ends of the overlap zone. In the numerical analysis study, it was concluded that the adhesive layer was

modeled with the cohesive zone model (CZM), and the experimental and finite element analysis data were quite compatible with each other.

To Cite: Çalık A., Akpınar S. Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Yapıştırma Bağlantılarında İç Kademenin Bağlantı Hasar Yüküne Etkisi: Deneysel ve Sayısal Analiz. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2022; 5(3): 1128-1140.

Giriş

Endüstride yapışkanlı bağlantıların kullanımı havacılık, otomotiv endüstrisi ve takım tezgahları modüllerinin geliştirilmesi için büyük ilgi görmektedir (Zielecki ve ark. 2017). Zaman ve maliyet tasarrufu, yorulma ve yüksek korozyon direnci, çatlak geciktirme ve iyi sönümleme özellikleri bu bağlantıların başlıca avantajlarıdır (Mubashar ve ark. 2011; Sülü, 2018; Bayramoğlu ve ark., 2021).

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantının yapıştırılan bölge geometrisini değiştirmek, her zaman stres ve gerinim dağılımında değişikliklere neden olacaktır. Bu farklılıkların ayrıca stres konsantrasyonları ve dolayısıyla bağlantının yük kapasitesi ve uzun vadeli performansı üzerinde tesirli bir etkisi vardır. Yapıştırıcıyla birleştirmede, yük, üst üste binme bölgesindeki yapışkan tabaka aracılığıyla bir yapıştırılandan diğerine düzgün bir şekilde iletilir, yani yapıştırıcı, yük aktarımı için bir ortam görevi görür.

Tek tesirli bindirme bağlantılar, yıllar içinde en yaygın olarak kullanılan yapışkanlı bağlantılardır ve önemli araştırmaların konusu olmuştur (Beigrezaee ve ark., 2020). Tek tesirli bindirme bağlantılarda nispeten düşük elastisite modüllü yapıştırıcılar kullanıldığında bile, stres, yapışma yüzeyi boyunca üniform olmayan bir şekilde dağılmaktadır. Tek tesirli bindirme bağlantıdaki yükler ortak doğrusal değildir, bu da bağlantının dönmesine neden olan bir bükülme momenti üretir. Bu moment yapışkan tabakayı kesme ve soyulma gerilimlerine maruz bırakır. Yapıştırılan levhalar benzer şekilde aynı zamanda çekme ve bükülmeye maruz kalırlar. Özellikle yüksek gerilimli bölgelerde hem yapıştırıcının hem de yapıştırılan maddenin deformasyonunun plastik hale gelmesi oldukça sık rastlanılır.

Yapıştırıcıda oluşan soyulma gerilmeleri bindirme bölgesinin uçlarında çatlağa neden olup, bu çatlağın ani bir şekilde merkeze doğru ilerlemesiyle hasar oluşmaktadır. Yapıştırıcı bölgesinde oluşan bu olayı nümerik analizde en iyi simule etmek için yapıştırıcı bölgesinin CZM ile modellenmesi gerekmektedir (Çalık ve Akpınar, 2019).

Grant ve ark.(2009) yaptığı çalışmada bindirme bağlantıları çekme, dört nokta eğilme (saf eğilme) ve üç nokta eğilme (makasla eğilme) altında test edilmiştir. Örtüşme uzunluğu, yapışma yüzeyi kalınlığı ve bindirme bölgesinin kenar geometrisi gibi çeşitli parametreler değiştirildiğinde bağlantı mukavemeti deneysel ve analitik olarak incelenmiştir.

Özel ve ark.(2003) yaptığı çalışmada dört nokta eğme yükünde yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısına doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi uygulandı. Birleşim konfigürasyonu için çok farklı mekanik davranışlara sahip sert ve esnek iki yapıştırıcı ve dört farklı kalınlıkta yapıştırılan sert çelik analiz edilmiştir. Sonuç olarak yapıştırıcı kalınlığının derz performansında önemli bir rol oynadığı gösterilmiştir; sert yapıştırıcı, kalın yapıştırıcılar kullanıldığında daha güçlü

bağlantı mukavemeti sağlarken, ince yapıştırıcılar kullanıldığında esnek yapıştırıcı için durum tam tersiydi.

Temiz ve ark.(2015) yaptığı çalışmada, eğilmeye maruz gömülü yama ile çift bantlı birleşimdeki yapıştırıcının davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

Akpınar ve ark.(2013) yaptığı çalışmada, üst yapışma ve alt yapışma genişliklerinin aynı olmadığı, eğilme momenti altında yapıştırma ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantının mekanik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

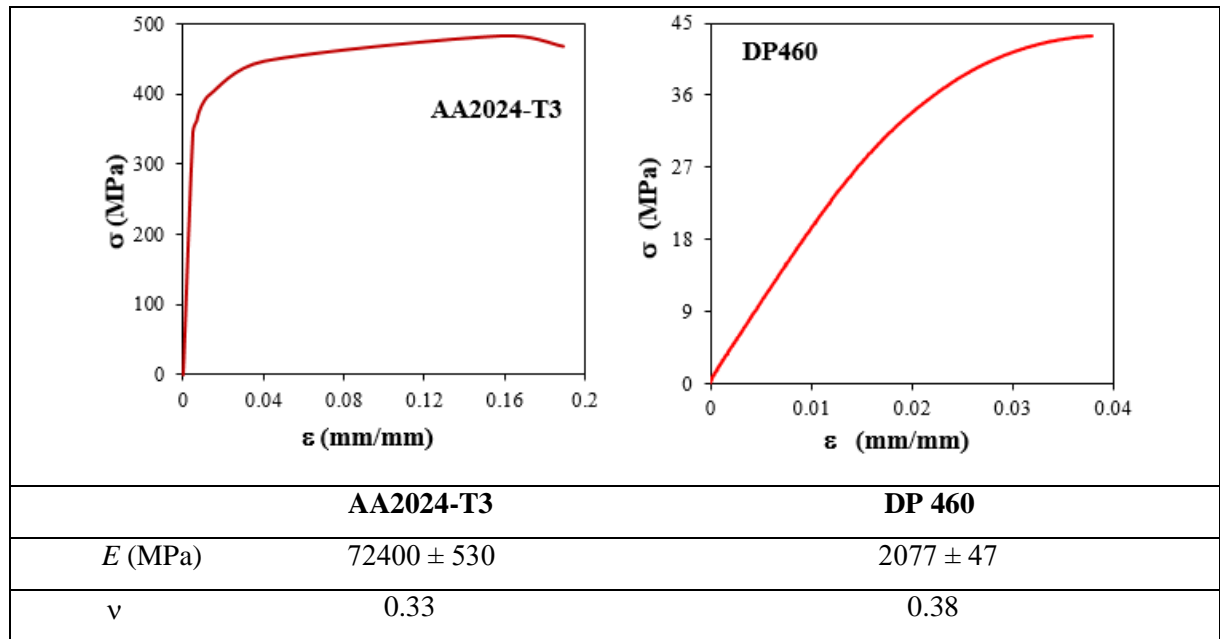
Bu çalışmanın temel amacı, farklı iç kademe uzunluklarına sahip tek tesirli bindirme bağlantıların dört nokta eğme yükü altında mekanik özellikleri deneysel ve nümerik olarak incelemektir. Deneysel çalışmaların sonuçlarının doğruluğunun tespiti için cohesive zone model (CZM) kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Deneyel Yöntem ve Sonlu Elemanlar Analizi

Bu araştırmadaki yapıştırılan malzeme olarak, alüminyum alaşımı olan AA2024-T3 kullanılmıştır. AA2024-T3 alüminyum alaşımı işlenebilirliği, hafifliği, fiziksel ve mekanik özellikleri ve mükemmel korozyon direnci nedeniyle otomotiv ve havacılık sektörlerinde yaygın kullanım alanına sahiptir.

Deneysel çalışmada yapıştırıcı olarak çift bileşenli sıvı epoksi (DP460) kullanılmıştır. 3MTM DP460, 2:1 hacim oranında epoksi (B) ve hızlandırıcı (A) kombinasyonundan meydana gelen sıvı bir yapıştırıcıdır. Metal, porselen, cam ve çeşitli kompozit malzemeleri birbirine bağlamak için kullanılır. Yapıştırılan malzemenin ve yapıştırıcının malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir (Gavali ve ark., 2021).

Tablo 1. Çalışmadaki yapıştırıcının mekanik özellikleri (Gavali ve ark., 2021)

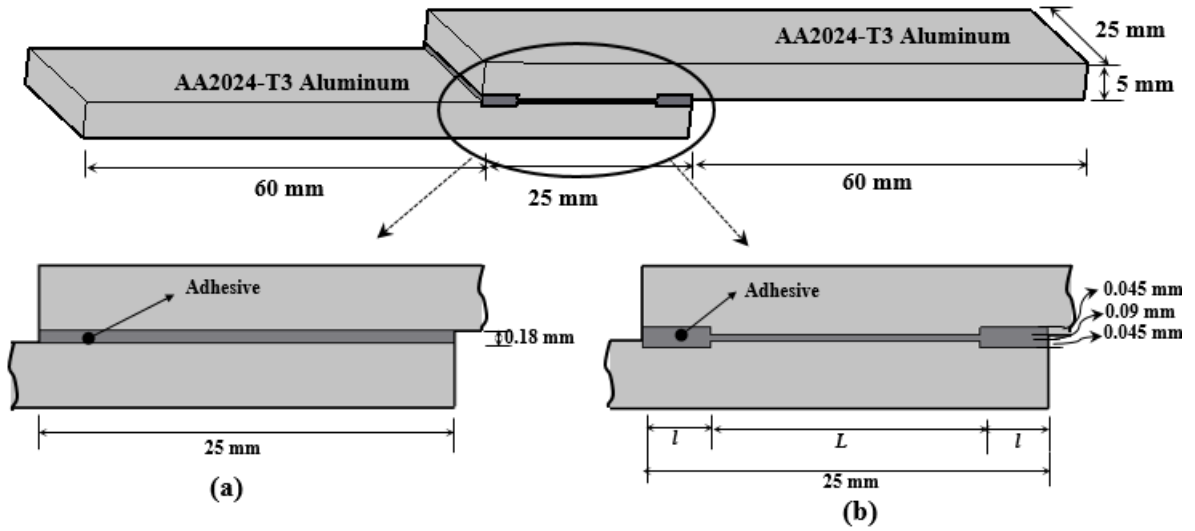


E: Young modülü; ν : Poisson oranı; σ_t : Nihai çekme mukavemeti; ϵ_t : Nihai çekme gerilmesi

Sunulan çalışmada; yapıştırılan malzemenin kalınlığı, genişliği ve bindirme uzunluğu aynı olan tek tesirli bindirme bağlantı (SLJ) ve beş farklı içi kademe uzunluğuna sahip iç kademeli bindirme bağlantı (ISLJ)'in dört nokta eğme yükü altında mekanik davranışları incelenmiştir. Bu numunelere ait deneysel ve geometrik parametreler Şekil 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar için deneysel parametreler

Numune	Bağlantı Tipi	Uzunluklar l - L - l (mm)
Tek Tesirli Bindirme Bağlantı (Single Lap Joint)	SLJ	25
İç Kademeli Bindirme Bağlantı (Internal -Step Lap Joint)	ISLJ-21	2-21-2
İç Kademeli Bindirme Bağlantı (Internal -Step Lap Joint)	ISLJ-17	4-17-4
İç Kademeli Bindirme Bağlantı (Internal -Step Lap Joint)	ISLJ-13	6-13-6
İç Kademeli Bindirme Bağlantı (Internal -Step Lap Joint)	ISLJ-9	8-9-8
İç Kademeli Bindirme Bağlantı (Internal -Step Lap Joint)	ISLJ-5	10-5-10

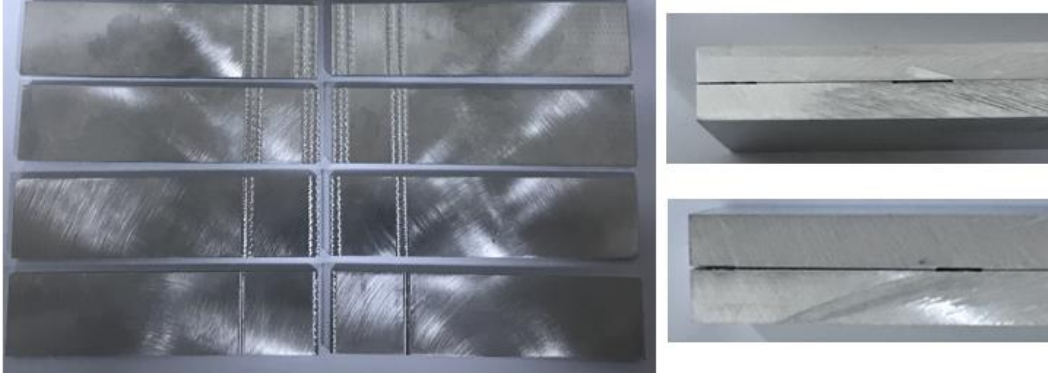


Şekil 1. Çalışmadaki bağlantı geometrisi, a) tek tesirli bindirme bağlantı, b) iç kademeli bindirme bağlantı.

Bağlantı numunelerinde kullanılmak üzere 4.85 mm kalınlığında AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemesi 25 x 112.5 mm boyutlarında hassas testere ile kesildi (Şekil 1). Üç kademeli bindirme bağlantılarında kullanılan malzemelerin kademe açma işlemi ise beş eksenli CNC freze tezgahında yapıldı. Daha sonra yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların performansı yüzey hazırlama işlemlerine bağlı olduğundan yapıştırılacak malzemelere yüzey hazırlama işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Bundan dolayı, istenilen geometrik boyutlara getirilmiş numunelerde oluşan çapakların ve numune üzerindeki yağ, gres, kir gibi atıkların temizlenmesi için numuneler 400 grade SiC zımpara ile zımparalanmıştır. Daha sonra 400 grade SiC zımpara işleminde numuneler üzerinde oluşan zımpara çiziklerin yok edilmesi için numuneler 1000 grade SiC zımpara ile zımparalanmış ve pürüzsüz yüzey

elde edilmiştir. Zımpara işlemi bittikten sonra numuneler toz deterjan ile yıkandıktan sonra numuneler 10 dakika asetonda bekletilmiştir.

Yapıştırılmadan önce asetonda ekstrakte edilen numune parçaları 60°C etüvde kurutularak yüzey hazırlama işlemleri yapılmıştır (Şekil 2).

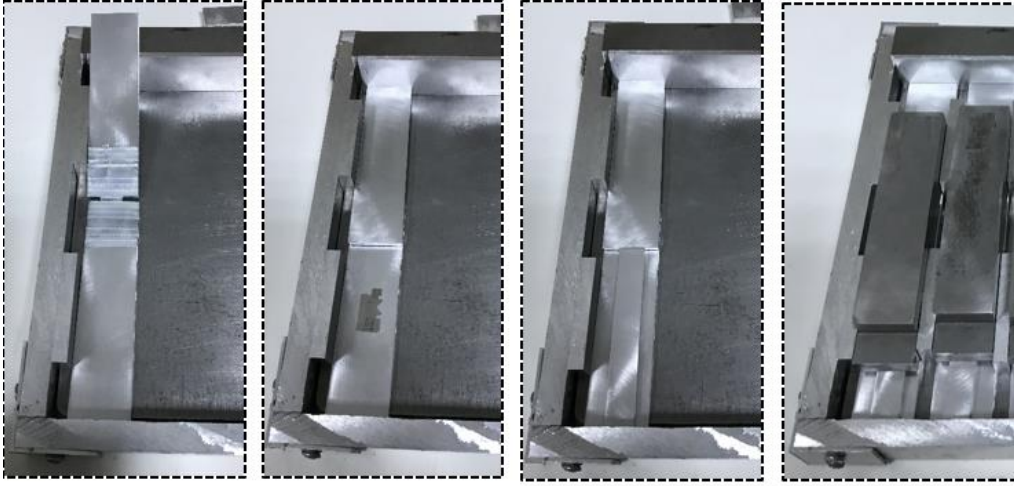


Şekil 2. Yüzey hazırlama işlemi uygulandıktan sonra yapıştırılan malzemeler

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş derz numuneleri elde etmek için yapıştırıcı uygulanmıştır. Numuneler daha sonra Şek. 3'te sergilenen kalıba yerleştirildi. DP460 sıvı yapıştırıcı bindirme bölgelerine uygulanmış ve bir mastar yardımıyla yapıştırılacak yüzeylere yayılmıştır (Şekil 3). Tek tesirli bindirme bağlantılarda yapıştırıcı kalınlığının 0.18 mm olması için bağlantının her iki ucuna 0.18 mm kalınlığında metal parçalar konulmuştur. Bu parçalar yapışma kalınlığını yapışma bölgesi boyunca sabit kalmasını temin etmesi için kullanılmıştır.

Düzgün yapışma kalınlığını sağlama, yapışma kalınlığının ayarlanabilmesi, kürleşme için gerekli düzgün basınç uygulanabilmesi ve yapıştırılan malzemelerde kayma olmaması için Şekil 3'te fotoğrafları sunulan yapışma bağlantıları için özel tasarlanmış ve üretilmiş kalıp kullanılmıştır.

Yapıştırıcı DP 460 için sıcaklık, basınç ve süreye bağlı olarak bazı farklı kürleşme koşulları bulunurken, bu çalışmada Şekil 3'de gösterildiği gibi kalıp içerisine yerleştirilmiş yapıştırma bağlantılarında kürleşme 0,15 MPa basınç altında 70 °C'de 120 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir (Gavali ve ark.,2021). Numunelere uygulanan kürleşme şartı sağlandıktan sonra numuneler ortam şartında soğumaya bırakılmıştır. Kalıp içerisinde oda sıcaklığına erişen numuneler kalıp içerisinden çıkarılarak kürleşme esnasında dışarı taşan fazla yapıştırıcılar keskin bir bıçak yardımıyla temizlenmiş ve böylece yapıştırma işlemi tamamlanmıştır. Her bir bağlantı çeşidi için 3 olmak üzere toplamda 18 numune üretilmiştir.

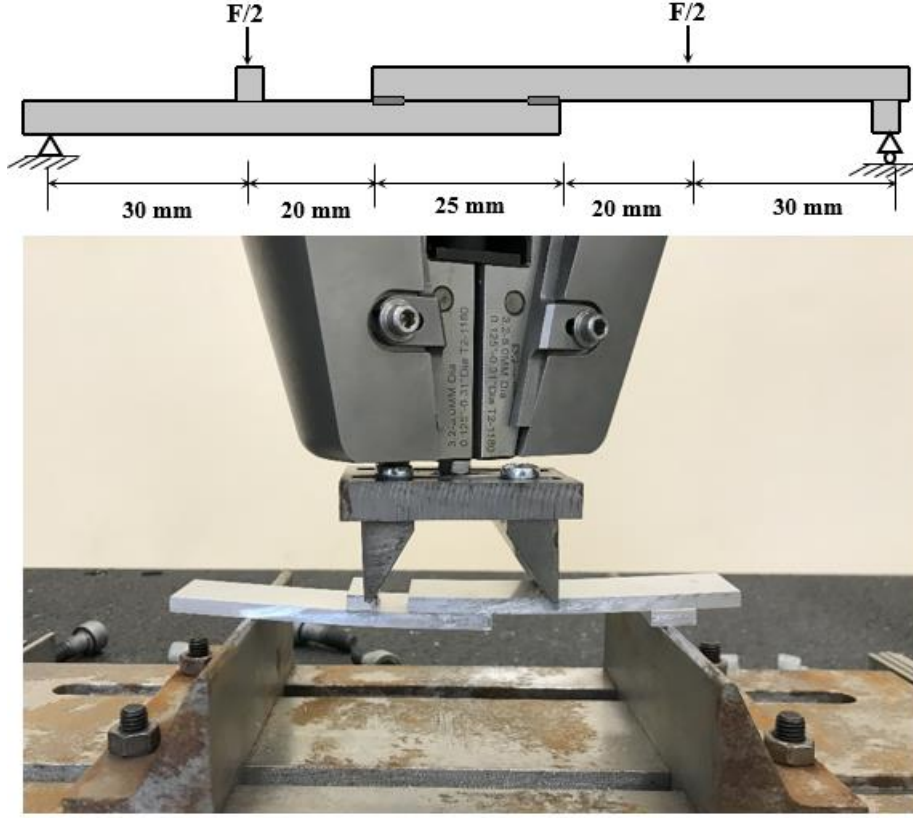


Şekil 3. Numunelerin ortak imalat kalıbı.

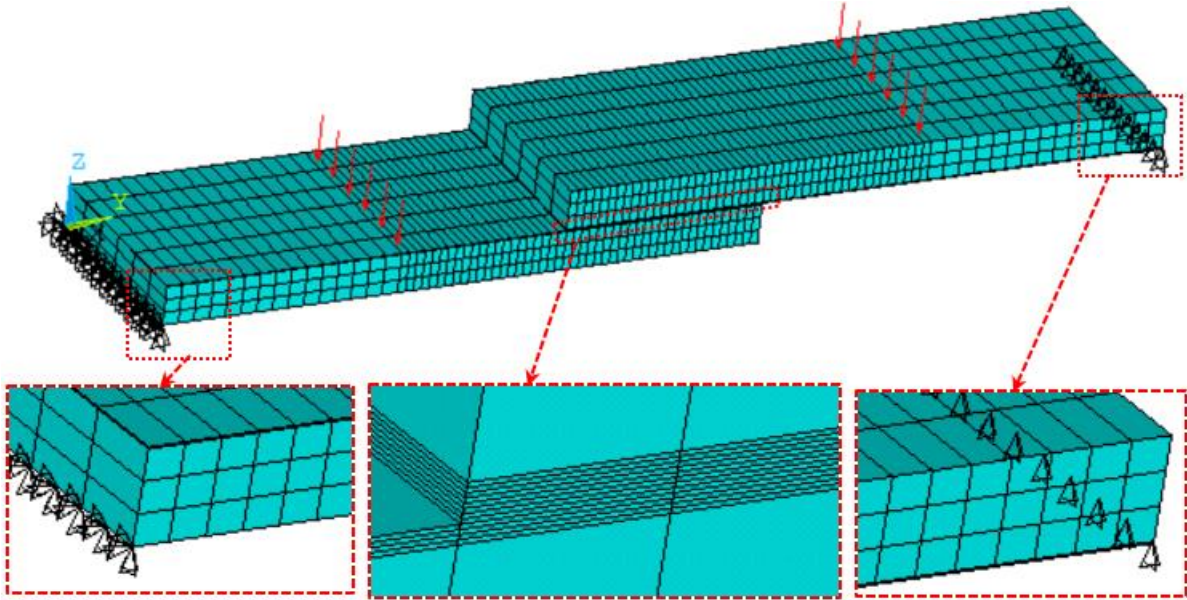
Statik dört nokta eğilme testleri, Instron-5982-100 kN (ABD) üniversal çekme test cihazı kullanılarak 21 °C ve %22 nemde 5 mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir. Üç tip numune (SLJ ve ISLJ) için sınır koşulları ve uygulanan kuvvet Şekil 4'te gösterildiği gibidir. Testten önce, her örneğin örtüşme uzunluğu ve yapışkan tabaka kalınlığı ölçülmüş ve belgelenmiştir. Dört nokta eğme testi sırasında derzler dikkatlice izlendi ve numunelerin taşıyabileceği maksimum kuvvet kaydedilmiştir.

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan numuneler ANSYS 18 paket programı ile 3 boyutlu modellenmiştir (Şekil 5). Bağlantıların sayısal analizlerinde yapıştırılan malzeme (AA2024-T3) için lineer olmayan malzeme davranışı göz önüne alınarak Multilinear Isotropic Hardening (MISO) malzeme model kullanıldı. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda bindirme bölgesinin uçlarında soyulma gerilmeleri, orta kısımlarda ise kayma gerilmeleri daha baskın oluşmaktadır. Nümerik analizde deneysel olayı daha iyi simüle etmek için yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların nümerik analizlerinde yapıştırıcı bölgesinde malzeme modeli olarak Cohesive Zone Model (CZM) seçildi.

Sonlu elemanlar analizlerinde, Deneysel çalışmadaki aynı numune boyutları, aynı yükler ve aynı sınır koşulları kullanılmıştır. Üç boyutlu analizde, yapıştırılan malzeme ve yapışkanın Solid 186 sonlu elemanları kullanılarak modellenmiştir. Solid 186 sonlu elemanı üç serbestlik derecesi ve 20 düğüm sayısına sahiptir. Gerilme dağılımının kritik olduğu bölgelerde (bindirme bölgesi ve bindirme bölgesine yakın yerlerde) daha küçük mesh kullanılmıştır (Şekil 5). Nümerik modelde farklı mesh yoğunluklarında denemeler yapıldı ve gerilme analizleri göz önüne alınarak sayısal çözümler için gereken süreyi azaltmak için ideal mesh boyutu seçildi.



Şekil 4. Deneylerde kullanılan sınır koşulları ve yükleme



Şekil 5. ISLJ'in sonlu eleman modeli

CZM, gerilmeler ve bağıl yerdeğiştirmeler (T_n çekme gerilimi, T_t kayma gerilimi) arasındaki bir ilişkiye dayanır. ANSYS 18 sonlu elemanlar yazılım paketinde CZM ile analizin gerçekleştirilebilmesi için T_n^{max} (σ_n^{max}), G_{IC} , T_t^{max} (τ_t^{max}) ve G_{IIC} parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Kanar ve ark.(2018) ve Kazaz ve ark.(2020), bu değerleri Mod I ve Mod II deneyleri yaparak elde etmişler ve Tablo 3'te verilmiştir. Çift Konsol Kirişli bağlantılarla G_{IC} (çekme kritik gerinim enerjisi salınım

oranı) değerleri elde edilirken, G_{IIC} (kesme kritik gerinim enerjisi salınım oranı) değerleri Kalın Yapışma Kesme Testi bağlantılarıyla elde edildi. Mevcut çalışmada bu değerler kullanılmıştır.

Tablo 3. CZM modellemesi için DP460 yapıştırıcının özellikleri (Kantar ve ark., 2018; Kazaz ve ark., 2020)

σ_n^{max} (MPa)	G_{IC} (N/mm)	τ_t^{max} (MPa)	G_{IIC} (N/mm)
32.6	2.56	28.5	11.71

Bulgular ve Tartışma

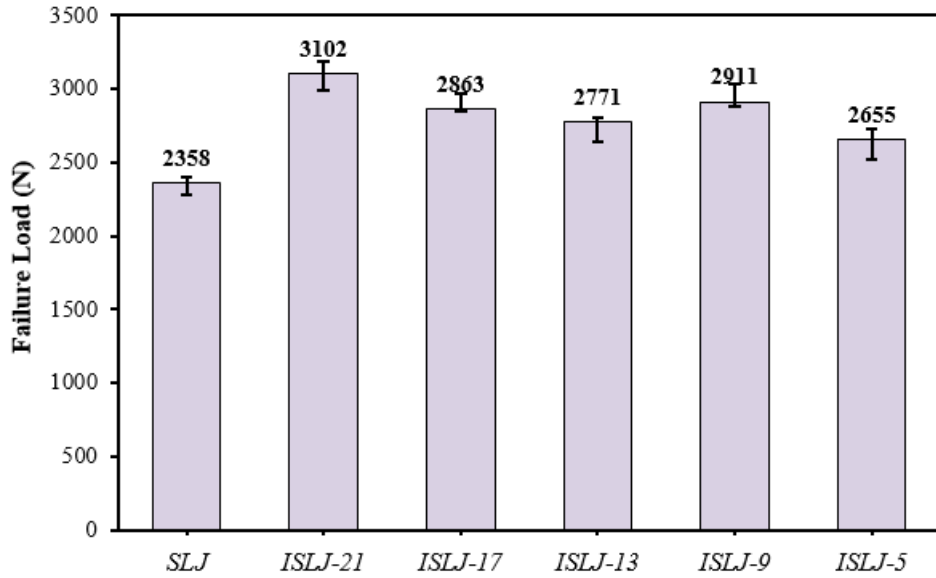
DeneySEL Sonuçlar

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantıları yüke maruz kaldığında, bindirme bölgesinin uçlarında soyulma gerilmeleri oluşur ve bu soyulma gerilmeleri bindirme bölgesinde çatlaklar oluşturur. Bu çatlakların bindirme bölgesi merkezine yaklaştıkça bağlantıda hasar oluşturur.

Akpınar ve Durmuş (Akpınar, 2014; Durmuş ve Akpınar, 2020) tarafından yapılan çalışmalarda, bindirme bölgesinde kademe yapılması çatlağın ani ilerlemesini engellediği ve bu durum bağlantının hasar yükünü artırdığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmalar göz önüne alınarak, sunulan çalışmada tek tesirli bindirme bağlantısına iç kademe yapılarak elde edilen iç kademeli bağlantı tipinin dört nokta eğme yükü altındaki performansı incelenmiştir. Dört nokta eğme yükü uygulanmasındaki amaç bindirme bölgesinin tamamı eğme momentine maruz kalmasını sağlamaktır.

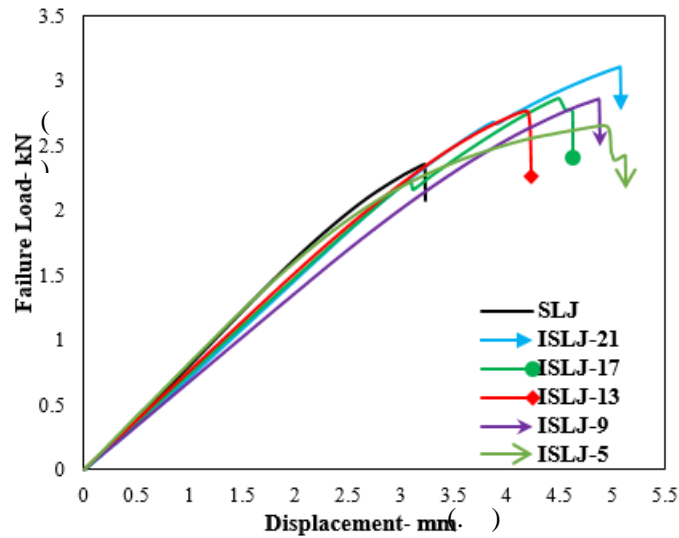
Şekil 6'da verilen hasar yükleri her bir bağlantı parametresinden üçer numune test edilerek elde edilen ortalama hasar yükleri olup, standart sapmaları yaklaşık %1 ile %3 arasındadır. SLJ tipinin hasar yüküne göre ISLJ-21 bağlantı tipi yaklaşık %31 daha fazla yük taşımıştır. Ancak iç kademe uzunluğu 21 mm'den 17 mm'ye indirildiğinde, hasar yükündeki artış oranı %31'den %21'inde olup, iç kademe uzunluğu 17 mm'den 13 mm'ye indirildiğinde ise hasar yükündeki artış oranı %21'den %18'inde. İç kademe uzunluğu 13 mm'den 9 mm'ye indirildiğinde hasar yükündeki artış oranı %18'den %23 çıkarken, iç kademe uzunluğu 9 mm'den 5 mm'ye indirildiğinde hasar yükündeki artış oranı %23'den %13'inde.

SLJ tipine göre tüm ISLJ tiplerinin hasar yüklerinde artış olduğu ve bu artışın bindirme bölgesinde iç kademe yapılarak çatlağın ani ilerlemesinin engellenmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Ancak ISLJ-21 tiplerinin hasar yükündeki ani artışın nedeni bindirme bölgesinin her iki ucunun 2 mm'lik kısmında yapıştırıcı kalınlığının 0.18 mm ve daha sonraki kısımlarında ise yapıştırıcı kalınlığının 0.09 mm olmasından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 6. Deneysel çalışmadan elde edilen yapıştırıcıyla birleştirilmiş iç kademli bindirme bağlantıların (ISLJ) ortalama maksimum kopma yükleri

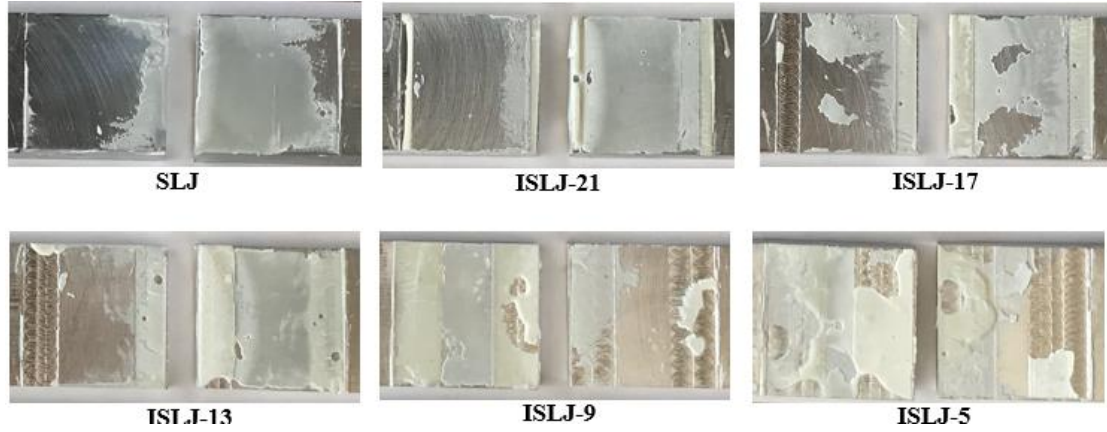
Şekil 7’de ISLJ tipleri için verilen kuvvet yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde, single lap joint tiplerinin bindirme bölgesine iç kademe yapılması bağlantıların hem yük taşıma kapasitesini hem de yer değiştirme kapasitesini önemli derecede artırmaktadır. Ayrıca, kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altındaki alan, bağlantı tarafından emilen enerjiyi temsil ettiğinden, Grafiğe bakarak ISLJ tipleri tarafından emilen enerji, SLJ tipleri tarafından emilen enerjiden çok daha yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 7. DP460 yapıştırıcı kullanılarak yapılan ISLJ kuvvet-yer değiştirme eğrileri.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tüm bağlantı tiplerinde ortaya çıkan kırılma modları tespit edilmiş ve Şekil 8’de verilmiştir. Deformasyon türleri ISO 10365 (ISO 10365 1992)’da tanımlanmıştır. Bu tanımlar dikkate alınarak mevcut çalışmadaki kırılmalar gözlemlendiğinde, yapışkan tabakanın hem alt yapıştırmada hem de üst yapıştırmada mevcut olduğu tespit edilebilir. Bu nedenle hem alt yapıştırılan

hem de üst yapıştırılan yapıştırıcı tabakasının kalınlığı eşit olmadığında ortaya çıkan özel kohezyon kırılmasının (SKF) tüm derz tiplerinde meydana geldiği ifade edilebilir (Şekil 8).



Şekil 8. Bu araştırmada değerlendirilen numune yüzey hasarları

Ayrıca Şekil 8’de verilen bu hasar yüzeylerinden elde edilen en önemli sonuç, bindirme bölgesindeki iç kademenin her iki tarafında (bindirme bölgesinin her iki ucunda) yapıştırıcı kalması ve kalan bu yapıştırıcının hem üst yapıştırılan malzemenin ucunda hemde alt yapıştırılan malzemenin ucunda olmasıdır. Bu, hasara neden olan çatlakın bindirme bölgesinin her iki ucundan başladığını ve daha sonra iç aşamaya yaklaştıkça yön değiştirdiğini göstermektedir. Bunun sonucunda bağlantının hasar yükünde artış meydana gelir.

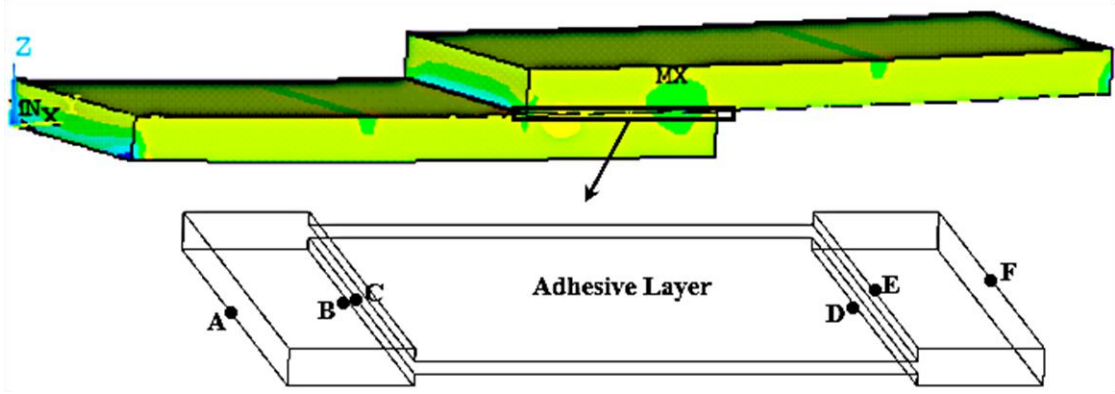
Sonlu elemanlar analiz sonuçları

Tablo 4’de verilen deneylerden ve nümerik analizden elde edilen hasar yükleri incelendiğinde, deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum yapıştırma bağlantılarının nümerik analizinde yapıştırıcı tabakasının cohesive zone model ile modellenmesinin doğruluğunu göstermektedir.

Tablo 4. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların sayısal ve deneysel ortalama kırılma yükleri

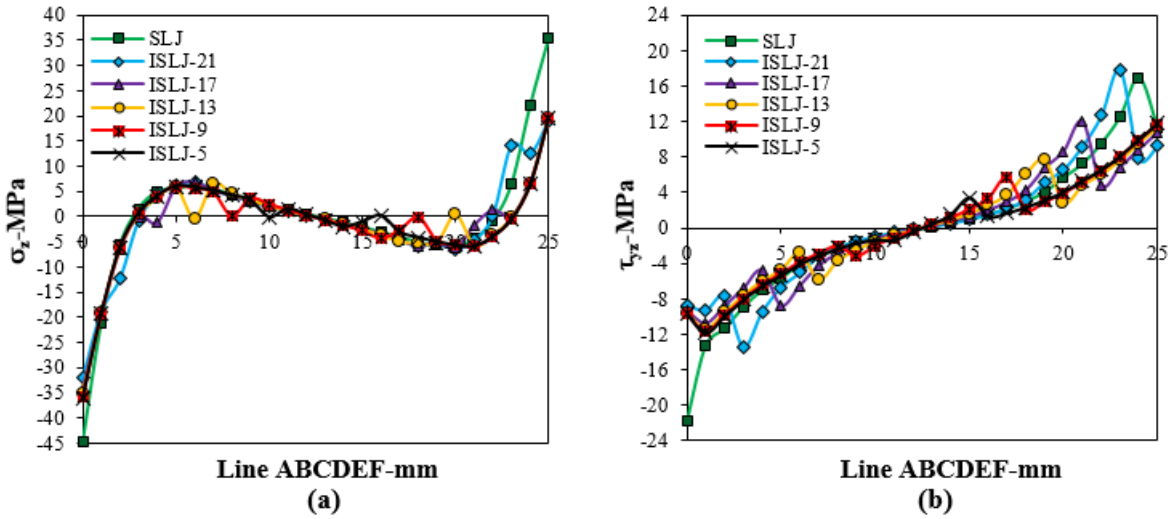
Bağlantı Tipi	Deneysel kopma yükü, F_{EXP} (N)	Sayısal kopma yükü, F_{FEA} (N)	F_{FEA}/F_{EXP}
SLJ	2358	2300	0,97
ISLJ-21	3102	3220	1,04
ISLJ-17	2863	2940	1,03
ISLJ-13	2771	2790	1,01
ISLJ-9	2911	2820	0,97
ISLJ-5	2655	2710	1,02

Sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmanın sonuçları, kırılma için kritik yüzeyin ABCDEF çizgisi ile gösterilen arayüz olduğunu göstermektedir, bkz. Şekil 9. Aynı bağlama alanına sahip SLJ ve ISLJ tipleri için 1200 N (deneylerden elde edilen en küçük hasar yükünün yaklaşık yarısı olan yük) dört nokta eğilme yükü altında sayısal analizler yapılmıştır.



Şekil 9. Yapıştırıcı ile yapıştırılmış ISLJ numunelerinin kritik kırılma yüzeyleri

Şekil 10, SLJ ve ISLJ tipleri için ABCDEF hattı boyunca yapışkan tabaka üzerinde meydana gelen gerilme dağılımlarının, kırılmada diğer gerilmelerden daha etkili olan soyulma ve kesme (σ_z ve τ_{yz}), karşılaştırmasını göstermektedir. A noktasındaki ve B noktasındaki gerilim farkı sınır koşulu sebebiyledir (bağlantının bir ucu sabit destek ve diğer ucu hareketlidir). Şekil 10a'de verilen gerilme dağılımları incelendiğinde, SLJ tipinin bindirme bölgesine iç kademe yapılması yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımlarını önemli derecede azaltmaktadır. Bu azalma sonucunda bağlantının hasar yükü artacaktır.



Şekil 10. SLJ ve ISLJ tiplerinden elde edilen kritik çizgilerin karşılaştırılması, a) soyulma gerilimi (σ_y), b) kesme gerilimi (τ_{xy})

Diğer taraftan ISLJ tiplerinde bindirme bölgesinin uçlarında oluşan (F noktalarında) maksimum çeki karakterli gerilmeler gitgide azalarak iç kademenin başlangıcında (E noktalarında) minimum ve bası karakterli olduğu görülmektedir. İç kademenin başlangıcında (E noktaları) minimum ve bası karakterli olan gerilmeler kademe geçtiği aynı noktada tekrar çeki karakterli olmaktadır. Bu geçiş noktalarındaki çeki ve bası gerilmeleri arasındaki farklar, binme bölgesindeki iç basamak uzunluğunun azaltılması ile azalmaktadır.

Ayrıca, Şekil 10b’de verilen kayma gerilme (τ_{xy}) dağılımları incelendiğinde, bindirme bölgesinde iç kademe yapılması A ve F noktalarında oluşan maksimum kayma gerilme değerini azaltmaktadır. İç kademedeki dolaylı kademe başlangıcında oluşan kayma gerilmelerindeki ani artma ve azalma düzensizliği, iç kademe uzunluğunun azalmasıyla minimum olduğu görülmektedir.

Sonuçlar

Sunulan çalışmada farklı iç kademe uzunluklarına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarının dört nokta eğme yükü altında mekanik özellikleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Tek tesirli bindirme bağlantılarının bindirme bölgesinde iç kademe yapılması bağlantıda oluşan çatlağın ilerlemesini engellediğinden dolayı, bağlantının eğme yükünü artırmaktadır.
- Bağlantının eğme yükündeki artış oranı bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki iç kademe uzunluğuna göre değişmektedir.
- ISLJ tipleri tarafından emilen enerji, SLJ tipleri tarafından emilen enerjiden çok daha yüksektir.
- SLJ tipinin bindirme bölgesine iç kademe yapılması yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımlarını önemli derecede azaltmaktadır. Bu azalma bağlantının hasar yükünün artması anlamına gelmektedir.

Çıkar Çatışması

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

Yazar Katkısı

Salih Akpınar çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, verinin dönüştürülmesi, uygun yöntemlerle analizi, sonuçların yorumlanması ve verinin toplanması aşamalarında, Ahmet Çalık çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi ve sonuçların yorumlanması aşamalarında katkı sağlamışlardır.

Kaynaklar

- Akpınar S. The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers. Composites Part B: Engineering 2014; 67: 170–178.
- Akpınar S., Doru MO., Özel A., Aydın MD., Jahanpasand HG. The effect of the spew fillet on an adhesively bonded single-lap joint subjected to bending moment. Composites Part B: Engineering 2013; 55: 55–64.

- Bayramoglu S., Akpınar S., Çalık A. Numerical analysis of elasto-plastic adhesively single step lap joints with cohesive zone models and its experimental verification. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2021; 35(2): 641–649.
- Beigrezaee MJ., Ayatollahi MR., Bahrami B., da Silva LFM. A new geometry for improving the strength of single lap joints using adherend notching technique. *The Journal of Adhesion* 2020; 97(11): 1-20.
- Çalık A., Akpınar S. Effect of extensometer usage on obtaining the force-displacement curve of the adhesively single lap joint. *European Mechanical Science* 2019; 3(4): 142–146.
- Durmuş M., Akpınar S. The experimental and numerical analysis of the adhesively bonded three-step-lap joints with different step lengths. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 2020; 105(October 2019): doi:10.1016/j.tafmec.2019.102427
- Gavgali E., Sahin R., Akpınar S. An investigation of the fatigue performance of adhesively bonded step-lap joints: An experimental and numerical analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2021; 104(June 2020): 102736.
- Grant LDR., Adams RD., da Silva LFM. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2009; 29(4): 405–413.
- ISO 10365. Adhesives- Designation of main failure patterns 1992.
- Kanar B., Akpınar S., Avinc Akpınar I., Akbulut H., Ozel A. The fracture behaviour of nanostructure added adhesives under ambient temperature and thermal cyclic conditions. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 2018; 97: 120-130.
- Kazaz I., Akpınar S., Ozel A. The effects of thermal cycle and nanostructure reinforcement on the shear load in adhesively bonded joints. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 2020; 27(19): 1627-1638.
- Mubashar A., Ashcroft IA., Critchlow GW., Crocombe AD. Strength prediction of adhesive joints after cyclic moisture conditioning using a cohesive zone model. *Engineering Fracture Mechanics* 2011; 78(16): 2746–2760.
- Ozel A., Kadioglu F., Sen S., Sadeler R. Finite element analysis of adhesive joints in four-point bending load. *Journal of Adhesion* 2003; 79(7): 683–697.
- Sülü, İY. Mechanical behavior of composite parts adhesively jointed with the insert double-lap joint under tensile load. *Welding in the World*, 2018; 62(2): 403–413.
- Temiz Ş., Adin H., Sülü İY. Behaviour of bi-adhesive in double-strap joint with embedded patch subjected to bending. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 2015; 45(3): 83–96.
- Zielecki K., Witek L., Stachowicz F. Influence of plastic deformation of adherend material on stress distribution in adhesive lap joints. *Acta Metallurgica Slovaca* 2017; 23(4): 304–312.