



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Kriterlerinin İncelenmesi

İsmail SARAÇ

Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye
İsmail SARAÇ, ORCID No: 0000-0001-8438-2744

*Sorumlu yazar e-posta: ismailsarac@aksaray.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 22.11.2023
Kabul: 16.04.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1394411

Anahtar Kelimeler

Gevrek yapıştırıcı,
Hasar analizi,
Sünek yapıştırıcı,
Yapıştırma bağlantıları

Öz: Yapıştırıcıların endüstriyel uygulamalarda kullanımının artmasıyla birlikte, yapıştırma bağlantılarında hasar analiz çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalar, yapıştırma bağlantılı yapıların tasarımında mühendisler için önemli bilgiler sunmuş ve tasarımların şekillenmesine katkı sağlamıştır. Yapıştırma bağlantılarının mukavemetini tahmin etmeye yönelik ilk çalışmalar analitik yaklaşımlar kullanılarak yapılmıştır. Bunu takiben, Sonlu Elemanlar Yönteminin yaygınlaşmasıyla birlikte, geometri sınırlaması olmaksızın, yapıştırma bağlantılarının dayanım tahminleri kapsamlı bir şekilde yapılmaya başlanmıştır. Yapıştırıcılar için literatürde çok sayıda hasar kriteri mevcuttur. Hasar kriteri seçiminde, kullanılan yapıştırıcının sünek veya gevrek yapıda olduğunun bilinmesi önemlidir. Ayrıca, yapıştırıcı hasar kriterinin uygulanabilmesi için, yapıştırıcı tabakasının, bağlantının toplam mukavemetinin en zayıf kısmı olması gerekir. Bu çalışmada, gevrek karakterli Araldite AV138 ve sünek yapıda olan Araldite 2015 yapıştırıcılar kullanılarak oluşturulan tek tesirli bindirme bağlantılarında analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak hasar yükleri hesaplanmıştır. Elde edilen analitik ve sayısal hasar yükleri literatürdeki bir deneysel çalışma ile karşılaştırılarak, yapıştırıcı plastik davranışının, hasar kriteri seçiminde önemi gösterilmiştir. Çalışma sonucunda, gevrek karakterli yüksek dayanımlı AV138 yapıştırıcının kullanıldığı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında Von Mises kriterinin, sünek yapıdaki Araldite 2015 yapıştırıcının kullanıldığı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ise Global Akma kriterinin kullanılmasının incelenen diğer yöntemlere göre daha uygun olduğu gösterilmiştir.

An Investigation of Failure Criteria in Adhesive Joints

Article Info

Received: 22.11.2023
Accepted: 16.04.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1394411

Keywords

Adhesive joints,
Brittle adhesive,
Ductile adhesive,
Failure analysis

Abstract: With the increasing use of adhesives in industrial applications, failure analysis studies have begun to be carried out on adhesive joints. The analysis studies provided important information for engineers in the design of bonded structures and contributed to the shaping of the designs. Initial studies to predict the strength of adhesive joints were conducted using analytical approaches. Following this, with the widespread use of the Finite Element Method, strength predictions of the adhesive joints began to be made comprehensively, without geometry limitations. There are many failure criteria for adhesives in the literature. When choosing a failure criterion, it is important to know whether the adhesive used is ductile or brittle. Additionally, for the adhesive failure criterion to apply, the adhesive layer must be the weakest part of the total strength of the joint. In this study, failure loads were calculated using analytical and numerical methods for single-lap adhesive joints formed using brittle Araldite AV138 and ductile Araldite 2015 adhesives. The obtained analytical and numerical failure loads were compared with the results of experimental studies in the literature and

the importance of adhesive plastic behavior in the selecting of adhesive failure criteria was revealed. It has been shown that the use of the Von Mises criterion in the brittle, high-strength AV138 adhesive, and the Global Yield criterion in the ductile Araldite 2015 adhesive is more appropriate than the other methods examined in this study.

1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında çok sayıda birleştirme tekniği kullanılmaktadır. Yıllar içinde, cıvata, perçin, kaynak ve lehim gibi birleştirme elemanları geliştirilmiş ve standartlaştırılmıştır. Bu tekniklerin kullanımında herhangi bir tereddüt yoktur ve hasar tahmin yöntemleri bilinmektedir. Yapıştırma tekniği ise, ilk çağlardan beri insanlar tarafından kullanılmasına rağmen mühendislik uygulamalarında kullanımının son yıllarda yaygınlaştığını söylemek mümkündür. Tek bindirmeli bağlantı yöntemi, yapıştırıcı gerilme davranışını anlayabilmek için yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemidir. Yapıştırma bağlantılarının mukavemetini etkileyen birçok parametre vardır. Bunlar yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mekanik özellikleri, yapıştırılan malzemenin kalınlığı, bindirme uzunluğu, yapıştırıcı hattı kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey hazırlama yöntemi ve kürlenme işlemi olarak sıralanabilir (Adams & Wake, 1984).

Yüksek mukavemetli yapısal yapıştırıcıların üretimi ile birlikte mühendislik uygulamalarında yapıştırıcı kullanımı yaygınlaşmıştır. Yapıştırma bağlantılarının diğer mekanik birleştirme yöntemlerine göre önemli avantajları vardır (Rodríguez ve ark., 2012). Ancak, hasar tahmin prosedürleri açık kurallara tabi değildir. Yapıştırıcıların tarihsel sürecinde, özellikle 1940'lardan bu yana birçok hasar tahmin yöntemi önerilmiştir. İlk yapıştırma bağlantı hasar ve gerilme analizleri, klasik analizler olarak da adlandırılan Volkersen (1938), Goland & Reissner (1944) ve Hart Smith (1973) tarafından oluşturulan iki boyutlu, lineer analizlerdir. İlerleyen süreçte klasik analizler referans alınarak birçok elastik ve elasto-plastik analiz çalışmaları yapılmıştır. Ancak geliştirilen modeller daha genel hale geldikçe denklem sayısı ve karmaşa artmış ve bilgisayar kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Da Silva ve ark. (2008), yaptıkları kapsamlı literatür araştırmasında, yapıştırma bağlantıları ile ilgili analitik ve sayısal modelleri kronolojik olarak bir tabloda sunmuşlardır. Analitik çözümlerin büyük çoğunluğu iki boyutludur. Bu analiz yöntemlerinde yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler elastik kabul edilir ve sadece gevrek yapıştırıcılar için doğru sonuçlar elde edilebilir. Plastik deformasyon özelliği yüksek yapıştırıcılar kullanıldığında, gerilme dağılımlarının doğru hesaplanabilmesi için plastisite özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir. Literatürdeki iki boyutlu elasto-plastik analitik modellerde, sadece yapıştırıcının plastik davranışı dikkate alınmaktadır (Raghava ve ark., 1973; Bigwood & Crocombe, 1989; Adams & Mallick, 1993; Mortensen & Thomsen, 2002).

Ortalama kayma gerilmesi teorisi, yapıştırma bağlantıları ile ilgili en basit teoridir. Bu teoriye göre yapıştırıcının sadece kesme etkisiyle deforme olduğu ve yapıştırılan levhaların rijit olduğu kabul edilmektedir. Bu teoride, yapıştırıcı hattı boyunca kayma gerilmesinin değişmediği varsayılmıştır. Yapıştırıcı tabakasındaki ortalama kayma gerilmesi, uygulanan yükün bindirme alanına bölünmesiyle hesaplanır. Bu analiz yöntemi, özellikle yapıştırıcı tabakadaki kayma gerilmesinin sabit olduğu varsayıldığı için çok gerçekçi değildir. Ancak, yapıştırıcı mukavemeti ile ilgili ortalama bir yaklaşım sunmaktadır.

Yapıştırma bağlantıları ile ilgili literatürdeki ilk analitik model Volkersen (1938), tarafından geliştirilmiştir. Volkersen modelinde, tek bindirmeli bağlantılarda eksantrik yüklemekten kaynaklanan eğilme etkisi dikkate alınmamıştır. Bu yöntem kullanılarak, yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımı hesaplanabilir. Volkersen yönteminde yapıştırıcının sadece kesme etkisiyle, yapıştırılan levhaların ise sadece çekme etkisiyle deforme olduğu varsayılmaktadır. Bu teoriye göre kayma gerilmesi bindirme uçlarında maksimum değerler alırken, orta kısımda ise minimum değerler alır. Volkersen teorisinden farklı olarak, Goland & Reissner (1944), levhaların eğilme etkisini de hesaba katmışlardır. Tek bindirmeli birleştirmelerde eksantrik yüklemekten dolayı eğilme momenti oluşur. Eğilme momentinin etkisi altında özellikle bindirme uçlarında yapıştırıcılar için yıkıcı olan soyulma gerilmeleri oluşur. Yapıştırıcının plastik davranışı Hart Smith (1973) teorisinde dikkate alınır. Bu teori, sünek yapıştırıcıların kullanıldığı birleştirmelerde tercih edilebilir. Bu teoride kayma gerilmeleri elastik ve plastik olarak hesaplanabilirken, soyulma gerilmeleri sadece elastik olarak hesaplanabilir.

Analitik modeller, bağlantılardaki gerilmeler hakkında fikir verse de, sayısal yöntemlerin, gerilme ve gerinim analizi için daha iyi bir araç sağladığı kanıtlanmıştır. Sınırlı özelliklere sahip bağlantılar için analitik modeller geliştirilmiştir, ancak sayısal tekniklerde analiz için gerekli parametreler bilinirse sınırlamalar yoktur. En çok kullanılan sayısal çözüm tekniği, herhangi bir geometrinin kolayca modellenebildiği Sonlu Elemanlar Modeli'dir (SEM). Kapalı form analizine dayalı analitik çalışmalarda, yapıştırıcı kalınlığı boyunca soyulma ve kayma gerilmelerinin sabit olduğu ve yapıştırılan malzemelerin sadece çekme etkisiyle deforme olduğu varsayılmıştır. Sürekli ortam mekaniği yaklaşımının bir parçası olarak kapalı form analizlerinin kullanımı, oldukça idealleştirilmiş bağlantılarla sınırlıdır ve yapıştırıcının doğrusal olmayan davranışı ihmal edilir. Bu nedenle yapıştırma bağlantılarının analizi SEM başta olmak üzere sayısal yöntemler kullanılarak daha kapsamlı bir şekilde yapılabilmektedir (Adams & Peppiatt, 1974; Crocombe, 1989; Odi & Friend, 2004). SEM, Adams'ın öncü çalışmalarından sonra yapıştırma bağlantılarını araştırmak için en yaygın kullanılan analiz yöntemi haline geldi (Adams & Wake, 1984; Adams ve ark., 1986). SEM'de geometrik ve malzeme doğrusalsızlıklarının analize kolayca uyarlanabilmesi, matematiksel iş yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır.

Literatürde birçok yapıştırıcı hasar tahmin kriteri bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları; maksimum değer kriteri, limit durum kriteri ve Koheziv Bölge Modeli yaklaşımıdır. Hasar tahmini için hangi kriterin en uygun olduğu konusunda net bir şey söylemek zordur. Yapıştırıcı özellikleri ve bağlantı geometrisi seçilecek hasar kriterlerini etkilemektedir. Ayrıca yapıştırıcı hasar kriterinin kullanılabilmesi için yapıştırıcı tabakasının birleştirilmesinin en zayıf kısmı olması ve yapıştırıcının, yapıştırılan kısımlardan önce zarar görmüş olması gerekmektedir. Tek bindirmeli bağlantılar, yapıştırma bağlantılarının gerilme analizinde en sık kullanılan bağlantı geometrisidir. Tek tesirli bağlantılar kullanılarak yapıştırıcıların kayma ve soyulma özellikleri kolayca analiz edilebilir. Bindirme uzunluğu boyunca gerilme dağılımları, analitik yöntemler kullanılarak hesaplanabilir. Analitik yöntemlerin temel hasar tahmin yöntemi, yapıştırıcı bölgesindeki maksimum gerilme değerlerini hesaplayarak bu gerilmeyi yapıştırıcı mukavemeti ile karşılaştırmaktır. Teorik yöntemler, yapıştırma bağlantılardaki gerilme dağılımı ve hasar durumu hakkında önemli bilgiler sağlasa da, yalnızca basit geometrilere uygulanabilir. Gelişen bilgisayar teknolojisi tüm mühendislik problemlerinde olduğu gibi yapıştırma bağlantılarında da sayısal çözümleri vazgeçilmez yapmıştır. Özellikle SEM'i kullanan yazılımların geliştirilmesiyle, yapıştırma bağlantılarının geometri sınırlaması olmadan daha etkin bir şekilde analiz edilebilmesi sağlanmıştır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde analitik modellerin büyük çoğunluğu iki boyutludur. Bu modellerde düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme yaklaşımları kullanılmıştır. Malzemelerin plastik davranışlarının dikkate alınması analizi çok karmaşık hale getirdiğinden, çoğu analizde yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler elastik olarak modellenir. Yapıştırıcının sünekliği veya kırılabilirliği, eğilme etkisinin derecesi, yapıştırılan malzemelerin mekanik davranışı gibi birçok faktör çözümü ve dolayısıyla çözüm için kullanılacak yöntemi etkiler. Literatürdeki çalışmalar düşünüldüğünde, genel olarak yapıştırma bağlantıları ile ilgili hasara analiz çalışmaları bulunmakla birlikte, yapıştırıcının mekanik davranışına göre hangi hasar tahmin yönteminin optimum sonuçlar vereceği konusunda belirgin bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, gevrek yapıdaki Araldite AV138 ve sünek yapıdaki Araldite 2015 epoksi yapıştırıcılar kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında analitik ve sayısal hasar yükleri hesaplanmıştır. Hesaplanan hasar yükleri, Özer & Öz (2017), tarafından yapılan deneysel çalışmadan alınan hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, yapıştırıcı süneklik özelliğinin hasar yükü tahmin yöntemleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analitik hasar yüklerinin belirlenmesinde Volkersen, Goland-Reissner ve Hart Smith analitik modelleri kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar analizleri, sürekli ortam mekaniği ve Koheziv Bölge Modeli (KBM) yaklaşımlarına göre yapılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Malzeme ve bağlantı modeli

DIN C75 yüksek dayanımlı çelik plaka, Araldite AV138 ve Araldite 2015 epoksi yapıştırıcılar kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantıları modellenmiştir. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri Çizelge 1'de ve DIN C75 mekanik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Yapıştırıcıların tek eksenli çekme

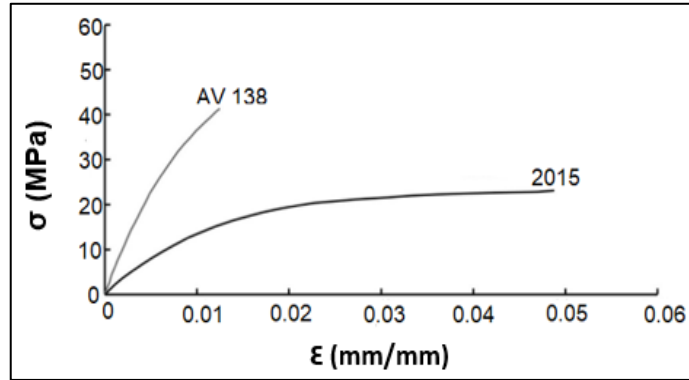
testi sonucunda elde edilen gerilme-birim uzama grafikleri Şekil 1'de gösterilmiştir (Marques & Da Silva, 2008).

Çizelge 1. Yapıştırıcı malzemelerin mekanik özellikleri (Özer & Öz, 2017)

	2015	AV 138
Elastisite modülü, E (GPa)	1.85	4.89
Poisson oranı, ν	0.33	0.35
Çekme dayanımı, σ_f (MPa)	21.63	39.45
Akma dayanımı, σ_y (MPa)	12.63	36.49
Kopma yüzde uzaması, ϵ_t (%)	4.77	1.21
Kayma modülü, G (GPa)	0.56	1.56
Kayma dayanımı, τ_f (MPa)	17.9	30.2
Kayma akma dayanımı, τ_y (MPa)	14.6	25.1
Kayma kopma yüzde uzaması, γ_t (%)	43.9	7.8

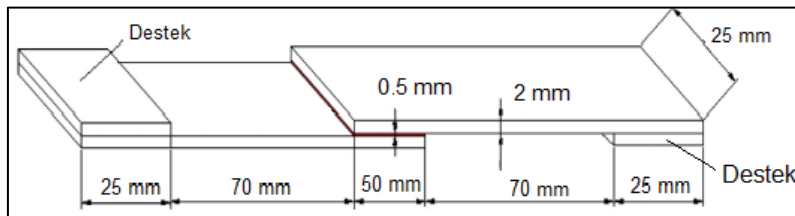
Çizelge 2. DIN C75 mekanik özellikleri (Özer & Öz, 2017)

Elastisite modülü, E (MPa)	198300
Poisson oranı, ν	0.29
Çekme dayanımı, σ_f (MPa)	1413
Akma dayanımı, σ_y (MPa)	1260



Şekil 1. Yapıştırıcıların gerilim-gerinim eğrileri (Marques & Da Silva, 2008).

Çalışmada modellenen tek bindirme bağlantısı boyutları Şekil 2'de gösterilmiştir. Bağlantı geometrisi Özer & Öz (2017) tarafından yapılan çalışmaya uygun olarak belirlenmiştir. Özer & Öz (2017), tek tesirli bindirme bağlantılarında AV138 ve Araldite 2015 yapıştırıcılarını aynı koşullar altında kullanarak deneysel hasar yüklerini elde etmişlerdir (Çizelge 3).



Şekil 2. Tek tesirli bindirme bağlantı modeli.

Çizelge 3. Deneysel kırılma yükleri (Özer & Öz, 2017)

Araldite 2015 hasar yükü (N)	20760
Araldite AV138 hasar yükü (N)	14510

2.2. Yapıştırma bağlantıları ile ilgili analitik yöntemler

Bu çalışmada Volkersen, Goland-Reissner ve Hart Smith modelleri analitik yöntemle hasar yüklerini belirlemek için tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan analitik yöntemlerin açıklamaları ve hasar yükü analizinde kullanılan denklemler detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.

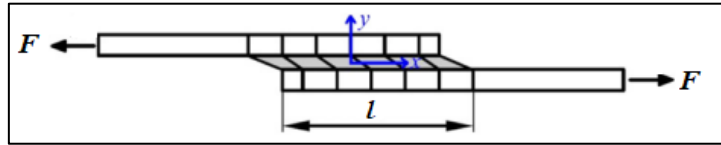
2.2.1. Volkersen modeli

Volkersen modelinde yapıştırıcı tabakadaki kayma gerilmesi dağılımı Denklem (1) ile hesaplanır. Bindirme bölgesinin merkezinden kenarlara kadar olan x mesafesi Denklem (1)' e girilir ve bindirme bölgesinin merkezinden uçlarına kadar olan gerilme dağılımları elde edilir.

$$\tau(x) = \frac{F\omega \cosh(\omega x)}{2b \sinh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} + \left(\frac{t_t - t_b}{t_t + t_b}\right) \left(\frac{\omega l}{2}\right) \frac{\sinh(\omega x)}{\cosh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{G_a}{E t_t t_a} \left(1 + \frac{t_t}{t_b}\right)} \quad (2)$$

Denklem (1) ve Denklem (2)' de, t_t üst levha kalınlığı, t_b alt levha kalınlığı, t_a yapıştırıcı kalınlığı, b levha genişliği, l bindirme bölgesi uzunluğu, E levha elastisite modülü, G_a yapıştırıcı kayma modülünü ve F bağlantıya uygulanan yükü temsil eder. Volkersen modelinde yapıştırıcının sadece kayma gerilmesi etkisiyle hasara uğrayacağı varsayımı yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Volkersen modeli.

2.2.2. Goland Reissner modeli

Goland ve Reissner modelinde, bağlantıya uygulanan çekme kuvvetinin neden olduğu eğilme etkisi hesaba dahil edilir (Şekil 4). Eğilme etkisinin gerilme analizinde dikkate alınmasıyla, özellikle tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı hattındaki soyulma gerilmesi dağılımını hesaplamak mümkündür. Yapıştırıcı tabakadaki kayma gerilmesi dağılımı Denklem (3)' e göre hesaplanır.

$$\tau(x) = -\frac{1}{8} \frac{\bar{F}}{c} \left[\frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh\left(\left(\frac{\beta c}{t}\right) \left(\frac{x}{c}\right)\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right] \quad (3)$$

$$k = \frac{\cosh(\Phi c)}{\cosh(\Phi c) + 2\sqrt{2} \sinh(\Phi c)} \quad (4)$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{3(1 - \nu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{\bar{F}}{tE}} \quad (5)$$

$$\beta^2 = 8 \frac{G_a}{E} \frac{t}{t_a} \quad (6)$$

Denklem (3)' te kullanılan; \bar{F} birim genişliğine uygulanan çekme yükü, c bindirme uzunluğunun yarısı, t yapıştırılan levhanın kalınlığı, k eğilme momenti faktörü, ν poisson oranıdır. Goland-Reissner teorisine göre soyulma gerilmesi dağılımı Denklem (7)' ye göre hesaplanır.

$$\sigma = \frac{1}{\Delta} \frac{\bar{F}t}{c^2} (A + B) \quad (7)$$

$$A = \left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cos \lambda \cosh(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \quad (8)$$

$$B = \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sin \lambda \sinh(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \quad (9)$$

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1 - \nu^2) \frac{\bar{F}}{tE}} \quad (10)$$

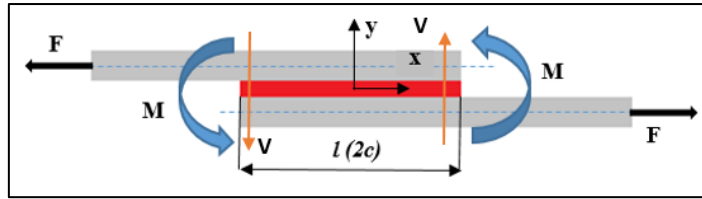
$$\lambda = \gamma \frac{c}{t} \quad (11)$$

$$\gamma^4 = 6 \frac{E_a t}{E t_a} \quad (12)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)) \quad (13)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (14)$$

$$R_2 = -\cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (15)$$



Şekil 4. Goland Reissner modeli.

2.2.3. Hart Smith modeli

Hart Smith modelinde, yapıştırıcı tabakasındaki soyulma ve kayma gerilmeleri dağılımları hesaplanabilmektedir. Kayma gerilmeleri elastik ve elasto-plastik olarak hesaplanır ve soyulma gerilmeleri sadece elastik olarak hesaplanır. Bu modelde Goland-Reissner modelinde olduğu gibi tek bindirmeli birleştirmelerde meydana gelen eğilme etkisi hesaplamalarda dikkate alınmaktadır. Hart Smith modelinde yapıştırıcının plastik deformasyon özelliği dikkate alınmıştır. Plastik deformasyon özelliği dikkate alındığında, gerilmeye dayalı hasar kriteri yerine gerinmeye dayalı hasar kriteri kullanılmaktadır. Hart Smith Modeline göre, yapıştırıcı hattındaki kayma gerilmesi dağılımı Denklem (16) kullanılarak elastik olarak hesaplanabilmektedir.

$$\tau(x) = A_2 \cosh(2\lambda'x) + C_2 \quad (16)$$

$$\lambda' = \sqrt{\left[\frac{1 + 3(1 - \nu^2)}{4} \right] \frac{2G_a}{t_a E t}} \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{G_a}{t_a E t} \left[\bar{F} + \frac{6(1 - \nu^2)M}{t} \right] \frac{1}{2\lambda' \sinh(2\lambda'c)} \quad (18)$$

$$C_2 = \frac{1}{2c} \left[\bar{F} - \frac{A_2}{\lambda'} \sinh(2\lambda'c) \right] \quad (19)$$

$$M = \bar{F} \left(\frac{t + t_a}{2} \right) \frac{1}{1 + \xi c + \left(\frac{\xi^2 c^2}{6} \right)} \quad (20)$$

$$\xi^2 = \frac{\bar{F}}{D} \quad (21)$$

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (22)$$

\bar{F} , G_a , t_a , E , E_a , ν , t , c değişkenleri, Volkersen ve Goland-Reissner teorisinde verilen değişkenlerle aynıdır. Hart Smith Teorisine göre, yapıştırıcı tabakasındaki soyulma gerilmesi dağılımı Denklem (23) ile hesaplanır.

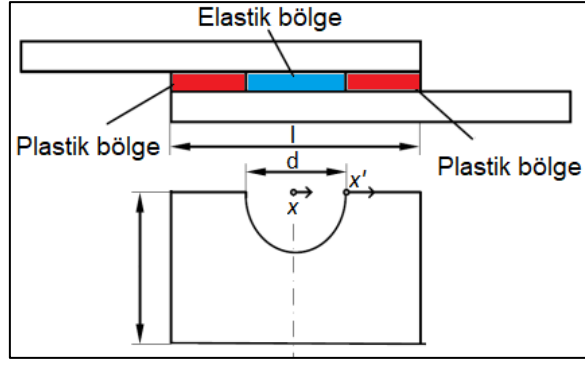
$$\sigma(x) = A \cosh(\chi x) \cos(\chi x) + B \sinh(\chi x) \sin(\chi x) \quad (23)$$

$$B = \frac{E_a M [\sin(\chi c) + \cos(\chi c)]}{D t_a \chi^2 e^{\chi c}} \quad (24)$$

$$A = \frac{-E_a M [\sin(\chi c) - \cos(\chi c)]}{D t_a \chi^2 e^{\chi c}} \quad (25)$$

$$\chi^4 = \frac{E_a}{2D t_a} \quad (26)$$

Hart Smith modelinde, yapıştırıcının elastik-plastik davranışı dikkate alınarak, Denklem (27)'ye göre kayma gerilmeleri hesaplanabilir. Bu yaklaşıma göre yapıştırıcı tabaka üç bölgeye ayrılır, orta kısım elastik bölge, kenarlar ise plastik bölge olarak tanımlanır (Şekil 5).



Şekil 5. Hart Smith Modeli yapıştırıcı tabakasındaki bölgeler.

$$\tau(x) = A_2 \cosh(2\lambda'x) + \tau_p(1 - K) \quad (27)$$

τ_p , yapıştırıcının plastik kayma gerilmesidir.

$$A_2 = \frac{K\tau_p}{\cosh(\lambda'd)} \quad (28)$$

K ve d , Denklem (29), Denklem (30) ve Denklem (31) kullanılarak yinelemeli yaklaşımla elde edilir.

$$\frac{\bar{F}}{l\tau_p}(\lambda'l) = 2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + (1 - K)(\lambda'd) + K \tanh(\lambda'd) \quad (29)$$

$$\left[1 + 3k(1 - \nu^2) \left(1 + \frac{t_a}{t} \right) \right] \frac{\bar{F}}{\tau_p} \lambda^2 \left(\frac{l-d}{2} \right) = 2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e} \right) + K \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) \right]^2 \quad (30)$$

$$2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e} \right) = K \left\{ \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + \tanh(\lambda'd) \right]^2 - \tanh^2(\lambda'd) \right\} \quad (31)$$

γ_e ve γ_p , elastik ve plastik kayma şekil değiştirmeleridir.

2.3. Sonlu elemanlar analizi

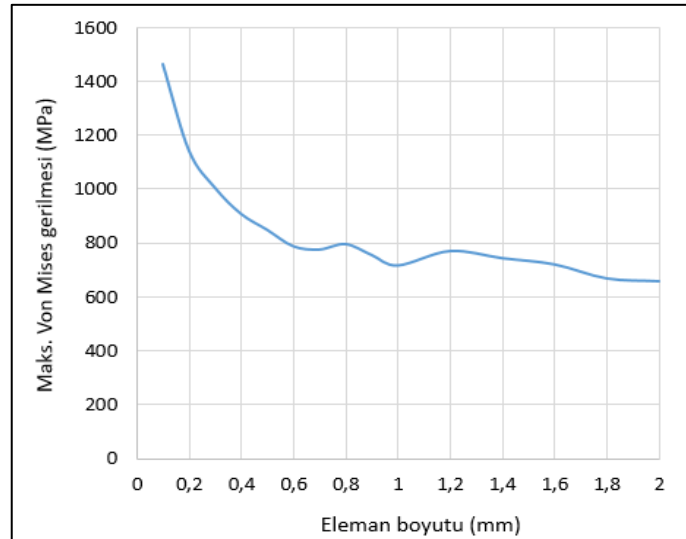
Çoğu analitik yöntemde, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mükemmel elastik kabulüne göre çözümler yapılır. Analitik yöntemlerde malzeme doğrusalsızlıklarının dikkate alınması problemi ve çözümü karmaşık hale getirir. Günümüzde, karmaşık ve analitik olarak çözümü zor olan problemleri çözmek için SEM kullanılmaktadır. Sonlu Elemanlar çalışması, malzeme ve geometrik doğrusalsızlıklar dikkate alınarak ANSYS 2023 R2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcı ve bağlı malzemelerin plastikleşme davranışı, BISO (Bilinear Isotropic Hardening) malzeme modeli kullanılarak karakterize edilmiştir. BISO malzeme modelinde, malzemelerin, tek eksenli çekme testinden elde edilen akma dayanımları ve Tanjant Modüllerinin analiz programına girilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin akma dayanımları Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Yapıştırıcıların Tanjant Modülleri, Şekil 1'de gösterilen gerilme-gerinim eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre, malzemelerin gerilme birim şekil değiştirme eğrilerinin akma dayanımı ve çekme dayanımı noktaları grafik üzerinden işaretlenerek birleştirilmiştir. Elde edilen doğruların eğimi hesaplanarak tanjant modülleri bulunmuştur. Araldite 2015 ve AV138 yapıştırıcılarının Tanjant Modülleri sırasıyla 228 MPa ve 1680 MPa olarak hesaplanmış ve programa girilmiştir. DIN C75 çeliğinin Tanjant Modülü 765 MPa alınmıştır.

Sayısal çalışmada iki farklı yöntem kullanılarak hasar yükleri belirlenmiştir. Bunlar, yapıştırıcı tabakadaki maksimum Von Mises gerilmesi ve Koheziv Bölge Modeli (KBM) yöntemleridir. Yapıştırma bağlantısı, deneysel çalışmada kullanılan numune boyutlarına göre 2 boyutlu olarak modellenmiştir. Çözümde düzlem gerilme yaklaşımı kullanılmıştır.

2.3.1. Ağ yapısı belirleme çalışması

Sonlu elemanlar çalışmalarında ağ yapısı sonuçları etkilemektedir. Ağ yapısını etkileyen en önemli faktör ise birim eleman boyutudur. Eleman boyutunun ideal değerden büyük seçilmesi çözüm sürelerini kısaltmasına rağmen sonucun gerçek değerden oldukça farklı olmasına neden olmaktadır. Eleman boyutunun uygun değerden çok küçük olması ise çözüm sürelerinin çok uzamasına ve sonuçların gerçek değerden büyük olmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bir sonlu eleman çalışmasında, ağ yapısının oluşturulması aşaması çalışmanın doğruluğu ile yakından ilişkilidir. Literatürde ağ yakınsama çalışması olarak adlandırılan ön çalışmanın yapılması önerilmektedir.

Bu çalışmada eleman boyutları 0.1 mm ile 2 mm arasında değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda Şekil 6'da görüldüğü gibi 0.6 mm ve 1.2 mm aralığında olan eleman boyutlarında yapılan analizlerde gerilme değerleri arasındaki değişim azalmıştır. Buna göre eleman boyutunun 0.6 mm olmasına karar verilmiştir.



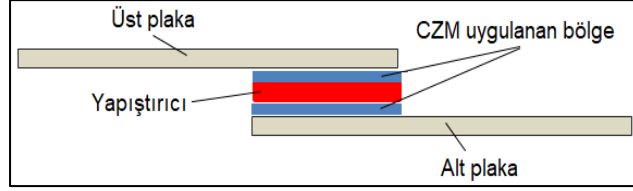
Şekil 6. Ağ yapısı yakınsama çalışması grafiği.

İki boyutlu yapıştırma bağlantı modelinin dikdörtgenel yüzeylere sahip olmasından dolayı 8 düğümlü quad-8 eleman kullanılmıştır. Yapılan bölüntüleme (mesh) işlemi sonucunda eleman sayısı 1765, düğüm (node) sayısı ise 6372 olmuştur. Ağ yapısı kalitesi değerlendirmelerinde kullanılan ortalama skewness değeri 1.5307e-004 olarak bulunmuştur. Skewness değeri, ideal eleman boyutu ile mevcut eleman boyutu arasında yapılan karşılaştırmaya göre yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Skewness değerinin sıfıra yaklaşması ideal eleman boyutuna yaklaşmak anlamına geldiğinden mesh kalitesinin arttığını göstermektedir. Skewness değerinin artması ise mesh kalitesinin düştüğünü göstermektedir. Diğer mesh kalitesi değerlendirme yöntemlerine göre, ortalama aspect ratio değeri 1.1579, ortalama jacobian ratio değeri (MPADL) 1.0002, ortalama element quality değeri 0.98878 çıkmıştır. Bu ağ kalitesi değerlendirme kriterlerine göre hesaplanan değerler mükemmel yakın bir ağ yapısı oluşturulduğunu kanıtlamaktadır.

2.3.2. Koheziv bölge modeli (KBM)

Kırılma mekaniği tabanlı bir yaklaşım olan KBM yöntemi, kompozit malzemelerde ve yapıştırma bağlantılarında ara yüzey ayrılmasının modellendiği oldukça kullanışlı bir yöntemdir. (Campilho ve ark., 2011; Noorman, 2014; Waseem & Kumar, 2014; Fiamegkou, 2015). KBM

yaklaşımında, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tepe noktasına kadar elastik şekil değişimi olduğu, eğrinin en üst noktasından sonra hasar başlayarak kopma meydana geldiği ifade edilmektedir (Saraç, 2021a). Bu çalışmada, yapıştırıcı tabakasının alt ve üst plakalarla oluşturduğu ara yüzlere KBM modeli uygulanmıştır (Şekil 7). KBM yönteminin uygulandığı ara yüzler koheziv elemanlarla temsil edilir ve çekme-ayırma kanunları uygulanır.



Şekil 7. Yapıştırıcıda KBM uygulanmış bölgeler.

Ara yüzelerde çekme-ayırma kanunlarının uygulanabilmesi için yapıştırıcıların KBM parametrelerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada kullanılan Araldite 2015 ve AV138 yapıştırıcılarının KBM parametreleri Çizelge 4' te verilmiştir (Pinto ve ark., 2014). Bu parametreler maksimum normal kontak gerilmesi (t_n^0), maksimum teğetsel kontak gerilmesi (t_s^0), normal kritik kırılma enerjisi (G_n^0) ve teğetsel kritik kırılma enerjisi (G_s^0)'dir.

Çizelge 4. Araldite 2015 ve AV138 KBM parametreleri

KBM parametreleri	AV138	2015
t_n^0 (MPa)	39.4	21.63
t_s^0 (MPa)	30.2	17.9
G_n^0 (N/mm)	0.20	0.43
G_s^0 (N/mm)	0.38	4.70

2.4. Hasar kriterleri

Literatürde yapıştırma bağlantılarıyla ilgili birçok hasar kriteri vardır. Bu kriterler iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki, yapıştırılan malzemenin özellikle kompozit malzemelerin hasarı, ikincisi ise yapıştırıcı hasar kriterleridir. Bu çalışmada yapıştırılan malzeme çelik olarak seçildiğinden yapıştırıcı hasarına odaklanılmıştır. Yapıştırıcı hasarı ile ilgili, maksimum değer, belirli bir bölgedeki kritik gerilme veya gerinme, limit durum ve kırılma mekaniği kriterleri literatürde yer almaktadır (Rodríguez ve ark., 2012; Odi & Friend, 2004).

2.4.1. Maksimum değer kriteri

Bu kriter yapıştırıcılar için en çok kullanılan hasar kriteridir. Bu kriter gere göre yapıştırıcı tabakasında hesaplanan maksimum gerilme veya gerinme değerleri yapıştırıcının kritik dayanım değerlerinin üzerinde ise hasar beklenir. Analitik yöntemlerin gelişimine paralel olarak, bu hasar kriterleri ve tasarım yöntemleri de gelişmiştir. Örneğin, Volkersen modelinde yapıştırıcının sadece kayma gerilmesi ile deforme olduğu varsayıldığından, sonuç olarak maksimum kayma gerilmesi kriteri kırılma kriteri olarak ortaya çıkmıştır.

Maksimum soyulma gerilmesi, Hart Smith (1973), tarafından hasar kriteri olarak benimsenmiştir. Yapıştırıcılar üzerindeki yıkıcı etkileri nedeniyle, tasarım aşamalarında soyulma gerilmeleri en aza indirilmelidir. Harris & Adams (1984), maksimum asal gerilme ve gerinme kriterlerini kullanarak yaptıkları elastoplastik sonlu elemanlar analizleri sonucunda tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının dayanımını yaklaşık %10'luk bir doğrulukla tahmin etmişlerdir.

Crocombe ve ark. (1990), maksimum asal gerilim kriterinin kırılma yapıştırıcılar için daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ikegami ve ark. (1990), maksimum Von Mises gerilme kriterini kavisli birleştirmeler için hasar kriteri olarak kullanmıştır. Charalambides ve ark. (1996), maksimum Von Mises gerilme kriterinin çift bindirmeli yapıştırma bağlantılarında etkisiz olduğunu belirtmişlerdir.

Maksimum asal gerilme kriteri [Turan & Kaman \(2010\)](#), tarafından yapılan çalışmada yapıştırıcı hasar değerlendirmesinde kullanılmıştır.

Von Mises gerilme kriterinin, polimerlerin deformasyon davranışını önemli ölçüde etkileyen hidrostatik gerilmeyi hesaba katmadığı için polimerlerin analizinde kullanılması doğru bir yaklaşım olmadığı belirtilmiştir ([Odi & Friend, 2004](#); [Rodríguez ve ark., 2012](#)).

Maksimum kayma gerilmesi kriteri, [Lee & Lee \(1992\)](#), tarafından silindirik birleştirme bağlantıları için kullanılmıştır. [Crocombe & Adams \(1982\)](#), soyulma testi numunelerinde tek eksenli plastik gerinim kriterini kullanmışlardır.

Maksimum gerilme veya gerinim kriterleri için sorun, gerilme veya gerinim değerlerinin tekilliklerden kaynaklı çok yüksek değerler almasıdır. Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırma bölgelerinin uçlarında her zaman tekillikler ile karşılaşılır. Tekillikleri en aza indirmek için sayısal çözümlerde ağ yapısını iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Literatür incelendiğinde, özellikle tek bindirmeli yapıştırılmalı birleştirme modellerinde bindirme uçlarındaki tekillikleri azaltmak için birçok sayısal çalışmaya rastlanmaktadır ([Kırkayak, 2019](#); [Saraç, 2020](#); [Saraç, 2021b](#)). Bu çalışmalarda, bağlantı geometrisinde yapılan tasarım değişiklikleri ile bindirme uç bölgesindeki gerilmelerin önemli oranlarda azaltılabileceği gösterilmiştir.

2.4.2. Von Mises akma kriteri

Von Mises kriteri, gerilme tensöründeki deviatorik gerilmeye dayalı olarak geliştirilmiştir. Von Mises kriterine göre eşdeğer gerilme, asal gerilmeler ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) kullanılarak Denklem (32)' e göre hesaplanır.

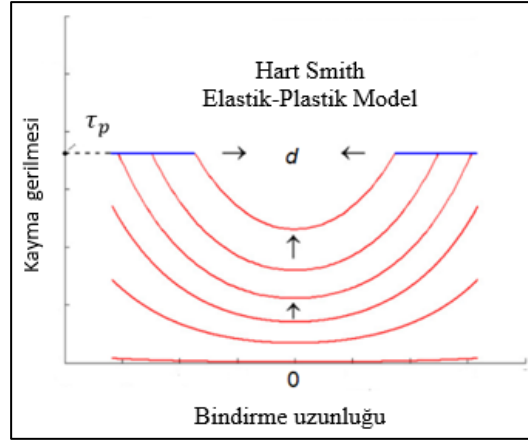
$$\sigma_{VM} = \sqrt{\{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]\}/2} \quad (32)$$

Yapıştırıcı tabakasındaki Von Mises gerilme dağılımları, Sonlu Elemanlar yöntemine göre çözüm üreten programlar kullanılarak hesaplanabilir. Buna göre, yapıştırıcı tabakasındaki hesaplanan maksimum Von Mises gerilmesi, yapıştırıcının tek eksenli çekme testinde elde edilen akma dayanımına ulaştığında akmanın başladığı kabul edilir.

2.4.3. Limit durum kriteri

Bu kriter ilk olarak [Crocombe \(1989\)](#), tarafından ortaya atılmıştır. Limit durum kriterinin ana yaklaşımı, yapıştırıcıya etki eden yükün belirli bir değerden sonra önemli ölçüde artmayacağı ve yapıştırıcının kritik bir uzamaya kadar plastik olarak akacağı prensibine dayanmaktadır. Bu kriter, sınırlı ölçüde yapıştırma bağlantıları için geçerlidir. Yapısal yapıştırıcıların çoğu yeterince sünek olmadığından, akma dayanımı aşıldığında kırılma meydana gelir.

Hart Smith Modelinde yapışkan tabaka ortadaki elastik bölge ve kenarlardaki plastik bölge olmak üzere üç kısma ayrılır. Yük arttıkça plastik bölge de genişler (Şekil 8). Yapıştırıcı bölge uygulanan yük artışı ile tamamen plastik olduğunda ($d=0$) bağlantı maksimum taşıma kapasitesine ulaşır. Bu durum literatürde global akma olarak adlandırılmaktadır. Sonuç olarak, bu kriteri göre yapıştırıcının tamamen plastikleşmesiyle hasarın oluşacağı varsayılmıştır. Global akma hasar kriteri, sünek yapıştırıcılar kullanıldığında deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağlamaktadır.



Şekil 8. Hart Smith modelinde yapıştırıcı plastikleşmesi.

Hart-Smith tarafından önerilen elastik-plastik modelin formülasyonu oldukça karmaşıktır ve çözümü iteratif bir yaklaşım gerektirir. Ancak bazı basitleştirmeler yaparak hasar yükü hesaplanabilir. Denklem (29) yeniden yazılırsa:

$$\frac{\bar{F}}{l\tau_p}(\lambda'l) = 2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + (1-K)(\lambda'd) + K \tanh(\lambda'd)$$

Global akma kriterine göre $d=0$ ise, Denklem (33) elde edilir.

$$\bar{F} = \frac{F}{b} = l\tau_p \quad (33)$$

Denklem (33)'e göre, hasar yükü yalnızca yapıştırıcının kayma akma dayanımına (τ_p), bindirme uzunluğuna (l) ve bağlantı genişliğine (b) bağlıdır. Buna göre hasar yükü Denklem (34) kullanılarak hesaplanabilir.

$$F_{HASAR} = bl\tau_p \quad (34)$$

3. Bulgular

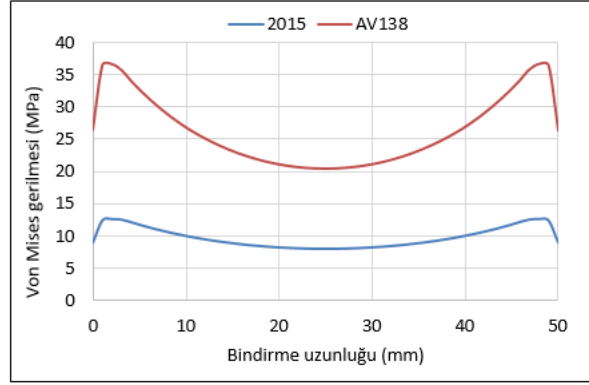
Bu çalışmada Volkersen, Goland-Reissner ve Hart Smith analitik yöntemleri ve SEM kullanılarak hasar yükleri hesaplanmıştır. Elde edilen analitik ve sayısal hasar yükleri, literatürden alınan deneysel hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır.

Sonlu elemanlar çalışmasına göre hasar yükü sürekli ortam mekaniği yaklaşımına göre yapıştırıcı tabakasındaki maksimum Von Mises eşdeğer gerilmesine göre ve KBM yaklaşımına göre hesaplanmıştır. Von Mises eşdeğer yaklaşımına göre, yapıştırıcı tabakasındaki maksimum Von Mises gerilmesi, yapıştırıcının akma dayanımına eşit olduğu durumdaki yük hasar yükü olarak kabul edilmiştir. Yapıştırıcı tabakasındaki Von Mises gerilme dağılımları, Şekil 9' da gösterilen A-B hattından alınmıştır. Gerilme tekilliği, ağ yapısı ve geometrik faktörler nedeniyle sonlu elemanlar çalışmalarında dikkate alınması gereken bir konudur. Yapıştırma bağlantılarında, gerilme tekilliği etkisini en aza indirmenin en yaygın yolu, yapıştırıcı tabakasının orta hattındaki gerilme dağılımını referans almaktır. Bu yöntem literatürde orta çizgi (centerline) yöntemi olarak yer almaktadır (Yue & Wahab, 2014). Yapıştırıcı tabakasında orta çizgi yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 9. SEM çözümlerinde gerilmelerin alındığı çizgi.

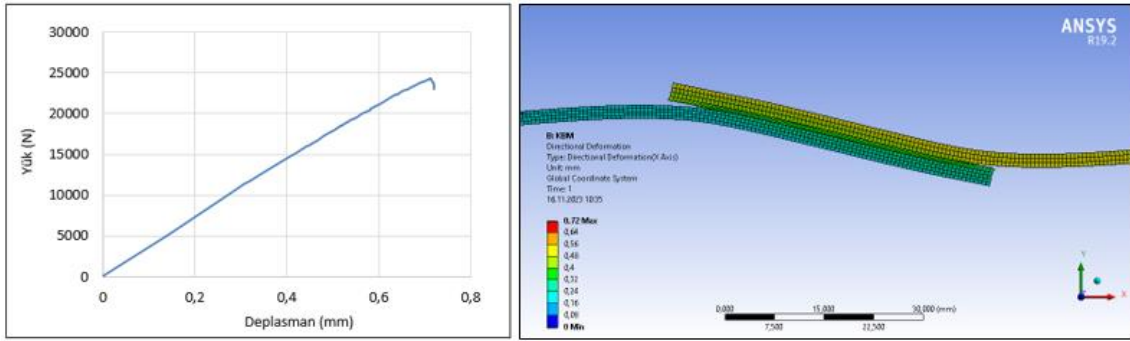
Şekilde 10'da A-B hattındaki, Von Mises gerilme dağılımı gösterilmiştir. Von Mises gerilme dağılımları her iki yapıştırıcı için hasar yükleri uygulanarak elde edilmiştir.



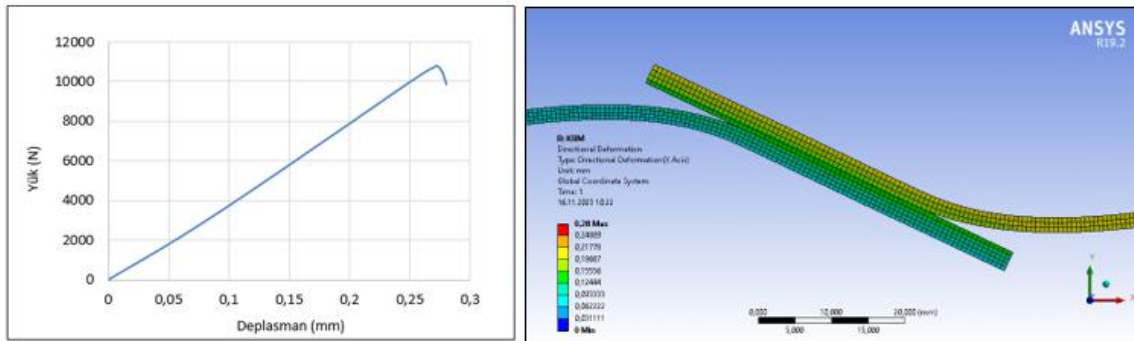
Şekil 10. Hasar yüklerine göre A-B hattı Von Mises gerilme dağılımları.

Şekilde 11 ve 12'de her iki yapıştırıcı için KBM çözümleri gösterilmiştir. KBM çözümleri sonucu elde edilen kuvvet deplasman grafiklerindeki maksimum yük değeri hasar yükü olarak kabul edilmiştir.

Analitik hasar yükü hesaplamaları ise Bölüm 2'de gösterilen analitik denklemler kullanılarak yapılmıştır.

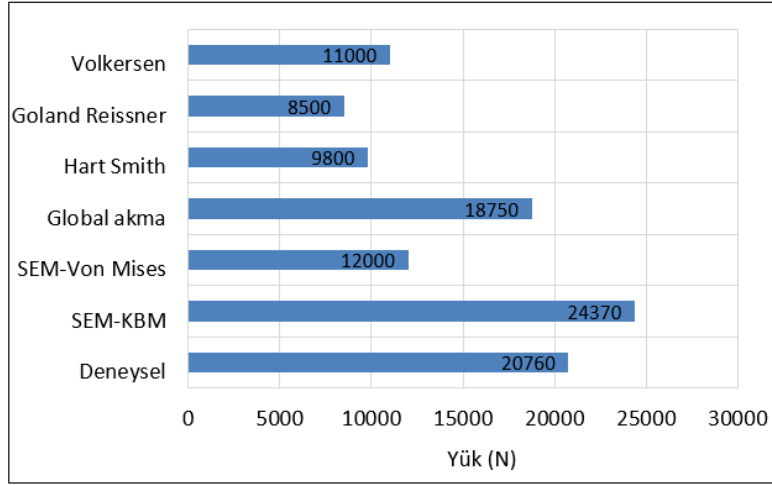


Şekil 11. 2015 yapıştırıcı KBM çözümü ve yük-deplasman grafiği.

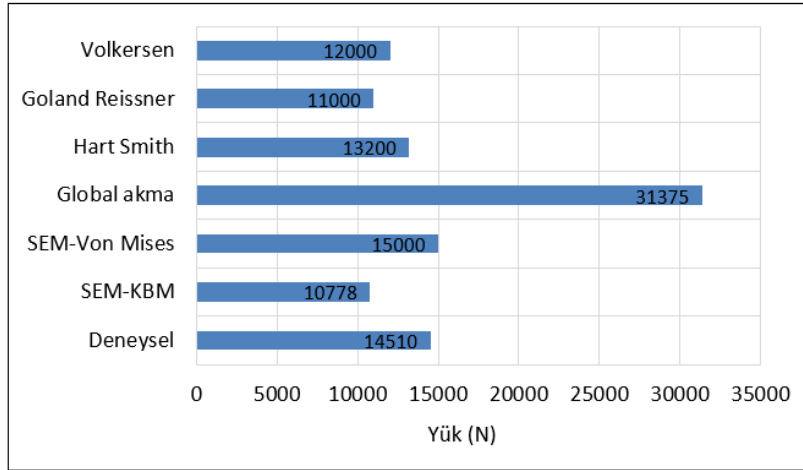


Şekil 12. AV138 yapıştırıcı KBM çözümü ve yük-deplasman grafiği.

Araldite 2015 ve AV138 yapıştırıcıları için hesaplanan hasar yükleri Şekil 13 ve Şekil 14' te gösterilmektedir.



Şekil 13. 2015 yapıştırıcı hasar yükleri.



Şekil 14. AV138 yapıştırıcı hasar yükleri.

Çizelge 5' te analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak elde edilen hasar yüklerinin kullanılan yapıştırıcı tipine bağlı olarak deneysel sonuçlardan sapma oranları verilmiştir.

Çizelge 5. Deneysel sonuçlardan sapma oranları

Hasar tahmin yöntemi	AV138	2015
SEM-KBM	% 25	% 17
SEM-Maks. Von Mises gerilmesi	% 3	% 42
Hart-Smith modeli	% 9	% 53
Volkersen modeli	%17	% 47
Goland Reissner modeli	% 24	% 59
Global akma kriteri	% 116	% 9

Çizelge 5 incelendiğinde, sünek karakterli Araldite 2015 yapıştırıcı kullanıldığında, bulunan hasar yükleri içerisinde deneysel sonuçlara en yakın hasar yükü Global akma kriterine göre yapılan

hesaplama da %9 sapma oranıyla elde edilmiştir. Deneysel sonuçlardan sapma oranları; SEM-KBM yaklaşımında %17, SEM-Von Mises yaklaşımında %42, Volkersen modelinde %47, Hart Smith modelinde %53, Goland Reissner modelinde %59 bulunmuştur. Gevrek ve yüksek dayanımlı Araldite AV138 yapıştırıcı kullanıldığında, bulunan hasar yükleri içerisinde deneysel sonuçlara en yakın hasar yükü SEM-Von Mises yaklaşımına göre yapılan hesaplamada %3 sapma değeriyle elde edilmiştir. Deneysel sonuçlardan sapma oranları; Hart Smith modelinde %9, Volkersen modelinde %17, Goland Reissner modelinde %24, SEM-KBM yaklaşımında %25 bulunmuştur. Global akma kriteri kullanıldığında, hasar yüklerinin deneysel sonuçlardan sapma oranı %116 olarak çok yüksek bir değer çıkmıştır.

Analitik yaklaşımlar, kırılgen yapıştırıcı (AV138) kullanıldığında deneysel sonuçlarla daha uyumludur. Bunun nedeni, kırılgen yapıştırıcının düşük deformasyon özelliklerine sahip olması ve bu nedenle tam elastik davranışa yakın bir özellik sergilemesidir. 2015 sünek yapıştırıcının, çekme-uzama eğrisi incelendiğinde plastisite özelliğinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla elastik olarak modellenen analitik yaklaşımlara göre hasar yüklerindeki sapmaların deneysel sonuçlara göre yüksek olması normaldir.

Global akma kriterlerine göre hasar yükleri incelendiğinde kırılgen karakterde ve dolayısıyla plastisite özelliği çok düşük olan AV138 yapıştırıcının kullanıldığı bağlantılarda sapma oranı çok yüksektir. Global akma kriteri tanımında, yapıştırıcı üzerindeki yükün belirli bir değerden sonra artmadığı ve yapıştırıcının plastik deformasyona uğrayarak zarar gördüğü belirtilmektedir. Araldite 2015 yapıştırıcı, çok yüksek süneklığe sahip bir yapıştırıcıdır, bu nedenle Araldite 2015 yapıştırıcı kullanıldığında, Global akma kriterine göre deneysel hasar yüküne yakın bir sonuç bulunmuştur.

Von Mises eşdeğer gerilme kriterine göre yapılan hasar yükü hesaplamalarında, gevrek özellikteki AV138 yapıştırıcı kullanıldığında, deneysel sonuçlardan sapma oranının düşük olması, Von Mises kriterinin gevrek karakterli yapıştırıcıların sayısal hasar yükü belirleme çalışmalarında kullanılabilceğini göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, analitik ve nümerik yöntemler kullanılarak basit bindirmeli yapıştırma bağlantısı için hasar yükleri tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürden alınan deneysel hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır. Yapıştırma bağlantıları, kırılgen AV138 ve sünek Araldite 2015 yapıştırıcıların mekanik özellikleri kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen genel sonuçlar aşağıda her bir yapıştırıcı türü için ayrı ayrı verilmiştir.

AV138 yapıştırıcı kullanıldığında elde edilen sonuçlar:

- Deneysel sonuçlarla en uyumlu hasar yükü, Von Mises eş değer gerilme kriterine göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir. Literatürde, Von Mises gerilme kriterinin, polimerlerin deformasyon davranışını önemli ölçüde etkileyen hidrostatik gerilmeyi hesaba katmadığı için polimerlerin analizinde kullanılması doğru bir yaklaşım olmadığı belirtilmiştir (Odi & Friend, 2004; Rodríguez ve ark., 2012). Ancak yapılan bu çalışmada gevrek karakterli AV138 yapıştırıcı için en iyi sonuç Von Mises eş değer gerilme yaklaşımında elde edilmiştir.
- Analitik çözümler kullanılarak belirlenen hasar yükleri arasında deneysel sonuçlardan en az sapma oranı Hart Smith modeline göre yapılan analiz sonucunda bulunmuştur.
- Global akma kriterlerine göre hesaplanan hasar yükü, deneysel sonuçlarda çok yüksek bir sapma (% 116) göstermiştir. AV138 yapıştırıcısı ile benzer mekanik davranışa sahip yapıştırıcıların hasar yükünün hesaplanmasında bu kriterin kullanılmaması gerektiği vurgulanmıştır.

2015 yapıştırıcı kullanıldığında elde edilen sonuçlar:

- Deneysel sonuçlara en yakın hasar yükü Global Akma kriterine göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir. Sünek yapıştırıcıların kullanıldığı yapıştırma bağlantılarının hasar tahminlerinde Global Akma kriterinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu Crocombe (1989) tarafından da vurgulanmıştır.

- Analitik yöntemlerle hesaplanan hasar yüklerinin deneysel sonuçlardan sapma oranları çok yüksek çıkmıştır (% 50 civarında). Buna göre, elastik çözümler üreten analitik modellerin sünek bir yapıştırıcıda kullanılmasının yanlış olduğu gösterilmiştir.
- Von Mises akma kriterine göre hesaplanan hasar yükünün deneysel sonuçlardan sapma oranı yüksek (% 42) çıkmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde gevrek karakterli yüksek dayanımlı yapıştırıcıların kullanıldığı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında hasar yükü belirleme çalışmalarında Von Mises kriterinin, sünek yapıdaki yapıştırıcıların kullanıldığı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ise Global akma kriterinin kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

- Adams, R. D., & Peppiatt, N. A. (1974). Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *Journal of Strain Analysis*, 9(3), 185-196. <https://doi.org/10.1243/03093247V093185>
- Adams, R. D., & Wake, W. C. (1984). The nature and magnitude of stresses in adhesive joints. In *Structural Adhesive Joints in Engineering* (pp. 14-114). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5616-2_2
- Adams, R. D., & Mallick, V. (1993). The effect of temperature on the strength of adhesively-bonded composite-aluminium joints. *The Journal of Adhesion*, 43(1-2), 17-33. <https://doi.org/10.1080/00218469308026585>
- Adams, R. D., Atkins, R. W., Harris, J. A., & Kinloch, A. J. (1986). Stress analysis and failure properties of carbon-fibre-reinforced-plastic/steel double-lap joints. *The Journal of Adhesion*, 20(1), 29-53. <https://doi.org/10.1080/00218468608073238>
- Bigwood, D. A., & Crocombe, A. D. (1989). Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 9(4), 229-242. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(89\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0143-7496(89)90066-3)
- Campilho, R. D., Banea, M. D., Pinto, A. M., da Silva, L. F., & De Jesus, A. M. P. (2011). Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(5), 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.09.008>
- Charalambides, M. N., Kinloch, A. J., & Matthews, F. L. (1996, September). *Strength prediction of bonded joints*. 83rd Meeting of the AGARD Structures and Materials Panels on Bolted/Bonded Joints in Polymeric Composites, Florence, Italy.
- Crocombe, A. D., & Adams, R. D. (1982). An elasto-plastic investigation of the peel test. *The Journal of Adhesion*, 13(3-4), 241-267. <https://doi.org/10.1080/00218468208073190>
- Crocombe, A. D. (1989). Global yielding as a failure criterion for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 9(3), 145-153. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(89\)90110-3](https://doi.org/10.1016/0143-7496(89)90110-3)
- Crocombe, A. D., Bigwood, D. A., & Richardson, G. (1990). Analysing structural adhesive joints for failure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10(3), 167-178. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(90\)90100-C](https://doi.org/10.1016/0143-7496(90)90100-C)
- Da Silva, L. F., Lima, R. F., Teixeira, R. M., & Puga, A. (2008). *Closed-form solutions for adhesively bonded joints*. Reports of the project Development of the software for the design of adhesive joints, University of Porto, Portugal.
- Fiamegkou, E. (2015). *Development of improved, multi-functional, nano-structured polymer based adhesives with applications in the bonding of composite components and the repair of engineering structures with composite patches*. (PhD), University of Patras, Greece.
- Goland, M., & Reissner, E. (1944). The stresses in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics*, 11(1), A17-A27. <https://doi.org/10.1115/1.4009336>

- Harris, J. A., & Adams, R. A. (1984). Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 4(2), 65-78. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(84\)90103-9](https://doi.org/10.1016/0143-7496(84)90103-9)
- Hart-Smith, L. J. (1973). *Adhesive-bonded double-lap joints*. NASA CR-112235: National Aeronautics and Space Administration.
- Ikegami, K., Takeshita, T., Matsuo, K., & Sugibayashi, T. (1990). Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metals. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10(3), 199-206. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(90\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0143-7496(90)90104-6)
- Kırkayak, L. (2019). Yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımına etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 27-33. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.54289>
- Lee, S. J., & Lee, D. G. (1992). Development of a failure model for the adhesively bonded tubular single lap joint. *The Journal of Adhesion*, 40(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/00218469208030467>
- Marques, E. A. S., & da Silva, L. F. (2008). Joint strength optimization of adhesively bonded patches. *The Journal of Adhesion*, 84(11), 915-934. <https://doi.org/10.1080/00218460802505275>
- Mortensen, F., & Thomsen, O. T. (2002). Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach. *Composites Science and Technology*, 62(7-8), 1011-1031. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00030-1)
- Noorman, D. C. (2014). *Cohesive zone modelling in adhesively bonded joints*. (MSc), Delft University of Technology, Holland.
- Odi, R. A., & Friend, C. M. (2004). An improved 2D model for bonded composite joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24(5), 389-405. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2001.06.001>
- Özer, H., & Öz, Ö. (2017). The use of the exponential Drucker-Prager material model for defining the failure loads of the mono and bi-adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 76, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.02.005>
- Pinto, A. M. G., Campilho, R. D. S. G., Mendes, I. R., & Baptista, A. P. M. (2014). Numerical and experimental analysis of balanced and unbalanced adhesive single-lap joints between aluminium adherends. *The Journal of Adhesion*, 90(1), 89-103. <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.773258>
- Raghava, R., Caddell, R. M., & Yeh, G. S. (1973). The macroscopic yield behaviour of polymers. *Journal of Materials Science*, 8, 225-232. <https://doi.org/10.1007/BF00550671>
- Rodríguez, R. Q., de Paiva, W. P., Sollero, P., Rodrigues, M. R. B., & de Albuquerque, É. L. (2012). Failure criteria for adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 37, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.01.009>
- Saraç, İ. (2020). Çekme yükü uygulanmış boru yapıştırma bağlantılarında bindirme uç geometrisinin bağlantı dayanımına etkisinin araştırılması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(4), 733-744. <https://doi.org/10.36306/konjes.708239>
- Saraç, İ. (2021a). Yapıştırma bağlantılarında kohezif bölge modeli uygulayarak ve uygulamadan modelleme yapılmasının gerilme dağılımına etkisinin araştırılması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(15), 457-468. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.990291>
- Saraç, İ. (2021b). Failure analysis of simple overlap bonding joints and numerical investigation of the adhered tip geometry effect on the joint strength. *Materials Testing*, 63(11), 1007-1011. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-0035>
- Turan, K., & Kaman, M. O. (2010). Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ilerlemeli hasar analizi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 16(3), 315-323.
- Volkersen, O. (1938). Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtfor Schung*, 15, 41-47.
- Waseem, M., & Kumar, K. (2014). Finite element modelling for delamination analysis of double cantilever beam specimen. *International Journal of Mechanical Engineering*, 1(5), 27-34. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V1I5P105>
- Yue, T., & Wahab, M. A. (2014). Finite element analysis of stress singularity in partial slip and gross sliding regimes in fretting wear. *Wear*, 321, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.09.008>