

YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA KOHEZİF BÖLGE MODELİ UYGULAYARAK VE UYGULAMADAN MODELLEME YAPILMASININ GERİLME DAĞILIMINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

İsmail SARAÇ^{1*}

¹Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray, 68100, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 02.09.2021 Kabul Tarihi/Accepted Date: 21.10.2021 DOI: 10.54365/adyumbd.990291

ÖZET

Yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan sayısal yöntemler zaman içerisinde gelişim göstermiştir. Başlangıçta maksimum gerilme/gerinim yöntemi kullanılarak analizler yapıldı. Bunu takiben, yapıştırma bağlantılarında oluşan hasarın bir çeşit kırılma problemi olması nedeniyle kırılma mekaniği yaklaşımları kullanılmaya başlandı. İlk olarak Lineer Elastik Kırılma Mekaniği temelli çalışmalar yoğun bir şekilde yapıldı. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği yaklaşımıyla önemli oranda başarılı çalışmalar yapılmasına rağmen, çatlak ucunda oluşan gerilme alanının tamamen elastik kabulü ve plastik şekil değişiminin ihmal edilmesi nedeniyle bazı sınırlamalarla karşılaşmıştır. Lineer Elastik Kırılma mekaniğindeki bu sınırlama nedeniyle non-Lineer Elastik Kırılma Mekaniğine odaklanılarak çalışmalar yapılmıştır. 1990' lı yıllarda ise özellikle kohezif bölge modeli hızlı bir gelişme göstermiştir. Tokluğu yüksek yapıştırıcıların, uygulamada artan kullanımıyla birlikte, yapıştırma bağlantılarının doğrusal olmayan kırılma davranışlarını incelemek daha da önemli oldu. Yapılan bu çalışmada, tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara bölgelerinde, kohezif bölge modeli uygulayarak ve kohezif bölge modeli uygulamadan modelleme yapılmasının, gerilme ve strain enerji dağılımlarına etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, yapıştırma bağlantılarında kohezif bölge modeli uygulamanın fiziksel probleme daha uygun olduğu ve yapıştırıcı tabakasındaki soyulma gerilmesi, kayma gerilmesi ve strain enerji dağılımı açısından önemli farklılıklar olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma bağlantıları, kohezif bölge modeli, sayısal analiz

THE INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MODELING WITH AND WITHOUT COHESIVE ZONE MODELING ON THE STRESS DISTRIBUTION IN ADHESIVE JOINTS

ABSTRACT

Numerical methods used to determine the mechanical properties of adhesive joints have developed over time. Initially, analyzes were performed using the maximum stress/strain method. Following this, fracture mechanics approaches were used, since damage to adhesive joints is a kind of fracture problem. Initially, studies based on Linear Elastic Fracture Mechanics were intensively carried out. Although there have been significant successes with the Linear Elastic Fracture Mechanics approach, some limitations have been encountered due to the fact that the stress field formed at the crack tip is assumed to be fully elastic and plastic deformation is neglected. Due to this limitation in Linear Elastic Fracture mechanics, studies have been carried out focusing on non-Linear Elastic Fracture Mechanics. In the 1990s, especially the cohesive zone model showed a rapid development. With the increasing use of high toughness adhesives in practice, it has become even more important to examine the nonlinear fracture behavior of adhesive joints. In this study, the effects of modeling on the stress and strain energy distributions in single lap adhesive joints, between the adhesive and the adhesive material, by applying the cohesive zone model and without applying the cohesive zone model, were investigated. As a result of the study, it was emphasized that the application of the cohesive region model in adhesive joints is more suitable for the physical problem and there are significant differences in terms of the peel stress distribution in the adhesive layer.

Keywords: Adhesive joints, cohesive zone model, numerical analysis

* e-posta: ismailsarac@aksaray.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8438-2744> (Sorumlu Yazar)

1. Giriş

Yapıştırma bağlantılarının mühendislik uygulamalarında güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için mekanik özelliklerinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Yapıştırma bağlantılarının mukavemet tahmin yöntemleri zaman içerisinde gelişme göstermiştir. Başlangıçta, basit bağlantı geometrileri (tek tesirli bindirme bağlantısı, çift tesirli bindirme bağlantısı gibi) kullanılarak teorik metotlar geliştirilmiştir. Teorik metotların temel yaklaşımı, yapıştırıcı tabakasındaki maksimum gerilme değerlerinin tespit edilmesi ve bu değerlerin yapıştırıcı dayanım değerleriyle karşılaştırılması şeklinde olmuştur. Bu şekilde hasar tahminleri maksimum gerilmeye bağlı olarak yapılmaya çalışılmıştır. Daha sonraki yıllarda, sonlu elemanlar yönteminin yapıştırma bağlantılarının analizlerinde kullanılmaya başlanmasıyla birlikte maksimum gerilme/gerinme yöntemi kullanılarak çok sayıda sayısal çalışma yapılmıştır [1-5]. Buna göre yapıştırıcı tabakasındaki gerilme/gerinim dağılımları sonlu elemanlar paket programları kullanılarak elde edilmiş ve kritik değerlerle karşılaştırılarak hasar tahminleri yapılmıştır.

Bunu takiben, yapıştırma bağlantılarında oluşan hasarın bir çeşit kırılma problemi olması nedeniyle kırılma mekaniği yaklaşımları kullanılmaya başlandı. İlk olarak Lineer Elastik Kırılma Mekaniği temelli çalışmalar çok yoğun bir şekilde yapıldı. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği özellikle kırılma/gevrek karakterli malzemelerde önemli oranda doğru sonuçlar vermektedir. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği Yaklaşımında, bağlantılara uygulanan yüklemeler, çatlak büyümesi ile ilgili, gerilme şiddeti faktörü veya enerji yayılım hızı faktörleriyle ilişkilendirilerek çalışmalar yapılmıştır. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği yaklaşımıyla önemli oranda başarılı çalışmalar yapılmasına rağmen, çatlak ucunda oluşan gerilme alanının tamamen elastik kabulü ve plastik şekil değişiminin ihmal edilmesi nedeniyle bazı sınırlamalarla karşılaşmıştır.

Özellikle plastik şekil değiştirme kabiliyeti yüksek, kırılma özellikte olmayan yapıştırıcıların üretilmesiyle birlikte yapıştırma bağlantılarının mekanik analizinde yeni çözüm yöntemleri uygulanmaya başlanmıştır. Çünkü tokluğu yüksek yapıştırıcılarda, kohezif mukavemet plastik bölgeyle doğrudan ilişkili olmaktadır. Lineer Elastik Kırılma mekaniğindeki bu sınırlama nedeniyle Lineer olmayan Elastik Kırılma Mekaniğine odaklanılarak çalışmalar yapılmıştır.

Araştırmacılar tarafından 1950'lerin sonlarına doğru kohezif bölge kavramı önerildi [6-7]. Buna göre, potansiyel bir çatlak yolu (kohezif bölge) boyunca gerilme değerleri, referans olarak kabul edilen çekme-ayrılma yasası kavramıyla ilişkilendirilerek, çatlak ilerlemesi ve kırılma incelemeleri yapıldı. Kırılma prosesinde, gerilme değerleri, kabul edilen ara yüzey yasasına göre deformasyon miktarlarına göre değişmektedir. Öte yandan 1960'ların sonlarına doğru, çatlak ucundaki plastik deformasyonu da dikkate alarak enerji salınım hızını hesaplamak için sünek malzemelere uygulanabilen J-İntegral metodunu önermiştir [8]. Bu çalışmaların öncülüğünde 1990'lara kadar yapıştırma bağlantılarının lineer olmayan kırılma davranışlarını araştırmak için yoğun çalışmalar yapılmıştır.

1990'lı yıllarda ise özellikle kohezif bölge modeli hızlı bir gelişme göstermiştir. Tokluğu yüksek yapıştırıcıların uygulamada artan kullanımıyla birlikte yapıştırma bağlantılarının doğrusal olmayan kırılma davranışlarını incelemek daha da önemli oldu. Böylece tek parametrelili, Lineer Elastik Kırılma mekaniği yaklaşımının, özellikle tokluğu yüksek yapıştırıcıların kullanılmasıyla oluşturulan yapıştırma bağlantılarında, doğru simülasyonların yapılmasında yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Lineer Elastik Kırılma Mekaniğindeki tek parametrelili model yerine, daha doğru bir modelleme yapılabilmesi için kohezif bölge modeli yaklaşımında iki veya üç parametreye gerek olduğu bildirilmiştir. Bu parametreler, kırılma tokluğu, kohezif dayanım ve kohezif dayanımın kayb olduğu karakteristik deplasman değerleri olarak seçilebilmektedir.

Araştırmacılar tarafından yapıştırma bağlantılarının kırılma sürecini modellemek için çeşitli kohezif bölge modelleri önerilmiştir. Bu modeller arasındaki temel fark çekme-deplasman eğrisinin şekli ve kullanılan parametrelerdir. Kohezif bölge modellerinin hepsi kritik değerlere ulaşıldığında çatlak yayılmasına izin verilen bir veya daha fazla ara yüzün tanımlanabileceği varsayımına dayanır. Kohezif bölge modelleri yapıştırma bağlantıları da dahil olmak üzere çeşitli malzeme ve yapıların kırılma davranışlarını incelemek için geleneksel sonlu elemanlar modellerine uyarlanabilmektedirler. Yapıştırma bağlantılarının kırılma problemlerini sayısal olarak incelemek için birkaç tane kohezif bölge modeli tabanlı yöntem bulunmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, ilk olarak kohezif bölge modeli genel olarak tanıtılmıştır. Daha sonra; tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme ara yüzeyleri kohezif bölge modeli uygulayarak ve kohezif bölge modeli uygulamadan ayrı ayrı modellenmiştir. Oluşturulan modellere bir ucundan deplasman verilerek sayısal analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, yapıştırıcı tabakasındaki gerilme ve strain enerji dağılımları ve yapıştırılan malzemedeki gerilme dağılımları elde edilerek karşılaştırılmıştır. Çalışma Ansys sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

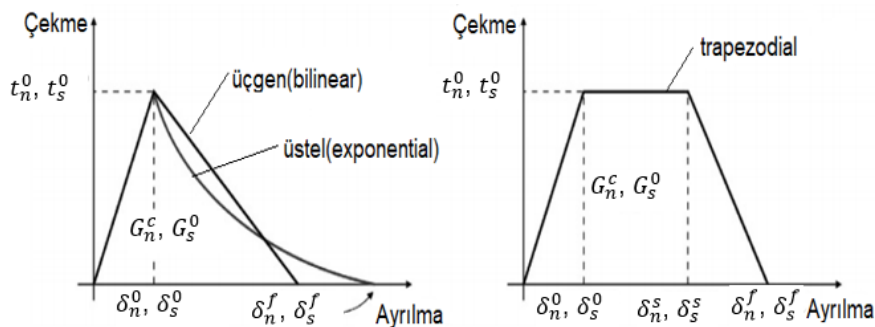
1.1. Kohezif Bölge Malzeme Modeli

Kompozitler ve yapıştırma bağlantıları gibi farklı özelliklerdeki malzemelerin birleştirilmesiyle oluşturulan yapılarda sıklıkla görülen ara yüz boyunca kırılma veya delaminasyon olayları, yapıların dayanımını sınırlamada önemli bir rol oynamaktadır. Bu durum, ara yüzeylerin hasarı konusunda araştırmalar yapılmasının önünü açmıştır. Ara yüz ayrılması geleneksel kırılma mekaniği yöntemleri kullanılarak modellenebilmektedir. Ancak son zamanlarda, geleneksel kırılma mekaniği tekniklerine alternatif olarak, ara yüzeydeki çekme-ayrılma (traction-separation) ilişkilerini benimseyerek kırılma mekanizmasını doğrudan devreye sokan kohezif bölge modeli tekniği kullanılmaya başlandı. Kohezif bölge modelinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tepe noktasına kadar elastik davranış sergilendiği ve eğrinin en üst noktasından itibaren hasar başlayarak kopma meydana geldiğinin ifade edilmektedir. Bunun sonucunda, ara yüz ayrılması için gereken enerji olan kritik bir kırılma enerjisi kavramı ortaya çıktı [9].

Geleneksel sonlu elemanlar yöntemleri ile karşılaştırıldığında, malzeme ve ara yüzey özellikleri dikkate alınarak geliştirilen farklı şekillerdeki kohezyon yasalarının, kullanılmasıyla, CZM yönteminde daha doğru dayanım tahminleri yapılabilmektedir. Kohezif bölge modelinde aynı malzeme içerisinde ve farklı malzemelerin ara yüzeylerinde hasar büyümesini simüle etmek mümkündür. Malzemelerin ara yüzeyleri, ara yüz elemanları (interface elements) veya kontak elemanları (contact elements) seti ile temsil edilmekte ve ara yüz davranışını karakterize etmek için bir CZM modeli kullanılmaktadır.

CZM modeli temel olarak, arayüze etki eden çekme (Traction, T) ile karşılık gelen ara yüzey ayrılması (Separation, δ) arasındaki kurucu bir ilişkiden oluşur. Çekme-ayırma (traction-separation) tanımlaması, seçilen eleman tipine (kontak elemanı veya ara yüzey elemanı) ve malzeme modeline bağlıdır.

Malzeme modeli olarak; Üçgen(bilinear), üstel (exponential) ve trapezoidal kohezif bölge modeli şekilleri yapısal malzemelerin analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Kohezif bölge modeli üçgen, üstel ve yamuk şekilleri [1].

CZM' de maksimum gerilmeye (t_n^0 - çekme, t_s^0 -kayma) kadar elastik davranış ve elastik davranışı takiben, aşamalı olarak plastik şekil değişimiyle birlikte dayanım düşüşü ve final hasarı simüle edilir. δ_n^0 , maksimum kohesif çekme anındaki yer değiştirmeyi, δ_n^f , ayrılma tamamlandığı andaki yer değiştirmeyi göstermektedir.

G_n ve G_s , CZM şekillerindeki, yer değiştirme miktarlarına göre çekme-ayrılma grafiklerinin altında kalan alandır. Maksimum normal ve kayma yer değiştirmeleri (δ_n^f, δ_s^f) için, $G_n = G_n^c$ ve $G_s = G_s^c$ kritik tokluk değerleri elde edilir.

Bu tekniğin uygulanabilmesi için, ayrılmanın beklendiği yüzeylere çekme-ayrılma (traction-separation) yasalarının uygulanması gerekmektedir. Buna göre kırılma yolu boyunca çekme ve kayma durumları için enerji salınım hızlarına (G_n ve G_s) ve ilgili malzemeye ait kritik değerlere veya kritik tokluk değerlerine (G_n^c ve G_s^c) ihtiyaç vardır. Ayrılmanın beklendiği yüzeyler malzeme içerisinde bir yüzey olabildiği gibi iki farklı malzemenin ara yüzeyi de olabilmektedir. Normal gerilme (t_n^0) ve kesme gerilmesi (t_s^c) koheziv dayanımları, elastik bölgenin bitimiyle ilgili parametreleridir ve bilinmesi gerekmektedir [1].

Yapıştırma bağlantılarının kohezif bölge modeli kullanılarak modellenmesinde, genellikle yapıştırıcı ara tabakası bir bütün olarak ele alınır ve ince yapıştırıcı tabakanın yerini bir dizi ara yüz veya kontak elemanı alır. Yapıştırıcı tabakası bir yüzey olarak modellenir. Bu yöntem çok ince yapıştırıcı tabakaya sahip yapıştırma bağlantılarının kırılma davranışının incelenmesinde, basitliği ve pratikliği nedeniyle yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hesaplama pratikliğine rağmen bu yöntemde bazı sınırlamalar vardır. Çünkü kohezif dayanım, yapıştırıcı tabakasının elastoplastik davranışından etkilenmektedir. Yapıştırıcı tabakası bir yüzey olarak ele alındığında, yapıştırma bağlantısına uygulanan zorlama etkisiyle yapıştırıcı tabakasının elasto-plastik davranışı dikkate alınmamaktadır. Kohezif bölge modeli parametreleri, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme kalınlıklarına bağlı olduğu yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Dolayısıyla, tüm ince ara katmanı bir ara yüz olarak modellemek yerine, yapıştırıcı katman bir elastoplastik süreklilik olarak modellenmesi önerilmektedir [10-11].

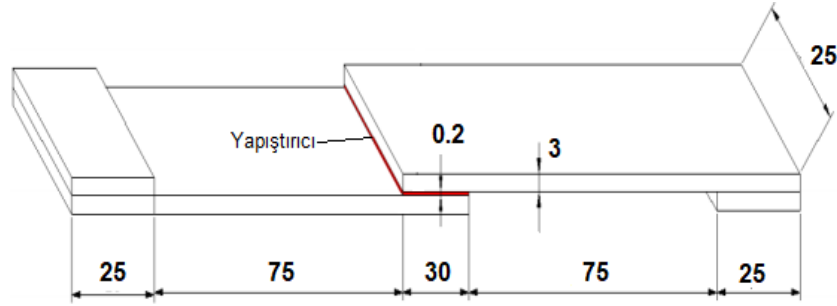
2. Materyal ve Metod

Yapılan bu çalışmada, literatürden alınan deneysel bir çalışmada kullanılan tek tesirli bağlantı modeli boyutlarına uygun şekilde 30 mm bindirme mesafesinde sayısal modeller oluşturulmuştur [12]. Tek tesirli bindirme bağlantı modelinde yapıştırıcı olarak DP460 epoksi yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme olarak ise St37 genel yapı çeliği kullanılmıştır. Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 1’de, 30 mm bindirme mesafesinde oluşturulan sonlu elemanlar modelinin genel boyutları Şekil 2’de gösterilmiştir.

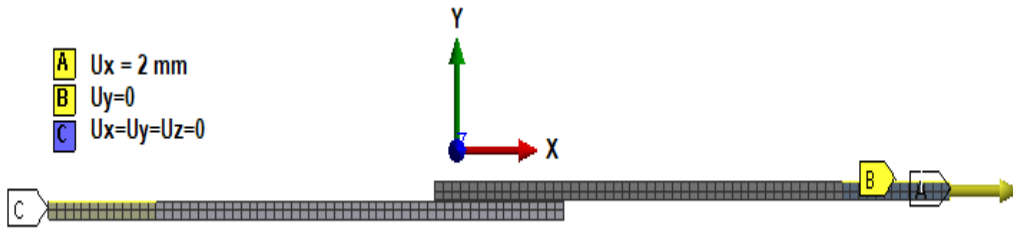
Çizelge 1. DP460 ve St37 mekanik özellikleri [13-14].

Mekanik Özellikler	St37	DP460
Elastisite modülü (MPa)	210.000	1984
Poisson oranı	0,3	0,38
Akma dayanımı(MPa)	235	38,4
Çekme dayanımı (MPa)	375	44,6
Tanjant modülü (MPa)	610	500

Sınır koşulları Şekil 3’ te gösterildiği gibi belirlenmiştir. Buna göre oluşturulan modellerin bir ucu her yönde sabitlenmiştir. Diğer ucuna ise yatay doğrultuda deplasman uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda, tek tesirli yapıştırma bağlantısının, çekme cihazının çeneleri içinde kalan kısımlarında y eksenine doğrultusunda hareket serbestliği kısıtlandığı için buna uygun olarak oluşturulan modellerin her iki ucundaki 25 mm kısımların y eksenine doğrultusundaki hareket serbestliği kısıtlanmıştır.

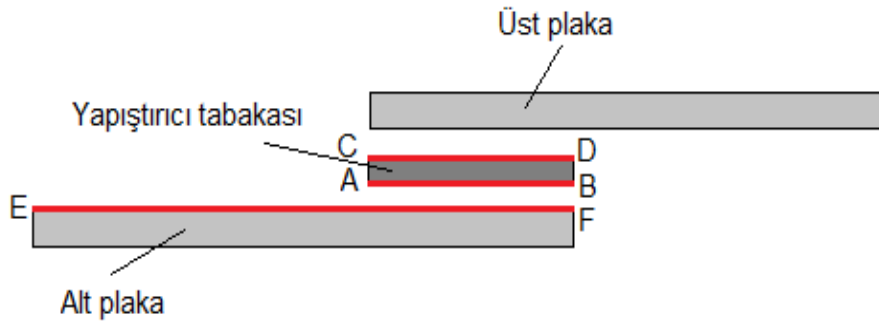


Şekil 2. Sonlu elemanlar modeli genel boyutları



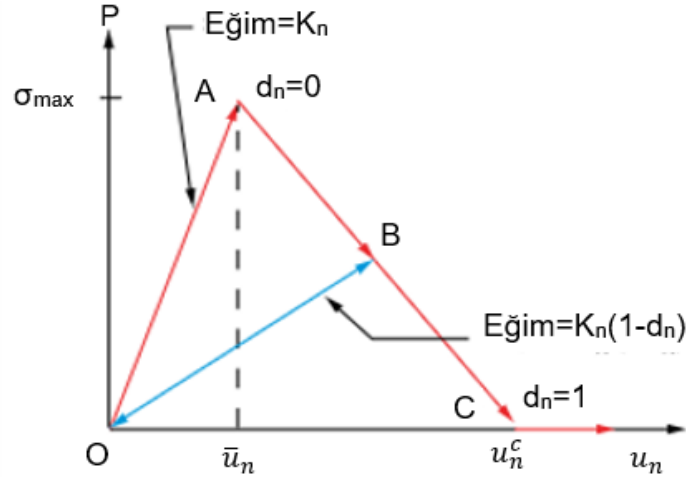
Şekil 3. Sınır şartları

Sonlu elemanlar analizleri iki boyutlu olarak gerçekleştirildi. İki boyutlu analizlerde genelleştirilmiş düzlem şekil değiştirme yöntemi kullanıldı. Yapıştırıcı ve plaka malzemeleri “Bilinear Isotropic Hardening” malzeme modeli kullanılarak elastoplastik olarak modellendi. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki Şekil 4’te gösterilen C-D ve A-B yüzlerine kohezif bölge malzeme modeli uygulanarak (CZM) ve uygulanmadan (Non-CZM) iki farklı teknik kullanılarak sonlu elemanlar modelleri oluşturuldu. Yapılan çalışmada, kohezif malzeme modeli olarak üçgen (bilinear) model kullanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 4. Kohezif bölge malzeme modeli uygulanan ve gerilme analizi yapılan hatlar

Ara yüz modellenmesinde kontak eleman seti kullanılmıştır. Kontak elemanları ile ara yüzey ayrılmasını modellemek “debonding” olarak adlandırılır. Debonding” şeklinde ara yüzey modellenmesinde kontak elemanları yapışmış (bonded) durumdadır ve kontak bölgesi için bir kohezif bölge materyali tanımlanması gerekir Ara yüz delaminasyonunu modellemek için “Debonding” yöntemini kullanmanın birçok avantajı vardır. Kontak elemanları kullanılarak oluşturulmuş modeller kolaylıkla modifiye edilebilmektedir. Ara yüzey ayrımı, temas boşluğu veya penetrasyon ve teğetsel kayma mesafesi olarak tanımlanır.



Şekil 5. Üçgen koheziv bölge modeli için normal kontak gerilmesi ve kontak boşluğu eğrisi

Şekil 5'te (OA) doğrusu, doğrusal elastik yüklemeyi, (AC) doğrusu, doğrusal yumuşamayı gösterir. Maksimum normal kontak gerilmesi, (A) noktasında elde edilir. Ayrılma (A) noktasında başlar ve normal kontak gerilmesi sıfır değerine ulaştığında (C) noktasında tamamlanır. (OAC) eğrisinin altındaki alan, ayrılmadan dolayı açığa çıkan enerjidir ve kritik kırılma enerjisi olarak adlandırılır. (OA) çizgisinin eğimi, maksimum normal kontak gerilmesindeki kontak aralığını belirler. Böylece, normal kontak gerilmesinin kontak boşluğu ile nasıl azaldığını, yani kırılmanın kırılğan mı yoksa sünek mi olduğunu karakterize eder.

Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının mekanik dayanımını etkileyen temel faktörlerden birisi, bindirme bölgesi uç kısımlarında yoğunlaşan soyulma gerilmeleridir. Ayrıca kayma gerilmeleri de hasar oluşumunda etkin olmaktadır. Bundan dolayı, CZM uygulamasında Ansys program paketinden Mod-I ve Mod-II temelli "Mixed Mod" seçilerek analizler yapılmıştır.

Mixed-Mod, normal ve teğetsel kontak gerilmeleri için denklemler şu şekilde yazılır:

$$P = K_n u_n (1 - d_m) \quad (1)$$

$$\tau_t = K_t u_t (1 - d_m) \quad (2)$$

P = normal kontak gerilmesi

K_n = normal kontak katılık

u_n = normal kontak deplasmanı

T_t = teğetsel kontak gerilmesi

K_t = teğetsel kontak katılık

u_t = teğetsel kontak deplasmanı

d_m = ayrılma parametresi

Ayrılma parametresi şu şekilde tanımlanır:

$$d_m = \left(\frac{\Delta_m - 1}{\Delta_m} \right) X \quad (3)$$

$\Delta_m \leq 1$ için, $d_m = 0$, ve $\Delta_m > 1$ için, $0 < d_m \leq 1$

Δ_m ve X aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\Delta_m = \sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_t^2} \quad (4)$$

$$\Delta_n = \frac{u_n}{\bar{u}_n} \quad (5)$$

$$\Delta_t = \frac{u_t}{\bar{u}_t} \quad (6)$$

$$X = \left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n} \right) = \left(\frac{u_t^c}{u_t^c - \bar{u}_t} \right) \quad (7)$$

\bar{u}_n = maksimum normal kontak gerilmesindeki normal deplasman

\bar{u}_t = maksimum teğetsel kontak gerilmesindeki teğetsel deplasman

u_n^c = ayrılma tamamlandığında toplam normal deplasman

u_t^c = ayrılma tamamlandığında toplam teğetsel deplasman

Mixed modlu ayrılma için, hem normal hem de teğetsel kontak gerilmeleri toplam kırılma enerjisine katkıda bulunur ve bileşenler için kritik kırılma enerjisi değerlerine ulaşılmadan önce bağ çözme tamamlanır. Bu nedenle, ayrılmanın tamamlanmasını tanımlamak için bir birleşik bir enerji kriteri kullanılır (Denklemler 8).

$$\left(\frac{G_n}{G_n^c} \right) + \left(\frac{G_t}{G_t^c} \right) = 1 \quad (8)$$

$$G_n = \int P du_n \quad (9)$$

$$G_t = \int \tau_t du_t \quad (10)$$

G_n ve G_t are, sırasıyla, normal ve teğetsel kırılma enerjileridir.

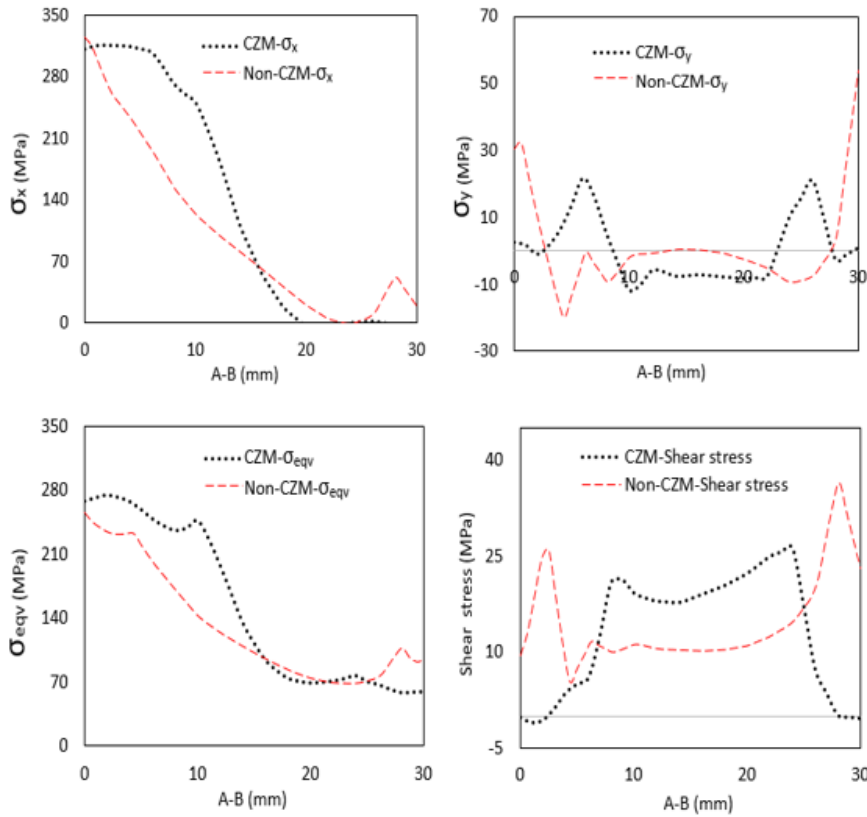
Ansys sonlu elemanlar programında; üçgen malzeme modelinin farklı varyasyonları mevcuttur; bu çalışmada, kırılma enerjisi temelli kohezif bölge malzeme modeli (Fracture-Energies based Debonding, CZM) kullanılmıştır. Bu modelin uygulanabilmesi literatürden alınan DP460 yapıştırıcıya ait kohezif parametreleri Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. DP460 CZM parametreleri [15].

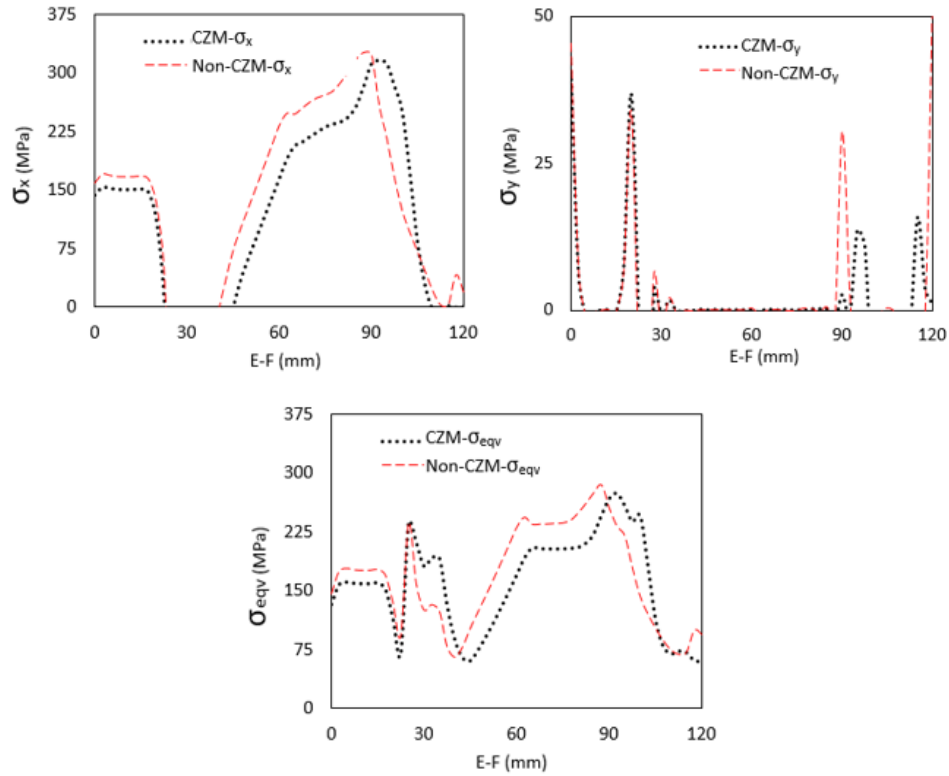
Maksimum normal gerilme (t_n^0)	32,6 MPa
Kritik normal enerji salınım hızı (G_n^c)	2,56 N/mm
Maksimum kesme gerilmesi (t_s^0)	28,5 MPa
Kritik teğetsel enerji salınım hızı (G_t^c)	11,71 N/mm
Maksimum normal yerdeğiştirme mesafesi (δ_n^f)	0,142 mm
Maksimum kayma yerdeğiştirme mesafesi (δ_s^f)	0,518 mm

3. Sonuçlar ve Tartışma

Yapıştırıcı tabakasındaki A-B hattı ve plaka üzerindeki E-F hattı boyunca elde edilen gerilme dağılım grafikleri Şekil 6-7’de verilmiştir. A-B hattında, σ_x normal gerilme, σ_y soyulma gerilmesi, σ_{eqv} eşdeğer gerilme ve τ_{xy} kayma gerilme dağılımları elde edilmiştir. E-F hattında ise σ_x normal gerilme, σ_y soyulma gerilmesi ve σ_{eqv} eşdeğer gerilme dağılımları elde edilmiştir.

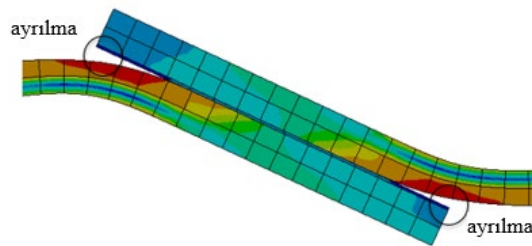


Şekil 6. A-B hattındaki gerilme dağılımları

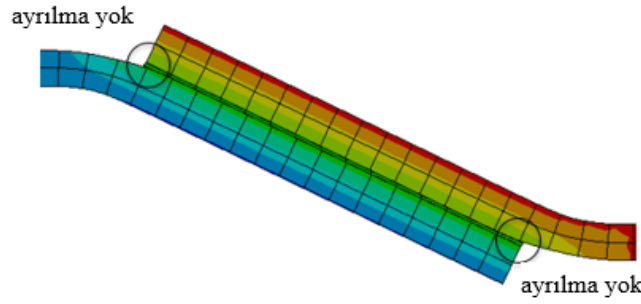


Şekil 7. E-F hattındaki gerilme dağılımları

Yapıştırıcı tabakasındaki A-B hattı boyunca elde edilen gerilme dağılımları incelendiğinde, özellikle soyulma ve kayma gerilme dağılımları, CZM uygulanan ve CZM uygulanmayan modellerde farklılık göstermektedir. CZM kullanılarak yapılan modellemede maksimum soyulma gerilmeleri bindirme uçlarından iç bölgelerde oluşmuştur. Bindirme uç bölgelerinde ise sıfıra yakın değerler elde edilmiştir. CZM uygulanan modelde bindirme uçlarında ayrılma olduğu için gerilme değerlerinin düşük olması gerekmektedir. Buna karşı ayrılmanın sonlandığı kısımlarda ise gerilme değerleri yüksek olmaktadır (Şekil 8). CZM uygulanmayan modelde ise bindirme uç bölgelerinde ayrılma oluşmadığı için soyulma gerilmeleri maksimum değerler almaktadır (Şekil 9). Kayma gerilme dağılımları incelendiğinde, CZM uygulanan modelde, bindirme uç bölgelerinde kayma gerilmeleri sıfıra yakın çıkmaktadır. Maksimum kayma gerilmeleri ayrılmanın olmadığı kısımlarda oluşmuştur. CZM uygulanmayan modelde ise kayma gerilmelerinin maksimum değerleri bindirme uç bölgeleri civarında oluşmaktadır. E-F hattındaki gerilme dağılımları incelendiğinde, soyulma gerilme dağılımları, CZM uygulanmayan modelde, bindirme bölgesi uç kısımlarında maksimum değerleri alırken, CZM uygulanan modelde ise bindirme bölgesi iç kısımlarda maksimum değerleri almaktadır. Bu durum A-B hattındaki soyulma gerilme dağılımı ile örtüşmektedir.



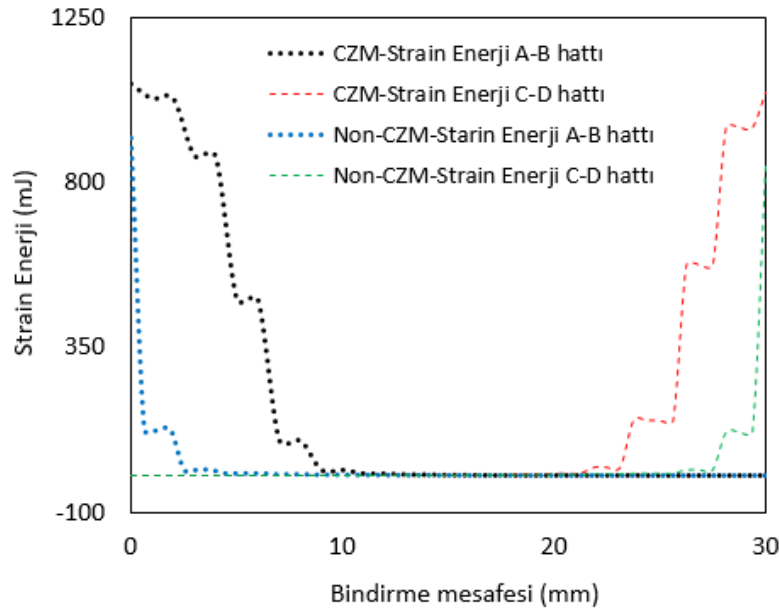
Şekil 8. CZM uygulanan modelde bindirme uçlarındaki ayrılma



Şekil 9. CZM uygulanmayan modelde bindirme uçlarındaki deplasman

CZM analizinde, kırılma enerjisi yüke ve yer değiştirmeye bağlı olduğu için, tek tesirli bindirme bağlantıları bindirme uçlarındaki kırılma enerjisi yapıştırıcının kırılma enerjisine ulaştığında hasar oluşumu başlar. Hasar oluşumu, yüzeylerin birbirinden ayrılması şeklinde kendini gösterir (Şekil 8). Uygulanan sınır şartlarına bağlı olarak tamamen ayrılma gerçekleşinceye kadar hasar ilerler. CZM uygulanmadan yapılan analizde ise bindirme uçlarında ayrılma gerçekleşmez, sadece deplasman meydana gelir (Şekil 9). Tek tesirli bindirme bağlantılarında yapılan çekme deneylerinde, bağlantının hasar durumu incelendiğinde ilk olarak, bindirme uç bölgelerinde oluşan yüksek gerilme yığılımlarının etkisiyle ayrılmalar net olarak gözlemlenmektedir. Bindirme uç kısımlarında ayrılmaların oluşmasından kısa bir süre sonra bağlantı tamamen hasara uğramaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar ve sayısal analizler incelendiğinde CZM uygulanan modellerin bindirme uç bölgelerindeki davranışının deneysel çalışmalar ile direkt olarak uyumlu olduğu görülmektedir.

CZM uygulanan ve uygulanmayan modellere ait A-B ve C-D hatlarındaki strain enerji dağılımları incelendiğinde, CZM uygulanan modellerin bindirme uçlarındaki strain enerji miktarları, non-CZM modellere göre daha yüksek çıkmaktadır (Şekil 10). Bu durum CZM modellerin bindirme uçlarındaki ayrılmalardan kaynaklı olarak deplasman miktarlarının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 10. A-B ve C-D hatlarındaki strain enerji dağılımları

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, 30 mm bindirme mesafelerinde tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, sayısal modeller, CZM kullanılarak ve CZM kullanılmadan (Non-CZM) iki farklı şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin bir ucu sabitlenerek diğer ucuna deplasman uygulanmıştır. Yapılan analiz sonucunda, yapıştırıcı tabakasındaki gerilme ve strain enerji dağılımları ve yapıştırılan malzeme üzerindeki, gerilme dağılımları elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda belirlenen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

Soyulma gerilmeleri; CZM’de bindirme uçlarındaki ayrılmaların bitiş noktalarında maksimum çıkmıştır, non-CZM’de ise bindirme uç kısımlarında maksimum değerler almıştır.

CZM’de bindirme uçlarındaki strain enerji miktarları Non-CZM’e göre daha yüksek çıkmıştır.

Kayma gerilmeleri; CZM’de bindirme uçlarında sıfıra yakın değerler alırken bindirme bölgesi orta kısımlarında maksimum değerler almıştır, Non-CZM’de ise bindirme uç kısımları civarında maksimum değerler almıştır.

Sonuç olarak, yapıştırma bağlantıları sayısal analizinde; CZM yönteminin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda gerilme ve strain enerji dağılımları farklılık göstermektedir. Yapıştırma bağlantılarının sayısal analizinde, CZM yönteminin kullanılmasının, fiziksel probleme daha uygun olduğu, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemeler arasındaki ayrılmaların daha gerçekçi simüle edilebildiği gösterilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Campilho RDSG., Banea MD, Neto JABP, Da Silva LFM. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2013; 44: 48-56.
- [2] Saraç İ, Adin H, Temiz Ş. Investigation of the effect of use of nano-Al₂O₃, nano-TiO₂ and nano-SiO₂ powders on strength of single lap joints bonded with epoxy adhesive. *Compos Part B* 2019; 166: 472-482.
- [3] Çitil Ş, Ayaz Y, Temiz Ş. Stress analysis of adhesively bonded double strap joints with or without intermediate part subjected to tensile loading. *J Adhes* 2017; 93(5):343-356.
- [4] Saraç İ. Basit bindirmeli yapıştırma bağlantılarında bindirme bölgesi uç açısı değişiminin bağlantı mukavemetine etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* 2020; 25(1): 101-110.
- [5] Saraç İ. Boru yapıştırma bağlantılarında farklı tasarım parametrelerinin yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımına etkisinin sayısal olarak araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Dergisi* 2021; 26(1): 215-231.
- [6] Barenblatt GI. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 1959; Vol. 23: 622-636.
- [7] Dugdale DS. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1960; 8: 100-104.
- [8] Rice JR. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics* 1968; 35: 379-386.
- [9] Çitil Ş. Investigation of curved and scarf lap joints subjected to tensile loads using the cohesive zone model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 2019; 233(17): 6149-6156.
- [10] Gefu J, Zhenyu O, Guoqiang L, Samuel I, Su-Seng P. Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints. *International Journal of Solids and Structures* 2010; 47: 2445-2458.
- [11] Stein N, Rosendahl PL, Becker W. Modelling load transfer and mixed-mode fracture of ductile adhesive composite joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2018; 82: 299-310.

- [12] Saraç İ., Adin H, Temiz Ş. Experimental determination of the mechanical properties of adhesive joints bonded epoxy adhesive included Al₂O₃ nanoparticle. *EJT* 2016; 6(2): 104-112.
- [13] Akpınar S. The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers. *Composites Part B* 2014; 67: 170-178.
- [14] Malag L, Kukielka L. Hybrid method to determinate the states of deformation and stress in material during the tensile test *Proc. Appl. Math. Mech.* 2007; 7: 2090025-2090026.
- [15] Kanar B, Akpınar S, Akpınar IA, 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.