

YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ T-BAĞLANTI TİPİNİN İKİ VE ÜÇ BOYUTLU GERİLME ANALİZİ**TWO AND THREE DIMENSIONAL STRESS ANALYSIS OF ADHESIVELY BONDED T-JOINTS TYPE****Salih AKPINAR^{1*} ve Murat Demir AYDIN²**¹Gümüşhane MYO, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, TÜRKİYE²Erzurum MYO, Atatürk Üniversitesi, 25240 Erzurum, TÜRKİYE**Geliş Tarihi:** 29 Mayıs 2012**Kabul Tarihi:** 09 Kasım 2012**ÖZET**

Günümüzde birçok yapısal alanda kullanımı artan yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarını anlayabilmek oldukça önemlidir. Bu yüzden sunulan çalışmada, yapıştırıcıyla (FM73) birleştirilmiş T bağlantı tipinin mekanik davranışı, deneysel ve nümerik analizler yoluyla incelenmiştir. Bunun için öncelikle, yapıştırılan malzeme olarak Al 2024-T3 alüminyum alaşımı ve yapıştırıcı olarak FM73 kullanılarak T bağlantı numuneleri üretilmiştir. Elde edilen numuneler çeki yüküne maruz bırakılarak test edilmiştir. Daha sonra, deneysel, düzlem şekil değiştirme ve 3 boyutlu gerilme analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeler açısından 2 boyutlu ve 3 boyutlu çözümler arasında büyük farklılıkların olduğu ve deneylerden elde edilen sonuçların 3 boyutlu çözümlerden elde edilen sonuçlara daha yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırıcı, T bağlantı tipi, düzlem şekil değiştirme, 3 boyutlu analiz

ABSTRACT

In recent years, it is quite important to understand the mechanical behavior of the adhesively bonded joints that are increasingly in use in many structural applications. In the present study, mechanical behavior of a T-joint bonded with adhesive (FM73) was examined through experimental and numerical methods. For this purpose, T-joint samples were produced by using Al 2024-T3 as bonded material and FM73 as adhesive and then tested by tensile loading. After words, experimental results, results obtained from plane-strain as well as 3-D stress analysis were compared to each other. In conclusion, it was revealed that there are significant differences between

* Sorumlu yazar: salihakpinar@gumushane.edu.tr

results of the 2-D and 3-D analysis in terms of stresses developed in the adhesive and additionally, observed that results of the 3-D analysis are in close proximity to the experimental results.

Keyword: Adhesive, T-joint type, plane-strain, 3-D stresses analysis

1. GİRİŞ

Günümüzde sistemlerin enerji tüketimini azaltmak için birçok sebep vardır. Yakıtta tasarrufa gitmenin başlıca yollarından bir tanesi de sistemlerin ağırlığını azaltmaktır. Sistem elemanlarını birleştirmek için kullanılan cıvata, perçin ve kaynak yerine daha hafif bir bağlantı şekli olan yapıştırıcıların kullanımı sistemleri daha hafif hale getirmiştir (Temiz,2003).

Bir yapıştırma bağlantısının analizinde, analitik ve sayısal olmak üzere iki temel yaklaşım vardır. İlk yaklaşımda, sınır şartları ve diferansiyel denklemlerden oluşan bir formülasyon söz konusudur. Bu denklemlerin çözümü bağlantının herhangi bir noktasındaki gerilme değerini verir. İkinci yaklaşımda ise diferansiyel denklemlerin çözümleri sayısal yöntemlerle elde edilir. Her iki yöntemde de yapıştırma bağlantısını oluşturan elemanların (yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme) elastik ve elastik-plastik davranışı dikkate alarak analiz yapılabilir (Aydın, 2003).

Sonlu elemanlar, mekanik sistemlerin analizinde kullanılan önemli ve lineer bölge içerisinde yapılan analizlerde basit ve oldukça etkili bir yöntemdir. Genel yük ve yer değiştirme şartlarında karmaşık geometrilerin analizine imkân sağlar. Bu yaklaşım bir yapıştırma bağlantısında kullanılacaksa, dikkate değer sonuçlar elde etmek için özellikle yapıştırıcı tabakasında sonlu elemanlar ağının çok iyi yapılmasını gerektirir (Duncan and Dean,2003).

Jeandrau (1991), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak farklı yapıştırma bağlantılarının burulma ve çekme yükleri altında elastik, elastik-plastik ve plastik gerilme dağılımlarını incelemiştir.

Kumar and Pandey (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, çift yapıştırıcı kullanarak birleştirilmiş ve çeki yüküne maruz bırakılmış tek tesirli bindirme bağlantısı düzlem şekil değiştirme ve 3 boyutlu sonlu elaman yöntemiyle modellenmiş ve elde edilen

gerilme analizi sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonuçta, 2 boyutlu gerilme analizinde ihmal edilen kayma gerilmelerin aslında ihmal edilemeyecek şiddete sahip olduğunu göstermişlerdir. Diğer bir çalışmada ise, çift destekli dik açılı T bağlantı tipi üç farklı yükleme şartı altında sonlu eleman yöntemiyle gerilme analizi yapılmıştır (Apalak vd.,1996).

Bu çalışmada; yapıştırıcıyla birleştirilmiş T bağlantı tipindeki numunelerin mekanik davranışları, deneysel ve sonlu eleman yöntemiyle incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, hafifliği, işlenebilirliği, fiziksel ve mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dayanımlarından dolayı havacılık ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı yapıştırılan malzeme olarak kullanılmıştır.

Yapıştırma işleminde; sıvı veya film yapıştırıcılar kullanılabilir. Sıvı yapıştırıcılar, yapısal yapıştırma bağlantılarında oldukça sık kullanılırlar ve yüksek bağlantı dayanımı, düzgün gerilme dağılımı ve iyi boşluk doldurma gibi avantajlar sağlarlar. Ancak, uygulanma esnasında bazı zorlukları da beraberlerinde getirirler. Film yapıştırıcılar ise, bağlantıda yeterli, düzgün ve sabit yapıştırıcı tabakası oluşturduğundan iyi tutunma özelliği sağlarlar. Yüksek dayanım yanında uygulama kolaylıkları bu yapıştırıcı tipinin kullanım alanını genişletmiştir.

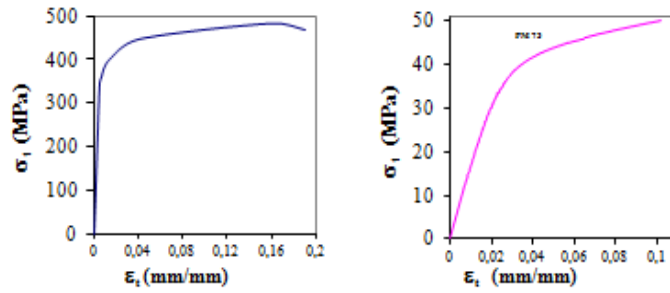
Yapılan çalışmada yapıştırıcı olarak FM®73 OST kullanılmıştır. Bu yapıştırıcı; -55°C ile 82°C sıcaklıkları arasında mükemmel yapısal performans sağlayan genel havacılık uygulamaları için geliştirilmiş epoksi esaslı yapısal bir film yapıştırıcıdır. Metal ve birçok kompozit malzemenin birleştirilmesinde kullanılır. Yapıştırıcının kürleşebilmesi için, 60 dakika 0.28 MPa basınç ve 120°C sıcaklıkta bekletilmesi gerekmektedir.

Yapıştırma bağlantısının gerilme analizlerinde, hem Al 2024-T3 alüminyum alaşımının hem de film yapıştırıcının gerilme-şekil değiştirme davranışlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil.1'deki

grafikler ve çizelge 1’de verilen veriler Akpınar (2008) ve Aydın (2003) tarafından yapılan çalışmalardan alınmıştır. Daha fazla bilgiye bu yayınlardan ulaşılabilir.

Tablo 1. Yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcının mekanik özellikleri

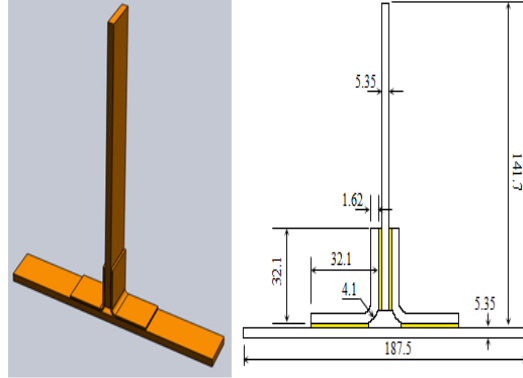
Özellik	AA2024- T3 ^[2]	FM73 ^[3]
E(MPa)	72400	1567,4
ν_e	0,33	0.38



Şekil 1. Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme (σ_t - ϵ_t) eğrileri; a) AA2024-T3 (Aydın,2003), b) FM73 (Akpınar,2008).

Çekme yükü altında yapılacak deneyler için FM73 yapıştırıcıdan geometrik parametreleri şekil 2’de verilen toplam 3 adet T bağlantı numunesi aşağıda verilen işlem basamakları uygulanarak hazırlanmıştır.

- Silikon yağlayıcı, kalıp üzerine püskürtülerek çok ince bir film tabaka oluşturulmuştur. Böylece, hem numunelerin kalıba yapışması engellenmiş hem de kurluşma sonrası kolayca ayrılması sağlanmıştır.
- FM 73 üzerindeki koruyucu tabaka kaldırılmadan istenilen boyutlarda kesildi. Kesilen film yapıştırıcılar, destek parçaları kullanılarak birleştirilecek AA2024-T3 yatay ve dikey parçalarının bindirme bölgesine gelecek şekilde yatay parçanın orta kısmının her iki bindirme bölgesine, ara yüzeyde hava kabarcıklarının oluşumunu engelleyecek şekilde uygulandı.



Şekil 2. T- bağlantı tipi için geometrik parametreler (tüm boyutlar mm).

Yapıştırıcıların kürleşmesi ve yapıştırıcı kalınlığının 0.10 mm olması için gereken basınç kalıbın üzerindeki civataların belirli oranda sıkıştırılmasıyla sağlandı.

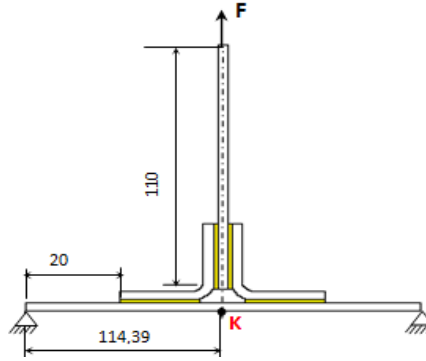
- Daha sonra numunelerin bulunduğu kalıp ısıtma fırınına yerleştirildi.
- Yapıştırıcılar için verilen kürleşme şartları, ısıtma fırınının kontrol paneli kullanılarak programlandı ve numunelerin kürleşmesi sağlandı.
- Soğuyan numuneler kalıp içerisinden çıkarılarak kürleşme esnasında dışarı taşan kısımlar temizlenerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3).

Çekme deneylerin tümü bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-I (100 kN) üniversal çekme cihazında 18°C ve %30 nem oranında 1 mm/dak.'lık çekme hızında yapılmıştır. Sınır şartları ve numunelere uygulanan kuvvet şekil 4'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3. T-bağlantı numunesi

Hesaplamlarda kullanılmak üzere test öncesi her numunenin genişliği, bindirme uzunluğu, yapıştırıcı tabaka kalınlığı ölçülerek kaydedilmiştir. Deneyler yapılırken her numune yakından gözlemlenmiş ve hasar sonrası hasar bölgesi incelenmiştir. Aynı zamanda, numunelerin taşıyabildikleri maksimum yük ve hasar tipi kaydedilmiştir. Ayrıca sonlu eleman çözümlerinde kullanılmak üzere, şekil 4 gösterilen K noktasında çekme doğrultusundaki yer değiştirme, video ekstensometre kullanılarak kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak her bir numune tipi için K noktasındaki kuvvet-yer değiştirme ($F-K$) grafikleri çizilmiştir.



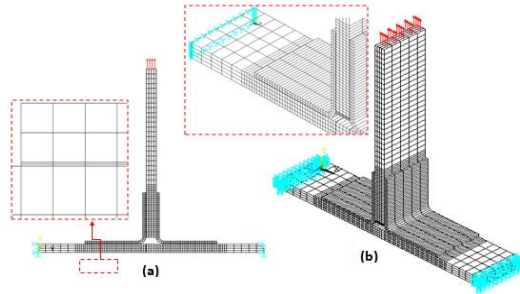
Şekil 4. Çekme deneylerinde kullanılan sınır şartları ve yükler.

3. NÜMERİK ANALİZ

Elasto-plastik sonlu eleman analizlerinde, deneysel çalışmalarda kullanılan yapıştırıcıyla (Cytec FM 73®) birleştirilmiş T bağlantı numuneleri çeki yükü altında ANSYS 14 paket programı kullanılarak düzlem şekil değiştirme kabulüne göre iki boyutlu ve üç boyutlu modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan numune boyutları (Şekil 2), yükleme ve sınır şartları (Şekil 4 ve 5), deneysel çalışmalarda kullanılanlarla aynıdır.

3 boyutlu analizlerde yapıştırma bağlantısı, üç serbestlik derecesi ve 20 düğüm noktasına sahip elemanlar (Solid 186) kullanılarak modellenmiştir. İki boyutlu analizlerde ise, iki serbestlik derecesi ve 8 düğüm noktasına sahip düzlem dörtgen elemanlar (Plane 183) kullanılmıştır. Gerilme dağılımları açısından kritik olan

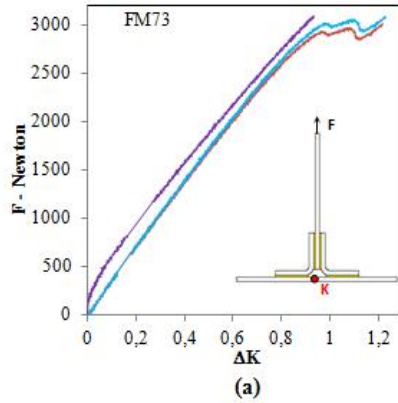
yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölge daha küçük elemanlara bölünmüştür (Şekil 5).



Şekil 5. Çekme yüküne maruz T bağlantı tiplerine ait sonlu eleman modelleri ve uygulanan sınır şartları; a) Düzlem şekil değiştirme kabulüne göre iki boyutlu model, b) üç boyutlu model.

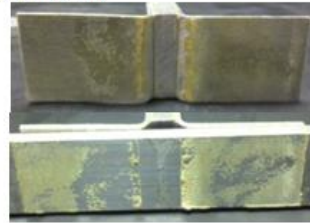
4. BULGULAR

FM73 kullanılarak üretilmiş numunelerden 3 adedi test edilmiş ve kuvvet-K noktasında meydana gelen yer değiştirme, yapıştırıcı tabaka kalınlığı, elde edilen maksimum hasar yükleri ile her numunede oluşan hasar tipleri Şekil 6'da verilmiştir.



Numune No	F	t	Hasar Tipi
Tip-I (FM73)-1	3087	0.10	Ö.K.H.
Tip-I (FM73)-2	3009	0.11	Ö.K.H.
Tip-I (FM73)-3	3084	0.10	Ö.K.H.
Ortalama	3060	0.10	

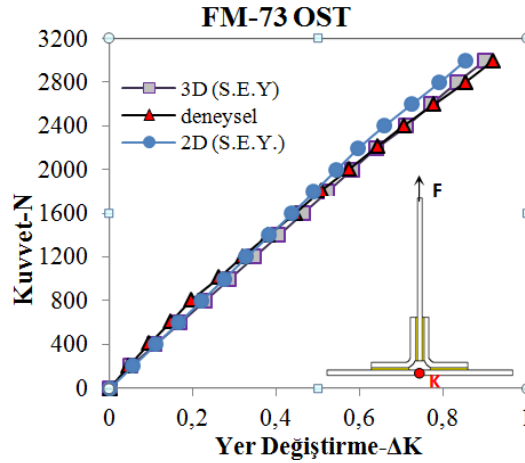
F: Hasar yükü (N), Ö.K.H.: Özel Köhür Hasar, t: yapıştırıcı tabaka kalınlığı (mm)



(b)

Şekil 6. FM73 kullanılarak üretilmiş numuneler için; a) K noktasındaki kuvvet-yer değiştirme (F-ΔK) grafikleri, b) Maksimum hasar yükü ve hasar yüzeyleri.

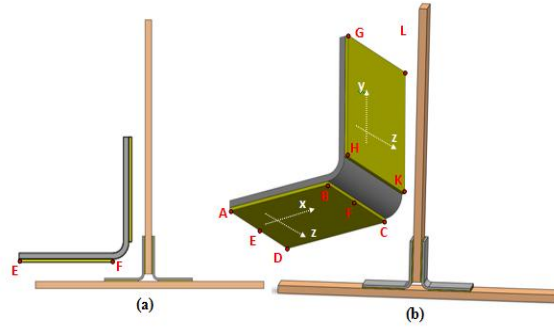
FM73 kullanılarak birleştirilmiş I. tip'deki numuneleri oluşturan AA2024-T3 alt yapıştırılan malzeme ile her iki destek parçasında da plastik deformasyon gözlemlenirken, dikey yerleştirilmiş AA2024-T3 yapıştırılan malzemede plastik deformasyon gözlemlenmemiştir. Bu tipteki numunelerde hasarı oluşturan çatlak, destek parçalarının kavisli bölgesinin bitimiyle yatay eleman ara yüzeyinden başlayarak, serbest uca doğru ilerlemiş ve serbest uçta kritik bir boya ulaştıktan sonra, anlık olarak gerçekleşmiştir. ISO 10365'te tanımlanan hasar tipleri göz önünde bulundurularak hasar yüzeyleri incelenirse, hem destek parçalarında hem de yatay yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabakasının kaldığı görülür. Bu yüzden numune yüzeylerinde özel kohosiv hasar (ÖKH) tipinin meydana geldiği söylenebilir (şekil 6b). Yapıştırılan dikey AA2024-T3 parçası ile destek parçaları arasındaki yapıştırıcı tabakasında herhangi bir hasar oluşumu tespit edilememiştir.



Şekil 7. FM73 ile birleştirilmiş T bağlantı numunesi için deneysel ve sonlu eleman analizlerinden (S.E.A.) elde edilmiş K noktasındaki kuvvet-yer değiştirme (F-ΔK) grafiği.

Sonlu eleman analizlerinde K noktasında çekme doğrultusundaki yer değiştirme, uygulanan 200 N'luk adımlarla tespit edilmiştir. Bu yer değiştirme verileri kullanılarak K noktasındaki kuvvet-yer değiştirme (F-ΔK) grafiği çizilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (şekil 7). FM73 kullanılarak üretilmiş numuneler için deneysel ve sonlu eleman analizlerinden

(S.E.A.) elde edilen sonuçlar incelendiğinde 3 boyutlu analizin oldukça uyumlu olduğu, ancak 2 boyutlu çözümün deney sonuçlarından biraz uzaklaştığı söylenebilir.



Şekil 8. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş T-bağlantı tipinde kritik hasar yüzeyleri; a) iki boyutlu model, b) üç boyutlu model.

FM73 kullanılarak birleştirilmiş T bağlantısının yapıştırıcılar ve yapıştırılan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınarak, çeki yükleme durumu için geometrik olarak lineer olmayan sonlu eleman yöntemi (SEY) kullanılarak gerilme analizi yapılmıştır. Analizlerde, çeki yükü olarak deneylerden elde edilen ortalama değer olan 3060 N' luk çeki yükü uygulanmıştır (Şekil 6b).

Pratikte ve mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler belirli kabullerle iki boyutlu ya da tek boyutlu hale indirgenerek çözülebilmektedir. Bununla birlikte, yapıştırma bağlantılarındaki yapıştırıcı tabakasında iki boyutlu modelleme için yapılan kabuller (düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme) uygun olmayan ya da eksik çözümlere neden olabilmektedir. Bu yüzden öncelikle, çeki yüküne maruz FM73 kullanılarak hazırlanmış T bağlantı numunesi düzlem şekil değiştirme kabulüne göre modellenerek çözüm yapıldıktan sonra, FM73 kullanılarak hazırlanmış aynı numune tipi üç boyutlu modellenerek çözüm yapılmıştır. Daha sonra, iki ve üç boyutlu çözümler karşılaştırılmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelenirse, hasarın başlaması açısından en kritik bölgelerin yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeyleri (ABCD ve GHKL yüzeyleri) olduğu görülür (Apalak

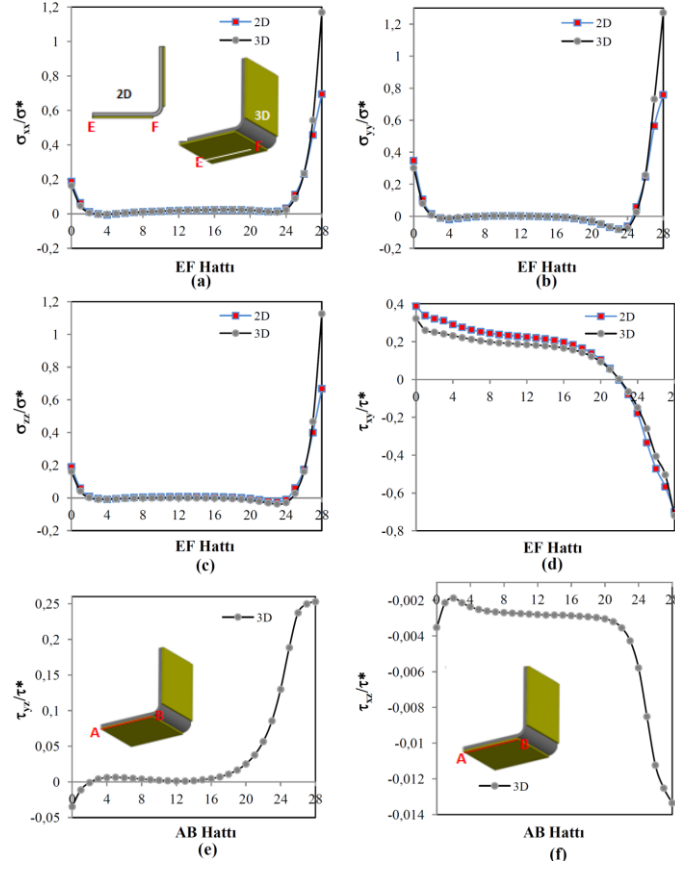
vd.,1996, Kumar and Pandey 2010, Khalili and Ghaznavi 2011). Bu çalışmada yapılan deneysel ve nümerik analiz sonuçları hasar açısından en kritik bölgenin alt yapıştırılan malzeme-yapıştırıcı ara yüzeyi (ABCD yüzeyi) olduğunu göstermiştir (şekil 8). Bu yüzden üç boyutlu gerilme analiz sonuçları, bu yüzey ve üzerindeki AB ve BC hatlarına göre, iki boyutlu gerilme analiz sonuçları ise üç boyutlu model üzerindeki EF hattıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Diğer taraftan, yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırmak için, ABCD ara yüzeyinde ve yapıştırıcı tabakası üzerinden alınan gerilme dağılımları Çizelge 1’de verilen her bir yapıştırıcının kendi çekme ve kayma dayanımlarına (σ^* , τ^*) bölünerek normalleştirilmiştir.

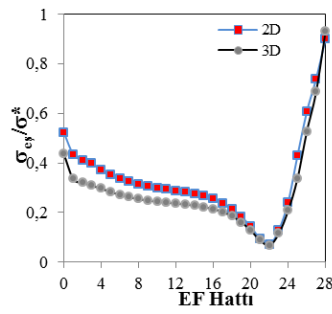
Tablo 2. Çalışmada kullanılan yapıştırıcının çekme ve kayma dayanımları

	FM73
σ^* (MPa)	53.3
τ^* (MPa)	39.3

Şekil 9. 'da verilen grafiklerde yapıştırıcı-alt yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde (ABCD ara yüzeyi) yapıştırıcı tabakası üzerindeki EF hattından alınan σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} ve τ_{xy} gerilme dağılımları karşılaştırılmıştır. Bu grafikler incelendiğinde, dikkat edilmesi gereken iki önemli nokta karşımıza çıkmaktadır. Birincisi, F noktası ve civarlarında normal gerilme dağılımları (σ_{xx} , σ_{yy} ve σ_{zz}) ile E noktası civarındaki τ_{xy} kayma gerilme dağılımlarında düzlem şekil değiştirme kabulüne göre yapılan çözüm ile üç boyutlu çözüm arasında büyük farklılıkların ortaya çıkmasıdır. İki çözüm arasında bu farklılık Poisson etkisinden kaynaklanmaktadır. İkincisi ise τ_{xz} ve τ_{yz} kayma gerilmelerinin iki boyutlu çözümlerde ihmal edilmiş olmasıdır. EF hattı için iki ve üç boyutlu çözümlerde bu gerilmeler sıfır ya da sıfıra çok yakın çıkmaktadır. Bununla birlikte üç boyutlu çözümde AB hattı dikkate alınırsa bu kayma gerilmeleri ihmal edilemeyecek büyüklükte olduğu görülür (Şekil 9.e ve f).



Şekil 9. FM73 yapıştırıcı ile birleştirilmiş T bağlantı numunelerinde 2 boyutlu ve 3 boyutlu gerilme dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 10. FM73 yapıştırıcı ile birleştirilmiş T bağlantı numunelerinde 2 boyutlu ve 3 boyutlu eşdeğer gerilme dağılımlarının karşılaştırılması.

Şekil 10 'da iki ve üç boyutlu çözümlerden elde edilen von-Mises eşdeğer gerilme dağılımları verilmiştir. Bu dağılımlarda E-F hattı boyunca farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu duruma ihmal edilen gerilmelerin sebep olduğu söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Pratikte ve mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler belirli kabullerle iki boyutlu ya da tek boyutlu hale indirgenerek çözülebilmektedir. Bununla birlikte, yapıştırma bağlantılarındaki yapıştırıcı tabakasında iki boyutlu modelleme için yapılan kabuller (düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme) uygun olmayan ya da eksik çözümlere neden olabilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Deneylerden elde edilen verilerin, sonlu eleman yöntemiyle (S.E.Y.) 3 boyutlu çözümden elde edilen verilerin 2 boyutlu çözümden elde edilen verilerden daha uyumlu olduğu söylenebilir.
- Üç boyutlu çözümde AB hattı dikkate alındığında iki boyut da ihmal edilen bu kayma gerilmeleri ihmal edilemeyecek büyüklükte olduğu görülür.

KAYNAKLAR

- Temiz, Ş., (2003). Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum,
- Aydın, M.D., (2003). Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Tek Tesirli Bindirme Bağlantısının mekanik özelliklerinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Akpınar, S., (2008). Kaymaya Maruz Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Duncan, B. and Dean, G., (2003). Measurement and models for design with modern adhesives. Int. J. of Adhesion and Adhesives, 23, 141-149.
- Jeandrou, J.P., (1991). Analysis and Design Data for Adhesively Bonded Joints. Int.J.Adhesion and Adhesives, 11(2), 71-79.

- Kumar, S. and Pandey, P.C. (2010). Behavior of Bi-adhesive Joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24- 1251-1281.
- Apalak, Z.G, Apalak, M.K and Davies.R (1996). Analysis and design of tee joints with double support ht. *J. Adhesion and Adhesives*, 16, 187-214.
- Lucas, F.M. da Silva, R.D. Adams, (2002). The strength of adhesively bonded T-joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 22, 311-315.
- Khalili, S.M.R. Ghaznavi, A. (2011). Numerical analysis of adhesively bonded T-joints with structural sandwiches and study of design parameters. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31-347-356.
