

Farklı Uniform Sıcaklıklar Altındaki Karma Bağlantı Yapılmış Kompozit ve Alüminyum Plakalardaki Gerilme Analizi

Faruk ŞEN, Kemal ALDAŞ

Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 68100 AKSARAY

Tel:+90-382 2150953 Fax:+90-382 2801365 faruk.sen@deu.edu.tr , kemalaldas@hotmail.com

ÖZET- Bu çalışmada, karma bağlantı uygulanmış kompozit ve alüminyum plakalarda meydana gelen gerilmeler analiz edilmiştir. Karma bağlantı, pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısının kombinasyonundan meydana getirilmiştir. Yapıştırıcı olarak, epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılmıştır. Analiz, sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılarak ve ANSYS yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çekme yükü sabit tutularak; modele artan değerlerde uniform sıcaklıklar uygulanmıştır. Artan sıcaklık değişiminin, gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre, sıcaklık miktarındaki artışa bağlı olarak gerilmelerin artışı gözlenmiştir. Karma bağlantı yapılan kompozit ve alüminyum plakaların farklı malzeme özellikleri nedeniyle, yüksek değerlerde gerilmeler oluşmuştur. Gerilmelerin pim deliğinin çevresinde yoğunlaştığı gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Karma bağlantı, pim bağlantısı, yapıştırıcı bağlantısı, FEM

Stress Analysis in Hybrid Bonded Composite and Aluminum Plates under Different Uniform Temperatures

ABSTRACT-In this study, stresses occurred in hybrid bonded composite and aluminum plates were analyzed. Hybrid joint was designed from both pinned joint and adhesive joint combinations with together. Epoxy resin was used as adhesive. Analysis was performed using finite element method (FEM) and helping of ANSYS software. While tensile load was constant, increasing values of uniform temperature loadings were applied on the model. The effect of increasing temperature changing on stresses was investigated. According to analysis results, increasing of stresses were observed by increasing magnitude of temperature. High stresses occurred because of the different material properties of both composite and aluminum plates bonded hybrid joint. It is observed that stresses were concentrated around pin hole.

Key words: Hybrid joint, pinned joint, adhesive joint, FEM

1. Giriş

İki veya daha malzemenin makroskobik düzeyde birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzeme, kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır. Alüminyum ve çelik gibi yaygın olarak kullanılan alışılagelmiş metal ve metal alaşımları ile karşılaştırıldığında, kompozit malzemeler, hafiflik, yorulmaya karşı uzun ömür, korozyon dayanımı gibi üstün özellikleri nedeniyle önem kazanmaktadır. Ayrıca, istenen yönde daha iyi mukavemet özelliklerinin elde edilebilmesi, sahip oldukları ısı genleşme özellikleri

ve boyutlarını yüksek oranda koruyabilmeleri diğer bazı önemli özelliklerindedir [1]. Bununla birlikte, metal-matrisli kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki özellikleri, cam lifi ile takviye edilmiş plastiklerle karşılaştırıldığında daha üstündür. Birçok sıcaklık değerinde, metal matrislerin mukavemet ve elastiklik modülü, reçine esaslı matrislerden daha yüksektir. Bunun yanı sıra metal matrisli kompozitlerin gevrek kırılma ihtimali daha düşüktür [2].

Kompozit malzemelerdeki hızlı gelişmelere bağlı olarak, kompozit plakaların birbirine veya diğer malzemelerden yapılmış plakalara bağlantıları için yeni ve çeşitli bağlantı şekilleri ve geometrileri üzerinde de yoğun olarak çalışılmaktadır. Çünkü bu bağlantıların en az hasar meydana getirecek şekilde tasarımı oldukça önemlidir. Sağladığı çeşitli avantajlar nedeniyle, kompozit plakaların özellikle pim bağlantıları ile birleştirilmesi oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Bu yüzden, kompozit pimli bağlantılar birçok yerde uygulama sahası bulmuştur [4].

Bunun yanında, yapıştırma tekniği de sağladığı çeşitli avantajlarından dolayı uygulamada yaygın olarak tercih edilen bir birleştirme yöntemidir. Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin gelişmesi İkinci Dünya Savaşı boyunca olmuştur [5]. Fakat yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin kaynak, perçinleme ve diğer mekanik bağlantıların tümünün yerini alacağı düşünülemez. Bu alışılmış birleştirme tekniklerinin her biri farklı şartlar altında kendine özgü üstünlüklere sahiptir. Yapıştırma bağlantılarda, büyük bir termik ve mekanik zorlama olmadan bağlantının yapılabilmesi, diğer bağlama yöntemlerine göre oldukça önemli bir avantajdır. Dolayısıyla, birleştirilecek parçaların özellikleri değişmez. Kısacası, çok farklı malzemelerin birbirine yapıştırıcı ile bağlanabilmesi mühendislik uygulamalarında oldukça önemlidir [6].

Şen ve Pakdil [7] yaptıkları çalışmada, pim bağlantılı kompozit plakalarda tabaka dizilişlerinin hasar davranışına etkisini incelemiştir. Bağlantı geometrisinin ve tabaka dizilişinin hasar oluşumu üzerine etkilerini gözlemlemek için hasar analizi deneysel olarak yapılmıştır. Şen ve ark. [8] tarafından yapılan deneysel çalışmada, pim ve civata bağlantısı yapılmış bağlantılarda hasar analizi incelenmiştir. Çalışmada, tek pim bağlantısı kullanılmış ve pim ile delik arasında bir boşluk bırakılarak, boşluğun hasar davranışı etkisini gözlemlemek amacıyla testler yapılmıştır. Apalak ve ark.[9] yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış karma bağlantılarda sıcaklık dağılımı ve sıcaklık tesiriyle meydana gelen ısı gerilmeleri incelemiştir. Sıcaklık

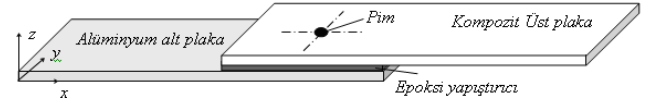
dağılımını, geliştirdikleri Fortran programını kullanarak, ısı gerilmeleri ise ANSYS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, alüminyum, titanyum ve çelik ince levhaların ısı gerilme analizini elasto-plastik olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, zamana bağlı çözüm gerçekleştirmişlerdir. Şen ve ark. [10], çift örtü kullanılarak yapıştırılmış metal levhalarda sıcaklık etkisiyle oluşan ısı gerilmeleri incelemiştir. Çözümde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Aldaş ve ark. [11], epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış ince metal levhalara uygulanmış çift bindirme bağlantısında meydana gelen ısı gerilmeleri incelemiştir. Isıl yük olarak, üniform sıcaklık uygulanmıştır. Analiz, sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şen ve ark. [12], yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirme bağlantılarının ısı gerilme analizini yapmışlardır. Bağlantıya, üniform sıcaklık uygulanmasından kaynaklanan ısı gerilme dağılımlarını hesaplamak için sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılmıştır. Isıl gerilme dağılımları, alüminyum ve çelik gibi farklı ince metal levhalar için analiz edilmiştir. Şen [13], üzerinde çok sayıda delik kompozit bulunan kompozit bir diskin ısı analizini gerçekleştirmiştir. Analiz elastik-plastik olarak gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Çalışmada artık gerilmeler de incelenmiştir. Şen [14] yapmış olduğu bir diğer çalışmada, üniform sıcaklık yükü altındaki kompozit plaklarda meydana gelen ısı gerilme dağılımını sonlu elemanlar metodunu kullanarak hesaplamıştır. Termoplastik kompozit plakanın orta kısmına, delik modellenmiş ve ısı gerilmeler üzerine, delik etkisi incelenmiştir. Yapılan önceki çalışmalar incelendiğinde, genel olarak sadece ya pim bağlantısı ya da yapıştırıcı bağlantısı çalışılmıştır. Analiz edilen bağlantılar değişik parametrelere sahip olmakla birlikte, bağlantılara etki ettirilen yüklerinde ya çekme yükü ya da sadece ısı yükü olduğu anlaşılmaktadır. Şen ve Aldaş tarafından yapılan önceki bir çalışmada [15], sıcaklık değişiminin yapıştırmalı ve pimli alüminyum plakalardaki gerilmeler üzerine etkisi sonlu elemanlar metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmada, karma bağlantı uygulanmış, sadece alüminyum malzemeden üretilmiş ince plakaların farklı üniform sıcaklıklar altındaki ısı gerilmeler hesaplanmıştır.

Bu çalışmada, kompozit ve alüminyum plaka ile oluşturulan karma bağlantı yapılmıştır. Pimli ve yapıştırıcı bağlantıdan karma bağlantı meydana getirilmiştir. Bağlantıya hem çekme yükü hem de ısı yükü aynı anda uygulanmıştır. Çalışmanın amacı, artan sıcaklık değişiminin, karma bağlantıda oluşan gerilmeler üzerindeki etkisinin incelenmesidir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısından meydana getirilmiş karma bağlantı Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Bağlantısı gerçekleştirilen alt plakanın alüminyum, üst plakanın metal matrisli kompozit olduğu varsayılmıştır. Tek bindirme bağlantısı yapılan alüminyum levhaların her birinin kalınlığı 2 mm, uzunlukları 100 mm ve genişlikleri 25 mm olacak şekilde modellenmiştir. Pim deliğinin çapı 5 mm olarak

seçilmiştir. Pim deliği ve diğer boyut parametreleri oluşturulurken, daha önceki tek pimli bağlantılar için yapılan deneysel çalışmalarda en iyi oran olarak önerilen $E/D=W/D=5$ tek pimli bağlantı oranı dikkate alınmıştır [7-8]. Bahsedilen, E/D oran, levhanın serbest ucunun pim delik çapına oranı ve W/D oranı ise levha genişliğinin pim delik çapına oranıdır. Ayrıca, yapıştırıcı tabakasının kalınlığı 0.2 mm, uzunluğu 50 mm ve genişliği 25 mm olacak şekilde modelleme yapılmıştır.



Şekil 1. Karma bağlantının şematik görünümü

Alüminyum alt plakanın ve kompozit üst plakanın malzeme özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmiştir (9-16). Kompozit malzeme, daha önceki bir çalışmada, alüminyum matris içerisine çelik tellerin ısı ve basınç altında birleştirilmesi ile elde edilmiştir [15]. Yapıştırıcı olarak mekanik özellikleri Tablo 1'de verilen epoksi yapıştırıcı tercih edilmiştir.

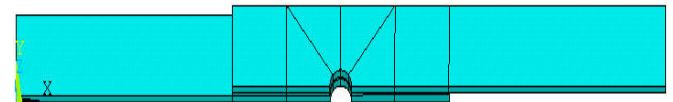
Tablo 1. Alüminyum ve epoksinin mekanik özellikleri [9]

	E(MPa)	ν	$\alpha_1(1/^\circ\text{C})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
Alüminyum	66000	0.33	23.6	2707
Epoksi	3300	0.30	43.3	1264

Tablo 2. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri [16]

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	α_1 ($1/^\circ\text{C}$)	α_2 ($1/^\circ\text{C}$)
85000	74000	30000	0,29	18.510^{-6}	2110^{-6}

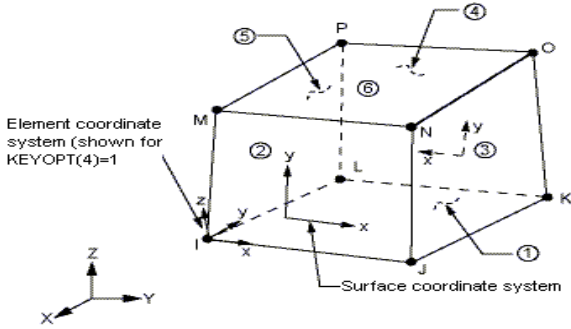
Karma bağlantının y-eksenine göre simetrik olmasından dolayı modelin tamamı yerine yarım model oluşturulması tercih edilmiştir (Şekil 2). Problemin çözümü için son yıllarda birçok mühendislik probleminin çözümünde sıklıkla tercih edilen sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodunun tercih edilmesi nedeniyle, karma bağlantının modellenmesi ve çözüm sürecinde ANSYS [17] sonlu elemanlar yazılımından yararlanılmıştır.



Şekil 2. Yarım model

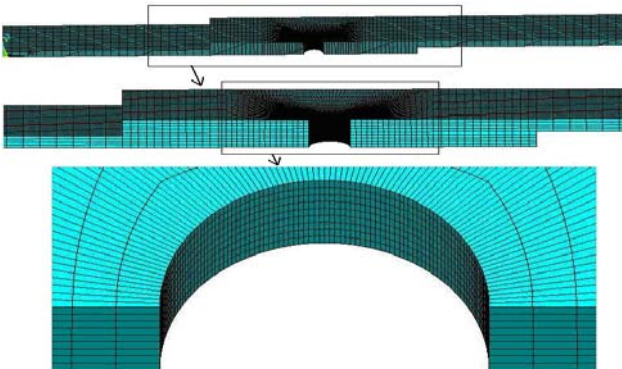
Sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması esnasında eleman tipi olarak, Şekil 3'te gösterilen SOLID 45 kullanılmıştır [16]. ANSYS programı içerisinde farklı modellemelere ve istenen sonuçlara uygun olarak farklı eleman tipleri geliştirilmiştir. Araştırmacılar, çalışmalarını

için yeterli ve uygun olan eleman tiplerini rahatlıkla kullanabilmektedir. Örneğin, ANSYS içerisinde üç boyutlu kompozit modeller için SOLID 46 eleman tipi de olmasına rağmen, bu çalışmada benzer olan SOLID 45 eleman tipi kullanılmıştır. Bunun nedeni bu çalışmada kullanılan kompozit malzemenin tabakalı bir yapı olmamasıdır. Sonlu elemanlara bölme işleminden sonra elde edilen, karma bağlantının sonlu elemanlar ağ yapısı Şekil 4'te verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, oluşturulan yarım modelin tamamında ve delik çevresinde düzgün dörtgen elemanlardan meydana gelen bir sonlu eleman ağ yapısı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlarla çözüm yönteminde düzgün bir sonlu eleman ağ yapısı elde edilmesi, analiz sonrasında sonuçlarında iyi bir şekilde elde edilmesine imkan vermektedir. Fakat tasarlanan bağlantıda pim bağlantısı gibi herhangi bir amaçla oluşturulmak zorunda kalınan ve dolayısıyla var olan bir delik bu tür düzgün bir ağ yapısının oluşturulmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Fakat bu çalışmada, istenen iyi ve düzgün ağ yapısı, delik çevresi de dahil olmak üzere, bağlantının tamamında oluşturulmuştur. Sonlu elemanlara bölme işleminden sonra üç boyutlu model üzerinde, 34350 eleman ve 42290 düğüm noktası oluşturulmuştur.



Şekil 3. ANSYS SOLID 45 eleman tipi [17]

Üç boyutlu modelleme ve sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması işlemlerinden sonra, bağlantıya çeşitli sınır şartları uygulanmıştır. Öncelikle, alt alüminyum plakanın serbest ucundan model tutularak ankastre hale getirilmiştir. Daha sonra, üst kompozit levhanın serbest ucundan ise -15 MPa bir basınç uygulanmıştır. Bu işlem ile serbest uçtan bir çekme yükü bağlantıya etki ettirilmiştir.



Şekil 4. Karma bağlantının sonlu elemanlar ağ yapısı

Delik iç kısmına, pim sınır şartı uygulanmıştır. Çalışmanın temel amaçlarından biri de karma bağlantıya

uygulanan farklı üniform sıcaklıkların gerilmeler üzerine etkisinin incelenmesidir.

Bu amaçla bağlantı üzerine sırasıyla 42.5, 52.5, 62.5 ve 72.5 °C üniform sıcaklıklar uygulanmıştır. Sonuç olarak, üç boyutlu olarak modellenen karma bağlantı üzerine aynı anda hem çekme yükü hem de ısıl yüklemeye gerçekleştirilmiştir.

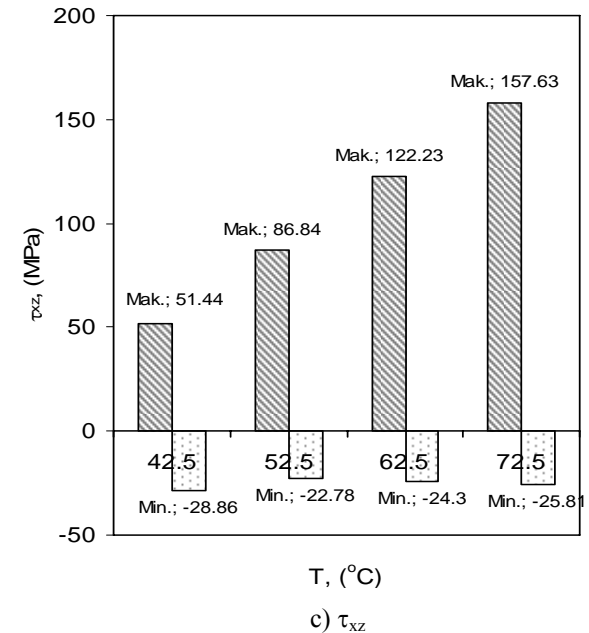
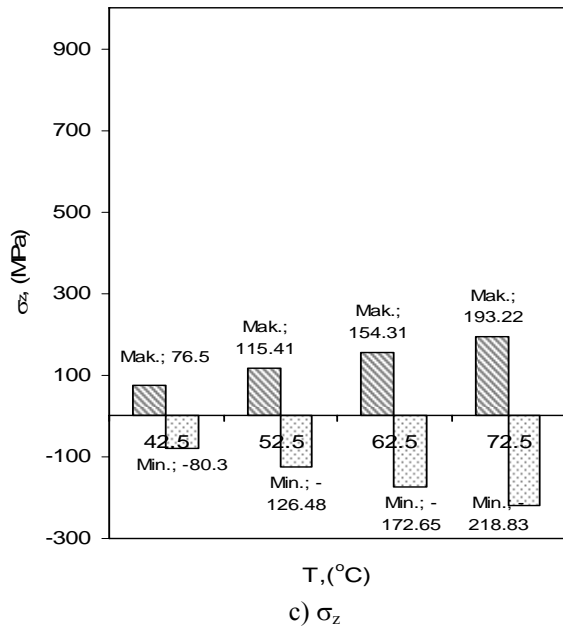
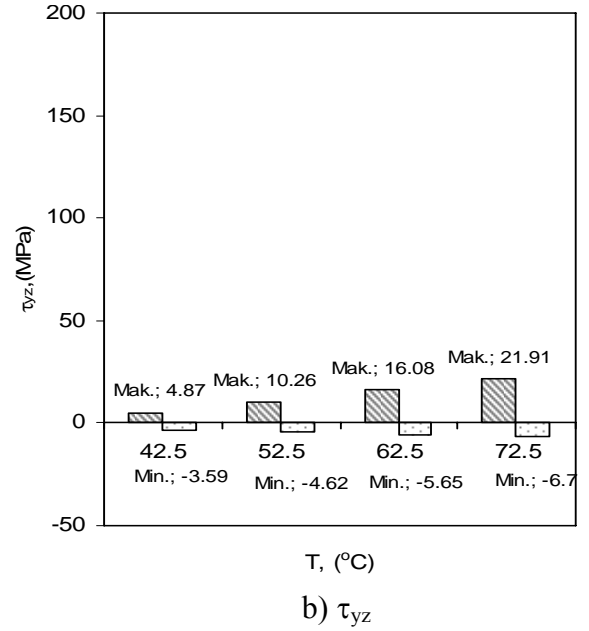
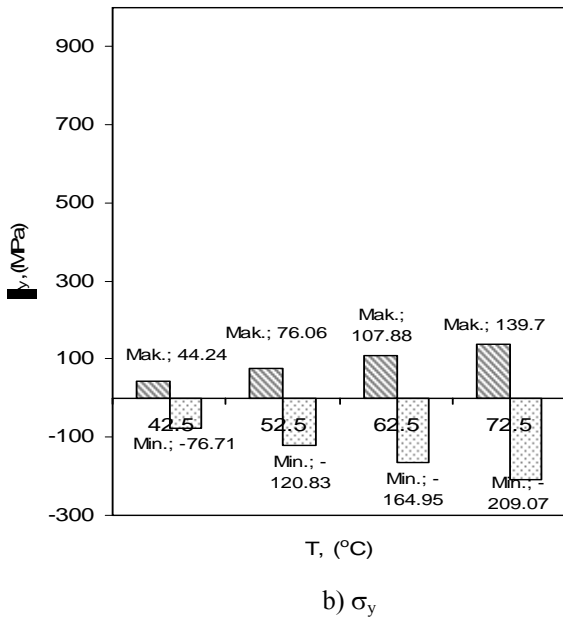
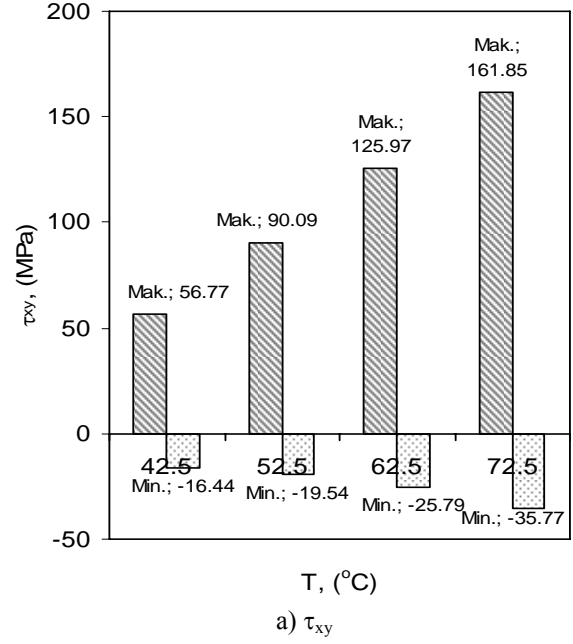
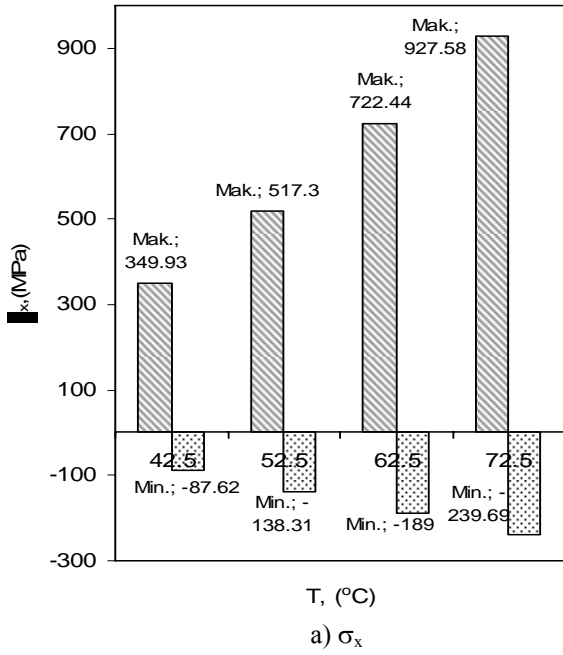
Çalışmanın daha önceki çalışmalardan önemli bir farkı da iki farklı yüklemenin üç boyutlu modele aynı anda yapılmış olmasıdır.

3. BULGULAR

Grafiklerde her üç doğrultuda (x, y, z) elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Farklı üniform sıcaklık için elde edilen çekme ve basma formundaki normal gerilmelerin maksimum değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi x-yönünde meydana gelen σ_x normal gerilmelerinin, y ve z-yönlerinde meydana gelen σ_y ve σ_z normal gerilmelerinden daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, karma bağlantıya x-yönünde bir çekme kuvvetinin uygulanması ve dolayısıyla bağlantının bu yönde diğer yönler göre daha fazla zorlanmasıdır. Hesaplanan normal gerilmelerinin değerlerinin uygulanan üniform sıcaklık artışına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Bu nedenle, en düşük normal gerilmeler 42.5 °C için hesaplanırken, en yüksek gerilmeler 72.5 °C sıcaklık uygulaması için hesaplanmıştır. x-yönünde hesaplanan çekme formundaki normal gerilmelerin basma formundaki normal gerilmelerden çok daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Hatta çekme gerilmeleri basma gerilmelerinin üç katından bile fazla olarak meydana gelmiştir. Uygulanan her bir farklı üniform sıcaklık için hesaplanan kayma gerilmelerinin çekme ve basma formundaki maksimum değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi τ_{xy} kayma gerilme değerlerinin diğerlerinden daha büyük olduğu anlaşılmıştır.

τ_{yz} gerilmeleri, diğer kayma gerilmelerinden çok küçük değerlerde hesaplanmıştır. τ_{xz} kayma gerilmeleri, τ_{xy} kayma gerilmelerinden küçük olmakla birlikte değerlerinin τ_{xy} kayma gerilmelerine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Normal gerilmelerde olduğu gibi kayma gerilmelerinde de çekme kayma gerilmelerinin değerleri, basma kayma gerilmelerinden daha büyük değerlerdedir. Benzer şekilde kayma gerilmeleri de sıcaklık artışına bağlı olarak artmıştır. Dolayısıyla en yüksek sıcaklık uygulandığında (72.5 °C) kayma gerilmelerinin değerleri en yüksek olarak hesaplanmıştır. En büyük olarak hesaplanan kayma gerilmesi, $\tau_{xy}=161.85$ MPa değerinde ve 72.5 °C üniform sıcaklık uygulandığında elde edilmiştir.

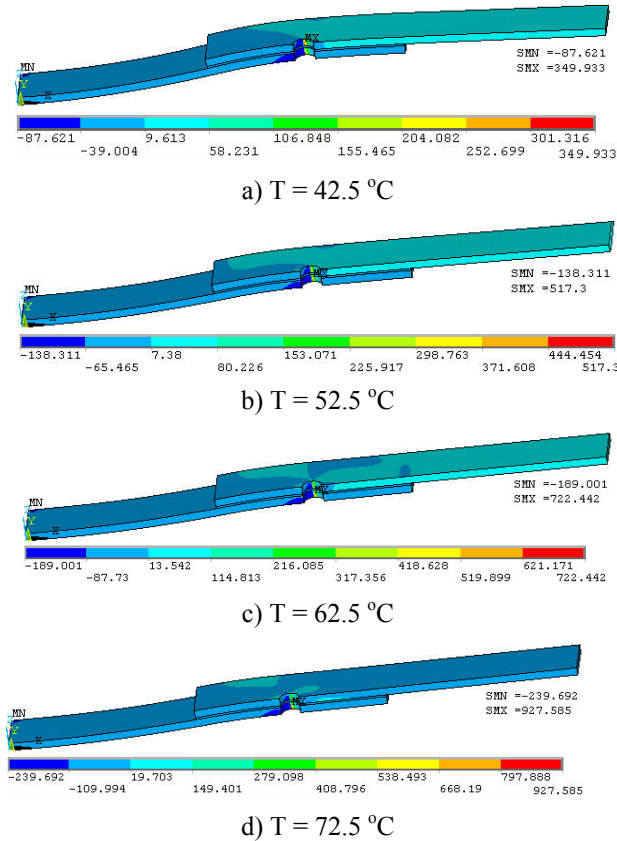
Bu çalışmada, model üzerinde x-yönünde elde edilen gerilmelerin dağılımı kontur şeklinde Şekil 7'de gösterilmiştir. Modelde meydana gelen deformasyon ve delik çevresinde meydana gelen gerilme yığılmaları açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5. Normal gerilmelerin maksimum değerleri

Şekil 6. Kayma gerilmelerinin maksimum değerleri

Yapıştırıcı tabakası üzerindeki delik çevresinde bir gerilme yığılması olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklık miktarındaki artışa bağlı olarak gerilmelerde de artışın olduğu görülmektedir. Yapıştırıcı tabakası üzerinde hesaplanan en yüksek von Mises gerilme değeri 26.057 MPa değerinde ve 72.5 °C uniform sıcaklık altında meydana gelmiştir. Şekil 7 ve 8 incelendiğinde delik çevresinde meydana gelen gerilmelerinin yatak hasarı oluşmasına neden olabilecek formda meydana geldiği anlaşılmıştır. Yapıştırıcı tabakası üzerindeki delik çevresinde bir gerilme yığılması olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklık miktarındaki artışa bağlı olarak gerilmelerde de artışın olduğu görülmektedir.



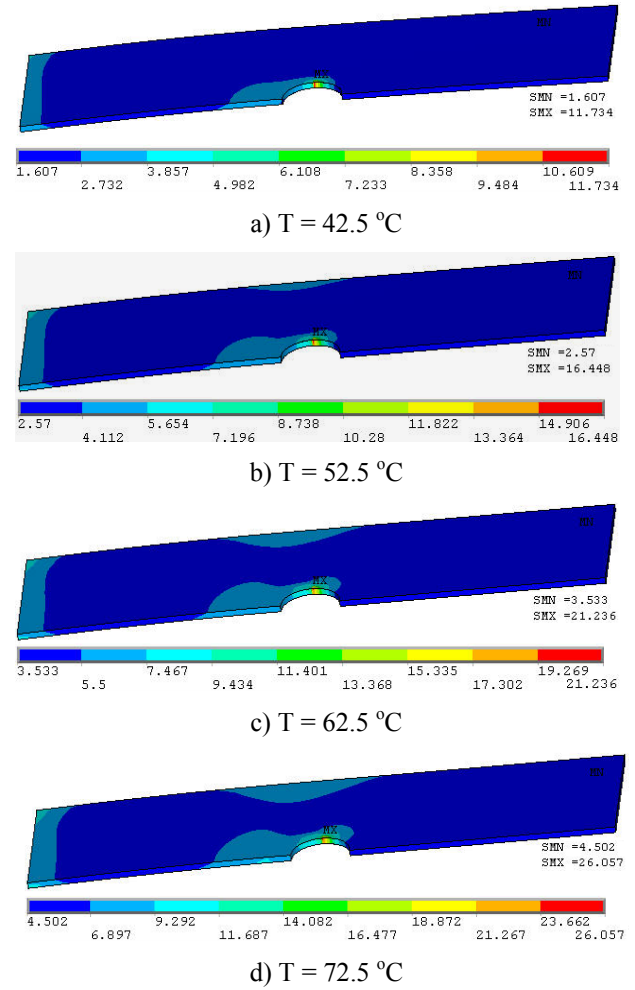
Şekil 7. Model üzerinde x-yönünde gerilmelerin dağılımı

Yapıştırıcı tabakası üzerinde hesaplanan en yüksek von Mises gerilme değeri 26.057 MPa değerinde ve 72.5 °C uniform sıcaklık altında meydana gelmiştir. Şekil 7 ve 8 incelendiğinde delik çevresinde meydana gelen gerilmelerinin yatak hasarı oluşmasına neden olabilecek formda meydana geldiği anlaşılmıştır. Bu sonuç daha önceki yapılan deneysel çalışmalarla uyum sağlamaktadır [7-8]. Modelleme aşamasında E/D ve W/D oranlarının da daha önceki deneysel çalışmalara uygun olarak seçildiği açıklanmıştır. Bu noktada, elde edilen sonuçların deneysel çalışmalar ile uyumlu olduğu rahatlıkla söylenebilir.

4. SONUÇLAR

Alüminyum ve kompozit plakalar için yapılan karma bağlantının analiz sonuçlarına göre bazı önemli sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplanan gerilmelerin değerlerinin, üniform sıcaklık artışına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Delik çevresinde gerilme yığılması olduğu görülmüştür. Çekme gerilmeleri, basma gerilmelerinden daha büyük olarak hesaplanmıştır. Elde edilen gerilme

dağılımlarının, daha önceki deneysel çalışmalarla uyum sağladığı görülmüştür.



Şekil 8. Yapıştırıcı üzerinde von Mises gerilme dağılımı

5. KAYNAKLAR

- [1] Tong, L., Mouritz, A.P. and Bannister, M. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, Elsevier, UK, 2002.
- [2] Ataberk, N., Uyaner, M., Avcı, A., Koçak, S., Elasto-plastic Stress Analysis of Aluminum Metal-Matrix Composite Plate Under In-Plane Loading, J. Reinforced Plastics and Composites, 23, 563-570, 2004.
- [3] Jones, R. M., Mechanics of Composite Materials (2th ed.). US: Taylor & Francis, 1999.
- [4] Şen, F., Sayman, O., Kompozit levhalarda hasar analizi, Bileşim Yayıncılık, MakineTek Dergisi, 9, 180-182, 2010.
- [5] Apalak, Z.G., Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş T-Tipi Bağlantıların Sonlu Eleman Metodu Kullanılarak Analiz ve Tasarımı. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri, 1995.
- [6] Palancıoğlu, H., Şen, F., Aldaş, K., Yapıştırma Bağlantıları ve Uygulama Usulleri, MakineTek Dergisi, Bileşim Yayıncılık, İstanbul, 1, 38-42, 2008.
- [7] Şen, F., Pakdil, M., The effect of stacking sequences on failure behavior of pinned composite plates, Journal of Polytechnic, 11/2, 147-151, 2008.
- [8] Şen, F., Pakdil, M., Sayman O. and Benli, S. Experimental failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload, Materials & Design, 29, 1159-1169, 2008.
- [9] Apalak, M.K., Aldaş, K. and Şen, F., Thermal non-linear stresses in an adhesively bonded and laser-spot welded single-lap joint during laser-metal interaction, Journal of Materials Processing Technology, 142, 1-19, 2003.
- [10] Şen, F., Aldaş, K., Palancıoğlu, H., Çift örtü kullanılarak yapıştırılmış metal levhalarda ısıl gerilme analizi, Fırat Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20, 649-659, 2008.

- [11] Aldaş, K., Palancıoğlu, H., Sen, F. Thermal stresses in adhesively bonded double lap joints by FEM, *Technological Researches*, 6/4, 55-64, 2009.
- [12] Şen, F., Aldaş, K., Palancıoğlu, H. Thermal stress analysis of adhesively bonded single lap joints using FEM. *Technological Researches*, 2, 31-40, 2008.
- [13] Şen, F., Elastic-Plastic Thermal Stresses in a Composite Disc with Multiple Holes, *Advanced Composite Letters*, 16/3, 95-103, 2007.
- [14] Şen, F. An investigation of thermal elasto-plastic stress analysis of laminated thermoplastic composites with a circular hole under uniform temperature loading, *Science and Engineering of Composite Materials*, 13, 213–224, 2006.
- [15] Şen, F., Aldaş, K., Sıcaklık değişiminin yapıştırmalı ve pimli alüminyum plakalardaki gerilmeler üzerine etkisi, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 3/4, 323-329, 2010.
- [16] Sayman, O., Elastic-Plastic and Residual Stresses in Symmetric Aluminum Metal-Matrix Laminated Plates Under a Linear Thermal Loading, *Journal of Thermal Stresses*, 26, 391-406, 2003.
- [17] ANSYS, Release 10.0 Documentation, Swanson Analysis System Inc., Houston, PA, USA.