

Karma bağlantılı kompozit plaklarda farklı sıcaklıklar etkisiyle oluşan gerilmelerin analizi

Kemal ALDAŞ, Faruk ŞEN*

Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray

Özet

Bu çalışmada, karma bağlantı yapılarak birleştirilmiş iki kompozit plakada uygulanan farklı uniform sıcaklıklar etkisiyle meydana gelen gerilmeler analiz edilmiştir. Karma bağlantı, pim ve yapıştırıcının birlikte kullanılması ile meydana getirilmiştir. Analizde sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılmıştır. Modelleme üç boyutlu olarak yapılmıştır. Modelleme ve çözümde, sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS programından yararlanılmıştır. Oluşturulan modele hem çekme yükü hem de uniform sıcaklık yükü aynı anda uygulanmıştır. Sıcaklığın gerilmeler üzerine etkisini gözlemlemek için çekme yükü sabit tutulmuş fakat 50, 70, 90 ve 110 °C'lik uniform sıcaklıklar uygulanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre gerilmeler delik çevresinde yoğunlaşmıştır. Dolayısıyla, karma bağlantı üzerinde başlayacak bir hasarın delik çevresinden başlayacağı anlaşılmıştır. Gerilmelerin değeri, uniform sıcaklık artışıdaki miktara bağlı olarak artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Karma bağlantı, Gerilme analizi, SEM, ANSYS, Kompozit.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Faruk ŞEN. Faruk.sen@deu.edu.tr; Tel: (382) 215 09 53 (2359)

Analysis of stresses created effect of different temperature in hybrid bonded composite plates

Extended abstract

Mechanical properties of glass-fiber composite materials make them attractive for structural applications where high strength-to-weight and stiffness-to-weight ratios are required. Bolts, pins or rivets have been used extensively in these applications for transferring load between the structural components (Wu and Hahn, 1997). Among the different techniques for joining structural members, mechanical fastening through a pin is a common choice owing to low cost, simplicity, and facilitation of disassembly for repair (Scalea, Cappello and Cloud, 1999). Contrary to many metallic structural members, for which the strength of the joints is mainly governed by the shear and tensile strengths of the pins, composite joints present specific failure modes because of their heterogeneity and anisotropy (Pierron, Cerister and Grediac, 2000). Adhesive bonding technology is commonly used these days in almost all the industries fields of the world and this is mainly because of its high strength-weight ratio, low cost and high efficiency (You et al., 2007). Nonetheless, the design of safe and cost effective bonded joints is a main challenge. It forces on the engineer to have a good understanding of the effect of material and geometric parameters on the joint's strength (Derewonko et al., in press). In fact, the adhesive joints experience not only mechanical loads but also thermal loads. Because the adhesive joints consist of materials with different mechanical and thermal properties, the thermal strains in the joint members might cause serious stresses (Apalak and Gunes, 2002).

According to literature survey, many researchers have studied either adhesively bonded or pinned single lap joint, double lap joint etc. But, the analysis of hybrid joints designed using both adhesively bonded and pinned single lap joints under both thermal loads and tensile loads has not been analyzed up till now, according to authors' knowledge.

Therefore, in this study stresses created different uniform temperatures effect in two composite plates bonded together with hybrid joint were analyzed. The hybrid joint was created using both pin and adhesive with together. In analysis, the finite element method (FEM) was used. Modeling and solutions were done as three dimensional FEM.

During both modeling and solution processes, it was utilized from ANSYS software which is a perfect finite element code. It is known that, the hole is needed if the pin, bolt, rivet etc. are used in the structure for mechanical joint. Therefore, mesh structure is very important around the hole zone for FEM analysis because of stress concentrations. Nonetheless, the generation of mapped mesh is very difficult if the model has hole. However, in this study, the mapped mesh was provided by the author.

Both tensile and uniform temperature loads were applied on created model with together. To observe the effect of temperatures on stresses tensile load is applied as single value when selected constant uniform temperature values were performed as 50, 70, 90 ve 110 °C.

According to obtained analysis results, it was shown that thermal stresses were concentrated around the pin hole. Therefore, it is understood that any failure may be start from pin hole zone firstly.

The magnitudes of stresses were increased by increasing uniform temperature, because the differences of mechanical properties between adhesive and composite adherents cause this result. The thermal expansion coefficient is very important in this increasing, particularly.

Keywords: Hybrid joint, Stress analysis, FEM, ANSYS, Composite.

Giriş

Metal-matriksli kompozitlerin, yüksek sıcaklıklardaki üstün özellikleri, cam lifi ile takviye edilmiş plastiklerle karşılaştırıldığında ön plana çıkmaktadır. Birçok sıcaklık değerinde, metal matrislerin mukavemet ve elastiklik modülü, reçine esaslı matrislerden daha yüksektir. Ayrıca, metal matriksli kompozitlerin gevrek kırılma ihtimali daha düşüktür (Ataberk vd., 2004). Bununla birlikte, alüminyum ve çelik gibi yaygın olarak kullanılan geleneksel metal ve metal alaşımları ile karşılaştırıldığında, kompozit malzemelerin, hafiflik, yorulmaya karşı uzun ömür, korozyon dayanımı gibi üstün özellikleri nedeniyle önemi artmaktadır (Tong vd. 2002). 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 (Jones,1999, Şen ve Sayman, 2010).

Apalak ve diğerleri (2003), yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş ve ardından nokta kaynağı yapılarak oluşturulmuş karma bağlantılarda, önce sıcaklık dağılımını ve daha sonra sıcaklık etkisiyle oluşan ısıl gerilmeleri analiz etmişlerdir. Sıcaklık dağılımını, geliştirdikleri Fortran programını kullanarak; ısıl gerilmeleri ise ANSYS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak oluşturdukları alt programlar yardımıyla gerçekleştirmişlerdir. Alüminyum, titanyum ve çelik ince levhalar analiz edilmiş ve ısıl gerilme analizi elasto-plastik olarak gerçekleştirilmiştir. Şen ve diğerleri (2008), yapıştırıcı ile birleştirilmiş ince metal plakaların tek bindirme bağlantılarının ısıl gerilmelerini incelemişlerdir. Yapıştırılmış bağlantıya uniform sıcaklık uygulanmasından kaynaklanan ısıl gerilme dağılımlarını sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanarak bulmuşlardır.

Çalışma iki boyutlu olarak yapılmış ve ısıl gerilme dağılımları, alüminyum ve çelik gibi farklı ince metal levhalar için bulunmuştur. Aldaş ve diğerleri (2009), epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış çift bindirme bağlantısında meydana gelen ısıl gerilmeleri incelemişlerdir. Isıl yük olarak, uniform sıcaklık uygulanmıştır. Analiz, sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Şen ve diğerleri (2008), diğer önemli yapıştırıcı ile birleştirilme usullerinden biri olan, çift örtü kullanarak yapıştırılmış ince metal levhalarda sıcaklık etkisiyle oluşan ısıl gerilmeleri incelemişlerdir. Problemin modellenmesinde ve çözümünde, sonlu elemanlar metodunu kullanılmışlardır.

Şen (2006), tabakalı kompozit plaklarla ilgili yapmış olduğu çalışmada, sıcaklık yükü nedeniyle plakalarda oluşan ısıl gerilmeleri incelemiştir. Çalışmada, sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Elastoplastik olarak yapılan çalışmada, termoplastik kompozit plakanın orta kısmına bir delik oluşturulmuş ve ısıl gerilmeler üzerine, delik etkisi incelenmiştir. Şen (2007), üzerinde çok sayıda delik bulunan kompozit bir diskin ısıl analizini gerçekleştirmiştir. Elastik-plastik olarak yapılan analizde, sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca artık gerilmeler de hesaplanmıştır.

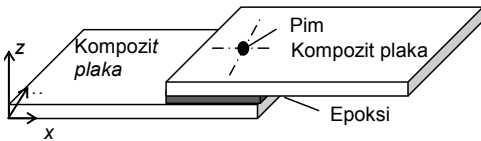
Silva ve Adams (2007), karma bir yapıştırıcı bağlantısını incelemişlerdir. Deneysel titanyum/titanyum ve titanyum/kompozit çift bindirme bağlantıları için yapılmıştır. Yapılan çalışmaların neticesinde; benzer olmayan levhaların yapıştırıcı ile birleştirilmesinde iki yapıştırıcının karışımından elde edilen yapıştırıcının performansının, yüksek sıcaklıkta kullanılan bir yapıştırıcının tek başına kullanılmasından daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Pakdil ve Şen (2007) tek pim bağlantısı kullanarak yaptıkları çalışmada, cam lifleri ile takviye edilmiş epoksi matrise sahip kompozit levhalarda oluşan hasar davranışını incelemişlerdir. Deneysel olarak yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, tek pim bağlantılı kompozit plaklarda, yatak mukavemetleri ve hasar tipleri hem

geometrik parametrelerden hem de tabaka dizilişlerinden kesinlikle etkilenmektedir. Şen ve diğerleri (2008) tarafından yapılan deneysel çalışmada, pim ve civata bağlantısı yapılmış bağlantılarda hasar analizi yapılmıştır. Çalışmada tek pim bağlantısı kullanılmış ve pim ile delik arasında bir boşluk bırakılarak, özellikle bu boşluğun hasar davranışını gözlemlemek amacıyla testler yapılmıştır. Özetlemek gerekirse, daha önce çalışmaların, genel olarak sadece ya pim bağlantısı ya da yapıştırıcı bağlantısı şeklinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, analizlerde bağlantılar değişik parametrelere sahip olmakla birlikte, bağlantılara etki ettirilen yüklerin de tekil olarak ya çekme yükü ya da sadece ısıl yük olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, kompozit plaklara hem pim bağlantısı hem de yapıştırıcı bağlantısı içeren, karma bir bağlantı modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu karma bağlantıya hem çekme yükü hem de ısıl yük aynı anda uygulanmıştır. Ayrıca, farklı ısıl yükler uygulamak suretiyle sıcaklık değişiminin gerilmeler üzerine etkisi incelenmiştir.

Problemin tanımlanması

Pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısı içeren karma bağlantı Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi iki adet kompozit plaka karma bağlantı ile birleştirilmiştir.



Şekil 1. Karma bağlantı

Tek bindirme bağlantısı yapılan alt ve üst kompozit levhaların ve üst metal plakaların her birinin kalınlığı 2 mm, plaka uzunlukları 100 mm ve plaka genişlikleri 25 mm olacak şekilde modellenmiştir. Pim deliğinin çapı ise 5 mm olarak seçilmiştir.

Modellenen kompozit plaka alüminyum matrisle sahip, çelik tellerle takviye edilmiş bir yapıdadır. Bu kompozit malzeme özellikleri Sayman (2003) tarafından üretilmiştir ve Tablo 1'de verilmiştir. Daha detaylı bilgi literatürden temin edilebilir. Epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir (Apalak vd., 2003).

Tablo 1. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri (Sayman, 2003)

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	α_1 ($1/^\circ\text{C}$) $\times 10^{-6}$	α_2 ($1/^\circ\text{C}$) $\times 10^{-6}$
85000	74000	30000	0,29	18.5	21

Karma bağlantı probleminin çözümünde, son yıllarda birçok mühendislik probleminin çözümünde, endüstride ve akademik çalışmalarda yaygın olarak tercih edilen sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bu nedenle, modelleme ve çözümde ANSYS (ANSYS, Release 10.0 Documentation) sonlu elemanlar programından yararlanılmıştır. Bilindiği üzere, ANSYS yazılımı, birçok farklı problemin çözümünde son yıllarda oldukça tercih edilmektedir. Bunun başlıca nedenleri, gayet güzel ve tam sonuçlar elde edilmesini sağlaması, gerek modellemede gerekse sonuçların değerlendirilmesi aşamasında sağladığı eşsiz avantajlarıdır.

Tablo 2. Epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri (Apalak vd., 2003)

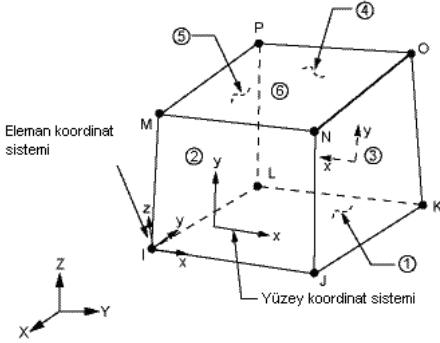
ρ (kg/m^3)	E (GPa)	ν	α ($\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)
1264	3.3	0.30	43.3

Karma bağlantının ilk olarak katı modeli oluşturulmuştur. Bağlantının y-eksenine göre simetrik olmasından dolayı yarım modelleme yapılmıştır. Bununla, eleman ve düğüm sayısının önemli oranda azaltılması, çözüm süresinin kısaltılması ve daha küçük çözüm dosyalarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen üç boyutlu yarım katı model Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Yarımların birleştirilmesiyle oluşturulan bir kompozit plak modelinin kesit görünümü.

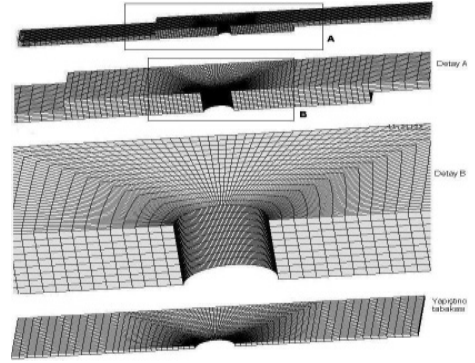
Sonlu elemanlarla çözüm işleminde modelin oluşturulmasından sonra en önemli işlem, modelin sonlu elemanlar ağı yapısının oluşturulmasıdır. Bu aşamada, çözülecek probleme ve sınır şartlarına uygun olarak ANSYS çok sayıda eleman tipi kullanıma sunmaktadır. Bu çalışmada, sonlu elemanlar ağı yapısının oluşturulması amacıyla, eleman tipi olarak Şekil 3'te gösterilen SOLID 45 kullanılmıştır (ANSYS, Release 10.0 Documentation). Modelin, sonlu elemanlara bölme işleminden sonra elde edilen sonlu elemanlar ağı yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, oluşturulan yarımların tamamında ve delik çevresinde düzgün dörtgen elemanlardan meydana gelen bir sonlu eleman ağı yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 3. ANSYS SOLID 45 eleman tipi

Bilindiği gibi sonlu elemanlarla çözüm yönteminde düzgün bir sonlu eleman ağı yapısı elde edilmesi, elde edilecek sonuçlarında doğru bir şekilde elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, eğer bir model üzerinde herhangi bir amaçla oluşturulmak zorunda kalınan ve dolayısıyla var olan bir deliğin varlığı, bu tür düzgün bir ağı yapısının

oluşturulmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Oluşturulan bağlantı üzerinde pim deliği olmasına rağmen; olması istenen iyi ve düzgün ağı yapısı, delik çevresi de dahil olmak üzere bağlantının tamamında oluşturulmuştur. Şekil 4'te bağlantının tamamında ve delik çevresinde elemanların oldukça düzgün oluşturulduğu açıkça görülmektedir. Bu şekilde, yapıştırıcı tabakasının sonlu elemanlara ayrılmış görüntüsüne de yer verilmiştir. Bu çizim ile de yapıştırıcı tabakası üzerinde de oldukça düzgün bir ağı yapısı meydana getirildiği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, model üzerinde 34350 eleman ve 42290 düğüm noktası elde edilmiştir.



Şekil 4. Karma bağlantının sonlu elemanlar ağı yapısı

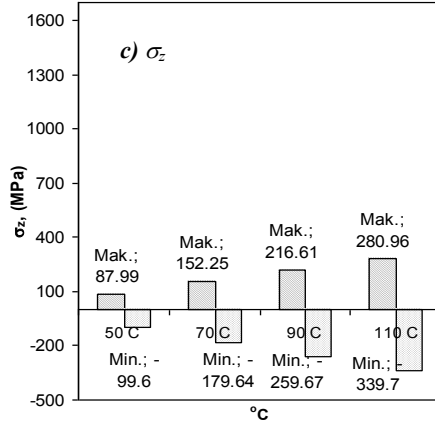
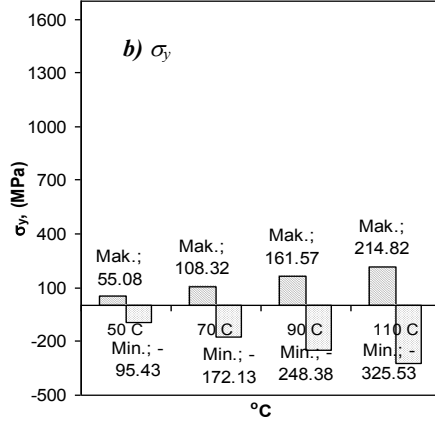
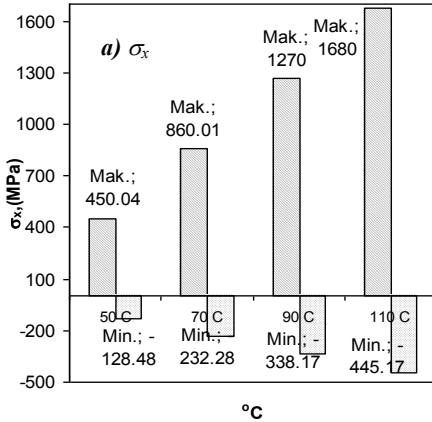
Karma bağlantının, üç boyutlu modellenmesi ve sonlu elemanlar ağı yapısının oluşturulmasından sonra, bağlantıya çeşitli sınır şartları uygulanmıştır. İlk olarak, alt kompozit plakanın serbest uçundan, model tutularak ankastre hale getirilmiştir. Daha sonra, üst kompozit levhanın serbest uçundan -15 MPa bir basınç uygulanmıştır.

Böylece plakanın bu uçundan bağlantıya bir çekme yükü uygulanması sağlanmıştır. Yarımlardan dolayı simetri sınır şartı uygulanmıştır. Son olarak, deliğin iç kısmına pim sınır şartı uygulanmıştır. Daha önce bahsedildiği üzere, çalışmanın arzulanan

amaçlarından biri de karma bağlantıya uygulanan farklı uniform sıcaklıkların gerilmelerin dağılımı ve değerleri üzerine etkisinin incelenmesidir. Bu nedenle, karma bağlantı üzerine sırasıyla 50, 70, 90 ve 110 °C uniform sıcaklıklar uygulanmıştır. Sonuç olarak, üç boyutlu olarak modellenen karma bağlantı üzerine aynı anda hem çekme yükü hem ısıl yüklemeye aynı anda gerçekleştirilmiştir. Daha önceki çalışmalardan önemli bir fark da, iki farklı yüklemenin üç boyutlu modele aynı anda uygulanmış olmasıdır.

Sonuçlar ve tartışma

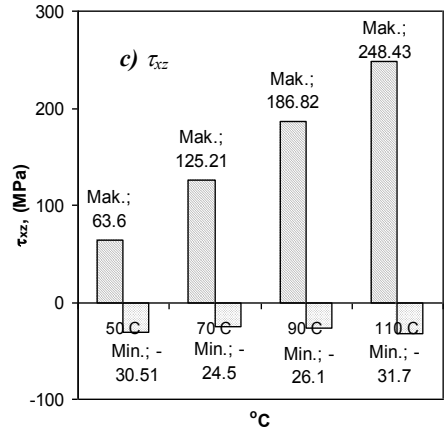
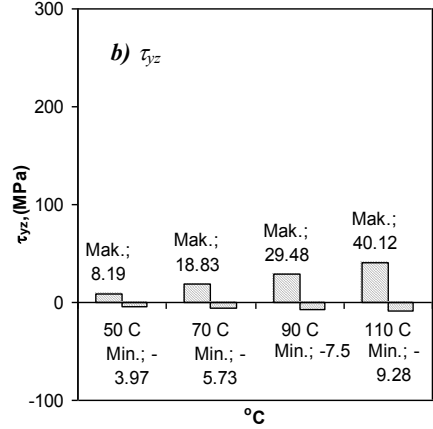
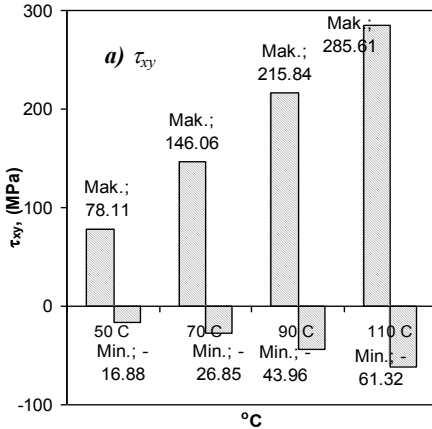
Karma bağlantıya uygulanan her biri uniform sıcaklık neticesinde elde edilen normal gerilmelerin maksimum değerleri her bir doğrultu için Şekil 5'te gösterilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi x doğrultusunda meydana gelen (σ_x) hem çekme hem bası gerilmelerinin, diğer doğrultularda meydana gelen gerilmelerden (σ_y ve σ_z) daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, bağlantıya uygulanan çekme gerilmesinin x doğrultusunda etki ettirilmesidir.



Şekil 5. Normal gerilmelerin maksimum değerleri

Her bir sıcaklık değerinde x doğrultusu için hesaplanan çekme gerilmelerinin basma gerilmelerinden çok daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte y ve z doğrultularında hesaplanan basma gerilmeleri çekme gerilmelerinden daha yüksek değerlerdedir. Tüm doğrultular göz önüne alındığında, en yüksek basma ve çekme gerilmeleri 110 °C uniform sıcaklık uygulandığında meydana gelirken, en düşük gerilmeler 50 °C sıcaklık uygulandığında hesaplanmıştır.

Gerilmelerin değerlerinin, artan sıcaklık miktarına bağlı olarak arttığı söylenebilir. En yüksek normal çekme gerilmesi değeri 1680 MPa ve en yüksek basma gerilmesi değeri -445 MPa olarak x doğrultusunda (σ_x) ve 110 °C uniform sıcaklık uygulandığı durumda hesaplanmıştır (Şekil 5-a). Her bir uniform sıcaklık değerine bağlı olarak hesaplanan kayma gerilmelerinin (τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{xz}) maksimum değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi τ_{xy} kayma gerilmelerini hem çekme hem de basma formundaki değerleri τ_{yz} ve τ_{xz} kayma gerilmelerinden daha büyük değerlerdedir. En düşük kayma gerilmeleri τ_{yz} olarak hesaplanmıştır. Normal gerilmelerde olduğu gibi kayma gerilmelerinin de değerlerinin uygulanan sıcaklık miktarındaki artışa bağlı olarak arttığı açıkça görülmektedir. Bundan dolayı, en düşük değerli kayma gerilmeleri 50 °C sıcaklık için hesaplanırken en yüksek değerli kayma gerilmeleri 110 °C uniform sıcaklığın uygulandığı durum için hesaplanmıştır. Tüm elde edilen maksimum kayma gerilmeleri karşılaştırıldığında en yüksek değerli çekme formundaki kayma gerilmesi



Şekil 6. Kayma gerilmelerinin maksimum değerleri

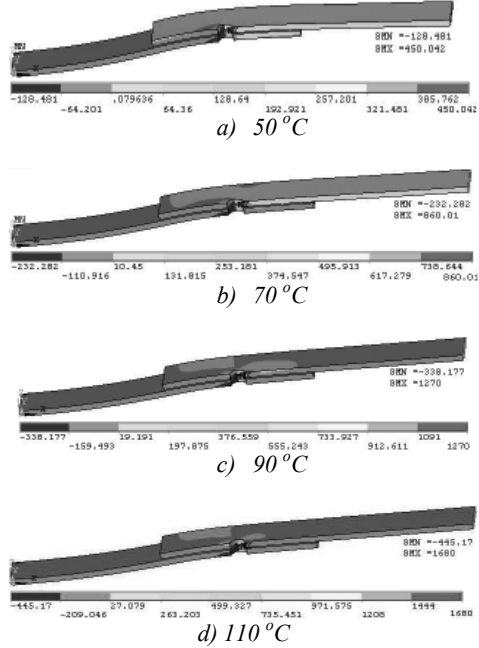
τ_{xy} =285 MPa ve en büyük değerli basma formundaki kayma gerilmesi τ_{xy} =-61 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6-a).

Bununla birlikte en düşük değerli çekme ve basma formundaki kayma gerilmelerin değerleri sırasıyla τ_{yz} =8 MPa ve τ_{yz} =-3 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6-b). Daha önce de ANSYS sonlu elemanlar programının, çözüm sonrasında sonuçların yorumlanması aşamasında da önemli kolaylıklar sağladığı söylenmiştir.

Her ne kadar Şekil 5 ve Şekil 6'da normal ve kayma gerilmelerinin hesaplanan maksimum değerleri verilmiş olsa da, bu şekillerden bu maksimum gerilmelerin karma bağlantı üzerinde nerede oluştuğu ve gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler anlaşılamamaktadır.

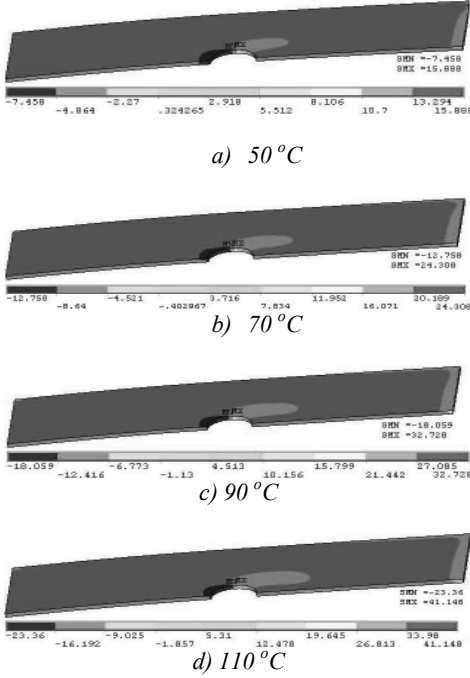
Bununla birlikte; yapılan analiz neticesinde kritik olan bu bölgelerin tespit edilebilmesi, gerilme yığılması neticesinde oluşabilecek herhangi bir hasarın, bağlantının neresinden başlayabileceği konusunda bir fikir verecektir. Kısacası ANSYS programının sağladığı gerilme dağılımlarının eş gerilme eğrileri ile gösterimi avantajı nedeniyle, Şekil 7'de σ_x normal gerilmelerinin tüm bağlantı üzerindeki dağılımı çizilmiştir. En yüksek gerilmeler x doğrultusunda meydana geldiğinden, örnek olarak sadece σ_x normal gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 7'de karma bağlantıda meydana gelen elastik deformasyon açıkça görülmektedir. Ayrıca, gerilmelerin değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak artışı değerlendirilebilmektedir. En önemlisi, maksimum normal gerilmelerin delik çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Delik çevresinde oluşan basma ve çekme gerilmesi dağılımlarının daha önce yapılan deneysel çalışmalara (Pakdil ve Şen, 2007; Şen vd., 2008) uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Bu nümerik çalışmadan belirlenen gerilme yığılmalarının, bahsedilen deneysel çalışmalarda gözlemlenen yatak hasarı ve çekme hasarını aynı bölgelerde meydana getirebileceği anlaşılmaktadır. Yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantılarda, özellikle yapıştırıcı tabakası üzerinde meydana gelen gerilmelerin ve dağılımlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Şekil 7'de σ_x normal gerilmelerinin tüm model üzerindeki dağılımı çizilmiş olmakla birlikte, bu şekilden yapıştırıcı tabakası üzerindeki gerilmelerin değerleri ve dağılımları konusunda herhangi bir fikir elde edilememektedir. Dolayısıyla, yapıştırıcı tabakasının değerlendirilebilmesi için gerekli olan yapıştırıcı tabakası üzerindeki σ_x normal gerilmelerinin dağılımı Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu şekle göre yapıştırıcı tabakası üzerinde meydana gelen basma ve çekme gerilmeleri sıcaklığa bağlı olarak artmaktadır. Bundan

dolayı yapıştırıcı tabakası üzerinde, x doğrultusunda hesaplanan en yüksek çekme ve basma gerilmelerinin değeri 41 ve -23 MPa olarak 110 °C uniform sıcaklık uygulandığında hesaplanmıştır.



Şekil 7. σ_x normal gerilmelerinin tüm bağlantı üzerindeki dağılımı

Şekil 7 ve Şekil 8 karşılaştırıldığında, kompozit plakalar üzerinde meydana gelen gerilmelerin, epoksi yapıştırıcı üzerinde meydana gelen gerilmelerden çok daha büyük değerlerde olduğu anlaşılmıştır. Fakat gerilme yığılmasının benzer şekilde delik çevresinde olduğu görülmüştür. Ayrıca, pimin baskı yaptığı yüzeyde benzer şekilde basma ve hemen yan yüzeyde ise çekme gerilmeleri oluşmuştur. Yapıştırıcı tabakası üzerinde genel olarak basma gerilmeleri meydana gelmiştir. Bunun nedeni, kompozit plakaların ve epoksi yapıştırıcının farklı ısıl genleşme katsayılarıdır (Tablo 1 ve 2).



Şekil 8. Yapıştırıcı tabakası üzerindeki σ_x normal gerilmelerinin dağılımı

Kısaca açıklamak gerekirse, uniform sıcaklık etki ettirildiğinde, epoksi yapıştırıcı daha fazla genişleme göstermek istemesine rağmen, ısıl genişleme katsayıları daha düşük olan kompozit plakalar daha az genişlebildiklerinden, yapıştırıcı tabakasının genişlemesini engellemektedir. Bunun neticesinde de, yapıştırıcı tabakasının üzerinde genel olarak basma gerilmeleri meydana gelmektedir. Burada karıştırılmaması gereken durum ise, delik çevresinde meydana gelen yüksek değerlerdeki basma ve çekme gerilmeleridir. Yüksek değerlerdeki bu gerilmeler ise pim sınır şartından kaynaklanmaktadır. Çünkü x doğrultusunda çekme etkisinde olan yapıştırıcı tabakasının bu doğrultuda hareketine pim tarafından izin verilmemektedir. Dolayısıyla hareketi sınırlanan yapıştırıcı tabakasının delik çevresinde yüksek gerilmeler oluşmaktadır.

Kaynaklar

- Aldaş, K., Palancıoğlu, H. ve Şen, F., (2009), Thermal stresses in adhesively bonded double lap joints by FEM, *Technological Researches*, 6/4, 55-64.
- ANSYS, Release 10.0 Documentation, Swanson Analysis System Inc., Houston, PA, USA.
- Apalak, M.K. ve Gunes, R., (2002), On non-linear thermal stresses in an adhesively bonded single lap joint, *Computers and Structures*, 80: 85-98.
- Apalak, M.K., Aldaş, K., ve Şen, F., (2003), 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.
- Ataber, N., Uyaner, M., Avcı, A. ve Koçak, S., (2004) Elasto-plastic Stress Analysis of Aluminum Metal-Matrix Composite Plate Under In-Plane Loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23, 563-570.
- Derewonko, A., Godzimirski, J., Kosciuzenko, K., Niezgoda, T. ve Kiczko, A., Strength assessment of adhesive-bonded joints, *Computational Materials Science*, In Press.
- Jones, R. M., (1999), *Mechanics of Composite Materials (2th ed.)*. US: Taylor & Francis.
- Pakdil, M. ve Şen, F., (2007), An experimental study of glass-epoxy laminated composite pin-joints, *Technological Researches*, 3, 13-19.
- Pierron, F., Cerisier, F. ve Grediac, M. (2000), A numerical and experimental study of woven composite pin-joints, *Journal of Composite Materials*, 34, 1028-1054.
- Sayman, O., (2003), Elastic-Plastic and Residual Stresses in Symmetric Aluminum Metal-Matrix Laminated Plates under a Linear Thermal Loading, *Journal of Thermal Stresses*, 26, 391-406.
- Scalea, F.L.D., Cappello, F. ve Cloud, G.L. (1999), On the elastic behavior of a cross-ply composite pin-joint with clearance fits, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 12, 13-22.
- Silva, L.F.M., ve Adams, R.D., (2007), Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherents and dual adhesives, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27, 216-226.
- Şen, F., (2006), 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.

- Şen, F., (2007), Elastic-Plastic Thermal Stresses in a Composite Disc with Multiple Holes, *Advanced Composite Letters*, 16/3, 95-103.
- Şen, F., Aldaş, K. ve Palancıoğlu, H., (2008), Thermal stress analysis of adhesively bonded single lap joints using FEM, *Technological Researches*, 2, 31-40.
- Şen, F., Aldaş, K. ve Palancıoğlu, H.,(2008), Çift örtü kullanılarak yapıştırılmış metal levhalarda ısıl gerilme analizi, *Fırat Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, 649-659.
- Şen, F., Pakdil, M., Sayman O., ve Benli, S.,(2008), Experimental failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload, *Materials & Design*, 29, 1159-1169.
- Şen, F. ve Sayman, O., (2010), Kompozit levhalarda hasar analizi, *MakineTek Dergisi*, 9,180-182.
- Tong, L., Mouritz, A.P., ve Bannister, M.,(2002), 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, Elsevier, UK.
- Wu, T.J. ve Hahn, H.T., (1997), The bearing strength of e-glass/vinyl-ester composites fabricated by vartm, *Composites Science and Technology*, 58, 1519-1529.
- You, M., Yan, Z.M., Zheng, X.L., Yu, H.Z. ve Li, Z. (2007), A numerical and experimental study of gap length on adhesively bonded aluminum double-lap joint, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27: 696-702.