

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BALSA / PVC SANDVIÇ YAPILARDA KIRILMA
TOKLUĞU ETKİSİNİN NÜMERİK ÇALIŞMASI**

Alper TORTOÇ

Kasım, 2009

İZMİR

BALSA / PVC SANDVIÇ YAPILARDA KIRILMA TOKLUĞU ETKİSİNİN NÜMERİK ÇALIŞMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Bölümü, İmalat ve Konstrüksiyon Anabilim Dalı

Alper TORTOÇ

Kasım, 2009

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ALPER TORTOÇ, tarafından YRD. DOÇ. DR. ÇİÇEK ÖZES yönetiminde hazırlanan “BALSA/PVC SANDVIÇ YAPILARDA KIRILMA TOKLUĞU ETKİSİNİN NÜMERİK ÇALIŞMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. ÇİÇEK ÖZES

Danışman

Doç. Dr. M. EVREN TOYGAR

Jüri Üyesi

Doç. Dr. GÖKDENİZ NEŞER

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli zamanlarını bana ayırarak, bilgi, tecrübe ve değerli katkılarıyla beni yönlendiren sayın Yrd. Doç. Dr. Çiçek ÖZES' e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bilgi ve birikimlerimi kazandığım, yüksek lisans öğrenimim ve tez süreci boyunca desteklerini esirgemeyen Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesine ve tüm mesai arkadaşlarıma, son olarak tüm öğrenim hayatım boyunca hiçbir desteği esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Alper TORTOÇ

BALSA / PVC SANDVIÇ YAPILARDA KIRILMA TOKLUĞU ETKİSİNİN NÜMERİK ÇALIŞMASI

ÖZ

Kırılma toleransı bütün mühendislik malzemelerinde önemli, kompozit malzemelerde ise kritik bir önem arz etmektedir. Faaliyeti sırasında kompozit malzemelerde delaminasyon olarak bilinen tabakalar arası kusurlar oluşur. Bu hasarlar genellikle hatalı çekirdek malzeme üretimi sonucu oluşmaktadır. Bu tür hataların oluşması kritiktir, çünkü ileriki dönemlerde yapının tamamında katstropik hasarların oluşması ihtimali gündeme gelecektir.

Bu tezin amacı, PVC ve Balsa çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozit malzemelerin kırılma tokluğu değerlerini, sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak belirlemektir.

Amerika Kuzey Carolina enstitüsünde yapılan bir çalışmada, farklı yoğunluklardaki Balsa ve PCV çekirdek malzemesinden oluşan, cam vinilester ve carbon epoksi kabuk malzemeleri kullanılarak üretilen farklı numunelerin kırılma tokluğu değerlerini deneysel metotla elde ederek, sonuçlarını yayınlamıştır.

Bu tez kapsamında, Shivakumar tarafından deneysel metotla kırılma tokluğu değerleri elde edilen sandviç kompozit malzemelerin nümerik olarak ansys ile simülasyonu yapılmıştır. Modelleme deneyde de kullanılan geliştirilmiş Mode I CSB testi kullanılarak yapılmıştır.

Nümerik olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS yazılımı ile kırılma tokluğu değerleri belirlenmiş ve bulunan sonuçlar deneysel metotla bulunan sonuçlar ile karşılaştırılarak, veriler bir tablo halinde tezin sonunda okuyucuya sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: PVC, Balsa, Sandviç Kompozitler, Kırılma Tokluğu, Ansys

NUMERICAL STUDY ON THE FRACTURE TOUGHNESS OF BALSA / PVC SANDWICH COMPOSITE MATERIALS

ABSTRACT

Damage tolerance is important for all engineering materials but is critical for composite materials. In service composite materials develop interlaminar defects known as delaminations or debonds. These defects can usually be attributed to poor manufacturing or low velocity impact. Evaluation of such damage is critical because it can lead to catastrophic failure of the entire structure.

The aim of this study to investigate the fracture toughness teorically of PVC/Balsa composite materials with finite elemants method.

The study that approached at the USA North Carolina Institute, PVC and Balsa cores of various densities and has e-glass vinylester / carbon epoxy face sheets specimens fabricated for find the fracture toughness with the experimantel method and realese the results.

The scope of this thesis, the experimental methods that made by Shivakumar fracture toughness values obtained of the sandwich composite material as the numerical simulation with ANSYS has been performed. Modeling is also used in the experiment was carried out with modified Mode I CSB test.

Using the numerical finite element method with ANSYS software the fracture toughness values have been determined and the results found with the experimental methods are compared with the results made by ANSYS and the data with a table was presented to the reader at the end of the thesis.

Keywords : PVC, Balsa, Sandwich Composites, Fracture Toughness, Ansys

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....	1
1.1 Sandviç Malzemeler.....	1
1.2 Sandviç Malzemelerin Çeşitleri.....	3
1.2.1 Yüzey Çeşitleri.....	3
1.2.1.1 Cam Elyafarı.....	3
1.2.1.2 Aramid Elyafarı.....	4
1.2.1.3 Karbon Elyafarı.....	4
1.2.1.4 Diğer Plastik Elyafar.....	4
1.2.1.5 Boron Elyafarı.....	5
1.2.2 Reçineler.....	5
1.2.2.1 Polyesterler.....	5
1.2.2.2 Vinylesterler.....	5
1.2.2.3 Epoksiler.....	5
1.2.3 Çekirdek Çeşitleri.....	6
1.2.3.1 PVC Köpükler.....	6
1.2.3.2 Balsa.....	6
1.2.3.3 Tahta.....	6
1.2.3.4 Bal Peteği.....	6
1.3 Sandviç Malzemelerin Endüstride Kullanım Alanları.....	7
1.4 Sandviç Yapı Dizaynında Uygun Malzeme Seçimi	9
1.4.1 Yapısal Elemanlar.....	10
1.4.1.1 Dayanım.....	10

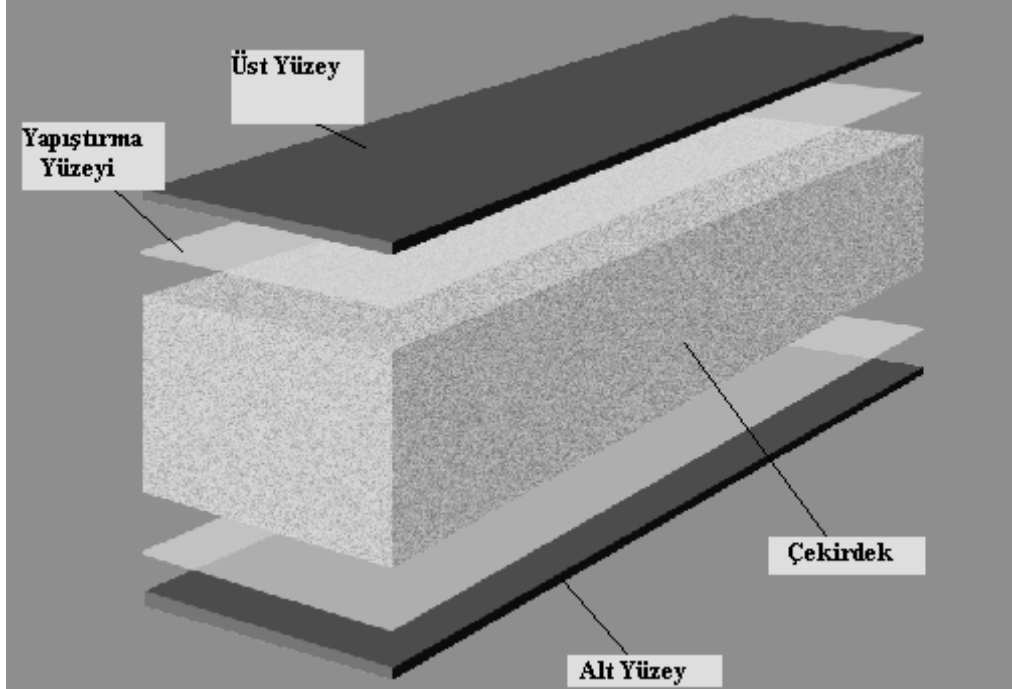
1.4.1.2 Rijitlik.....	10
1.4.1.3 Yapıştırma Bağlantı Performansı.....	10
1.4.1.4 Ekonomik Etmenler.....	10
1.4.2 Çevresel Etmenler.....	11
1.4.2.1 Sıcaklık.....	11
1.4.2.2 Yanıcılık Özellikleri.....	10
1.4.2.3 Yapıştırma Solüsyonları ve Buharlaşma.....	11
BÖLÜM İKİ – KIRILMA MEKANİĞİ.....	14
2.1 Kırılma Çeşitleri.....	14
2.2 Kırılma Mekanizmasının Teorik Esasları.....	15
2.2.1 Malzemelerin Teorik Kohezif Dayanımı.....	15
2.2.2 Griffith Enerji Yaklaşımı.....	17
2.2.2 “Elastik Enerji Boşalma Hızı” ve “Gerilme Şiddeti Çarpanı”.....	19
BÖLÜM ÜÇ – SANDVIÇ MALZEMELERDE KIRILMA TESTİ VE KIRILMA TOKLUĞUNUN ANSYS İLE NÜMERİK ANALİZİ.....	23
3.1 Sandviç Malzemelerde Kırılma.....	24
3.2 Malzeme.....	29
3.2 Sayısal Modelleme.....	30
3.3.1 Analiz Yönteminin Belirlenmesi.....	30
3.3.2 Birim Atama.....	30
3.3.3 Seçilen Malzeme Özelliklerinin Atanması.....	31
3.3.4 Numunenin Geometrisini Oluşturma.....	32
3.3.5 Kilit Noktalarının Oluşturulması.....	32
3.3.6 Çizgilerin Oluşturulması.....	33
3.3.7 Alanların Oluşturulması.....	34
3.3.8 Oluşturulan Alanlara Malzemelerin Atanması.....	35
3.3.9 Elemanlara Ayırma.....	36
3.3.10 Sınır Şartlarının Girilmesi.....	38

3.3.11 Yükün Uygulanması.....	39
3.3.12 Çözümün Başlatılması.....	39
3.3.13 Çatlak Yüzey Yolunun Tanımlanması.....	40
BÖLÜM DÖRT – SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI (ANSYS İLE)	42
4.1 Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları.....	42
4.1.1 PVC Sandviç Malzemesi Deneysel Sonuçları.....	42
4.1.2 PVC Sandviç Malzemesi Sayısal Analiz Sonuçları	43
4.1.2.1 H80/G Sandviç Kompozit Malzemesi.....	43
4.1.2.2 H100/G Sandviç Kompozit Malzemesi.....	44
4.1.2.3 H100/C Sandviç Kompozit Malzemesi.....	45
4.1.2.4 H130/G Sandviç Kompozit Malzemesi.....	46
4.1.2.5 H200/G Sandviç Kompozit Malzemesi.....	47
4.1.3 Balsa Sandviç Malzemesi Deneysel Analiz Sonuçları	48
4.1.4 Balsa Sandviç Malzemesi Sayısal Analiz Sonuçları	49
4.1.4.1 D57/G Sandviç Kompozit Malzemesi.....	49
4.1.4.2 D100/G Sandviç Kompozit Malzemesi.....	50
BÖLÜM BEŞ – SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	52
KAYNAKLAR.....	54

BÖLÜM BİR GİRİŞ

1.1 Sandviç Malzemeler

Sandviç malzemeler teknolojik kompozitlerin en önemli uygulamalarındandır. Kompozit malzeme birden fazla esaslı malzemenin belirli bir amaç için makroskobik anlamda birleşmesi ile oluşturulan yapıdır. Sandviç malzemelerde yine bu tanıma uymaktadır, farklı yapılar istenilen çeşitli mekanik özelliklerin sağlanması için birbirleri içinde çözünmeden birleştirilmektedir. Bu birleştirme işlemi adhesive bir katmanla sağlandığı için sandviç malzemeleri yapıştırma bağlantılı kompozitler kavramı içerisinde inceleyebilmekteyiz.



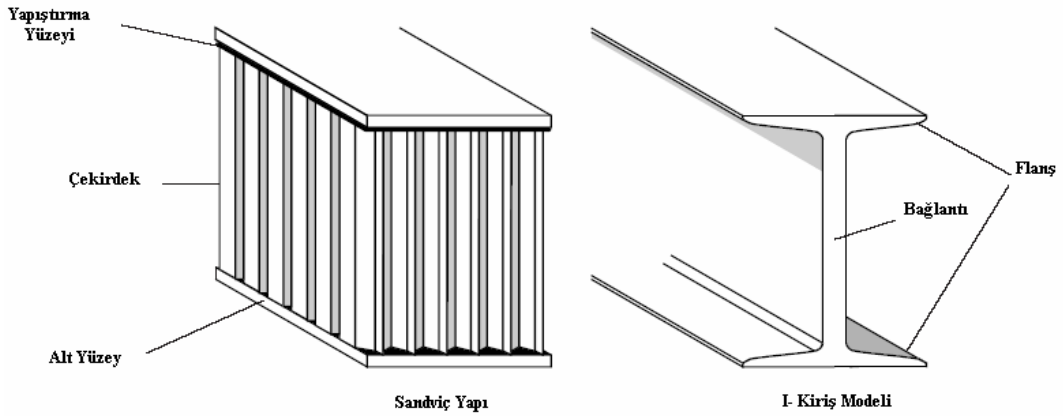
Şekil 1.1 Sandviç bir yapının temel elemanları (Diab tanıtım kataloğu)

Sandviç bir yapı temel olarak üç önemli elemana sahiptir. Şekil 1.1 de gösterildiği üzere en dışta alt ve üst yüzeyler, orta kısımda çekirdek olarak adlandırılan malzeme ve bağlantıyı sağlayan adhesive katmanlardan oluşmaktadır. Dış yüzeyler ince ancak mukavim bir yapıya sahipken, çekirdek malzemenin mukavemet değeri düşük ve hafiftir bu sayede mukavemeti yüksek bir eleman oluşturduğumuz gibi konstrüktif açıdan da düşük ağırlıklı bir yapı elde etmiş oluruz.

İçerideki çekirdek malzemenin temel görevi dış yüzeyler arasındaki mesafeyi muhafaza etmektir; çünkü bu mesafe sandviç malzemenin kesit alanına ait atalet momentinin ve de bükülme rijitliğinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Kısaca bir sandviç yapının sahip olması gereken özellikleri özetlemek gerekirse;

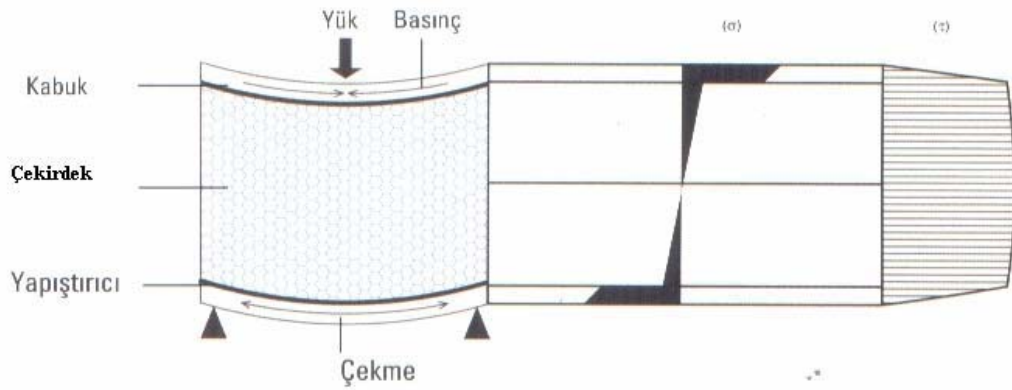
- Mukavemetli yüzeyler, düşük yoğunluklu çekirdek
- Rijit ve mukavim bir yapıştırma bağlantısıdır.

Önemle üzerinde durulması gereken diğer bir konuda sandviç malzemelerin sağladığı avantajlardan biri olan konstrüksiyon rijitliğidir. Bu konuyu açıklamak için öncelikle sandviç bir yapıyı şekil 1.2 deki gibi I-kiriş şeklinde modelleyelim.



Şekil 1.2 Sandviç yapının I-kirişi şeklinde modellenmesi ([www . aerodesign . ufsc . br/teoria /artigos /materialis /sandwich_design.pdf](http://www.aerodesign.ufsc.br/teoria/artigos/materialis/sandwich_design.pdf))

Burada sandviç panelin yüzeyi kirişin flanşlarını oluştururken çekirdek malzeme kirişin bağlantı bölümüne karşılık gelmektedir. Yük altında sandviç panelin yüzeyleri bükülmeye maruz kalırlar, yüzeylerden biri bası etkisinde iken diğeri çekiye zorlanacaktır (şekil1.3). Çekirdek malzeme kayma gerilmelerine direnç gösterirken aynı zamanda yüzeyler arasındaki mesafeyi koruyarak yapının rijitliğini artırır ve yüzeylere kesintisiz destek vererek düzenli rijit bir sandviç panel oluşturur. Çekirdek, yüzey ve yapıştırma bağlantısı uniform bir konstrüksiyon oluşturarak tek bir birim olarak davranırlar, böylece sandviç yapı yüksek burulma ve bükülme rijitliğine sahip olur.



Şekil 1.3 Sandviç yapıda oluşan gerilmeler (Mardav yalıtım ve inşaat firma kataloğu)

1.2 Sandviç Malzemelerin Çeşitleri

Sandviç konstrüksiyonları bir bütün olarak sınıflandırmaya tutmak mümkün değildir. Giriş bölümünde de bahsettiğimiz üzere sandviç yapı çekirdek ve yüzey olmak üzere iki temel elemandan oluşmakta idi; işte bu yüzden, sandviç bir yapıyı tam bir birim olarak sınıflandıramadığımız için bahsi geçen elemanları sınıflandırmaya tabi tutmak daha doğru olacaktır. Bu bölümde sandviç malzemelerde kullanılan yapılar özellikle denizcilik teknolojilerine yönelik bir sınıflandırılmaya tabi tutulacaktır, üçüncü bölümde deneylerimizde kullanılan malzemeler hakkında daha detaylı bilgi sunulacaktır.

1.2.1 Yüzey Çeşitleri

Yüzey çeşitleri olarak geleneksel malzemelerden olan çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum sandviç yapılarda çok fazla kullanılmazlar, bunlar yerine uygun koşullarda fiber veya cam takviyeli özel plastikleri kullanmak daha sağlıklıdır. Ana matriksin içerisinde özel mukavemet sağlanması istenen yerlerde bu amaçla kuvvetlendirici elyaflar kullanılır. Kuvvetlendirici elyafları şu şekilde sınıflandırabiliriz

1.2.1.1 Cam Elyafları

İlk kompozit panellerin yapımında kullanılan elyaf cam elyafı idi. Günümüzde çeşitli mukavemet özelliklerine sahip E, S ve R tipi cam elyafları üretilmekte ve

kullanılmaktadır. Cam elyafları reçineyi oldukça iyi özümseyebilen ve kullanımı nispeten kolay elyaflardır.

1.2.1.2 Aramid Elyafları

1960'lı yılların sonlarında DuPont de Nemours tarafından piyasaya sürülen Kevlar aramidlerin en bilinenidir. Son yıllarda çeşitli imalatçılar değişik ticari isimlerle piyasaya aramid elyaflar sürmüşlerdir. Aramid elyafların spesifik çekme mukavemeti çelikten yaklaşık 5 kat daha fazladır. (Yani 1 m boyunda 1 kg ağırlığında bir aramid halat, aynı boy ve ağırlıkta bir çelik halattan 5 kat daha fazla yük taşıyabilir. Bu üstün çekme mukavemeti özelliği aramidlerin balistik koruma amaçlarıyla da kullanılmasına imkan tanımıştır. Sürtünme ve aşınmaya da çok dayanıklı olan bu tip elyaflar basmada aynı performansa sahip değillerdir. Düşük yoğunlukları ve naylon temelli hidrofob yapıları kullanılan plastik matriksin aramid elyaflarını oldukça problemlili yapmaktadır. Aramidlerde, çok ileri reçine sistemlerinde bile, yapıdaki elyaf oranında %50'den iyisini elde etmek mümkün olamamaktadır. Ayrıca depolamada rutubet almaları bu ıslanmayı çok daha zor hale getirdiğinden yapısal bütünlük için bir tehlike oluşturur.

1.2.1.3 Karbon Elyafları

Mukavemet olarak cam ve aramid elyaflarından çok daha üstün özellikler taşırlar. Darbelerin yutulması için ve çok düşük ağırlıkla rijitlik sağlamak amacıyla kullanılırlar. Düşük uzama seviyeleri ve kırılganlıkları başlarda problem olmuşsa da günümüzdeki yüksek uzamalı karbon elyaflarının bulunmasıyla bu problemler ortadan kalkmıştır. Plastik matriks içerisinde ıslanabilme özellikleri oldukça iyidir.

1.2.1.4 Diğer plastik elyaflar

Kompozit yapılarda, az miktarda olsa da amaca uygun olarak naylon (Nomex) ve polyethylen elyaflar da kullanılmaktadır.

1.2.1.5 Boron elyaflar

Metal takviyeli metal (MRM) kompozitlerde boron elyaflar kullanılır. Gaz türbini kanatları gibi yüksek ısıda üstün mukavemet gerektiren yerlerde alüminyum oksit matriks içerisinde boron elyafları kullanılır.

1.2.2 Reçineler

1.2.2.1 Polyesterler

Reçine matrikslerin bilinen en eskilerinden ve en çok kullanılanıdır. Islak yatırma için uygundur. Sertleşmesi egzoterm kimyasal bir polimerizasyon sonucu olur. Bu arada solventi styrenmonomer açığa çıkar. Genelde ortoftalik ve izoftalik olarak iki tip polyester kullanılır. Polyesterin saf halde korozif elementlere ve suya mukavemeti çok iyi değildir. İmalatta çalışma süresi 30-40 dakika ile sınırlıdır. Bu süreyi uzatmak için çeşitli inhibitörler kullanılabilir. Ancak reaksiyonun egzoterm özelliği ve hızının güç kontrol edilebilmesi vakum altında imalatta çok büyük zorluklar getirir.

1.2.2.2 Vinylesterler

Polyesterlerden sonra bulunmuş bir matriks tipidir. Vinylester reçine ıslak yatırma için uygundur. Sertleşmesi egzoterm kimyasal bir polimerizasyon sonucu olur. Bu arada solventi styrenmonomer açığa çıkar. Vinylesterler su ve koroziflere karşı yüksek dirence sahiptirler. Polimerizasyon çeşitli ajanlar vasıtası ile 10-12 saate kadar uzatılabilir, bu sayede büyük yüzeylerde vakum tatbikatı yapılabilir.

1.2.2.3 Epoksiler

Epoksi reçineler de polyester ve vinylesterler gibi kimyasal polimerizasyon sonucu sertleşir. Ancak yapılarında açığa çıkan bir solvent yoktur. İmalatta çalışma süresi oda sıcaklığında 15 saat civarında olabilir. Epoksi reçineler karışımı yapılmış halde, soğuk ortamlarda (0 C altında) iki aya kadar muhafaza edilebilir.

1.2.3 Çekirdek Çeşitleri

1.2.3.1 PVC köpükler

PVC köpükler çok kullanılan bir çekirdek malzemesidir. Rutubet/su absorpsiyonu direnci iyidir. 40-300 kg/m³ yoğunluklarda bulunabilir.

Yapılarına göre:

- a) Çapraz bağlı PVC köpük: nispeten kırılğan
- b) Doğrusal PVC köpük: mukavemet özellikleri bozulmadan deformasyon kabul edebilen
- c) Yüksek ısı dirençli tipleri vardır.

1.2.3.2 Balsa

Hafif balsa ağacı, elyafları deriye dik gelecek şekilde (end grain) kesilerek çekirdek olarak kullanılır. Balsa çekirdekli sandviçler çok iyi bir rijitlik sağlarlar. Ancak, kırılmaları ani ve büyük boyutlu olur. Bunun yanı sıra, tabii kaynaklı malzemenin standardizasyonu imkansız denecek kadar zordur. Nispeten yüksek yoğunluğu ise, PVC köpük gibi geniş bir seçim şansı vermez.

1.2.3.3 Tahta

Balsa dışında tahta da, bilhassa iyi ezilme mukavemeti beklenen yerlerde çekirdek malzemesi olarak kullanılabilir. Genelde konturplak veya lamine şeklindedir. Standardizasyonu balsadan daha iyi kontrol edilebilir. Ağırlığı önemli bir dezavantajdır.

1.2.3.4 Bal peteği (Honeycomb)

Bal peteği metalik veya kompozit esaslı olabilir. Metalik bal peteği çok ince alüminyumdan, kompozit bal peteği ise kağıt veya naylon/aramid elyafları ve epoksi veya fenolik bir reçineden yapılırlar. Ateşe dayanıklı Nomex en popüler bal petek sistemlerinden biridir. Bal petek sistemleri dış derilere yapıştırılması oldukça zor, ama üstün mukavemet/ağırlık oranları sağlayan çekirdek yapıları oluştururlar. Ayrıca, eğimli yüzeyleri bal peteği ile kaplamak için özel bir teknik gerekmektedir. (Kaan N.Z.Onuk 2003)

1.3 Sandviç Malzemelerin Endüstride Kullanım Alanları

Sandviç malzemelerin en önemli özelliği bizimde üzerinde sıkça durduğumuz yüksek rijitlik kavramı idi; ancak özellikleri sadece bununla kısıtlamak yanlış olacaktır. Sanayide pek çok alanda ihtiyaca cevap verecek nitelikte sandviç konstrüksiyonları yaratılabilmektedir, hele ki dünyadaki kaynakların bir gün tükeneceğini göz önüne alacak olur isek bu yapıların önemi daha da artacaktır.

Hafiflik, düşük maliyet ve yüksek dayanım çağımızın en önemli rekabet unsurlarıdır, bu üç unsur sandviç yapılarda uygun yüzey, çekirdek ve de yapıştırıcı malzemesi seçmekle sağlanabilmektedir. Kompozit yapılar üzerindeki araştırma ve geliştirme faaliyetleri gelecek yıllarda sandviç konstrüksiyonların altın dönemlerini yaşayacağını ispatlar niteliktedir. Bu yapıları önemli kılan diğer özelliklerini sıralamak gerekirse;

- Yüksek bükülme dayanımı ve rijitlik
- Hafif malzemelerden oluşması
- Uygun malzeme kombinasyonu ile düşük maliyet eldesi
- Termal yalıtım özelliği
- Ses Yalıtım özelliği
- Radar dalgalarına yakalanmaması
- Uygun aerodinamik yüzeyler oluşturabilmesi
- Yüksek hızlara dayanım

(Huang 2003)

Bu özellikler ışığında bu yapıların kullanım alanlarından genel bir yaklaşım ile inceleyelim;

Havacılık ve uzay sanayiine yönelik uygulamalarda ise, hafiflik ve rijitlik özellikleri önem taşımakta ve genellikle uçağın taban kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi gibi parçalar sandviç konstrüksiyon tekniği ile üretilmektedir. Son yıllarda bir çok binek ve spor otomobillerin tavan, direk ve gövdesinin bir çok kısımlarında, spor aletlerinde (yarış bisikleti kaburgası) ve rüzgar türbini pervanesi gibi bir çok alet ve makine imalatında sandviç yapılar yaygın olarak

kullanılmaktadır. Sandviç yapılardaki kullanıma ilave olarak, petekli yapılar enerji sönümlenme, radyo dalgası kalkanı, uyduların güneş panelleri ve hava akımı doğrultucusu vb. olarak da yaygın bir kullanıma sahiptir. (Arslan ve Kaman, 2003)



Şekil 1.4 Hızlı bir feribotta sandviç yapının kullanıldığı yerler (2 ve 6 Gövde dış kısmı, 4. Asma tavanlar, 7. Kamara bölmeleri, 9. Hava kalkanı: Petek yapıli kompoziti

İki dış plaka ve içerisi izolasyon malzemesi ile dolu, sandviç görünümündeki bina yapı elemanları yıllardır kullanılmaktadır. İç dolgu izolasyon malzemesi olarak, cam yünü, mineral yün, polistren ve poliüretan gibi malzemeler; dış kaplama malzemesi olarak ise alüminyum, çelik, güçlendirilmiş plastik, güçlendirilmiş beton ve muhtelif ahşap kökenli malzemeler olmaktadır.(Commercial union sigorta risk yönetimi sunumu s.2)

Endüstriyel binalarda iki farklı tip panel kullanılmaktadır. Biri dış yüzeyler için, diğeri ise tavan ve bölmeler gibi iç hatlar içindir. Her iki tip panel de ısı kontrolünü sağlamakta ve yangın yükünü büyük ölçüde arttıran izolasyon dolgu maddesi içermektedirler. Ancak inşaat sektöründe çekirdek malzemesi daha ziyade dolgu

unsuru olarak kullanılmaktadır, bu nedenle bu alandaki panellere tam bir sandviç yapı düşüncesiyle yaklaşmamak da yarar vardır.

Sandviç konstrüksiyonların diğer bir kullanım alanı da tekne ve yat imalatındadır. Günümüzde kalıp ile tekne üretimi maliyetli bir yöntemdir, her dönemin modasına göre tekne ve yatlarda modeller değişmektedir. Her değişen yeni bir model için kalıp hazırlamak maliyet açısından çok büyük bir yük getirecektir, bu sektördeki veriler kalıpsız tekne imalatı yönteminde ileriye giden firmaların büyük kazançlar elde edeceğini göstermiştir. Kalıpsız imalatın en bilinen yolu da, tabii ki sandviç yapılardan geçmektedir. Sadece sivil denizcilik için değil askeri amaçlar için de bu yapılar tercih edilmektedir, hafiflik avantajı sağlanarak askeri tekne ve gemilere yeni silahlar eklenebilmektedir.

Bu proje kapsamında incelenecek tüm test numuneleri bütünüyle denizcilik endüstrisinde kullanılan malzemelerden yapılmıştır. Malzemelerimizin cinsleri ve deney metotları ikinci bölümde detaylı bir şekilde sunulacaktır.

1.4 Sandviç Yapı Dizaynında uygun malzeme seçimi

Sandviç bir yapının dizaynında belirli bir plan ve prosedür oluşturulması gerekir. Mukavemet, statik, mekanik ve malzeme bilimleri kombinasyonu ile oluşturulan sistematik bir yaklaşıma ihtiyaç duyulur. Yapının çalışma şartları göz önüne alınarak konstrüksiyondan beklenen verimin sağlanması hedef alınmalıdır. Tüm bunlar detaylı bir mühendislik araştırması ve yaklaşımı ile mümkün olacaktır. Her mühendislik uygulamasında olduğu gibi girdi ve çıktılar tanımlanmalı prosesler arasında geri beslemelerle optimum dizaynlar oluşturulmalıdır. İmkanlar dahilinde bilgisayar destekli mühendislik programlarıyla simülasyonlar yapılmalıdır. (www.aerodesign.ufsc.br/teoria/artigos/materiais/sandwich_design.pdf)

1.4.1 Yapısal Etmenler

1.4.1.1 Dayanım

Giriş bölümünde bahsettiğimiz üzere kompozit bir malzemede her bir eleman kendi mekanik özelliklerini koruyabilmekteydi , bu kuralı göz önüne alarak sandviç yapının çalışacağı yük koşullarını düşünerek düzgün çekirdek ve yüzey malzemesi kombinasyonu oluşturmalıyız.

1.4.1.2 Rijitlik

Sandviç malzemeler çok düşük ağırlıklarda yüksek rijitlik sağlamak için kullanılırlar. Pek çok çekirdek malzemesi düşük kayma modülüne sahiptir, ancak deplasman hesaplamalarında bükülmeden kaynaklanan çökmeye ilaveten kaymadan kaynaklanan çökmeyi de inceleyebilmeliyiz.

1.4.1.3 Yapıştırma Bağlantısı Performansı

Bir yüzeyden diğer yüzeye düzgün yük iletimi için yüzeyler kor malzemeye rijit bir şekilde yapıştırılmalıdır. Uygun yapıştırıcılar yüksek kayma modülüne sahiptirler. Depolama, tamirat veya kullanım sırasında hasara maruz kalabilecek hafif sandviç yapılarda kesinlikle düşük soyulma gerilmesine sahip yapıştırıcılar ile relativ olarak gevrek yapıştırıcılar kullanılmamalıdır.

1.4.1.4 Ekonomik Etmenler

Kompozit sandviç panellerden maliyet konusunda çok etkili sonuçlar alınabilmektedir. Ancak toplam maliyet hesaplamaları sırasında üretim maliyetleri yanında montaj, ilk kurulum ve de sandviç yapı destek sitemlerinin de masrafları hesaba katılmalıdır.

1.4.2 Çevresel Etmenler

1.4.2.1 Sıcaklık

Pek çok konstruktif sistemde olduğu üzere sandviç yapılarda da termal çevre önemli bir rol oynamaktadır. Genellikle sandviç yapılar oda sıcaklığı koşullarında etkin bir biçimde kullanılabilceği gibi pek çoğu da $-550C$ ila $1700C$ arasında istenilen performansı karşılayabilecek düzeydedir. İstenilen özellikler ve de

üretim koşulları doğrultusunda malzemenin kürlenme sıcaklıkları da incelenmelidir.

1.4.2.2 Yanıcılık özellikleri

Yapıştırma bağlantılı sandviç yapıları yanıcılık bakımından üçe ayırmaktayız. İlki yanıcı olmayan yapılar ki, ne yüzey malzemesi nede çekirdek malzemesi yanıcı değildir. Sistem bir bütün olarak yanmaya karşı dayanım gösterir. İkinci tip yarı yanıcılar; bu sistemlerde yapı aleve maruz kaldığı sürece yanar, alev ortadan kalkarsa malzemenin tutuşması söz konusu olmaz. Son olarak, üçüncü tip yapılar ise yanıcı olanlarıdır. Bu malzemelerde genellikle belirlenen koşullar altında alevin yayılma hızına göre bir sınıflandırılmaya tabi tutulabilirler.

1.4.2.3 Yapıştırma solüsyonları ve buharlaşma

Bir kısım yapıştırıcılar kürlenme sırasında bazı reçinelerle ve de metal olmayan çekirdeklerle reaksiyon oluşturarak dışarı solvent buharı verirler. Bu olay sandviç yapı üretiminde istenmez; çünkü hatırlanacağı üzere kompozit yapılarda bir araya gelen malzemeler ayrı ayrı mekanik özelliklerini korumak durumunda id; reaksiyonun oluşması yeni tip bir malzeme oluşumu ve sonuç olarak, farklı mekanik özellik oluşumu anlamına geleceğinden, üretimde bu hususa dikkat edilerek doğru yapıştırma sistemlerinin tercih edilmesi gerekmektedir.

Son olarak, yukarıda saydığımız tüm etmenlerin dikkatlice incelenerek uygun ve optimum malzeme kullanılmasına dikkat edilmelidir. Bu amaçla tablo 1.1 de hangi malzemelerle hangi mekanik özelliklerin en iyi şekilde sağlanabileceği gösterilmiştir.

Tablo1.1 Optimum malzeme seçimi ile mekanik özelliklerin eldesi

(www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursousead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materi_als.pdf)

	FİBER			REÇİNE					ÇEKİRDEK						
	E-CAM	KEVLAR	KARBON	POLYESTER	VINYLESTER	EPOKSI	PHENOLIC	TERMOPLASTİK	BALSA	ÇAPRAZ PVC	DOĞRUSAL YAPILI PVC	ALUMİNYUM BAL PETEĞİ	TERMOPLASTİK BALPETEĞİ	SENTETİK KÖPÜK	
Statik Çekme Dayanımı	☺	☺	☺	☹	☹	☺	☹	☹	☺	☺	☹	☹	☹	☹	
Statik Çeki Rijitliği	☹	☺	☺	☹	☹	☹	☹	☹	☺	☹	☹	☺	☹	☹	
Statik Basma Dayanımı	☺	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☺	☹	☺	☺	☹	☹	
Statik Basma Rijitliği	☹	☹	☺	☹	☹	☹	☹	☹	☺	☹	☹	☺	☹	☹	
Yorulma Dayanımı	☹	☺	☺	☹	☺	☺	☹	☺	☺	☹	☺	☹	☺	☹	
Hasar Dayanımı	☺	☺	☹	☹	☺	☺	☹	☺	☹	☺	☺	☹	☹	☹	
Su Geçirmezliği	☺	☹	☹	☹	☺	☺	☹	☺	☹	☺	☺	☹	☹	☹	
Yangın Dayanımı	☺	☹	☹	☹	☹	☹	☺	☹	☺	☹	☹	☺	☹	☹	
İşlenebilirlik	☺	☹	☹	☺	☹	☹	☹	☹	☺	☹	☹	☹	☹	☺	
Maliyet	☺	☹	☹	☺	☹	☹	☹	☺	☺	☹	☹	☹	☺	☺	
	☺	İyi Performans													
	☹	Kötü Performans													

Sandviç malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmakta hayatımızın pek çok önemli kesimine girmektedir. Gelecekte çok daha fazla alanda kullanılacak olan bu malzemeye güven ancak mühendislik kurallarına ve hesaplamalarına uyum ile sağlanabilecektir, bu yüzden ki sandviç malzemenin farklı yapıları arasındaki uyumlar çok önemlidir. Yukarıdaki tabloda sunulan ilişkiler sandviç dizaynının temeli olabilecek niteliktedir. Bu temel ilkelerin ihmal durumunda pek çok istenilmeyen sonuçla karşı karşıya kalabiliriz; hele ki bu yapıların denizcilik endüstrisinde kullanıldığını ve deniz ortamının sürekli değişkenlik arz ettiğini

düşünecek olursak, insan hayatını tehlikeye sokabilecek sonuçların doğabileceğini tahmin etmemiz zor olmaz.

Sandviç yapılar hakkında pek çok araştırmalar mevcuttur; örneğin, David R. Veazie ve diğerleri deniz ortamında PVC çekirdek malzemede oluşabilecek iç yüzeysel kırılma dayanımını incelemişlerdir, Sheng Chang, Dan Hong ve Fu-Pen Chiang çekirdek malzemesi yine köpük olan sandviç bir yapıda makro ve mikro deformasyonları incelemişlerdir; ileriki konularda yeri geldikçe diğer çalışmalardan da bahsedilecektir, ancak dikkat edileceği üzere konular daha ziyade yapının mekanik dayanımı ve hasar analizine doğru kaymaktadır. Bu nedenle, ülkemizde bu konu üzerindeki araştırmaların azlığını göz önüne alınarak, sandviç yapılar hakkında az araştırma yapılmış konulardan biri olan farklı ortamlarda kırılma tokluğunun nasıl etkileneceği konusu üzerinde çalışma yapılmasına karar verilmiştir. Özellikle, deniz suyunun kırılma tokluğu üzerine etkisinin araştırılmasının bu alanda yapılacak önemli çalışmalardan biri olabileceğine kanaat getirilmiştir. Bu nedendir ki, birinci bölümün beşinci konusu olarak sandviç yapılarda kırılma tokluğu ve mekaniği hakkında bilgiler sunulmuştur.

BÖLÜM İKİ

KIRILMA MEKANİĞİ

2.1 Kırılma Çeşitleri

Katı bir cismin gerilmeler altında iki veya daha çok parçaya ayrılması olayı KIRILMA olarak adlandırılır ve genellikle gevrek ve sünek olarak iki grupta ele alınır.

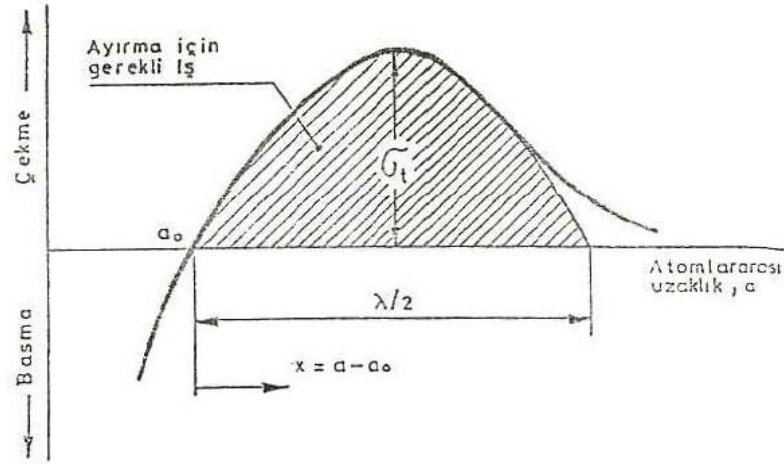
Sünek kırılma, çatlakların oluşması ve büyümesinde önemli ölçüde kalıcı şekil değişiminin görüldüğü kırılma türüdür. Çatlak, boşlukların oluşması ve birleşmesi ile meydana gelir ve yavaş ilerler. Kırılma yüzeyi mat ve lifli bir görünümündedir.

Gevrek kırılmada ise çatlak büyük bir hızla ilerler ve kalıcı şekil değişimi önemsiz düzeylerde olur. Ayrılmalar çok taneli bir yapıda her tanenin en düşük kohezyon dayanımlı kristallografik düzleminde oluşur ve kırılma yüzeyi parlak ve taneli bir görünümündedir. Gevrek kırılmanın diğer bir türü de taneler arası kırılmadır ve tane sınırlarının kırılma bir yapıda olması halinde görülür.

Yapısal olarak gevrek olarak tanıdığımız malzemelerin yanında, klasik çekme deneyinden sünek olarak tanıdığımız malzemelerde de gevrek kırılma görülebilir. Gevrek kırılmanın oluşmasına neden olabilecek faktörler arasında aşağıdaki hususlar sıralanabilir.

- a) Çok eksenli gerilme durumları (çentik)
- b) Hızlı zorlamalar (darbe)
- c) Düşük sıcaklıklar

Gevrek kırılma önceden farkına varılmasına imkan olmadan ve büyük bir hızla olduğundan en tehlikeli kırılma türüdür. Geçmişte bu nedenle ortaya çıkan hesapların çoğu facia ile sonuçlanmış, ancak o yıllarda bu olaylar mühendislik tasarım hatası olarak görülmüştür. Daha sonra malzemelerin gevrek kırılma davranışlarının pek iyi bilinmediği fark edilerek, konuya büyük önem verilmiş ve asrımızın ikinci yarısında Kırılma Mekaniği olarak adlandırılan yeni bir bilim dalı geliştirilmiştir.



Şekil 2.1 İki atom arasındaki kuvvetlerin atomlar arası uzaklık ile değişimi

2.2 Kırılma Mekanizmasının Teorik Esasları

2.2.1 Malzemelerin Teorik Kohezif Dayanımı

Kristal bir yapıda düzlemlerin kırılma yoluyla ayrılması için gerekli teorik kohezif dayanım bu bölümde hesaplanmaya çalışılacaktır. Şekil-1'de iki atom arasındaki kohezif kuvvetin atomlar arası uzaklık ile değişimi görülmektedir. Bir kristaldeki iki düzlem arasındaki gerilmelerin düzlemler arası uzaklık ile değişiminin de benzer şekilde olacağı söylenebilir. Bu eğri iki atom arasındaki çekme ve itme kuvvetlerinin toplanması ile elde edilmiştir.

Denge konumunda atomlar arası uzaklık a_0 olup, çekme gerilmesi uygulanması halinde bu uzaklık artmaktadır. Teorik kohezif dayanım olarak adlandırılan bir σ_t değerine ulaşıldığında ayrılma için gerekli en büyük gerilme elde edilmiş olur. Bu eğrinin üst kısmı büyük bir yaklaşımla bir sinüs eğrisi olarak ele alınabilir:

$$\sigma = \sigma_t \cdot \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada $x = a - a_0$ atomlar arası ayrılma, ise dalga boyudur. Küçük x değerleri için $\sin x = x$ olduğundan,

$$\sigma = \sigma_t \cdot \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (\text{Denklem 2})$$

yazılabilir. Elastik alanda kaldığı ve Hooke kanununun geçerli olduğu kabul edilirse,

$$\frac{x}{a_0} = \varepsilon, \quad \sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{E \cdot x}{a_0} \quad (\text{Denklem 3})$$

olur. (2) ve (3) eşitliklerinden,

$$\sigma_t = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{E}{a_0} \quad (\text{Denklem 4})$$

bulunur. Eğrinin altındaki taralı alan düzlemleri ayırmak için harcanan enerjiyi vermektedir.

$$U_0 = \int_0^{\lambda/2} \sigma_t \cdot \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cdot dx = \frac{\lambda \sigma_t}{\pi} \quad (\text{Denklem 5})$$

sarfedilen bu enerjinin, çatlakın oluşumunda yaratılması gerek iki yüzey için harcadığını kabul edersek,

$$\frac{\lambda \sigma_t}{\pi} = 2\gamma_y, \quad \lambda = \frac{2\pi\gamma_y}{\sigma_t} \quad (\text{Denklem 6})$$

bulunur. Bu değer (5) eşitliğinde yerine konulması ile,

$$\sigma_t = \left(\frac{E \cdot \gamma_y}{a_0} \right)^{1/2} \quad (\text{Denklem 7})$$

elde edilir. Bu denklem teorik kohezif dayanımın, malzemenin elastiklik modülü, yüzey enerjisi ve düzlemler arası uzaklığa bağlı olduğunu göstermektedir. Bu bağlantı ile saptanan dayanımlar $E/10$ mertebesinde olup, gerçek değerlerden 10 ilâ 1000 misli büyüktür. Sadece çok ince kılcal kristallerde (whisker) deneysel olarak saptanan değerler, bu teorik değere yakındır. Hesaplanan teorik değerlerin deneysel bulgulardan farklı olmasının nedeni, yapılan kabullerin yanlış olması değil, malzemelerin kristal yapılarında bazı kusurların (örneğin çatlakların) varlığıdır.

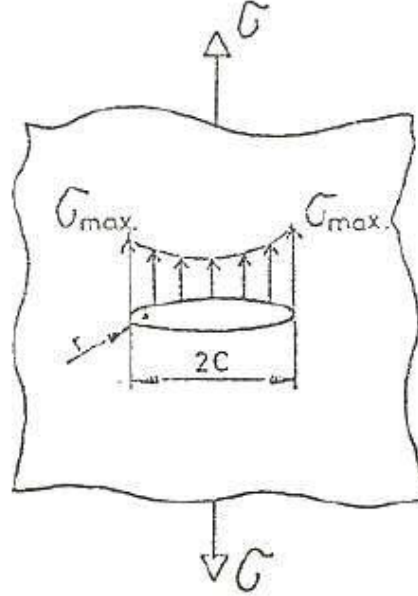
Çatlakların bulunması halinde doğabilecek gerilme yığılımları,

$$\sigma_{\max} = \sigma \left[1 + 2 \left(\frac{c}{r} \right)^{1/2} \right] \quad (\text{Denklem 8})$$

olarak verilmiştir, Şekil-2.2 $C \gg r$ olduğundan,

$$\sigma_{\max} = 2\sigma \left(\frac{c}{r} \right)^{1/2} \quad (\text{Denklem 9})$$

olarak kabul edilebilir. En küçük r değerinin a_0 olabileceği düşünülür ve σ_{\max} değerinin (7) denklemi ile verilen σ_t 'ye eşit olduğunda çatlakın büyüyeceği kabul edilirse, kırılma gerilmesi olarak,



Şekil 2.2 Sonsuz büyüklükte bir levhada $2c$ uzunluğundaki bir çatlakın ucundaki gerilme yığılması

$$\sigma_k = \left(\frac{E \cdot \gamma_y}{4c} \right)^{1/2} \quad (\text{Denklem 10})$$

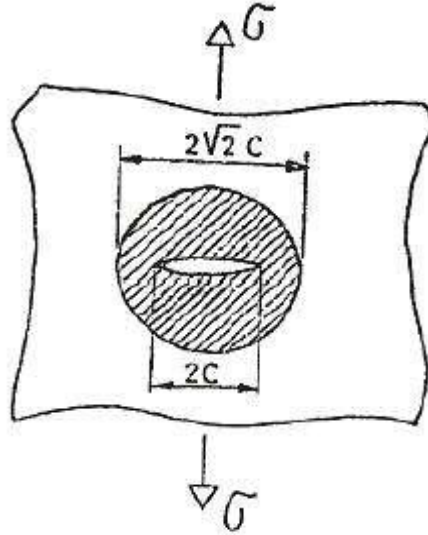
bulunur ki, bu denklem $c = 2.3 \mu\text{m}$ uzunluğunda çatlaklar için $E/1000$ dolayında değerler vermekte olup, gerçek değerlere çok daha yakındır.

2.2.2 Griffith Enerji Yaklaşımı

1920 yılında Griffith'in ideal gevrek bir cisim için ortaya koyduğu kriterler kırılma mekaniğinin temelini oluşturmuştur. Griffith, cisimlerin küçük çatlaklar içerdiğini ve bunların büyümesi için yeni yüzeylerin yaratılması gerektiğini, gereken enerjinin ise çatlakın büyümesi ile serbest kalan elastik enerji tarafından sağlandığını savunmuş ve "Bir çatlakın büyümesi ancak bu sırada serbest kalan elastik enerjinin yeni yüzey yaratmak için gerekli yüzey enerjisine eşit veya daha fazla olması halinde gerçekleşebilir" kriterini oraya koymuştur. Matematiksel olarak bu kriter,

$$\frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2c)} \geq \frac{\partial(\Delta U_y)}{\partial(2c)} \quad (\text{Denklem 11})$$

şeklinde ifade edilebilir. σ gerilmesi uygulanan bir cismin birim hacimde depo edilen elastik enerji



Şekil 2.3 2c uzunluğunda bir çatlakın çevresindeki elastik enerjinin serbest kaldığı bölgenin şematik gösterilişi

$$U_E = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (\text{Denklem 12})$$

şeklinde verilmektedir. Öte yandan birim kalınlık için 2c uzunluğunda bir çatlak nedeniyle elastik enerjideki düşüş ise,

$$\Delta U_E = \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} \quad (\text{Denklem 13})$$

olarak bulunmuştur. Bu enerji azalması çatlak çevresinde 2c yarıçapında bir bölgenin elastik enerjisinin serbest kalması olarak düşünülebilir (Şekil-3).

Öte yandan 2c uzunluğunda bir çatlak yaratmak için gerekli yüzey enerjisi artışı ise,

$$\Delta U_y = 2.2.c.\gamma_y = 4.c.\gamma_y \quad (\text{Denklem 14})$$

olarak yazılabilir. Türevler alınarak (11) denklemi,

$$2 \frac{\pi}{E} c \sigma^2 \geq 4 \cdot \gamma_y \quad (\text{Denklem 15})$$

şekline dönüşür ve çatlak ilerlemesi için gerekli gerilme,

$$\sigma \geq \left(\frac{2E \cdot \gamma_y}{\pi \cdot c} \right)^{1/2} = \sigma_K \quad (\text{Denklem 16})$$

olarak bulunur. Bu bağlantıdaki σ_K değeri, (10) denklemi ile verilen değerle karşılaştırılırsa merteye bakımından birbirine çok yakın oldukları görülür.

Griffith bağıntısı cam ve benzeri ideal gevrek cisme yakını malzemelerde gerçeğe yakın değerler vermektedir. Ancak metalsel malzemeler gibi mühendislik açısından çok önemli malzemelerde kırılma öncesi ve sırasında önemli ölçüde kalıcı şekil değişiminin olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Griffith'in ortaya koyduğu kriterlerde serbest kalan enerji yüzey yaratmakta kullanıldığı gibi kalıcı şekil değişimi için de harcanacaktır. Kalıcı şekil değişiminin her malzemeye özgü sabit bir değer olarak bağıntılar girmesi mümkün olmadığından Griffith'in enerji yaklaşımı metalsel malzemelere doğrudan uygulanamaz. Metalsel malzemeler için kırılma mekaniğinin esasları Griffith kriterlerinden yola çıkarak Irwin tarafından geliştirilmiştir.

2.2.3 “Elastik Enerji Boşalım Hızı” ve “Gerilme Şiddeti Çarpanı”

Sonsuz büyüklükte ve birim kalınlıkta bir levha ele alındığında levhada mevcut $2c$ uzunluğunda bir çatlak ilerlemesi için zorlayıcı faktör açığa çıkacak elastik enerjidir. İşte bu değere Elastik Enerji Boşalım Hızı veya Çatlak Büyümesi Kuvveti adı verilerek sembolüyle gösterilir.

$$G = - \frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2c)} \quad (\text{Denklem 17})$$

Bu büyüklüğün kritik bir σ_c değerini aşması halinde çatlak genişler. Yukarıda ele alınan cisimde düzlem gerilme durumunda (ince levha)

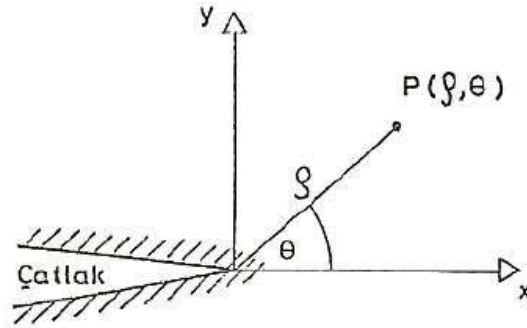
$$G = \frac{\pi}{E} c \sigma^2 \quad (\text{Denklem 18})$$

elde edilir. Görüldüğü gibi bu cisimde σ değeri $c\sigma^2$ çarpımı ile belirlenmekte, diğer bir deyimle kırılma tehlikesi $c\sigma^2$ çarpımından doğrudan etkilenmektedir. π değeri de bu çarpım içine alınır,

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot c} \quad , \quad G = \frac{K^2}{E} \quad (\text{Denklem 19})$$

şeklinde bir tanım yapılabilir. (18) ve (19) denklemleri düzlem gerilme hali için geçerli olup, düzlem şekil değiştirme durumunda E yerine $E / (1-\nu^2)$ koymakla bu eşitlikler kullanılabilir.

K değeri “Gerilme Şiddeti Çarpanı” olarak adlandırılır ve kırılma mekaniğinde çok önemli bir rol oynar. K değeri de kritik bir K_c değerini aştığında çatlak büyümeye başlar ve K_c değeri “Kırılma Tokluğu” olarak adlandırılır. K değerinin birimi $[\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}]$ veya $[\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}]$ dir.



Şekil 2.4 Çatlak ucundaki gerilmeleri belirlemede kullanılan koordinatlar

Çatlağın büyümesi bakımından çatlak çevresindeki gerilmelerin durumu önemlidir. Sonsuz büyüklükteki bir levhada düzlem gerilme halinde Şekil-2.4’de verilen koordinatlarla, herhangi bir P noktasındaki gerilmeler aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi\rho}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right]$$

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi\rho}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (\text{Denklem 20})$$

$$\tau = \frac{K}{\sqrt{2\pi\rho}} \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

Görüldüğü gibi çatlak ucundaki gerilme durumu sadece K değeri ve noktanın konumunu belirleyen koordinatlarla saptanabilmektedir. σ değeri fiziksel olarak daha

anlamli olmasına ragmen, kırılma mekaniğinde çalışma kolaylığı bakımından K değerinin kullanılması tercih edilmektedir.

K değerı geometriye bağlıdır, ancak aynı K değerine sahip çatlakların çevresindeki gerilme alanları da aynı olmaktadır. Değişik geometrilerdeki cisimler ve yükleme şekilleri için K değerleri elastisite teorisi yardımıyla hesaplanabilir ve gerilme şiddeti çarpanı en genel anlamda

$$K = \alpha \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot c} \quad (\text{Denklem 21})$$

şeklinde verilir. Örneğin sonlu genişlikte (w) ince bir levhada bu değer,

$$\alpha = \left(\frac{w}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{w} \right)^{1/2} \quad (\text{Denklem 22})$$

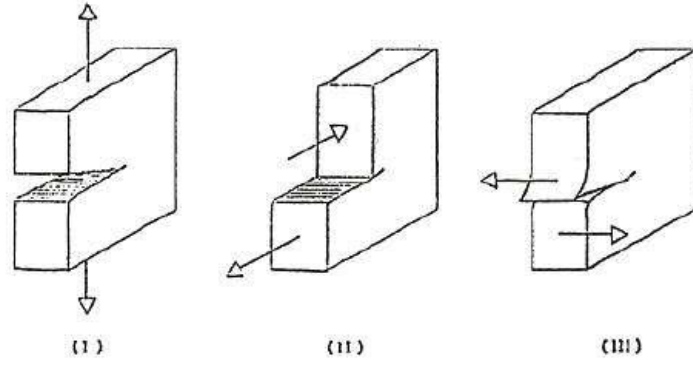
Olarak verilmektedir. Çatlağın yanda ve c uzunluğunda olması halinde ise,

$$\alpha = 1,12 \quad (\text{Denklem 23})$$

olarak hesaplanmıştır.

şimdiye kadar sadece iki çatlak yüzeyinin kendilerine dik yönde bir gerilmenin etkimesiyle ayrılmaya zorlanması durumu ele alınmıştır. şekil-5'den de görülebileceği gibi aslında üç değişik zorlanma hali söz konusudur ve bunlar sırasıyla I, II ve III indisleriyle gösterilmektedir. Bunlar arasında en önemlisi ve kırılma bakımından en tehlikeli olanı I durumudur ve değişik malzemeler için saptanan K_c değerleri bu yükleme şeklinde K_{1c} olarak verilir.

K_{1c} değerı gerilme durumunun düzlem gerilme veya düzlem şekilde değiştirme olması ile de önemli derecede etkilenir. Düzlem şekil değiştirme hali kırılma bakımından daha kritik bir durumdur ve K_{1c} değerleri bu koşullar altında en düşük düzeydedir. Bu nedenle K_{1c} değerleri düzlem şekil değiştirme halinde saptanır ve deneysel olarak saptanan K_{1c} değerlerinde aynı malzeme için sabit değerler elde edilir.



Şekil 2.5 Değişik çatlak yükleme türleri

Bu nedenle “Düzlem Şekil Değiştirme Kırılma Tokluğu” olarak adlandırılan K_{IC} karakteristik bir malzeme özelliği olarak kabul edilerek, kırılma mekaniği yardımıyla yapılan tasarımlarda kullanılmaktadır. Kırılma gerilmesi ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$G_K = K_{Ic} / \alpha \sqrt{\pi \cdot c} \quad (\text{Denklem 24})$$

BÖLÜM ÜÇ

SANDVIÇ MALZEMELERDE KIRILMA TESTİ VE KIRILMA TOKLUĞUNUN ANSYS İLE NÜMERİK ANALİZİ

Bu tezin amacı, PVC ve Balsa çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozit malzemelerin kırılma tokluğu değerlerini, sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak belirlemektir. Ancak tez kapsamındaki çalışmalar, lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımının geçerli olduğu diğer tüm gevrek malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesinde de kullanılabilir.

Amerika Kuzey Carolina enstitüsünde yapılan bir çalışmada, farklı yoğunluklardaki Balsa ve PCV çekirdek malzemesinden oluşan, cam vinilester ve carbon epoksi kabuk malzemeleri kullanılarak üretilen farklı numunelerin kırılma tokluğu değerlerini deneysel metotla elde ederek, sonuçlarını yayınlamıştır. Çalışma içerisinde özellikle farklı kabuk malzemesinin kırılma tokluğu değerine etkisi gösterilmiştir. Bunun dışında farklı yoğunluklardaki çekirdek malzemelerin kırılma tokluğu değerleri bulunmuştur. Deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında, Shivakumar tarafından deneysel metotla kırılma tokluğu değerleri elde edilen sandviç kompozit malzemelerin nümerik olarak ansys ile simülasyonu yapılmıştır. Modelleme deneyde de kullanılan geliştirilmiş Mode I CSB testi kullanılarak yapılmıştır.

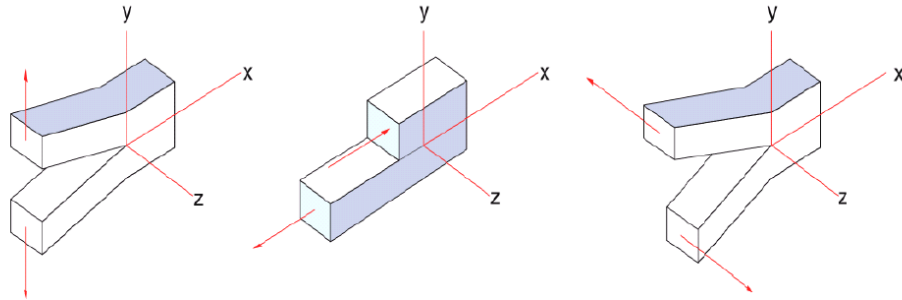
Nümerik olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS yazılımı ile kırılma tokluğu değerleri belirlenmiş ve bulunan sonuçlar deneysel metotla bulunan sonuçlar ile karşılaştırılarak, veriler bir tablo halinde tezin sonunda okuyucuya sunulmuştur. Sonuçların geçerliliği açısından birden fazla, kırılma mekaniği analizinin yapılması, ANSYS yazılımının ve teorik metodun güvenilirliğini açıkça ortaya koymaktadır.

3.1 Sandviç Malzemelerde Kırılma

Kırılma toleransı bütün mühendislik malzemelerinde önemli, kompozit malzemelerde ise kritik bir önem arz etmektedir. Faaliyeti sırasında kompozit malzemelerde delaminasyon olarak bilinen tabakalar arası kusurlar oluşur. Bu hasarlar genellikle hatalı çekirdek malzeme üretimi sonucu oluşmaktadır. Bu tür hataların oluşması kritiktir, çünkü ileriki dönemlerde yapının tamamında katstropik hasarların oluşması ihtimali gündeme gelecektir.

Sandviç yapılarda işletme koşulları altında meydana gelebilecek olan başlangıç çatlakları zamanla ilerler ve de yeni kusur ve de iç hasarların oluşmasına neden olurlar. Belirli yüklem koşulları altında bu kusurlar büyüyebilir ve çekirdekten üst ve alt yüzey tabakalarının ayrılmasına sebep olur. Çatlaklar ilerledikçe yapıda özellikle rijitliğin ve de dayanımın azalmasına sebep olurlar, özellikle yüzey ile çekirdek malzemesi arasındaki iç yüzeysel bölgedeki çatlağın ve kırılma tokluğunun incelenmesi sandviç yapının bütününe ilgilendirmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Kırılma ve çatlak analizleri genellikle şekilde gösterildiği üzere üç tip yüklem durumu ile gerçekleştirilmektedir.

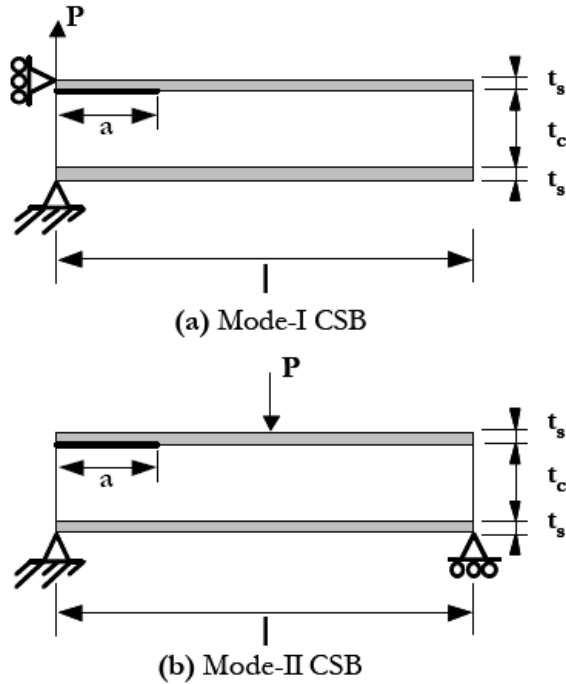


Şekil 3.1 (a)gösterimi Mod-I çekme konumu, (b); Mod-II; kayma konumunu, (c)gösterimi de Mod-III yırtılma konumunu ifade etmektedir.

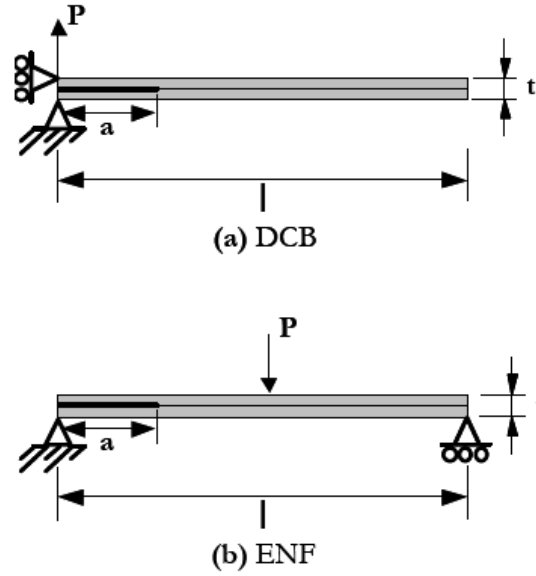
Bu proje kapsamındaki analizlerde, çekirdek ile yüzey malzemesi arasındaki iç yüzeysel çatlak analizi için (a) konumundaki model benimsenmiş ve modeller Mod-I prensibine göre yapılmıştır.

Sandwich malzemelerin hasar toleranslarının keşfi, özellikle sandwich kirişlerin arayüzey kırılma tokluğunun litaratürde dikkat çekmesini sağlamıştır. Carlsson ve arkadaşları (1991) kompozit sandwich yapıların arayüzey kırılma tokluğunu araştırmak için 2 tane test bulmuşlardır. Bunlar Mode-I ve Mode-II arayüzey kırılma tokluğu testleridir. Bu iki test Mode I ve Mode II Çatlak Sandwich Kiriş (Cracked Sandwich Beam) – CSB çeşitlendirilerek günümüzde hala lamine kompozit malzemelerin kırılma tokluğu çalışmalarında kullanılmaktadır.

Mode – I testi CSB, çift ankastre kiriş testi (double cantilever beam) (DCB) temel alınarak oluşturulmuştur. Mode – II CSB testi ise End – Notched Flexure (son-çentik eğme) (ENF) testi temel alınarak oluşturulmuştur.



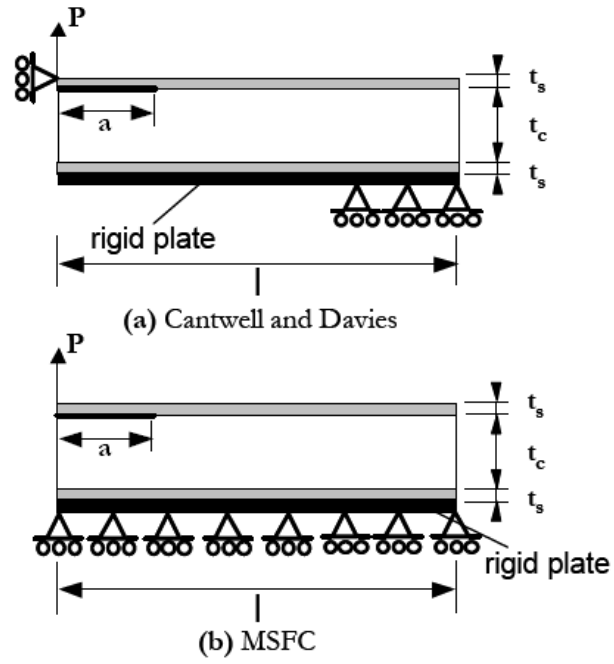
Şekil 3.2 Mode I ve Mode II CSB kırılma tesleri



Şekil 3.3 Çift ankastre kiriş (DCB) ve son çentik eğme (ENF) kırılma testleri

Sandwich malzemelerin arayüzey kırılma tokluğu çalışmalarında, delaminasyon mutlaka çekirdek malzeme ile yüzey malzemesi arasında bulunmalıdır. Test sırasında numunede asimetrik bir deformasyon oluşumu arzulanan bir durumdur. Ve çatlak ucunda karışık-mode gerilmelerini tetikler. Catwell ve Davies SCB (single cantilever beam) (tek ankastre kiriş) testinin bu simetri problemini çözdüğünü açıklamışlardır. (1994 – 1996 yayınları). Bu SCB testi Mode I CSB testinin geliştirilmiş halidir.

SCB testinde Sandwich malzeme Kayar bir taşıyıcı üzerinde Rijit bir yüzeye monte edilmiştir. Bu konfigürasyon Balsa/PVC Köpük sandwich malzemelerinin arayüzey kırılma tokluğunu incelemek için kullanılacaktır. SCB testi ideal bir konfigürasyondur. Ancak numunenin monte edilmesi hantal, zaman kaybı yüksektir ve her numune için tekrarlanmak zorundadır.

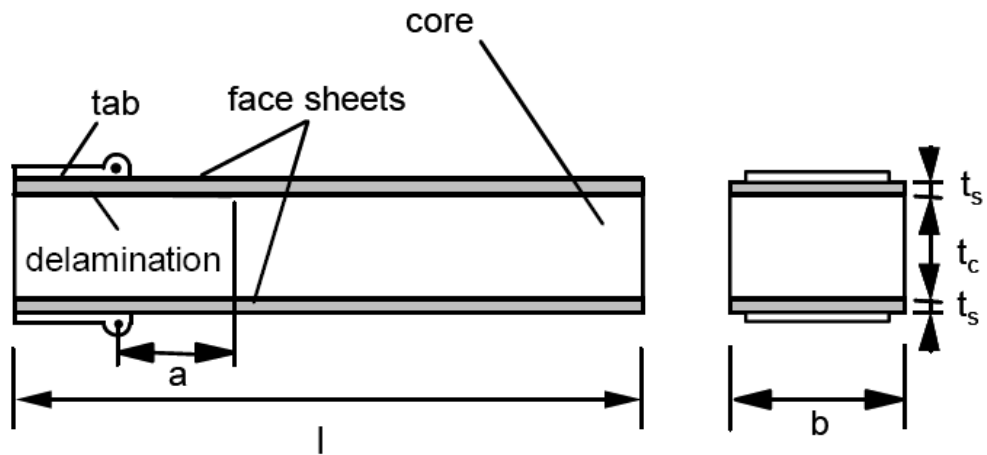


Şekil 3.4 Tek ankastre kiriş kırılma testi

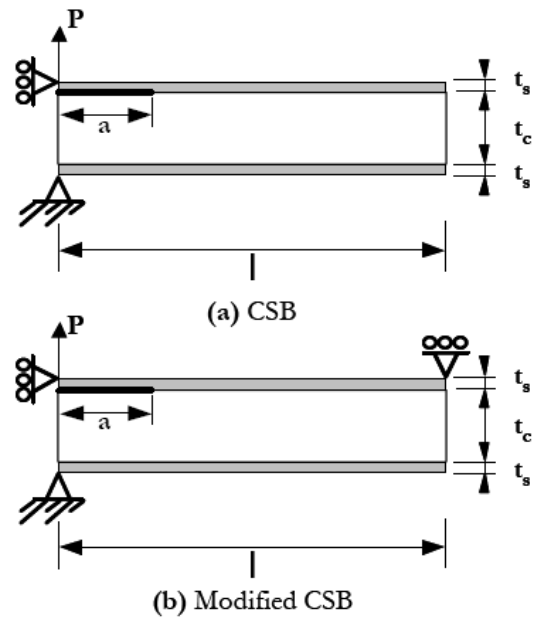
Bu tezde, farklı yoğunluklardaki, cam/vinylester ve karbon/epoksi yüzey kaplamalarına sahip PVC ve Balsa köpük çekirdek malzemesinden oluşan sandwich kompozitlerin kırılma tokluğu testi ANSYS programı ile nümerik olarak modellenip hesaplanacaktır.

Arayüzey kırılma tokluğu testi geliştirilmiş Mode-I CSB testi ile gerçekleştirilecektir.

CSB numune malzemelerinin konfigürasyonu ve Geriltilmiş CSB konfigürasyonunun kullanıldığı çalışma, şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Mode I CSB kırılma tokluğu testi numune konfigurasyonu



Şekil 3.6 SCB – Mode I CSB ve geliştirilmiş Mode I CSB kırılma tokluğu test konfigurasyonu

Açıklanan modifikasyon Serbest uca bir kayar mesnet eklenmesi ile CSB testi numunesinin dönmesini engellemesidir.

Bu projede yapılacak sayısal sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş CSB testine göre yapılacaktır.

3.2 Malzeme

Test edilecek sandwich panel numuneleri farklı yoğunluklarda PVC / Balsa köpük çekirdek malzemelerinden oluşur. Bu numuneler nominal olarak 38 mm genişliğe ($b \approx 38$) 305 mm yüksekliğe ($l \approx 305$ mm) ve 31 mm kalınlığa ($2t_s + 2t_c \approx 31$ mm) sahip olmalıdır. Spesifik numune malzeme boyutları tabloda gösterilmiştir. PVC köpük çekirdek malzemesinin yoğunluğu 80 – 200 kg/m³ aralığında değişmektedir. Balsa için 90 ve 155 kg/m³ lük iki farklı yoğunluk kullanılacaktır.

PVC köpük ve Balsa çekirdek malzemeleri kabuk malzemesi olarak E-Cam / Vinilester kullanılacaktır. 100 kg/m³ Carbon/Epoksi kabuk malzemesine sahip bir PVC çekirdek malzemesinde arayüzey kırılma tokluğu değerinin yüzey malzemesinden bağımsız olduğunu göstermek için modellenecektir.

Tablo 3.1 Model boyutları

Uzunluk, (l)	Yüzey kalınlığı, (t _s)	Çekirdek kalınlığı, (t _c)	Genişlik, (b)	Başlangıç Çatlağı
305 mm	3 mm	25 mm	38 mm	25 mm

Tablo 3.2 PVC köpük çekirdek malzemesinin mekanik özellikleri

	H80	H100	H130	H200
Yoğunluk (kg/m ³)	80	100	130	200
E _{xx} (MPa)	80	105	140	230
v _{xy}	0.29	0.31	0.35	0.35
G _{xy} (MPa)	31	40	52	85

Tablo 3.3 Balsa çekirdek malzemesinin mekanik özellikleri (divinycell)

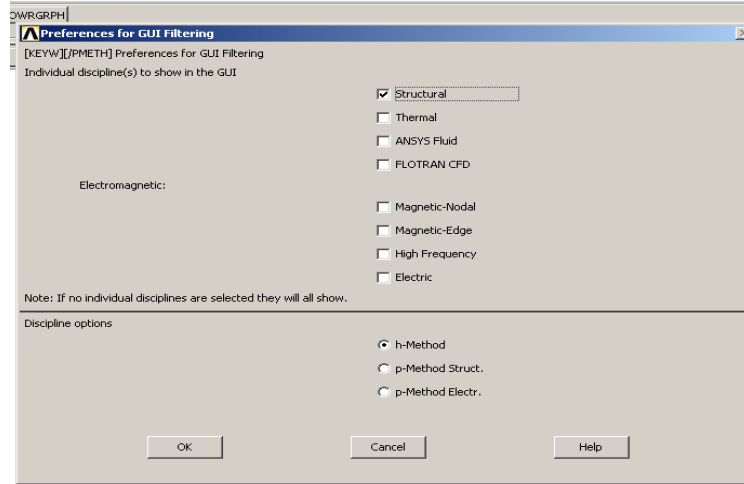
	LD7 (D57)	PB (D100)
Yoğunluk (kg/m ³)	90	155
E _{xx} (MPa)	1850	4100
v _{xy}	0.32	0.35

Tablo 3.4 Panel malzemelerinin mekaniksel özellikleri (divinycell)

	E-Cam / Vinilester	Carbon / Vinilester
E _{xx} (MPa)	23000	47500
v _{xy}	0.11	0.04

3.3 Sayısal Modelleme

3.3.1 Analiz Yönteminin Belirlenmesi



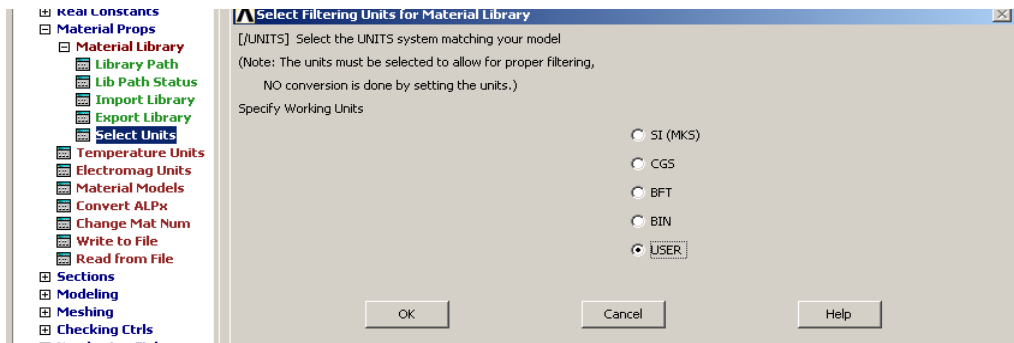
Şekil 3.7 Ansys analiz yöntemi

[Main Menu>Prefences>Structural] komutlarını takip ederek yapacağımız analiz sadece gerilmelerle ilgili olduğundan Structural aktif hale getirilir ve “Ok” tıklanarak pencere kapatılır.

3.3.2 Birim Atama

Problem çözümünde kullanacağımız verileri kullanıcının atamasını seçerek kendi birimlerimiz ile işlem yapabiliriz. Böylece bulunan sonuçlar girilen değerlerimizin birimlerine göre çıkacaktır. Örnek: P (N) giriliyorsa seğimler (mm), Kıc $N/mm^{3/2}$ olarak çıkacaktır.

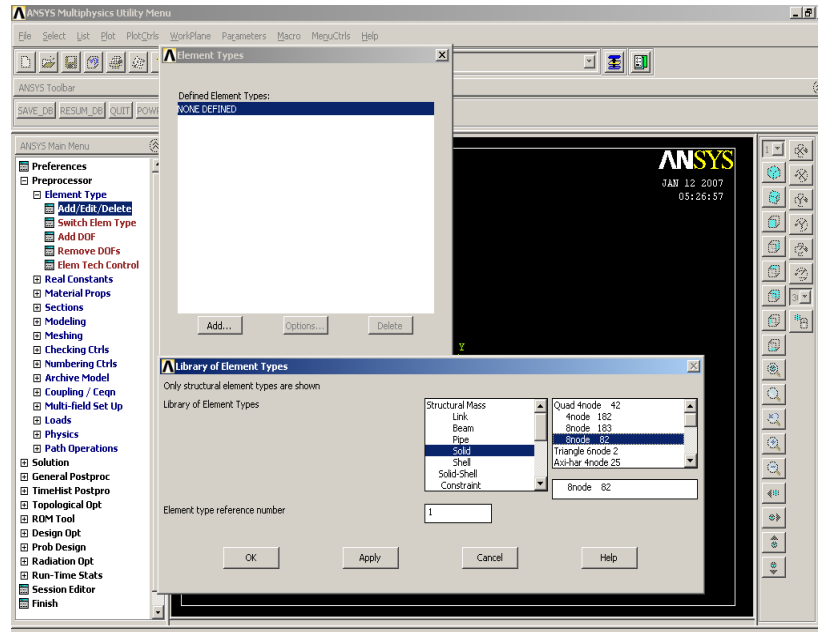
[Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Library > Select Units> User> Ok]



Şekil 3.8 Ansys birim belirleme

3.3.3 Seçilen Malzeme Özelliklerinin Atanması

Problem tanımında verilen verilere uygun olarak malzememizin ataması yapılır. Bu projede kullanacağımız sandwich kompozit malzemeler için Solid 82' nin seçimi uygun olacaktır. [Main Menu> Preprocessor>Element Type> Add> Solid 8 node 82>Ok]



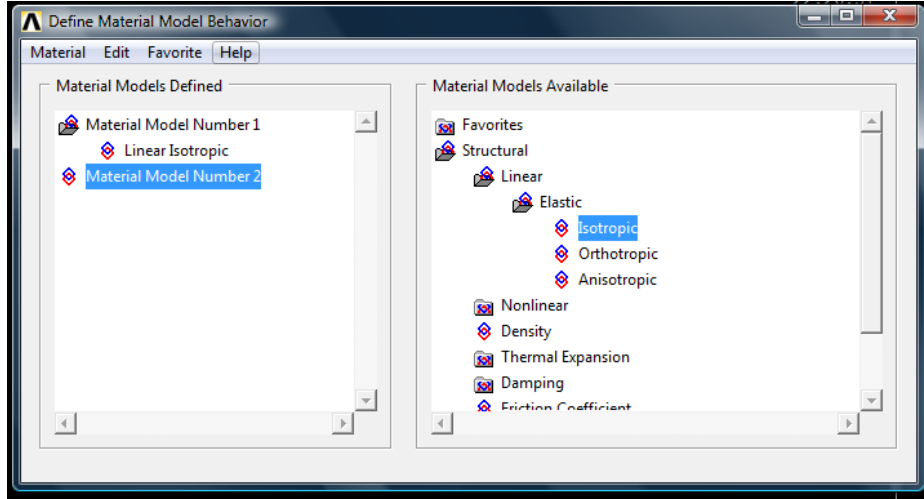
Şekil 3.9 Eleman atama

Bu seçimin ardından “Option” tıklanarak kalınlık ile gerilme analizi yapılacak bir malzeme olacağını belirtiriz. (Plane sts w/thk) Böylece kalınlığımız ihmal edilmeyecektir.

[Main Menu> Preprocessor>Element Type> Options> Plane sts w/thk> Ok]

Malzememizin lineer elastik izotropik özellik gösterdiğini belirtelim. Sandwich kompozit modelimiz için, kabuk ve çekirdek olmak üzere 2 tip malzeme oluşturmamız gerekmektedir.

[Main Menu> Preprocessor> Material Props> Structural> Linear> Elastic> Isotropic]



Şekil 3.10 Malzeme davranışını belirleme

Malzememizin tanıtımından sonra bizden malzemenin analizi için gerekli verileri isteyen küçük bir pencere açacaktır. Malzememizin Elastise modülünü ve poisson oranı burada belirtilmelidir.

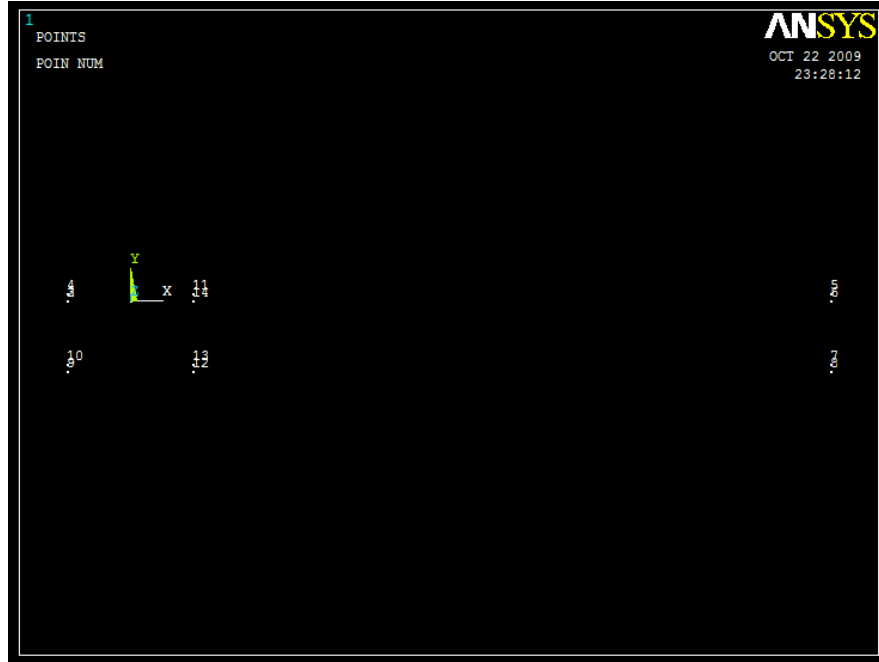
3.3.4 Numunenin Geometrisini Oluşturma

Geometrik model oluşturmadaki en temel yöntem noktalardan doğrular, doğrulardan alanlar oluşturmaktır. K değerini belirlemek için eksen takımını çatlak dibine yerleştireceğiz. Aksi taktirde K hesabında çatlak dibinde lokal bir eksen tanımlamamız ve aktif hale getirmemiz gerekecek. Bu lokal eksenlerin yönleri uygun seçilmediği taktirde ise çözümlerde problemler çıkabilmektedir. Bu gibi problemlerle karşılaşmamak için global eksen takımımızı çatlak dibine yerleştirmek büyük bir kolaylık sağlar. X ekseninin çatlak açılması (çatlağa dik) doğrultusunda olması gerekir.

3.3.5 Kilit Noktaların Oluşturulması (Keypoints)

Geometrik modelimizi karakterize eden noktaları (keypointleri) oluşturalım. Burada dikkat etmemiz gereken unsur; çatlak bölgesinin, aralarında boşluk bulunmayan iki yüzeyden meydana gelmesidir. Burada üst üste iki çizgi tanımlayacağız. Bir çizgi üstteki alana, diğeri alttaki alana ait olacak. Bu sebeple çatlak ucunda aynı koordinatlara sahip iki nokta tanımlayacağız.

[Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints> On Active Cs]



Şekil 3.11 Anahtar noktaların çalışma düzleminde belirmesi

LIST ALL SELECTED KEYPOINTS. DSYS= 0

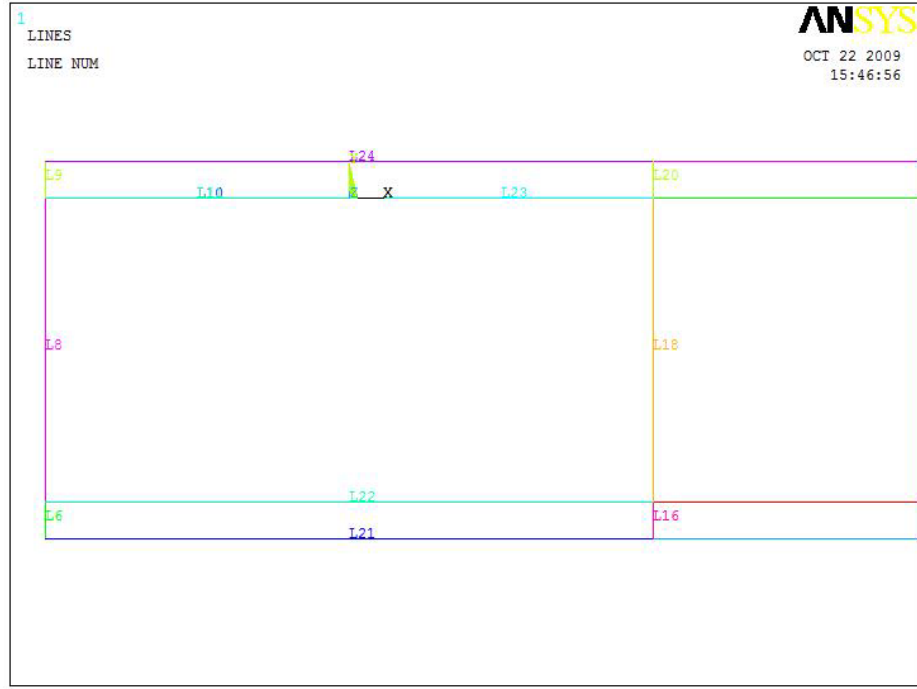
NO.	X,Y,Z LOCATION			THXY, THYZ, THZX	ANGLES
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000	0.0000
2	-25.000000	0.000000	0.000000	0.0000	0.0000
3	-25.000000	0.000000	0.000000	0.0000	0.0000
4	-25.000000	3.000000	0.000000	0.0000	0.0000
5	280.0000	3.000000	0.000000	0.0000	0.0000
6	280.0000	0.000000	0.000000	0.0000	0.0000
7	280.0000	-25.000000	0.000000	0.0000	0.0000
8	280.0000	-28.000000	0.000000	0.0000	0.0000
9	-25.000000	-28.000000	0.000000	0.0000	0.0000
10	-25.000000	-25.000000	0.000000	0.0000	0.0000
11	25.000000	3.000000	0.000000	0.0000	0.0000
12	25.000000	-28.000000	0.000000	0.0000	0.0000
13	25.000000	-25.000000	0.000000	0.0000	0.0000
14	25.000000	0.000000	0.000000	0.0000	0.0000

Şekil 3.12 Anahtar noktaların listesi

3.3.6 Çizgilerin Oluşturulması (Lines)

Bu adımda dikkat etmemiz gereken unsur çatlak bölgesinde iki doğru meydana getirmektir. Bizim modelimiz de bu doğrular 1-2 ve 1-3 noktalarından oluşan doğrulardır.

[Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Lines> Straight Line]

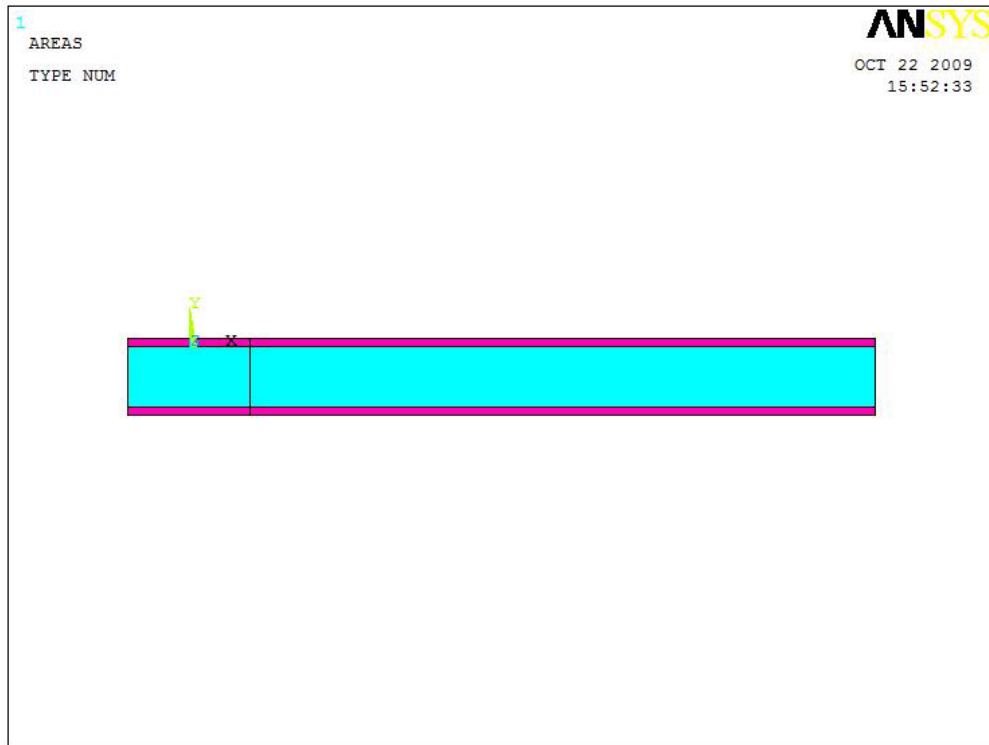


Şekil 3.13 Çizgilerin oluşturulması

3.3.7 Alanların Oluşturulması (Areas)

Alanları oluştururken dikkat etmemiz gereken unsur çatlak bölgesinde oluşturduğumuz iki doğrunun birinin alttaki alana diğerinin de üstteki alana ait olacak şekilde ayarlanmasıdır.

[Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas > Arbitrary> By Lines]

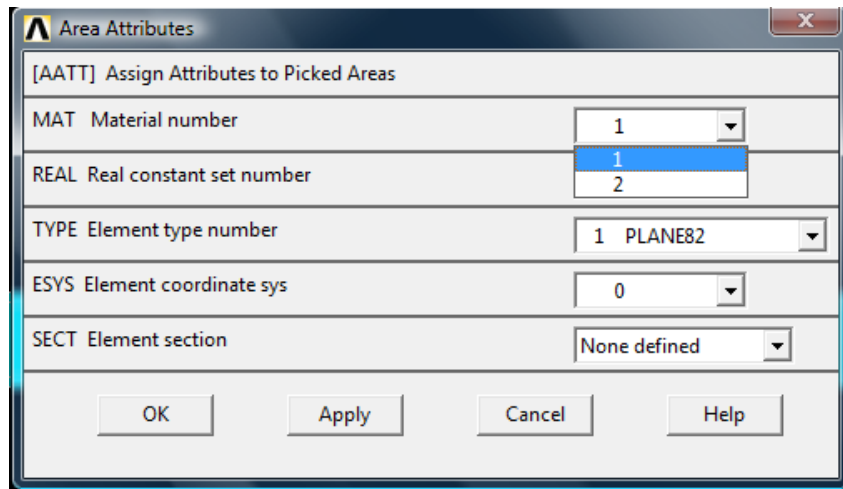


Şekil 3.14 Katı model numune

Şekilde görüldüğü gibi modelimiz kabuk ve çekirdek malzemesi olmak üzere 2 farklı malzemeden oluşmaktadır.

3.3.8 Oluşturulan Alanlara Malzemelerin Atanması

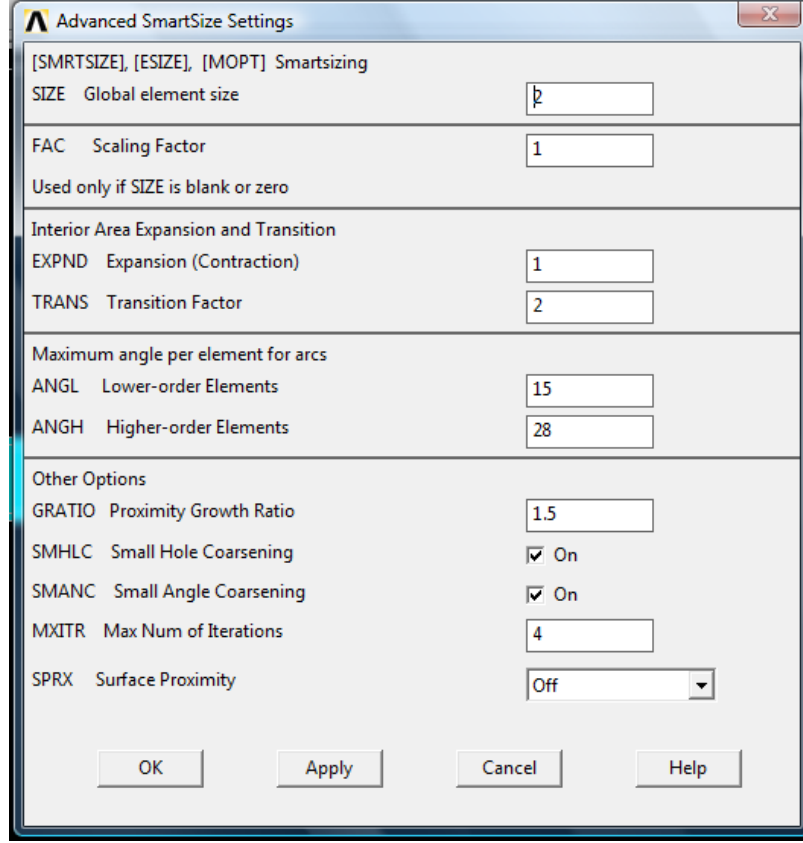
Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas seçeneğinden oluşturulmuş alanlara, kabuk ve çekirdek malzeme atamaları yapılır.



Şekil 3.15 Malzemelerin atanması

3.3.9 Elemanlara Ayırma (Meshing)

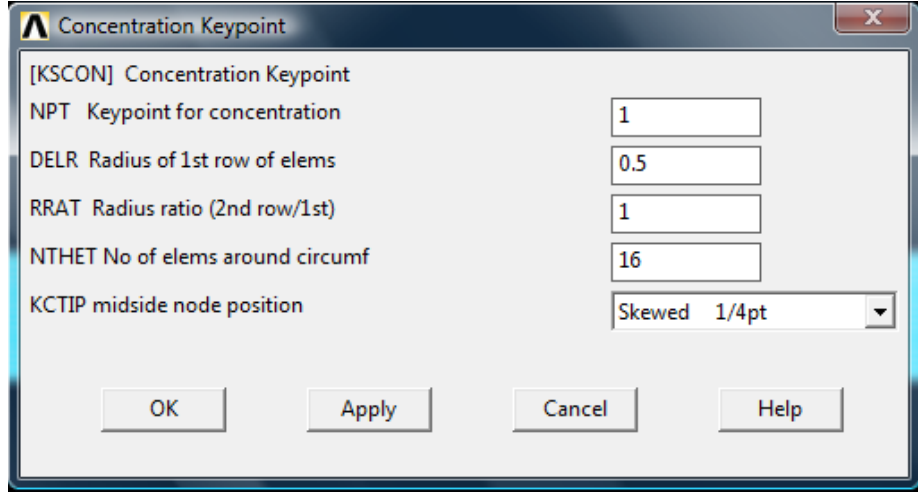
Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free seçeneğinin ardından alan seçilir ve mesh edilir.



Şekil 3.16 Mesh ayarı

Kırılma mekaniğinde, sonlu elemanlar modelinde çatlak etrafındaki elemanların çevre boyunca üçgen elemanlar (singular) olması gerekir. Bunu için çatlak dibindeki “1” nolu KeyPoint te bu özellik aşağıdaki gibi tanımlanır.

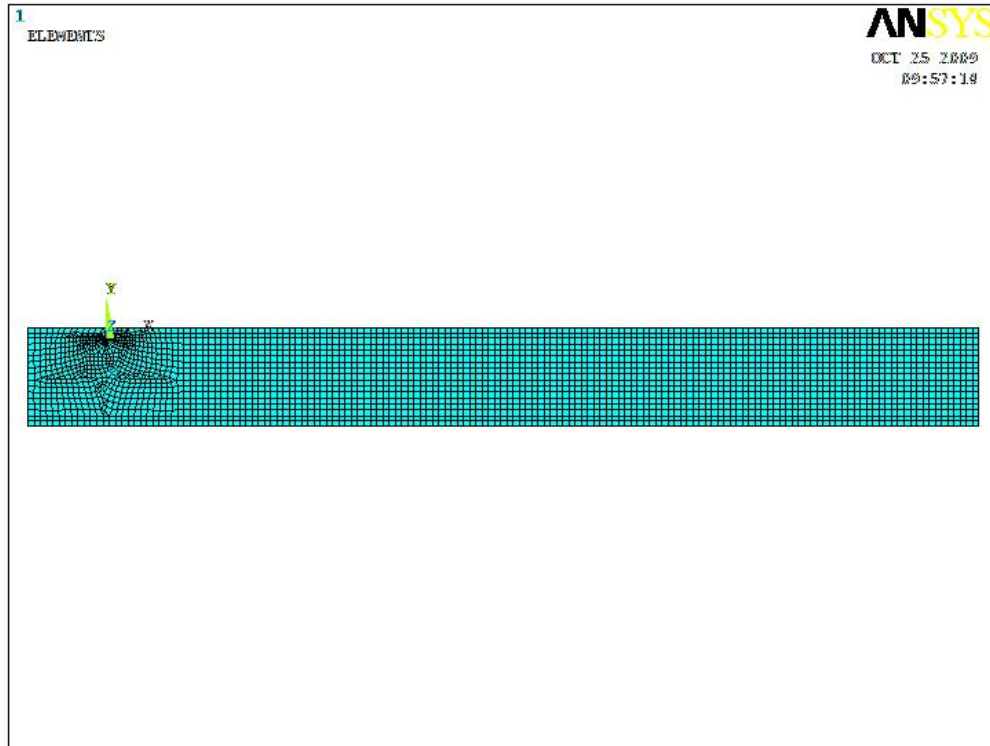
[Main Menu> Preprocessor> Modeling> Meshing> Size Cntrl> Concenrats KPs]



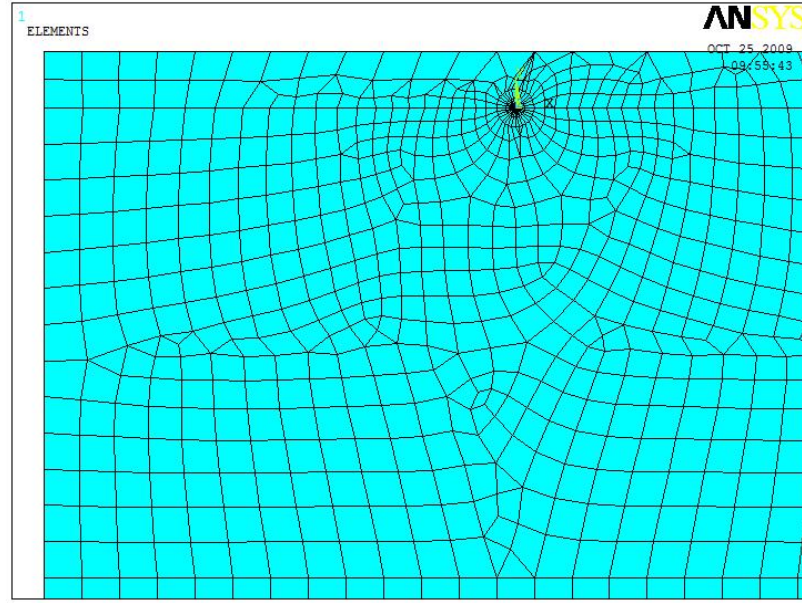
Şekil 3.17 Çatlak ucunun yoğunlaştırılması

[Main Menu> Preprocessor> Modeling> Meshing> Mesh > Areas > Free > Pick All]

Komutu ile Meshing işlemimizi sonlandırıyoruz. Yoğunluğun seçilen nokta etrafında olduğuna dikkat edelim.



Şekil 3.18 Mesh edilmiş model

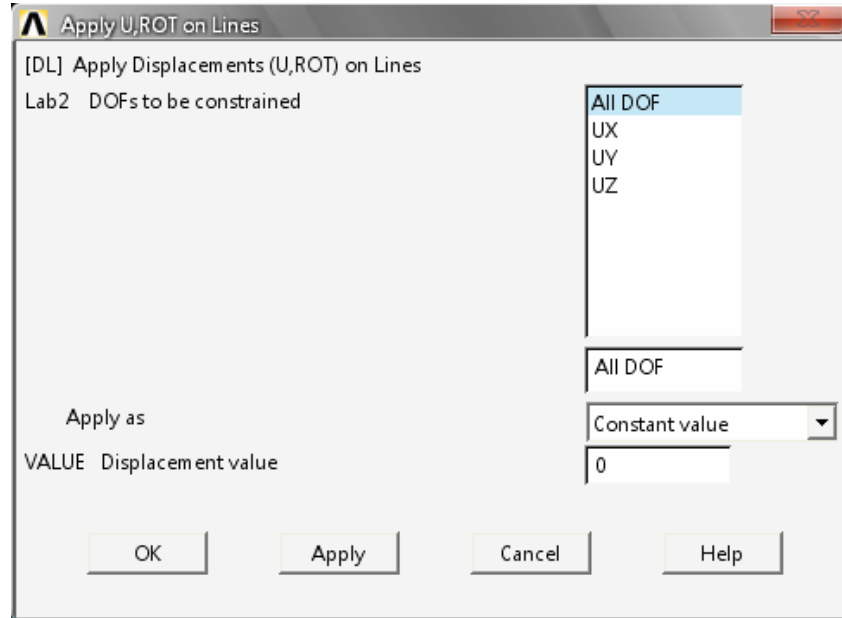


Şekil 3.19 Çatlak ucu

3.3.10 Sınır Şartlarının Girilmesi

Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes

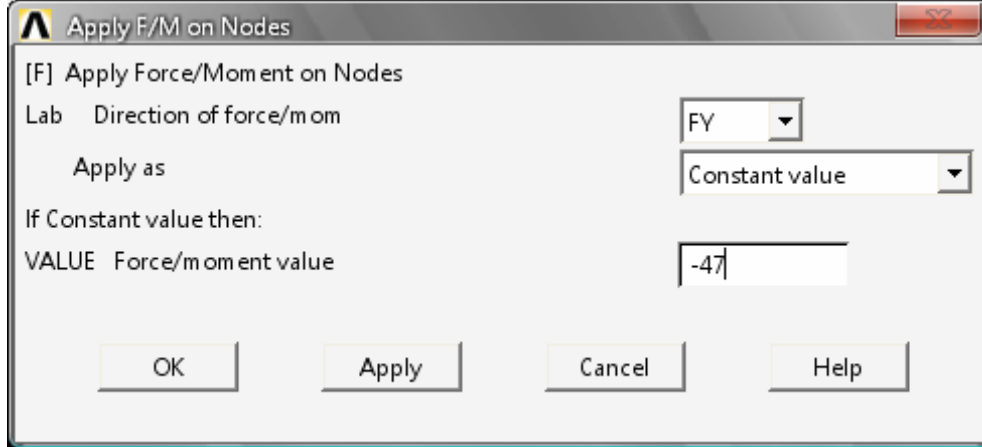
Seçeneği ile açılan pencerede mesnet noktalarının bulunduğu çizgiler seçilir ve sınır şartları uygulanır.



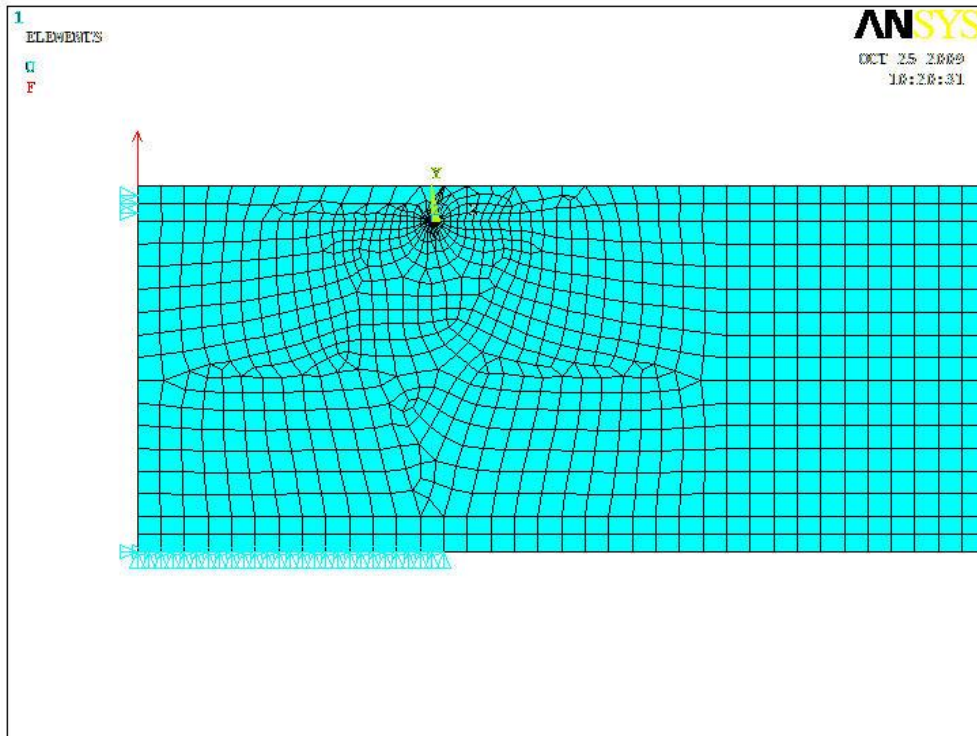
Şekil 3.20 Sınır şartlarının uygulanması

3.3.11 Yükün Uygulanması

Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes seçeneği ile açılan pencereye yük girilir.



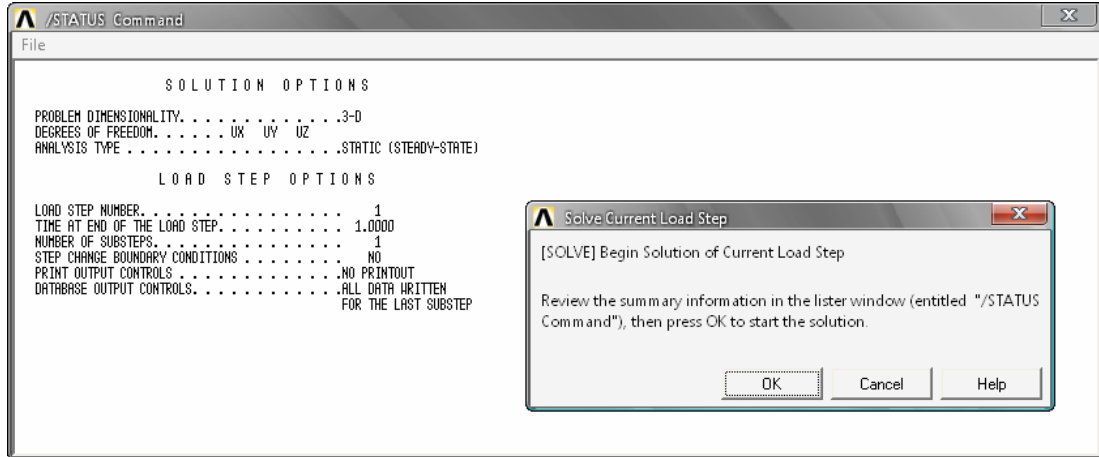
Şekil 3.21 Yükün uygulanması



Şekil 3.22 Sınır şartları uygulanmış model

3.3.12 Çözümün Başlatılması

Main Menu > Solution > Solve > Current LS seçeneği ile çözüm başlatılır.

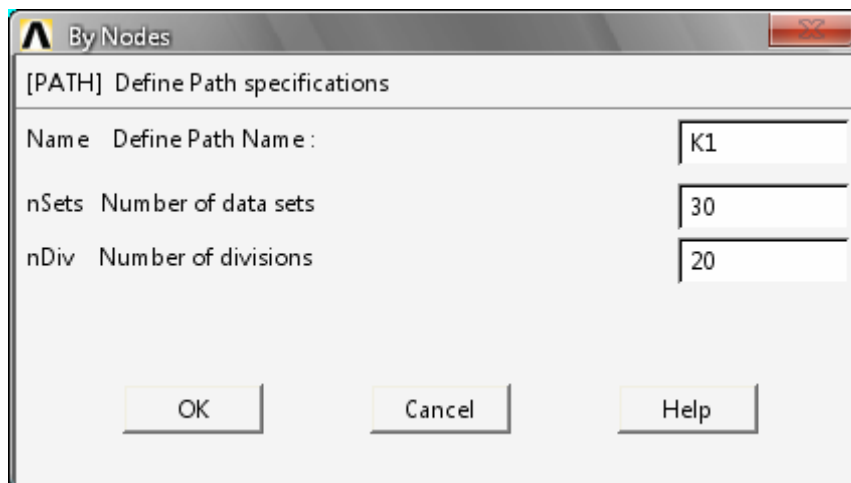


Şekil 3.23 Çözümün başlatılması

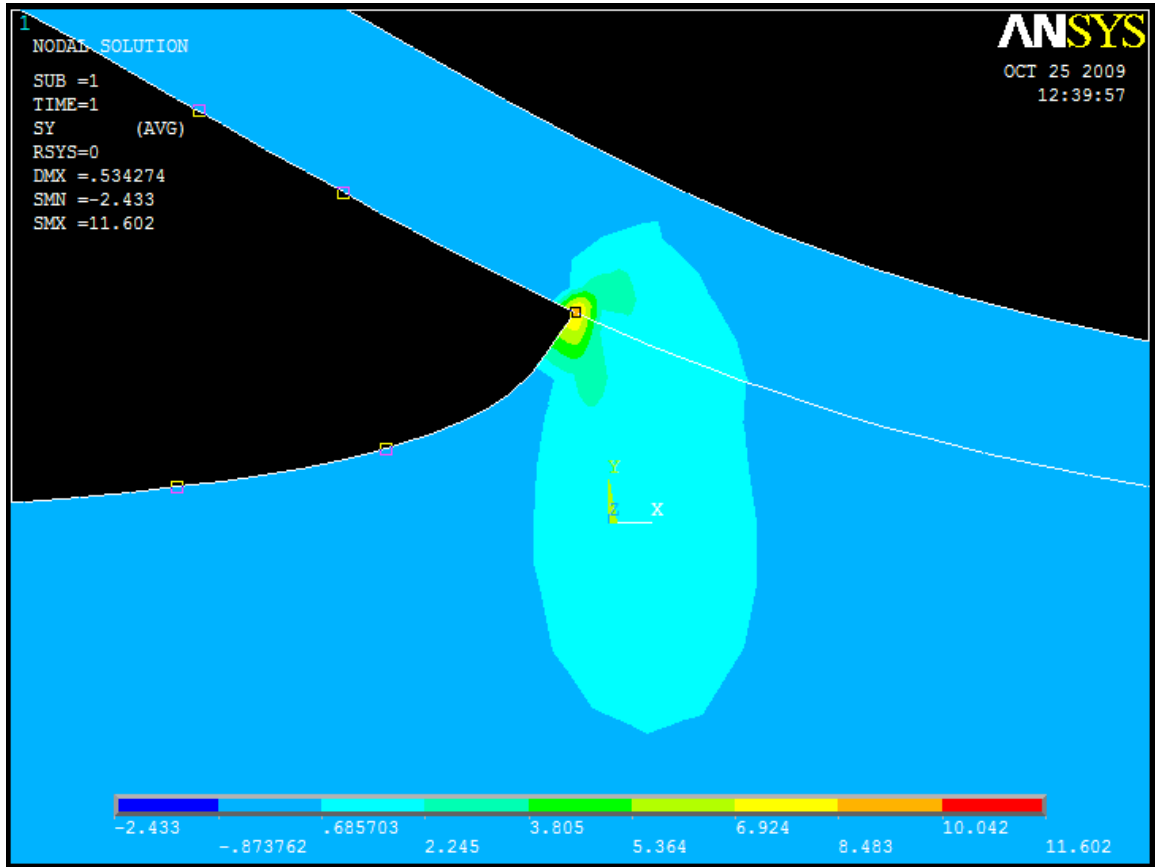
3.3.13 Çatlak Yüzey Yolunun Tanımlanması

Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes seçeneğinin ardından simetri özelliğinin kullanılmadığı modelde beş adet düğüm noktası belirlenir.

Seçilen ilk düğüm noktası çatlak ucunda olup, geri kalan diğer dört düğüm noktasının ikisi çatlak kenarının sol yüzeyi üzerinde, kalan ikisi de sağ yüzeyi üzerinde seçilir.



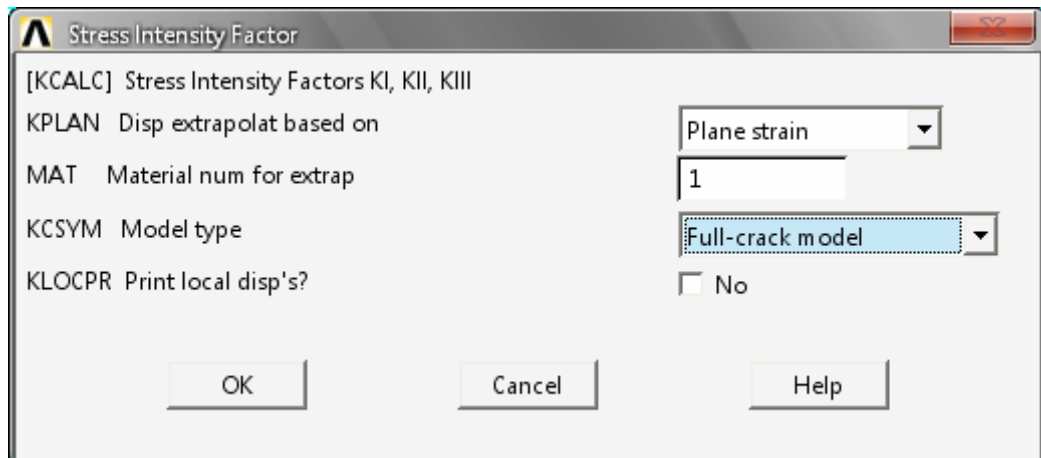
Şekil 3.24 Çatlak yüzey yolu tanımlanması



Şekil 3.25 Çatlak yüzey yolu düğüm noktaları

3.3.14 Gerilme Şiddet Faktörü Değerinin Bulunması (K_{IC})

Main Menu > General Postprocessor > Nodal Calcs > Stress Int. Factr seçeneği ile açılan pencerede düzlem deformasyon durumu seçilir ve gerilme şiddet faktörü değeri okunur.



Şekil 3.26 Gerilme şiddet faktörü değerinin ansys'te bulunması

BÖLÜM DÖRT

SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI (ANSYS İLE)

4.1 Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları

4.1.1 PVC Sandviç Malzemesi Deneysel Sonuçları

Test edilecek sandwich PVC köpük çekirdek malzemesinin yoğunluğu 80 – 200 kg/m³ aralığında değişmektedir. PVC köpük çekirdek malzemeleri için kabuk malzemesi olarak E-Cam / Vinilester kullanılacaktır. 100 kg/m³ Carbon/Epoksi kabuk malzemesine sahip bir PVC çekirdek malzemesinde arayüzey kırılma tokluğu değerinin yüzey malzemesinden bağımsız olduğunu göstermek için modellenmiştir.

Tablo 4.1 Kırılma için uygulanan yükleme değerleri

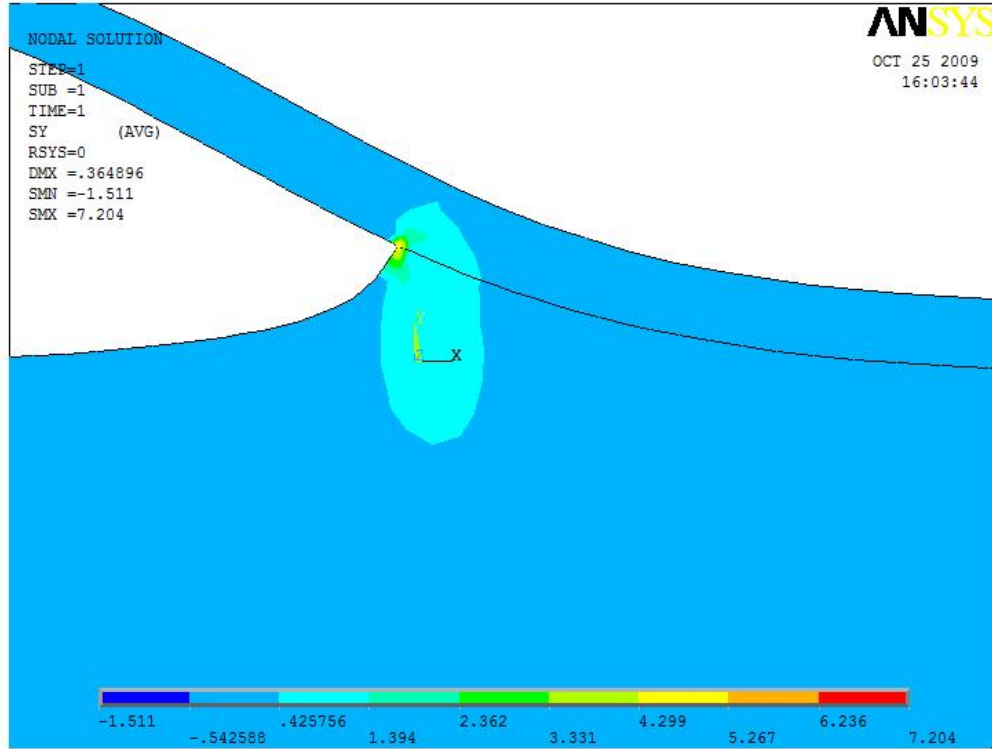
Panel	Uygulanan Kuvvet, N
H80/G	151.97
H100/G	244.74
H100/C	294.25
H130/G	300.10
H200/G	352.34

Tablo 4.2 PVC sandviç malzemenin deneysel kırılma tokluğu değerleri

Kırılma Tokluğu (G _c) Deneysel Sonuçları	
Sandviç Malzeme (Çekirdek Yoğunluğu kg/m ³)	Ortalama J/m ²
H80/G (80)	367.33
H100/G (100)	557.53
H100/C (100)	565.42
H130/G (130)	877.70
H200/G (200)	1349.75

4.1.2 PVC Sandviç Malzemesi Sayısal Analiz Sonuçları

4.1.2.1 H80 / G Sandviç Kompozit Malzemesi



Şekil 4.1 – H80 / G sandviç kompozitin şekil değiştirmesi

Tablo 4.3 H80/G gerilme şiddeti faktörü sonuçları

```

**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****

ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS

ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)

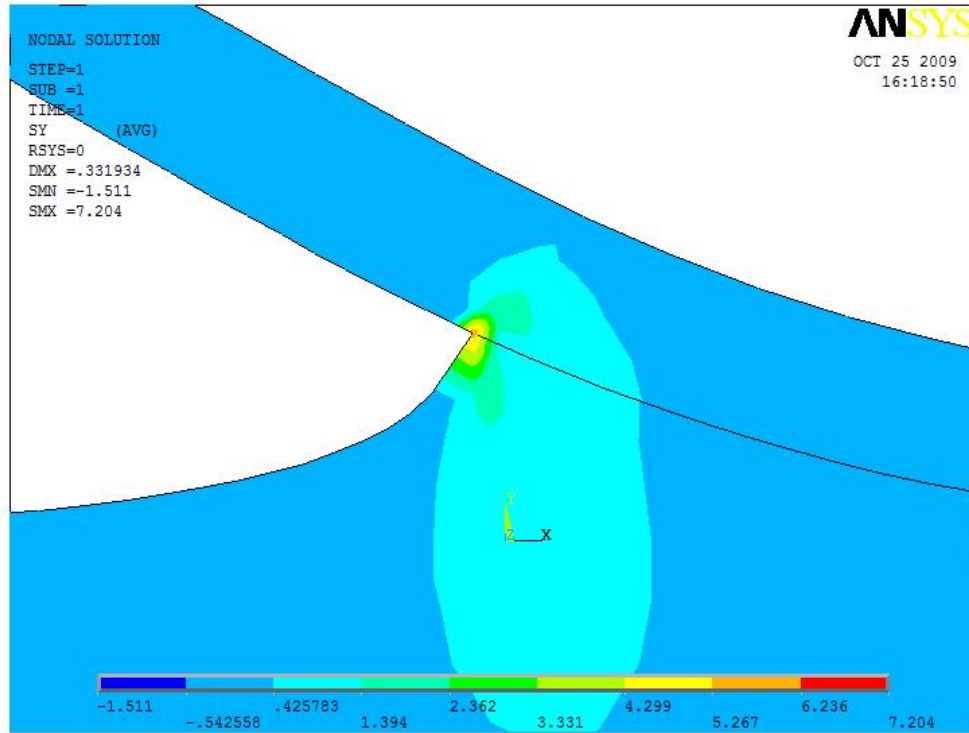
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:  7046  8879  8889  7057  7069
WITH NODE  7046 AS THE CRACK-TIP NODE

USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER  2
EX =  23000.  NUXY =  0.11000  AT TEMP =  0.0000

**** KI =  303.46  , KII =  52.758  , KIII =  0.0000  ****

```

4.1.2.2 H100 / G Sandviç Kompozit Malzemesi



Şekil 4.2 – H100 / G sandviç kompozitin şekil değıştirmesi

Tablo 4.4 H100/G gerilme şiddeti faktörü sonuçları

```

**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****

ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS

ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)

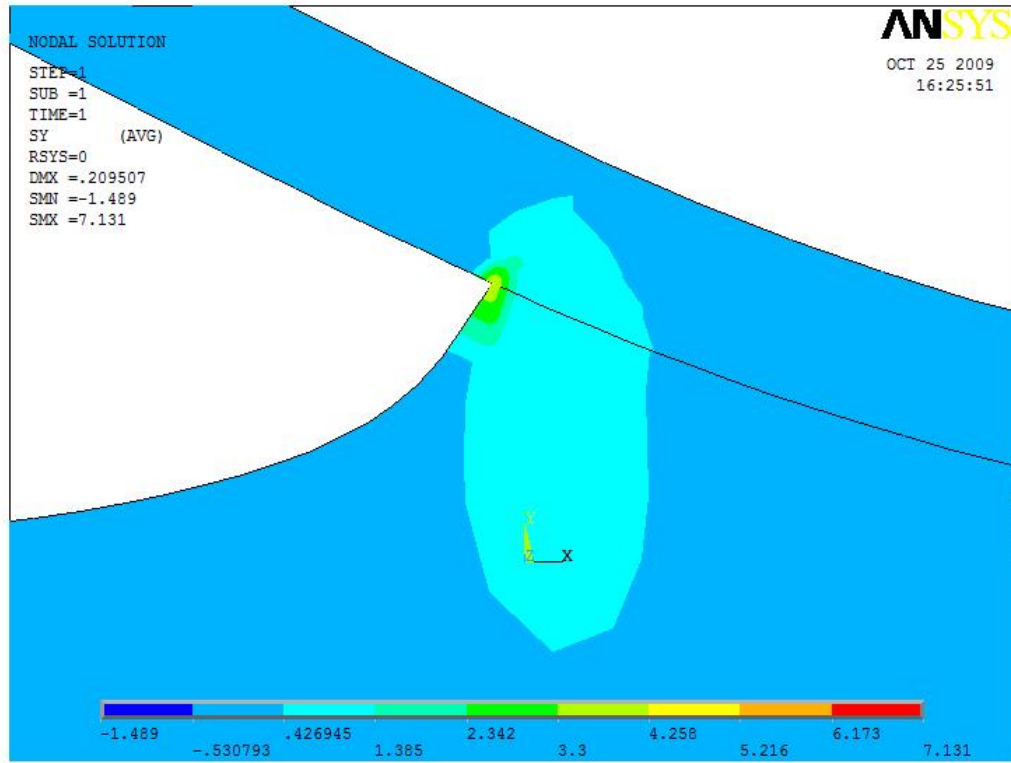
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:  7046  8880  8890  7059  7069
WITH NODE  7046 AS THE CRACK-TIP NODE

USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER  2
EX =  23000.  NUXY =  0.11000  AT TEMP =  0.0000

**** KI =  359.24  , KII =  30.084  , KIII =  0.0000  ****

```

4.1.2.3 H100 / C Sandviç Kompozit Malzemesi

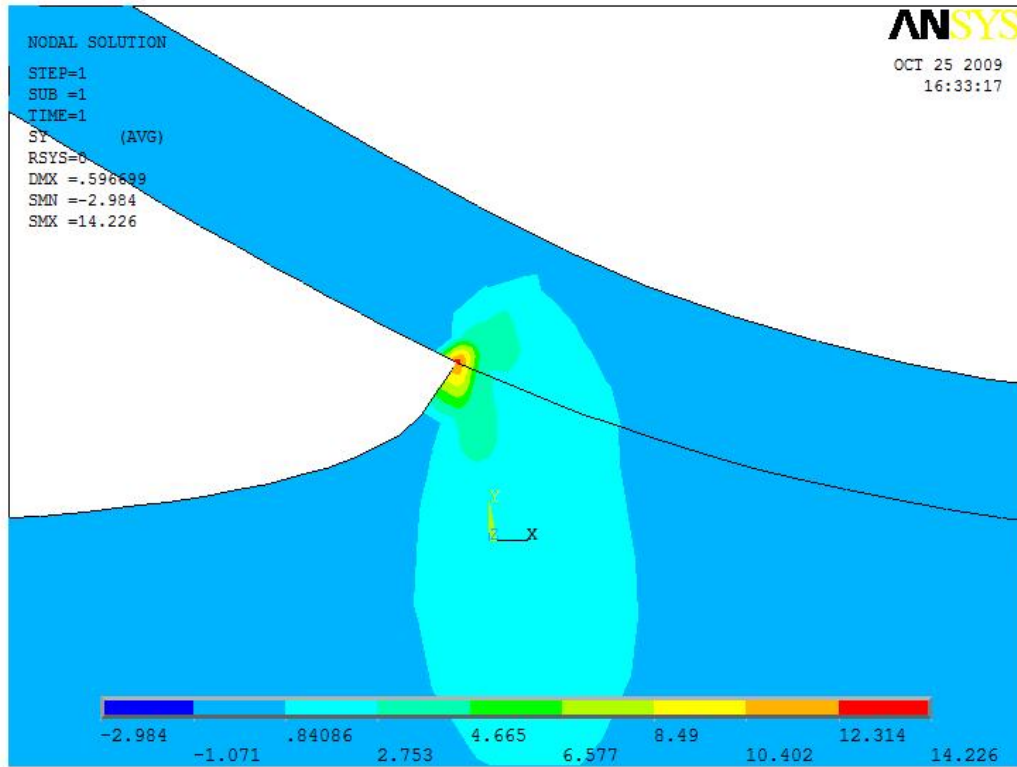


Şekil 4.3 – H100 / C sandviç kompozitin şekil değişmesi

Tablo 4.5 H100/C gerilme şiddeti faktörü sonuçları

<pre> **** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS **** ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES) EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES: 7046 8880 8887 7054 7063 WITH NODE 7046 AS THE CRACK-TIP NODE USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER 2 EX = 47500. NUXY = 0.40000E-01 AT TEMP = 0.0000 **** KI = 524.63 , KII = 100.75 , KIII = 0.0000 **** </pre>
--

4.1.2.4 H130 / G Sandviç Kompozit Malzemesi



Şekil 4.4 – H130 / G sandviç kompozitin şekil değiştirmesi

Tablo 4.6 H130 / G gerilme şiddeti faktörü sonuçları

```

**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****

ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS

ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)

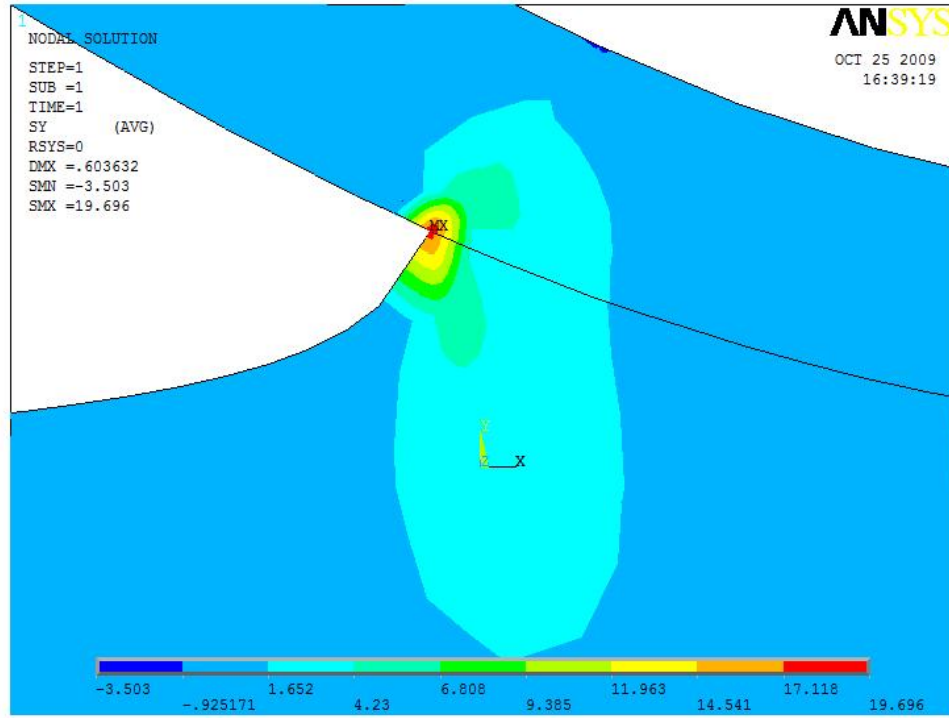
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:  7046  8876  8888  7060  7072
WITH NODE  7046 AS THE CRACK-TIP NODE

USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER  2
EX =  23000.  NUXY =  0.11000  AT TEMP =  0.0000

**** KI =  452.17  , KII =  26.332  , KIII =  0.0000  ****

```

4.1.2.5 H200 / G Sandviç Kompozit Malzemesi



Şekil 4.5 – H200 / G sandviç kompozitin şekil değiştirmesi

Tablo 4.7 H200 / G gerilme şiddeti faktörü sonuçları

```

**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****

ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS

ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)

EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:  7046  8877  8885  7058  7068
WITH NODE  7046 AS THE CRACK-TIP NODE

USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER  2
EX = 23000.  NUXY = 0.11000  AT TEMP = 0.0000

**** KI = 561.48  , KII = 9.9094  , KIII = 0.0000  ****

```


4.1.3 Balsa Sandviç Malzemesi Deneysel Sonuçları

Test edilecek sandwich Balsa çekirdek yoğunluğu 90 ve 155 kg/m³ lük iki farklı yoğunluk kullanılacaktır. Balsa çekirdek malzemeleri kabuk malzemesi olarak E-Cam / Vinilester kullanılacaktır.

Tablo 4.8 Kırılma için uygulanan yükleme değerleri

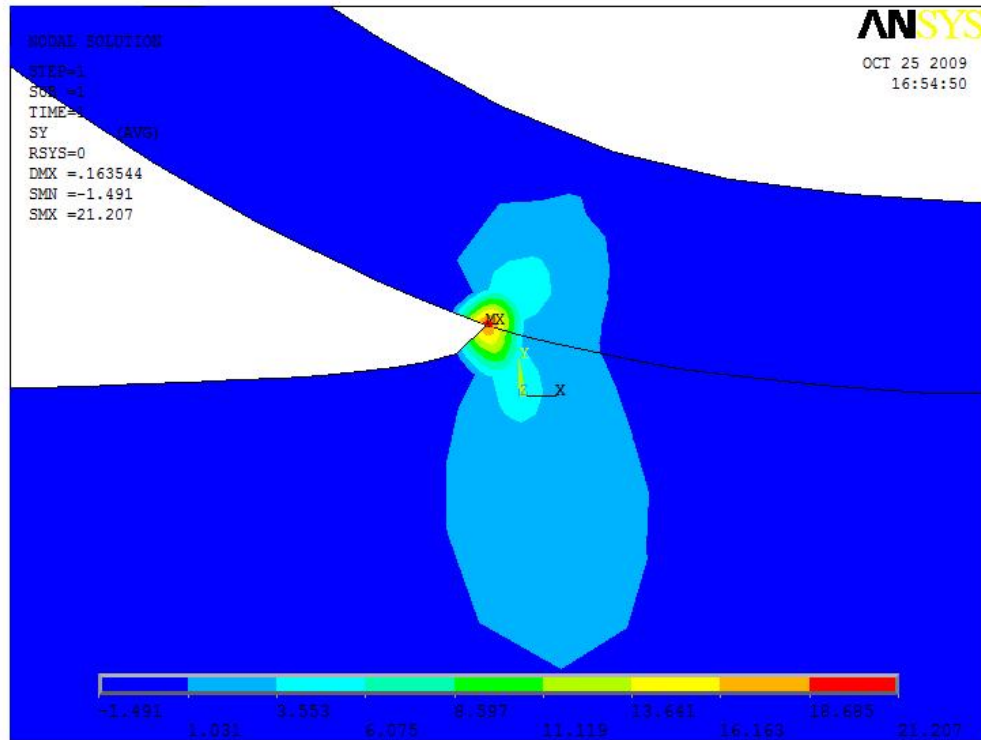
Panel	Uygulanan Kuvvet, N
LD7 (D57)	151.97
PB (D100)	352.34

Tablo 4.9 Balsa sandviç malzemenin deneysel kırılma tokluğu değerleri

Kırılma Tokluğu (G _c) Deneysel Sonuçları	
Sandviç Malzeme (Çekirdek Yoğunluğu kg/m ³)	Ortalama J/m ²
LD7 (D57)	693.15
PB (D100)	1008.07

4.1.4 Balsa Sandviç Malzemesi Sayısal Analiz Sonuçları

4.1.4.1 D57 / G Sandviç Kompozit Malzemesi



Şekil 4.6 – D57 / G sandviç kompozitin şekil değiştirmesi

Tablo 4.10 D57 / G gerilme şiddeti faktörü sonuçları

```

**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****

ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS

ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)

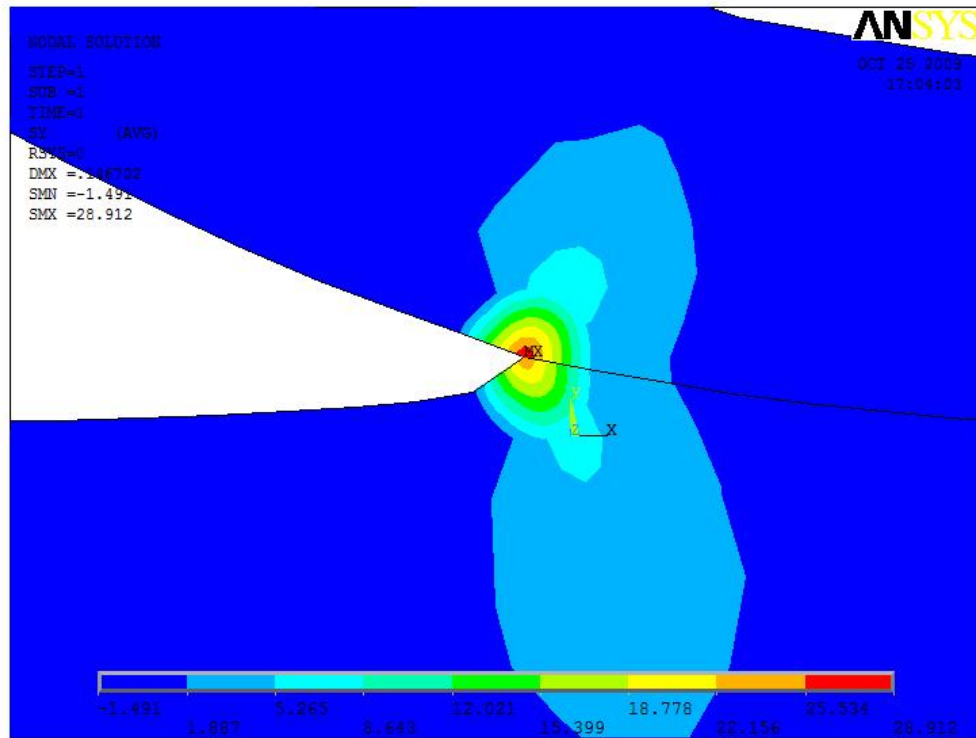
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:  7046  8877  8885  7058  7068
WITH NODE  7046 AS THE CRACK-TIP NODE

USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER  2
EX =  23000.  NUXY =  0.11000  AT TEMP =  0.0000

**** KI =  404.51  , KII =  9.9094  , KIII =  0.0000  ****

```

4.1.4.2 D100 / G Sandviç Kompozit Malzemesi



Şekil 4.7 – D100 / G sandviç kompozitin şekil değiştirmesi

Tablo 4.11 D100 / G gerilme şiddeti faktörü sonuçları

<pre> **** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS **** ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES) EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES: 7046 8877 8885 7058 7068 WITH NODE 7046 AS THE CRACK-TIP NODE USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER 2 EX = 23000. NUXY = 0.11000 AT TEMP = 0.0000 **** KI = 491.24 , KII = 9.9094 , KIII = 0.0000 **** </pre>

4.2 Sayısal Analiz Sonuçlarına Göre (G_c) Kırılma tokluğunun Hesaplanması

Tablo 4.12 Gerilme şiddeti faktörü değerleri

Gerilme Şiddeti Faktörü (K_{IC})	
Sandviç Malzeme	$N/mm^{3/2}$
H80/G	303,46
H100/G	359,24
H100/C	524,63
H130/G	452,17
H200/G	561,48
LD7 (D57)	404,51
PB (D100)	491,24

Analiz sonucunda bulunan gerilme şiddeti faktörleri Denklem (19) kullanılarak, açığa çıkan şekil değiştirme enerjisi oranı (Kırılma tokluğu değeri G_c) bulunur.

Tablo 4.13 Kırılma tokluğu değerleri

Kırılma Tokluğu (G_c) Değerlerinin Sayısal Analiz Sonuçları	
Sandviç Malzeme	$G_c (J/m^2)$
H80/G	400,38
H100/G	561,10
H100/C	579,44
H130/G	888,94
H200/G	1370,69
LD7 (D57)	711,42
PB (D100)	1049,20

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu tez kapsamında, Shivakumar tarafından deneysel metotla kırılma tokluğu değerleri elde edilen farklı yoğunluklardaki farklı çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozit malzemelerin nümerik olarak ansys ile simülasyonu yapılmıştır. Modelleme deneyde de kullanılan geliştirilmiş Mode I CSB testi kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 5.1.'de farklı yoğunluklardaki Balsa ve PVC sandviç kompozit malzemelere ait ANSYS yazılımı ile belirlenen kırılma tokluğu değerleri verilmiş ve bu değerler deneysel metotla belirlenen değerlerle karşılaştırılmış, doğruluk oranları sonuçların hemen altında verilmiştir.

Tablo 5.1.'den elde edilen verilerle ANSYS yazılımının güvenilirliği ve kırılma mekaniği analizleri için uygunluğu açıkça görülse de mesh yoğunluğunun sonuçları etkilediği gerçeği de göz ardı edilmemelidir. ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan kırılma mekaniği analizleri, deneysel metotla elde edilen sonuçlarla desteklenmelidir.

Tablo 5.1.'den de görüldüğü gibi kırılma tokluğu değeri çekirdek malzeme yoğunluğuna bağlıdır. PVC köpük malzemenin arayüzey kırılma tokluğu değeri, yalnız çekirdek malzeme kırılma tokluğu değerinden belirgin bir şekilde yüksektir.

Tablodan görüldüğü gibi kırılma tokluğu değeri yüzey malzemesinden bağımsız fakat çekirdek malzemesinin yoğunluğuyla doğru orantılıdır.

Tablo 5.1 Kırılma tokluğu değerlerinin karşılaştırılması

Kırılma Tokluğu (G_C) Değerlerinin Karşılaştırılması		
Sandviç Malzeme	DeneySEL Olarak Belirlenen G_C (J/m^2)	Ansys ile hesaplanan G_C (J/m^2) (% Doğruluk)
H80/G	367.33	400,38 (%8,99)
H100/G	557.53	561,10 (%0,64)
H100/C	565.42	579,44 (%2,47)
H130/G	877.70	888,94 (%1,28)
H200/G	1349.75	1370,69 (%1,55)
LD7 (D57)	693.15	711,42 (%2,63)
PB (D100)	1008.07	1049,20 (%4,08)

KAYNAKLAR

- Aran A. (1981). *Kırılma mekaniğine giriş – seminer notları*. Gebze : Tübitak MAM.
- Carlsson L.A., Sendlein L.S., Merry S.L. (1991). Characterization of face sheet/core shear fracture of composite sandwich beams, *Journal of Composites Materials*, (25), 101-116.
- Koçhan C., Özes Ç., Neşer G. (2008). *Pvc/cam takviyeli plastik sandviç sistemlerin kırılma tokluğu denizel çevrenin etkisinin deneysel olarak saptanması incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Kolat K. (2005). *Farklı ortamların sandwich kompozitlerin kırılma tokluğu üzerindeki etkisi*. Yüksek lisans tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Mallick P.K. (1997). *Composite engineering handbook (11thed.)*. NY: Marcel Dekker Inc.
- Shivakumar, K.N., & Smith S.A. (2004). In situ fracture toughness testing of core materials in sandwich panels. *Journal of composite materials*, 38 (8),655-668.
- Shivakumar K.N., Chen H., Smith S.T. (2005). An evaluation of data reduction methods for opening mode fracture toughness of sandwich panels, *Journal of Sandwich Struct Materials*, (7), 77-90.
- Smith, A. (2002). *Fracture testing of sandwich materials*. Eylül 20, 2004. <http://www.ncat.edu/~sasmith/C3.pdf>

Smith S.A. & Shivakumar K.N. (2000). Evaluation of the interfacial fracture toughness of vartm sandwich panels using the mode-I cracked sandwich beam specimen, *Center for Composite Materials Research*, Department of Mechanical Engineering North Carolina A&T State University Greensboro, NC.