

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANDVIÇ KOMPOZİT PLAKLARDA BAĞLANTI
NOKTALARININ HASAR ANALİZİ

Alper BASMACI

Ekim, 2011

İZMİR

SANDVIÇ KOMPOZİT PLAKLARDA BAĞLANTI NOKTALARININ HASAR ANALİZİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı

Alper BASMACI

Ekim, 2011

İZMİR

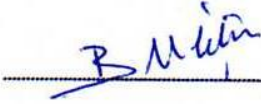
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ALPER BASMACI, tarafından DOÇ. DR. CEM ATAS yönetiminde hazırlanan
“SANDVIÇ KOMPOZİT PLAKLARDA BAĞLANTI NOKTALARININ
HASAR ANALİZİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği
açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Cem ATAS

Yönetici



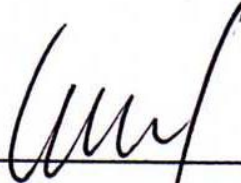
Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN

Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Mehmet SAKMANAR

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum Yüksek Lisans tezimde bana rehberlik eden, desteğini ve anlayışını esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Cesim ATAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmada yardımını eksik etmeyen ve tecrübelerini paylaşan Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN'e ve Arş. Gör. Dr. Yusuf ARMAN'a ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmamda beni yalnız bırakmayan kardeşim Gülper BASMACI'ya ve emeği geçen diğer herkese teşekkür ederim.

Son olarak, aileme gösterdikleri anlayış ve manevi destekleri için çok teşekkür ederim.

Alper BASMACI

SANDVİÇ KOMPOZİT PLAKLARDA BAĞLANTI NOKTALARININ HASAR ANALİZİ

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, cam elyaf takviyeli sandviç kompozit plaklarda pimli bağlantıların hasar mekanizmasının deneysel olarak incelenmesidir. Deney esnasında kullanılan sandviç kompozit numuneler, vakum destekli reçine infüzyon sistemi kullanılarak Dokuz Eylül Üniversitesi Kompozit Araştırma Laboratuvarı'nda üretilmiştir. Deney için Shimadzu AG-X marka çekme test cihazı kullanılmıştır.

Öncelikle dolgusuz pimli bağlantıya sahip numuneler üretilmiş ve çekme deneyleri yapılmıştır. Ardından çeşitli geometrik parametrelere sahip pim etrafı elyaf-reçine dolgulu numuneler üretilmiş ve çekme deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle ve uygun parametreler temel alınarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar tartışılmış, dolguların hasar mekanizmalarına etkisi hakkında faydalı sonuçlara ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: sandviç kompozit plaklar, pimli bağlantı, infüzyon, hasar analizi, vakum destekli reçine infüzyonu

DAMAGE ANALYSIS OF THE JOINTS IN SANDWICH COMPOSITE PLATES

ABSTRACT

The aim of this study was to examine the pin joints failure mechanism of sandwich composites reinforced with glass fibers and epoxy resin. The specimens used in experiments were manufactured by vacuum assisted resin infusion molding method in Composite Research Laboratory at Dokuz Eylül University. Shimadzu AG-X brand tensile testing machine used in the experiments.

Firstly the unfilled specimens with pinned joints were manufactured and tensile experiments were done. Secondly the specimens reinforced with glass/epoxy filling around the pin hole for various geometric parameters were manufactured and then tensile experiments were done. The results obtained are compared with each other based on appropriate parameters. The results are discussed, and useful conclusions are noted regarding effect of fillings on the damage mechanisms.

Keywords: sandwich composite laminates, pinned joint, damage analysis, infusion, vacuum assisted resin infusion.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT	v

BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
--------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ – KOMPOZİT YAPILARDAKİ BAĞLANTILAR.....	12
--	-----------

2.1 Giriş	12
2.2 Kompozitlerde Mekanik Bağlantılar ile Yapıştırılmalı Bağlantıların Karşılaştırılması.....	14
2.3 Kompozit Yapılarda Bağlantıların Tasarım Kriterleri	16
2.4 Bağlantılarda Hasar Tipleri	17
2.4.1 Takviye Açılarının Etkisi	18
2.4.2 Delik Çapı – Genişlik (W/D) Oranı Etkisi	18
2.4.3 Kenar Mesafesi – Delik Çapı (E/D) Oranı Etkisi	19
2.4.4 Civata Ön Gerilme Miktarı Etkisi	19
2.4.5 Pim-Delik Toleransı Etkisi	19
2.4.6 Tek Kesme Kuvveti Etkisi	19

BÖLÜM ÜÇ – SANDVIÇ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ	21
--	-----------

3.1 Kompozit Üretim Tezgahı	21
3.2 Üretimde Kullanılan Malzemeler ve Fonksiyonları	24
3.3 Üretim Aşamaları	24

BÖLÜM DÖRT - DENEY DETAYLARI VE SONUÇLARI 47

4.1 Giriş	29
4.2 Problemin Belirlenmesi	29
4.3 Numunelerin Hazırlanması ve Deney Prosedürü	30

**BÖLÜM BEŞ - DENEY SONUÇLAR: KARŞILAŞTIRMA VE
YORUMLAR..... 38**

5.1 Dolgusuz Deney Grupları.....	38
5.2 Dolgulu Deney Grupları	41
5.3 Deney Sonuçları ve Parametrelerin Karşılaştırılması.....	54
5.3.1 Dolgu Konsantrasyonu Değişiminin Etkileri	54
5.3.2 Kenar-Delik Arası Mesafesinin (E) Değişiminin Etkileri	63
5.3.3 Dolgu Çapı (D) Değişiminin Etkileri	72

BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR 78

KAYNAKLAR..... 80

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Kompozit malzemeler klasik malzemelere oranla sahip oldukları hafiflik, yüksek dayanım/ağırlık oranı, kolay onarılabilmek, boyutsal kararlılık, yüksek ısı ve kimyasal direnç ve nispeten kolay üretim gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır.

Kompozit malzemelerin metallere göre önemli avantajlarının bulunmasının yanı sıra bazı dezavantajları da mevcuttur. Kompozit malzemeler metallere göre çok daha kırılgan (gevrek) bir yapıya sahiptirler ve plastik deformasyon meydana gelmez. Dolayısıyla kompozit yapılarda ani hasarlar olabilir. Metaller ise sünek yapıya sahip olduklarından, yükleme altında plastik deformasyon meydana gelebilir. Metallerdeki kırılma olayı belli süreçleri gerektirdiği için kırılmadan önce gerekli önlemlerin alınma şansı vardır. Bu duruma ek olarak kompozit malzemelerin, gerilme yığılmalarındaki davranışları da metallere oranla çok daha farklıdır. Bunun sebebi kompozit malzemelerin anizotropik ve kırılgan olmalarıdır. Yukarıda belirtilen durumlardan dolayı kompozit yapıların tasarımı metallerden oluşan yapıların tasarımına göre oldukça karmaşıktır ve detaylı çalışma gerektirmektedir.

Mukavemet ve dayanım gereksinimleri nedeniyle uygulamalarda başka bir kompozite veya metale bağlantılar yapmak gerekmektedir. Kompozit yapılar yapıştırma veya mekanik bağlantı şeklinde bir araya getirilmektedirler. Mekanik bağlantının yapıştırmaya göre çeşitli avantajları vardır. Yapının demontajına imkân vermesi ve yapıyı oluşturan elemanlardan herhangi biri kolaylıkla değiştirilebilmesi bu avantajlarından biridir. Yapıştırma yöntemi ile bir araya getirilen yapılarda elemanların değiştirilme işlemi çok zordur. Ayrıca, mekanik bağlantılı yapılarda, civata delikleri gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır. Gerilme yığılmaları kompozit yapının mukavemetini önemli ölçüde zayıflatmaktadır. Çünkü gevrek yapıdaki kompozit malzemelerde gerilme yığılmalarının olduğu bölgede çatlaklar oluşmaktadır. Yükleme arttırıldıkça bu çatlaklar levhanın kenarlarına doğru hızla ilerler ve kırılmaya sebep olur. Metaller ise sünek yapıda olduklarından, gerilme yığılmaları lokal plastik deformasyonlara sebep olmaktadır. Dolayısıyla statik yüklemelerde metaller için gerilme yığılmaları genellikle dikkate alınmaz. Mekanik

bağlantılı kompozit yapılarıdaki hasar şekilleri şunlardır: Pim kırılması, pimli bağlantı yüzeyine uyguladığı temastan dolayı kompozit levhada meydana gelen ezilme, yırtılma, net kopma ve tabakalar arasında oluşan delaminasyondur.

Mekanik bağlantılar, yapısal kompozitler arasındaki yük aktarımını sağlayan ana elemanlar olma özelliğini sürdürmektedir. Çalışma yükünün artması ile dolaylı olarak mekanik bağlantıların taşıdıkları yük miktarı da artmaktadır. Bu durum bağlantılarda hasar meydana gelme olasılığını artırır. Bağlantı elemanı ile kompozit malzeme arasında sürtünmeden meydana gelen gerilme ve sürtünme yüzey alanının tam olarak tespit edilememesinden dolayı pimli bağlantılardaki analizler, diğer bağlantı türlerine göre daha karmaşıktır. Delik çevresinde meydana gelen gerilmelerin tutarlı biçimde tahmin edilmesi, güvenilir mukavemet hesaplarının ve hasar tahminlerinin yapılması için çok önemlidir. Kötü tasarlanmış mekanik bağlantı sistemi nedeniyle kompozit malzeme dayanımı çok yüksek dahi olsa, yük taşıma kapasite düşmektedir. Bu sebepten ötürü mekanik bağlantılar, özellikle pimli bağlantılar üzerine birçok araştırma ve çalışma yapılmıştır.

İçten ve Sayman (2003) pim bağlantılı alüminyum-cam epoksi sandviç kompozit plakalarda hasar analizi yapmışlardır. Kompozit plakada kritik kırılma yükü ve kırılma modunun tespit edilmesi için pim yanal kesme kuvvetine maruz bırakılmış ve bağlantı geometrisinin ve elyaf oryantasyonunun kritik kırılma yüküne etkilerinin tespiti için parametrik çalışmalar deneysel olarak yapmışlardır. Deliğin numunenin kenarına göre konumu ile çapının oranı (E/D) ve numunenin eninin deliğin çapına oranı (W/D), plakada sırasıyla 1'den 5'e ve 2'den 5'e değiştirilmiştir. Deneysel çalışmalar göstermiştir ki ilk kırılma yükü ve kritik kırılma yükü E/D ve W/D değişkenleri arttırılınca artmıştır. İçten ve arkadaşları (2005) daha sonra aynı çalışmayı örülmüş kevlar ile güçlendirilmiş pim bağlantılı kompozitler üzerinde gerçekleştirmişlerdir.

İçten ve Karakuzu (2002), pim bağlantılı karbon/epoksi levhaların hasar modlarını incelemek üzere deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında örülmüş kompozit levhalar kullanılmıştır. Delik merkezinin plaka kenarına uzaklığı/delik çapı, (E/D) ve plaka genişliği/delik çapı, (W/D), oranlarının yapının mukavemetine

etkisi araştırılmıştır. Çekme testleri yapılarak kuvvet-pim yer değiştirmesi grafikleri elde edilmiş ve çalışmanın ikinci kısmında iki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Pim-delik yüzeyi arasında meydana gelen kuvvet, kosinüs dağılımı şeklinde delik yüzeyine uygulanmış ve düzlemsel gerilme analizleri yapılmıştır. Analizlerde Hoffman ve Hashin hasar kriterleri hasar ilerleme algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Ayrıca hasar durumuna göre malzeme özelliklerinde zayıflatma kuralları uygulanmıştır. Analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Dano ve arkadaşları (2000) mekanik bağlantılı kompozit plaklarda gerilme ve hasar analizi yapmışlardır. Bu çalışmada pim bağlantılı kompozitlerin davranışlarının öngörülmesi için bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada büyük deformasyon teorisi ve doğrusal olmayan kayma gerilme-uzama ilişkisini kabul etmişler ve sonlu elemanlar metoduyla elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Nümerik tahminler ile deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin tutarlı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Whitworth ve arkadaşları (2002) pim bağlantılı bir kompozitin hasar analizini yapmışlardır. Pim bağlantılı kompozitin kayma mukavemetinin tespiti için analizler yapmışlardır. Analizlerde Chang–Scott–Springer karakteristik eğrisini ve iki boyutlu sonlu elemanlar analiz metodunu kullanarak bağlantı deliğinin çevresindeki gerilme dağılımını tespit etmişlerdir. Bası ve çekideki karakteristik uzunlukları, nokta gerilme kriterinin ortasından çentikli bir plakaya çeki yüklemesi ve ortasında bir delik bulunan bir plaka bası yüklemesi yaparak tespit etmişlerdir. Yamada–Sun kırılma kriterini hasar analizinde temel almışlardır ve elde edilen değerlerin mevcut olan deneysel veriler ile uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir.

Aktaş ve arkadaşları (2009) pim bağlantılı kompozit malzemelerde deneysel ve nümerik hasar analizleri yapmışlardır. Tek ve çift paralel bağlı pimli bağlantılara sahip cam-epoksi kompozit plakalarda kırılma yükü ve kırılma modu analizini nümerik ve deneysel karşılaştırmalı olarak gerçekleştirmişlerdir. Analizler sırasında iki değişken belirlemişlerdir: Deliğin numune kenarına göre konumu ile çapının oranı (E/D) (2,3,4,5), numune eninin delik çapına oranı (W/D) (2,3,4,5). Nümerik

çalışmaları ANSYS sonlu elemanlar programı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kırılma kriteri olarak Yamada–Sun kırılma kriterini temel almışlardır. Buldukları sonuçlara göre numune kenarına en uzakta olan delik en yüksek kayma gerilmesine maruz kalmıştır. Nümerik tahminler ile deneysel sonuçların uyumluluğunu gözlemlemişlerdir.

Ahn ve arkadaşları (2005) kompozit plakalarda pimli bağlantı hasarı incelemişlerdir. Çalışmada bir uçak kontrol çubuğunun hasar analizlerini deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirmişlerdir. Pim deliği geometrisinin etkisinin araştırılması için dokuz ayrı geometri deneylere tabi tutulmuştur. Pim ve delik arası sürtünme de hesaba katılarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş, Tsai–Wu ve Yamada–Sun kırılma kriterleri kullanılarak karakteristik eğri önceden hesaplanmıştır. Çalışmalar sonunda Tsai–Wua kırılma kriterinin 0,1 sürtünme katsayısı değeri ile en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir.

Southward ve arkadaşları (2007) yapıştırılarak birleştirilen levha ve ara malzeme ile imal edilmiş sandviç kompozit malzemelerde hasar analizi yapmışlardır. Bunun için çekirdek yapısı bal peteği olan kompozit malzeme eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Testlerden önce yapılan nümerik araştırmalar ile deneyler karşılaştırılmış ve çeşitli tavsiyeler sunulmuştur.

Chang ve Chang (1987) ortası delikli kompozit levhalar için gerilme ve hasar analizleri yapmışlardır. İki boyutlu, düzlemsel gerilme ve ortotropik grafit/epoksi kompozit malzeme modelini incelemişlerdir. Kompozit malzemeler için sonlu eleman analizlerinde uygulanmak üzere hasar ilerleme modeli geliştirilmiş ve Yamada-Sun hasar kriteri kullanılmıştır. Matris çatlaması, matris-elyaf sıyrması ve elyaf kopması hasar modlarını incelemiştir. Yaptıkları sonlu eleman analiz sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Chang ve arkadaşları (1984), pimle bağlanmış kompozit levhaların hasar analizleri üzerine çalışmışlardır. Bir ve birden fazla pimle yüklenmiş kompozit levhalarda gerilme durumu incelenmiş ve kompozit levhadaki gerilme dağılımı sonlu eleman metodu kullanılarak hesaplanmış, maksimum yük ve hasar şekli önerilen hasar hipotezi ve Yamada-Sun hasar kriteri ile tanımlanmıştır. Çalışmalarında

T300/1034-C grafit/epoksi kompozit malzeme kullanarak iki boyutlu gerilme analizi yapmışlardır.

Chang ve arkadaşları (1991), ortasında delik bulunan ve çekme kuvvetine maruz kalan tabakalı kompozit levhalarda hasar şekillerini ve toleranslarını inceleyerek, deneysel ve nümerik çalışmalar yapmışlardır.

Jurf ve Vinson (1990), civata bağlantılı kevlar/epoksi ve grafit/epoksi malzemelerin hasar analizleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, hem klasik laminasyon teorisi kullanarak analitik analizlere, hem de sonlu eleman analizlerine yer vermişlerdir. Sonlu eleman analizlerinde öncelikle sadece delikli kompozit levha için analizler yapmışlar ve sonuçları deneylerle karşılaştırmışlardır. Çalışmanın ikinci kısmında ise hem kompozit levha hem de pim modellemişlerdir.

Echavarria (2006), elastik ortotropik plakalarda pim üzerinden yüklenmiş deliklerin analitik incelemesini yapmıştır. Bu çalışma pim ile bağlanmış olan elastik ortotropik kompozit plakalarda gerilme konsantrasyon faktörünü belirleyen denklemleri elde etmek amacıyla yapmıştır. Kompleks gerilme fonksiyonları kullanılarak pim bağlantıları etrafındaki gerilme analitik olarak çözülmüştür.

Wang ve arkadaşları (1996), civata ve pim bağlantılı kompozit levhalarda ezilme hasar şekli üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmaları iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda deneysel çalışmalar yapılmış, ikinci kısımda ise bir sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Araştırmalarında T800/3900-2 grafit/epoksi malzeme kullanmışlardır. Bağlantı şeklinin, civata ve pim rijitliğinin, pul boyutunun ve civata ön gerilmesinin yatak mukavemetini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Deneylerde çeşitli tabaka yapılandırmaları, W/D ve E/D oranlarını kullanmışlar, parametrelerin sonuçları nasıl etkilediğini de incelemişlerdir. Çalışmada hem pim bağlantısı hem de civata bağlantısı ayrı ayrı incelenmiştir. Her iki durum için ayrı deneysel aparatlar geliştirmişlerdir. Farklı civata ön gerilmelerinin bağlantının mukavemetini nasıl etkilediği ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Çalışma sonucunda civata bağlantılı yapılarda kırılmanın adım adım ilerlediği, pim bağlantılı yapılarda ise kırılmanın birdenbire gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. İkinci olarak, ön gerilme arttıkça bağlantının mukavemetinin de arttığını gözlemlemişler.

Ireman ve arkadaşları (2000) mekanik bağlantılı kompozit plakalarda hasar gelişimini incelemişlerdir. Grafit-epoksi kompozit plakadaki deliğin civarındaki hasar gelişiminin ölçülmesi ve karakterize edilmesi için kapsamlı bir deney programı oluşturmuşlardır. Bu deney programı ile elde edilen verileri uygun bir kırılma kriterini geliştirmek için kullanmayı tasarlamışlardır.

Karakuzu ve arkadaşları (2007) iki seri pim bağlantısına sahip kompozit plakalarda hasar davranışlarını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada E/D, W/D ve iki delik arasındaki mesafe ile çap oranı (M/D) gibi geometrik parametrelerin iki adet seri pimle bağlı cam elyaf-vinilester kompozit plakaların hasar yüküne ve modlarına etkisini deneysel ve nümerik olarak tespit etmeye çalışmışlardır. Nümerik analizlerde hasar yükü ve modlarının tespiti için Hashin kırılma kriterini kullanmışlardır. Analizler sırasında LUSAS sonlu elemanlar bilgisayar programı kullanılmış, yapılan nümerik ve deneysel analizler sonucunda E/D, W/D, M/D oranlarının arttırılması ile hasar yükünün arttığını gözlemlemişlerdir.

Xiao (2005) pimli kompozit bağlantıların ezilme mukavemetini ve hasar davranışını incelemiştir. Temas etmeden ölçüm yapabilen özel bir cihazla veriler alınmıştır. Çekme testleri sırasında ezilme hasarları akustik emisyon ölçümü ile tespit etmeye çalışılmıştır. Birçok numuneyi X-ray ışınları ve SEM elektron mikroskopları altında incelemiştir. İncelemeler sonunda Xiao, ezilme hasarının 4 adımda gerçekleştiğini tespit etmiştir: Hasar başlangıcı, hasar büyümesi, lokal kırılma, yapının kırılması. Ezilme hasarlarının ana unsurlarını da belirlemiştir: elyaflardaki mikro eğilme, reçine tabakasının çatlaması, tabakaların ayrılması (delaminasyon), ve dış yüzey kesme kırılması. Ayrıca ezilme mukavemetinin reçinenin tokluk özelliğine bağlı olduğunu tespit etmiştir.

İçten ve arkadaşları (2003), pim bağlantılı örgülü cam-elyaf kompozit malzemelerdeki mekanik davranışları ve hasar ilerleyişini nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir.

Girard ve arkadaşları (2003), mekanik olarak bağlanmış olan karbon-elyaf kompozit levhalarda ezilme hasarlarını incelemişlerdir. Çalışmalarını iki kısma ayırmışlardır. Öncelikle, ön gerilme verilen civatadan dolayı meydana gelen delik

çevresindeki lokal gerilmeleri incelemişlerdir. Literatürde daha önce yapılan çalışmalar ile kendi çalışmalarını karşılaştırmışlardır. Deneyler sonucunda ezilme hasarına karşı hangi elyaf oryantasyonunun daha etkili olduğunu araştırmışlardır. İkinci kısımda ise yaptıkları çalışmadaki hasar mekanizmasını irdelenmişlerdir. Ön gerilme verilerek takılan civatanın yarattığı ezilme hasarı bu bölümde incelenmiştir. Hasarlı numuneler sonra hassas bir şekilde mikroskop altında incelenmiştir.

Johannes ve arkadaşları (2009) çeki kuvvetine maruz sandviç kompozitlerde farklı çekirdek malzemelerin kesiştiği noktalardaki lokal etkileri gözlemlemişlerdir. Lokal etkiler, numuneler üzerinde statik ve yorulma testleriyle incelenmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar modeli oluşturularak hasarı önceden karakterize etmeye çalışmışlardır.

Mackerle (2001) sandviç yapılar üzerinde yapılan sonlu eleman analizlerini değerlendirip bir araya toplamıştır.

Choi (2003) mekanik olarak birleştirilmiş kompozit yapılarda hasar yükünü önceden belirlemek için bir çalışma yapmıştır. Çeşitli hasar durumlarını inceleyerek bu durumlar için yaklaşık öngörü sağlayan metotlar önermiştir.

Tserpes ve arkadaşları (2001) civata bağlantılı kompozit levhalarda üç boyutlu hasar ilerleme modeli üzerinde çalışmışlardır. Hasar ilerleme modeli öngörmek amacıyla bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Parametrik çalışmada gerilme analizi, hasar analizi üzerinde durmuşlardır. Üç boyutlu modelin oluşturulmasında ANSYS programı kullanılmıştır. Hasar analizi ise Hashin kırılma kriteri baz alınarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Tan (1991), ortasında delik bulunan kompozit levhalar için bir hasar ilerleme modeli geliştirmiştir. Çalışmada Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Farklı yapılandırmalar için analizler yapıp sonuçları yaptığı deneyler ile karşılaştırmıştır.

Chang ve Chang (1987), çalışmalarında mekanik bağlantılı kompozit levhalar için bir hasar ilerleme modeli geliştirmişlerdir. Mekanik bağlantılı kompozit levhalar için üç ana hasar şekli olduğu tespit edilmiştir: Net kopma, yırtılma ve pim baskısı sonucunda meydana gelen delik iç yüzeylerindeki ezilme. Deneysel incelemeler

sonucunda levhanın kopmasının ve yırtılmasının iki boyutlu (düzlemsel) olduğunu, ezilme şeklinin ise üç boyutlu olduğunu belirtmişler. Çalışmalarında sadece ilk iki hasar şekli olan levha kopması ve yırtılması incelenmiştir. İki boyutlu düzlemsel gerilme durumunu almışlardır.

Lessard ve Shokrieh (1995), pim bağlantılı karbon/epoksi malzeme için iki boyutlu bir hasar ilerleme modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, pimi rijit olarak kabul edip, radyal sınır koşullarını uygulayarak pimi modellemişlerdir. Pim deliği/plaka genişliği ve pim deliği/kenar uzaklığı oranlarının kompozit levhanın mukavemetine olan etkisini araştırmışlardır. Ayrıca doğrusal olmayan malzeme davranışının da etkisini incelemişlerdir.

Hung ve Chang (1996), çalışmalarında pim bağlantılı kompozit levhaların mukavemet analizlerini yapabilen bir sonlu elemanlar kodu geliştirmişlerdir. Çalışmada, çift kesme durumu incelenmiş, üç farklı karbon/epoksi malzeme için analizler yapılmıştır. İki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturup, pim yerine radyal sınır koşulları uygulamışlardır.

Okutan (2005), pim bağlantılı kompozit plakaların davranışlarını incelemiştir. Yaptığı çalışmada bağlantı geometrisinin, elyaf oryantasyonunun, kırılma mukavemetine ve moduna olan etkilerini incelemiştir. Pim bağlantılı kompozit plakanın değişik durumlardaki ve ölçülerdeki hallerini deneysel olarak gözlemlemiştir. Tek pimle bağlanan kompozit plakalar pimlerden yüklenmiştir. E/D ve W/D oranları sırasıyla 1'den 5'e ve 2'den 5'e değiştirilmiş ve numunelerdeki hasar modları gözlemlenmiştir. Okutan, deneyler sonunda elyaf oryantasyonun hasar oluşma şekline etki ettiğini gözlemlemiştir. Ayrıca değişik delik pozisyonlarının ve geometrilerin hasar moduna etki ettiği saptanmıştır.

Okutan ve Karakuzu (2003) tabakalı kompozitlerde pimli bağlantıların mukavemetini incelemişler. Çekme testlerinde $[0/\pm 45]_s$ ve $[90/\pm 45]_s$ gibi 2 farklı elyaf oryantasyonuna sahip kompozit malzeme kullanmışlardır. Her oryantasyon için 20 farklı geometri seçmişlerdir. Çalışmalarının asıl amacı hasar mekanizmasını karakterize edebilmek ve geometrik değişikliklerin pimlerin ezilme, kesme ve çekme

mukavemetlerine olan etkilerini tespit etmektir. Bu çalışma, elyaf oryantasyonun ve geometrinin pim mukavemeti açısından hayati önem taşıdığını göstermiştir.

Kim ve arkadaşları (1998), pim bağlantılı, elyaf takviyeli kompozit levhaların mukavemeti üzerine çalışmışlardır. Sonlu elemanlar metodu kullanarak mukavemet analizleri yapmışlardır. Pim/delik arasındaki temas modellemesini ve delik iç yüzeyindeki yük dağılımının hesaplanmasını incelemişlerdir. Hashin hasar kriterini, hasar ilerleme algoritmasıyla birlikte kullanmışlardır. Pim rijit kabul edilmiş, kompozit tabakalar simetrik olarak yerleştirilmiş, pim/delik arasındaki sürtünme katsayısı ise sabit alınarak modellemede; net kopma, yırtılma ve ezilme hasar şekilleri incelenmiştir.

Ireman (1999), civata bağlantılı kompozit levhada gerilme dağılımını incelemek üzere üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturmuştur. Model IDEAS yazılımında oluşturulup, analiz ABAQUS sonlu eleman programında yapılmıştır. Farklı civata tipi, ön gerilme, tabaka dizilişi ve civata/delik arasındaki boşluk gibi değişkenlerin bağlantının mukavemetine olan etkisi incelenmiştir.

Yogeswaren ve Reddy (1988), pim bağlantılı ortotropik levhalarda pim-delik temasından kaynaklanan gerilme dağılımını incelemişlerdir. İki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturup, pim-delik temas bölgesinde statik ve dinamik sürtünme katsayıları tanımlamış ve sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır.

Camanho ve Matthews (1999), civata bağlantılı T300/914 karbon elyaf/epoksi levhaların mukavemetinin belirlenmesi ve hasar ilerleme analizi için üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen sonlu eleman modeli deneylerle karşılaştırılmıştır. Analizlerde Hashin'in üç boyutlu hasar kriterleri kullanılmıştır. Hasar ilerleme modellemesinde, kompozit malzemenin elastiklik ve kayma modülü, kompozit malzemede oluşan hasarın ilerleme durumuna göre sonlu eleman analizlerinde azaltılarak uygulanmış, sonlu eleman modeli ABAQUS yazılımı ile oluşturulmuştur. Çift kesme durumu incelenmiş, civata ve pul rijit olarak modellenmiştir. Civataya herhangi bir ön gerilme uygulanmamış, pul ile kompozit levha arasında sürtünme tanımlanmış, temas analizi bu veriler doğrultusunda yapılmıştır.

Perugini ve arkadaşları (2001), civata bağlantılı kompozit yapıların mukavemetini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmalarında plastik 5769 malzeme kullanmış ve tek bağlantı durumunu incelemişlerdir. Üç boyutlu sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak hazırlanmış, civata, somun ve pul elastik olarak modellenmiştir. Bu çalışmada Hashin hasar kriterleri, geliştirilen hasar ilerleme algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Civata-pul, pul-kompozit, kompozit-kompozit, civata-kompozit arasındaki temas durumu incelenmiş, ancak civata ön gerilmesi uygulanmamıştır. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar deneylerle karşılaştırılmış, analiz sonuçları ile deneyler arasında ortaya çıkan farkta, sürtünmenin etken olduğu ve bu etkenin ayrıntılı olarak araştırılmasının gerekli olduğu belirtilmiştir.

Tserpes ve arkadaşları (2000, 2002), HTA/6376 grafit/epoksi malzemesinden imal edilmiş $[(\pm 45/0/90)]_{4s}$ ve $[(\pm 45/0/90)]_{8s}$ elyaf dizilişine sahip kompozit levhalarda civata bağlantılarının mukavemetini incelemişlerdir. Tek kesme durumu ele alınmış, kompozit levha ile alüminyum levha birbirlerine bir civata ile bağlanmıştır. Hasar ilerleme modeli, Hashin ve maksimum gerilme hasar kriterleri ile birlikte kullanılmıştır.

Sun ve arkadaşları (2002), civata bağlantılı kompozit levhaların mukavemetini incelemek üzere iki kısımdan oluşan bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarının birinci kısmında, üç boyutlu sonlu eleman modelini geliştirmişlerdir. Civata ön gerilmesinin, pul boyutunun ve civata özelliklerinin yapının mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Sonlu eleman yazılımı olarak ABAQUS kullanılmıştır. Çift kesme durumu incelenmiş ve sonlu eleman analizlerinde civata ön gerilmesi uygulayabilmek için sıcaklık yükü verilmiş ve civata eksenine doğrultusunda gerilme oluşturulmuştur.

Elyaf oryantasyonu olarak $[(0/90)]_{6s}$ ve $[(0/\pm 45/90)]_{3s}$ yapılandırmaları ele alınmıştır.

Padhi ve arkadaşları (2003), pim bağlantılı kompozit yapıların üç boyutlu sonlu eleman analizlerini yapabilmek için MSC.Patran programı içerisinde çalışabilen bir

ara program geliştirmişlerdir. Bu program sayesinde üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmasında, pim modellenmesinde ve cisimler arasında temas tanımlanmasında kolaylık sağlanmıştır. Yapmış oldukları çalışmada ayrıca MSC.Marc sonlu eleman yazılımı kullanılarak pim ile delik arasındaki boşluğun mukavemete olan etkisini incelemişlerdir. Seri olarak üç pim ile bağlanmış levhalar için gerilme analizi yapmışlardır.

Yang (2003) elastik pim deliğı açılmış olan kompozit plakalarda üç boyutlu bir gerilme analizi yapmıştır. Sürtünme, ezilme kuvveti ve geçiş yüklerinin gerilme dağılımına etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Nümerik analizleri çok tabakalı sınır elemanları metodu (MLBEM) ile gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmada ise, hafiflikleri ve yüksek eğilme dirençleri nedeniyle kompozit yapılarda kullanılan sandviç kompozitlerin pimli hasar analizleri deneysel olarak incelenmiştir. Sandviç kompozitin üretiminde ara malzeme olarak PVC köpük, üst ve alt kabuk kısımlarında ise cam-elyaf epoksi kullanılmıştır. Çekirdek (ara) malzeme mukavemeti çok küçük olduğundan mekanik bağlantılarda yük taşıma kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. Bağlantı için açılan pim deliklerinin hasar analizine ilave olarak; sözü edilen delik bölgeleri kırılmış cam-elyaf ve epoksi ile dolgu yapılmış ve tekrar delik açılarak pimli hasar analizleri yapılmıştır. Böylece sandviç yapıların mekanik bağlantılardaki yük kapasitelerinin arttırılabileceğı gösterilmiştir.

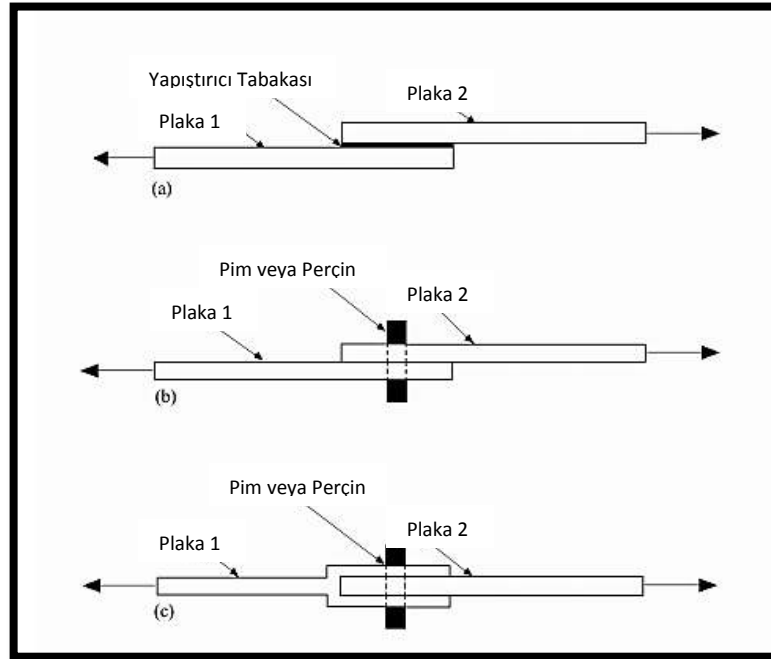
BÖLÜM İKİ

KOMPOZİT YAPILARDAKİ BAĞLANTILAR

2.1 Giriş

Kompozit malzemelerde kullanılan matrislerin tiplerine göre mekanik bağlama, içten kenetleme, yapıştırma, kaynatma, lehimleme veya daha değişik hibrit bağlantılar (kaynak-lehim, kaynak-yapıştırma vb.) gibi bağlantı şekilleri kullanılmaktadır.

Polimer matrisli kompozitlerde genellikle iki çeşit bağlantı şekli kullanılmaktadır: Yapıştırırmalı bağlantılar ve mekanik bağlantılar. Polimer matrisli kompozitlerde matrisin termoplastik yapıda olması durumunda kaynatma ve termal yapıştırma gibi yöntemler de sıkça kullanılmaktadır. Şekil 2.1 kompozit yapılarda bağlantı şekillerini göstermektedir: (Lessard, 1995)



Şekil 2.1 Temel Bağlantı Şekilleri: (a) Yapıştırırmalı Bağlantı, (b) Tek Taraflı Pimli Bağlantı, (c) Çift Taraflı Pimli Bağlantı (Okutan, 2001)

Metal matrisli kompozitlerin bağlanması ise çok yaygın olarak kullanılan yöntemler şunlardır: lehimleme, yapıştırma, mekanik bağlama ve kaynatma. Kaynak yöntemlerinin günümüzde giderek gelişmesi ile hatasız olarak metal matrisli

kompozitlerin birleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Kaynak-lehim, kaynak-yapıştırma gibi hibrit bağlama yöntemleri de sıklıkla kullanılmaktadır.

Seramik matrisli kompozitlerde şu bağlantı yöntemleri tercih edilir: Lehimleme, yapıştırma. Lehimleme yönteminde aktif metal ve seramik dolgu malzemesi kullanılır. Yapıştırma yönteminde ise inorganik yapıştırıcılar, organik yapıştırıcılara göre daha çok tercih edilerek kullanılır. Seramik matrisli kompozitlerin kaynağı mümkün gibi gözükse de hala geliştirilme aşamasındadır. Mekanik olarak bağlama ve kenetleme de çok yaygın olmasa da kullanılan yöntemlerdendir. (Okutan, 2001)

Tablo 2.1 çeşitli tiplerdeki kompozit malzemelerin bağlantı yöntemlerini özetlemektedir.

Tablo 2.1 Çeşitli kompozit malzemelere göre bağlantı şekilleri (Mazumdar, 2002)

Sürekli Elyafı Güçlendirilmiş	Kırılmış Elyafı Güçlendirilmiş
Organik veya Polimer Matrisli Kompozitler	
1. Yapıştırmalı Bağlantı (Organik Yapıştırıcılar) 2. İçten Mekanik Bağlantı 3. Mekanik Bağlantı 4. Füzyon Bağlantı (Termoplastikler için) 5. Kaynaklı Bağlantı (Termoplastikler için)	1. Füzyon Bağlantı (Termoplastikler için) 2. Kaynaklı Bağlantı (Termoplastikler için) 3. Yapıştırmalı Bağlantı (Organik Yapıştırıcılar) 4. Mekanik Bağlantı 5. Perçinli Bağlantı
Metal Matrisli Kompozitler	
1. Füzyonsuz Kaynak 2. Lehimleme 3. Kaynak-Lehim 4. Mekanik Bağlantı 5. Yapıştırmalı Bağlantı 6. Kaynaklı Bağlantı	1. Füzyonsuz Kaynak 2. Füzyonlu Kaynak 3. Kaynak-Lehim 4. Lehimleme 5. Mekanik Bağlantı 6. Kaynaklı Bağlantı 7. Yapıştırmalı Bağlantı

Tablo 2.1 (devam) Çeşitli kompozit malzemelere göre bağlantı şekilleri (Mazumdar, 2002)

Seramik Matrisli Kompozitler	
1. Füzyonsuz Kaynak	1. Füzyonsuz Kaynak
2. Seramik Doldurarak Lehimleme	2. Sinterleme
3. Metal Doldurarak Lehimleme	3. Füzyonlu Kaynak
4. Yapıştırıcı ile Doldurma	4. Seramik Doldurarak Lehimleme
5. Yapıştırılmalı Bağlantı (Organik Yapıştırıcılar)	5. Metal Doldurarak Lehimleme
	6. Yapıştırılmalı Bağlantı (Organik Yapıştırıcılar)
Inter metalik Matrisli Kompozitler	
1. Füzyonsuz Kaynak	1. Füzyonsuz Kaynak
2. Lehimleme	2. Füzyonlu Kaynak
3. Kaynak-Lehim	3. Kaynak-Lehim
4. Füzyonlu Kaynak	4. Lehimleme
5. Yapıştırılmalı Bağlantı	5. Yapıştırılmalı Bağlantı
Karbon-Karbon Kompozitleri	
1. Reçineli Birleştirme	1. Reçineli Birleştirme
2. Lehimleme	2. Lehimleme
3. Mekanik Bağlantı	3. Mekanik Bağlantı
4. Yapıştırılmalı Bağlantı	4. Yapıştırılmalı Bağlantı

Kompozit yapıların matris tiplerine uygun bağlantı yönteminin seçilmesinin yanında, bağlantıların tasarımı da hayati önem taşımaktadır. Bunun nedeni kompozit malzemelerin sahip olduğu anizotropik yapıdan en iyi şekilde faydalanmak ve herhangi bir sorunla karşı karşıya gelmemek için malzeme üzerine uygulanan yükün çok dikkatli bir şekilde kontrol altında tutulması gerekmesidir. Aksi halde çok tabakalı kompozitlerde tabakların birbirinden ayrılması gibi çok kritik sorunlar meydana gelebilir.

2.2 Kompozitlerde Mekanik Bağlantılar ile Yapıştırılmalı Bağlantıların Karşılaştırılması

Birçok kompozit için mekanik bağlantılar ve yapıştırılmalı bağlantılar çokça tercih edilmiş ve hala edilmekte olan bağlantı yöntemleridir. Yapıştırılmalı bağlantı yöntemi bir kompoziti, diğerine bağlamak için kullanılan birincil yöntem olmasına rağmen metalleri ve çeşitli metal çeşitlerini yapıştırmanın mümkün olmadığı veya yapıştırıldığında verimin az olacağı özel uygulamalarda mekanik bağlantılar kullanılmaktadır.

Malzemeleri birbirine bağlamanın fonksiyonu yükü bir bağlantı elemanından diğerine aktarmaktır. Yükün aktarılabilmesi kabiliyeti yükün tipine, çevre koşullarına ve bağlanan malzemeye bağlıdır.

Mekanik bağlantıların ve yapıştırılmalı bağlantıların ikisi de çeşitli avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Mekanik bağlantı kompozitlerin, yapıştırılmalı bağlantılara göre avantajları şunlardır: (Mazumdar, 2002).

- 1) Malzemeye yüzeyinde önceden özel bir işlem gerekmez.
- 2) Malzemeye herhangi bir zarar vermeden demontajı mümkündür.
- 3) Kayma gerilmelerine ve dış yüzeylerden gelen yüklere karşı daha dirençlidir.
- 4) Çıplak gözle durumu kolaylıkla belirlenebilir.
- 5) Isıya, neme ve diğer çevresel etmenlere karşı hassasiyeti daha azdır.

Diğer yandan bu tür bağlantıların, yapıştırılmalı bağlantılara göre dezavantajları da bulunmaktadır: (Mazumdar, 2002).

- 1) Kenetlerin ve bağlantı deliklerinin etrafında önlenemeyen gerilme yığılmaları meydana gelir.
- 2) Açık deliklerden ve bağlantıların çevresinden sızıntı meydana gelme ihtimali vardır.
- 3) Bağlantı elemanları kullanıldığı için yapının ağırlığında bir artış meydana gelir.

Yapıştırma bağlantılı kompozitlerin, mekanik bağlantılara göre avantajları şunlardır: (Mazumdar, 2002).

- 1) Az veya neredeyse ihmal edilebilecek düzeyde gerilme yığılmaları meydana gelir, düzgün gerilme dağılımı oluşur.
- 2) İnce bağlantı yüzeyi sayesinde yapıda fazladan ağırlık artışı olmaz.
- 3) Yapının dış yüzeyi bağlantı işleminden sonra da düzgünlüğünü korur. (Aerodinamik ve hidrodinamik akışın düzgünlüğü için)
- 4) Benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesinden meydana gelen galvanik korozyon yapıştırılmalı bağlantılarda görülmez.

- 5) Çok ince malzemelerin yapıştırılarak birleştirilmesi ile mekanik bağlantı için gereken delik delme işlemi problemleri yoktur.
- 6) Sürekli yüklerde daha iyi performans elde edilir.

Yapıştırırmalı bağlantıların genel olarak dezavantajları ise şu şekilde sıralanabilir: (Mazumdar, 2002).

- 1) Malzemeye herhangi bir zarar vermeden sökülmesi gibi bir durum söz konusu değildir.
- 2) Yüksek ve düşük sıcaklık, su, nem, tuz, çözücü, radyasyon, vakum, ultraviyole ışını gibi çeşitli çevresel etmenlere karşı direnci önceden tahmin edilememektedir.
- 3) Yapıştırma yüzeyi önceden kimyasallarla ve fiziksel işlemlerle önceden hazırlanmalıdır.
- 4) Durumunun gözlemlenmesi çıplak gözle pek mümkün değildir.
- 5) Tamir edilmesi neredeyse imkânsızdır.

2.3 Kompozitler Yapılarda Bağlantıların Tasarım Kriterleri

Kompozit malzemelerin yüksek mukavemet ve rijitlik özelliklerinden mümkün olduğunca verimli şekilde yararlanmak için tasarımda en uygun şekle gitmek gereklidir. Özellikle hava aracı tasarımında ağırlık ve mukavemet ile ilgili olarak en uygun şekle sokma çalışmaları uygulanmaktadır.

Bağlantı kullanılan kompozit yapıların en uygun şekle sokmayı, bu yapıların mukavemet analizlerinin en doğru şekilde yapılmasına, yapılarda karşılaşılan hasar şekillerinin bilinmesine, hasar kriterlerinin doğru bir şekilde uygulanmasına ve yükleme şekline karşı en uygun kompozit malzeme tasarımına ve seçimine bağlıdır.

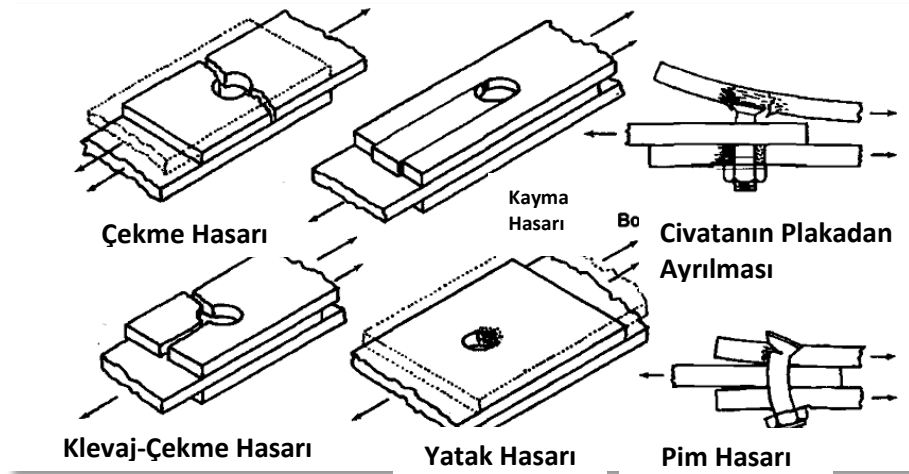
Kompozit yapılar tasarlanırken, bağlantı şekilleri de göz önüne alınmalıdır. Yapıda kritik noktaları oluşturacak kısımlar bağlantılar olacaktır. Bir kompozit yapıda bağlantılar kısmen veya tamamen kompozit malzemeden imal edilebilir. Geometrik tasarım ve karşılanacak yükler göz önüne alınarak bağlantı şekli

yapıştırırmalı veya mekanik olarak seçilebilmektedir. Bağlantı tasarımı yapılırken aşağıdaki durumlar ele alınır:

- 1) Yükün şiddeti bağlantı elemanı sayısına bölünür ve bir elemana gelen yük miktarı hesaba katılmalıdır.
- 2) Yük baştan sona kadar bir elemandan diğerine düzgün bir biçimde aktarılacak şekilde tasarlanmalıdır.
- 3) Bağlantılar yapının geometrik sınırlamaları doğrultusunda düzenlenmelidir.
- 4) Bağlantı yüke tasarımcı tarafından belirlenen uzunlukta dayanmalıdır.

2.4 Bağlantılarda Hasar Tipleri

Yükün düzgün bir şekilde bir elemandan diğerine aktarılması olayı hem yapıştırırmalı bağlantılarla hem de mekanik bağlantılarla benzer bir şekilde gerçekleştirilebilmesine rağmen yük aktarma mekanizmaları tamamen farklıdır. Bağlantı elemanlarının bağlantı içindeki yerleşimi veya geometrisi yükün aktarımını ve meydana gelen hasar tiplerini etkilemektedir. Şekil 2.2’de, mekanik bir bağlantı ile bir araya getirilmiş kompozit parçalardaki ve bağlantı elemanlarındaki hasarlara örnekler verilmiştir.

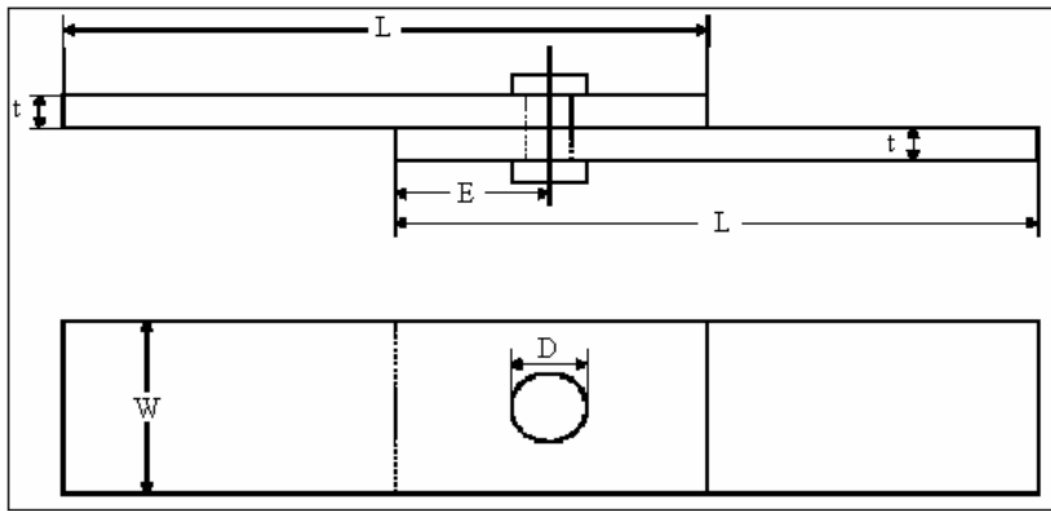


Şekil 2.2 Mekanik bağlantılı kompozit yapılarda hasar modları (Okutan, 2001)

Mekanik bağlantılı kompozit yapıların tasarımını etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir: (Peters, 1998)

- Takviye açılarının etkisi
- Delik çapı - genişlik (W/D) oranı
- Kenar mesafesi - delik çapı (E/D) oranı
- Civata ön gerilme miktarı
- Pim - delik arası toleransı
- Tek kesme kuvveti etkisi

Burada ifade edilen W, E, D gibi boyutlar Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Pim bağlantılı kompozit yapı (Dursun, 2006)

2.4.1 Takviye Açılarının Etkisi

Kompozit yapı karşılayacağı yüklere uygun olarak tasarlanması gerekmektedir. Buna göre kompozit yapının kaç tabakadan oluşacağı ve takviye açılarının yeri ve açılarının derecesi belirlenmelidir. Takviye açılarının konumu, yapının kırılma şekline etki etmektedir. Özellikle kayma kuvvetlerinin etkili olduğu durumlarda takviye açıları önem kazanmaktadır. ± 45 ve 90 dereceli tabakalar kompozit yapılarda kayma mukavemetine arttırıcı etkisi vardır. (Dursun, 2006, s.43).

2.4.2 Delik Çapı - Genişlik (W/D) Oranı Etkisi

Delik çapı - genişlik (W/D) oranı düşük tutulması durumunda malzemede çekme hasarı oluşma olasılığı artmaktadır. Bu yapılarda çok istenmeyen bir durumdur,

Çünkü ekme hasarı ani gelişen ve önlenemeyen bir hasar türüdür. (Dursun, 2006, s.44).

2.4.3 Kenar Mesafesi - Delik apı (E/D) Oranı Etkisi

E/D oranı küçük tutulması halinde malzemede kayma hasarları meydana gelebilmektedir. Bu da istenmeyen bir durumdur, çünkü kayma hasarı da ani gelişen ve önlenemeyen bir hasar türüdür. (Dursun, 2006, s.44).

2.4.4 Civata Ön Gerilme Miktarı Etkisi

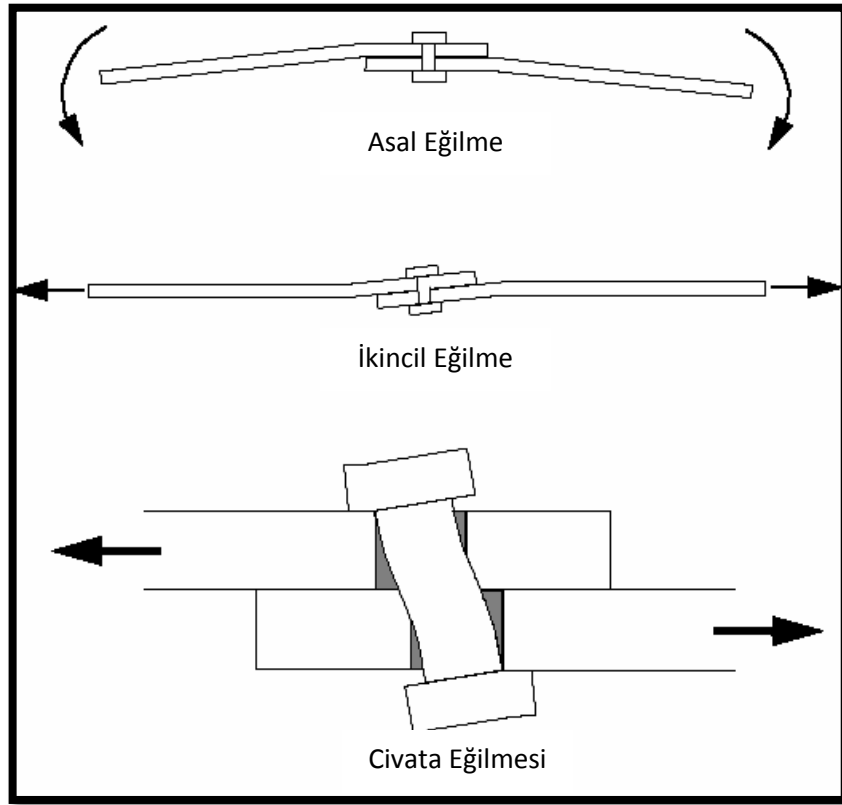
Mekanik bağlantı şekillerinden biri olan civataya ön gerilme verilmesi malzemede mukavemeti arttırıcı bir önlemdir. (Dursun, 2006, s.45).

2.4.5 Pim-Delik Toleransı Etkisi

Pimli bağlantılarda delik ile pim arasındaki tolerans arttıkça bağlantı rijitliğinin %10 mertebesine kadar azaldığı yapılan araştırmalar ve deneyler sonucu belirlenmiştir. Birden fazla pimin kullanılması ile pimplere düşen yük miktarı da azalmaktadır. (Dursun, 2006, s.45).

2.4.6 Tek Kesme Kuvveti Etkisi

Tek bir yüzeyden bağlantılı yapılarda çekme kuvvetine maruz kalma durumunda ayrıca ikinci bir eğilme meydana gelmektedir. Bunun nedeni ise uygulanan kuvvetlerin aynı ekseninde olmamaları, dolayısıyla bir eğilme momenti meydana getirmeleridir. Ayrıca yukarıda belirtilmiş olan pim-delik toleransının yüksek olması nedeniyle pimde eğilmeler meydana gelebilmektedir. Tek kesme bağlantı şekline sahip yapılarda bağlanan levhaların ve pimin rijitliğine ve pim-delik toleransına bağlı olarak delik iç çeperinde üniform olmayan bir gerilme dağılımına sebep olur. (Dursun, 2006, s.45)

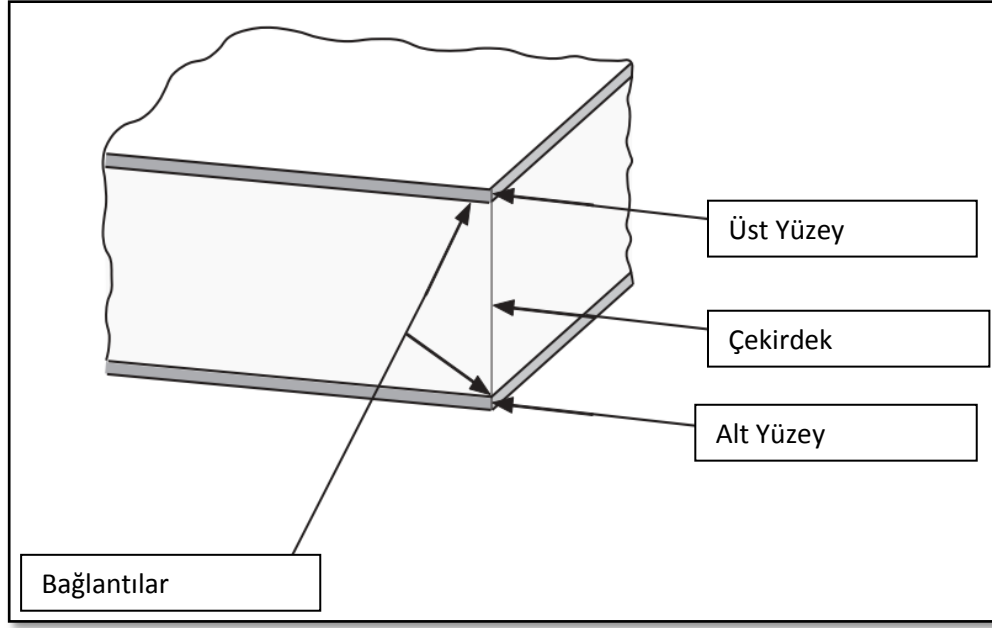


Şekil 2.4: Kompozit yapılarda tek kesme bağlantı şekli (Dursun, 2006)

BÖLÜM ÜÇ

SANDVIÇ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ

Bir yapısal sandviç genellikle iki yüzünde metal veya elyaf kompozit gibi sert ve güçlü ince plaka şeklindeki malzemelerin arasına çekirdek adı verilen kalın, mukavemeti çok daha düşük ancak hafif bir malzeme ile yapıştırılmasıyla elde edilir.



Şekil 3.1 Sandviç kompozit malzemenin temel parçaları (Diab Sandwich Handbook)

Kompozit malzemelerin üretiminde pek çok yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sandviç kompozit numunelerin üretimi için vakum destekli reçine infüzyonu metodu kullanılmıştır.

3.1 Kompozit Üretim Tezgâhı

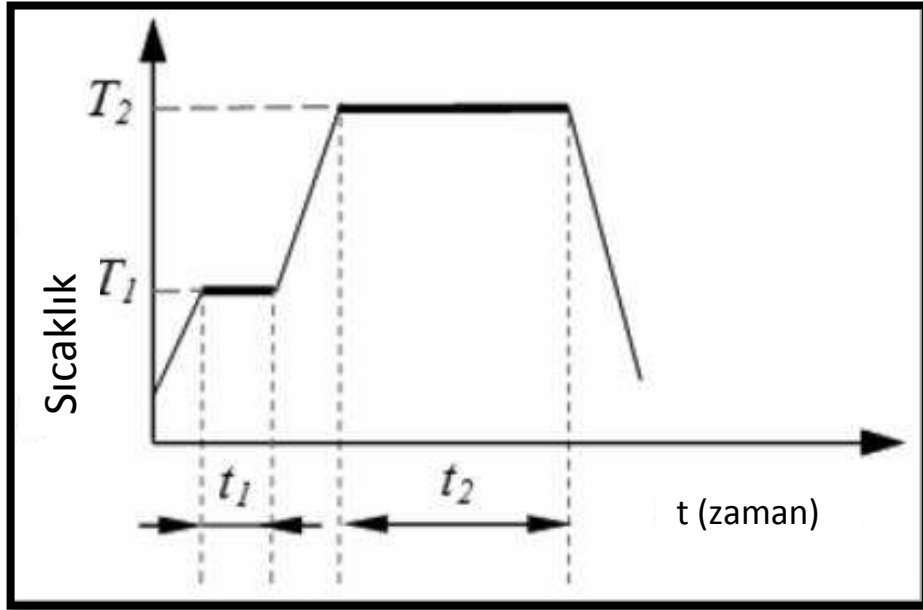
Kompozit plakanın üretilmesi için kullanılan reçine-sertleştirici karışımının ısı yardımıyla vakum altında sertleştirilmesi gerekmektedir. Bunu sağlamak amacıyla özel tasarlanmış üretim tezgâhları kullanılmaktadır. Projede kullanılan sertleştiriciler belirli sıcaklıklar altında tepkimeye girmektedir. Dolayısıyla vakum ortamının yaratılması ve reçine-sertleştirici karışımına ısı verilmesi işlemi D.E.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Kompozit Üretim Laboratuvarı'nda

gerçekleştirilmiştir. Üretim Şekil 3.1’de görülmekte olan kompozit üretim tezgâhında gerçekleştirilmiştir.

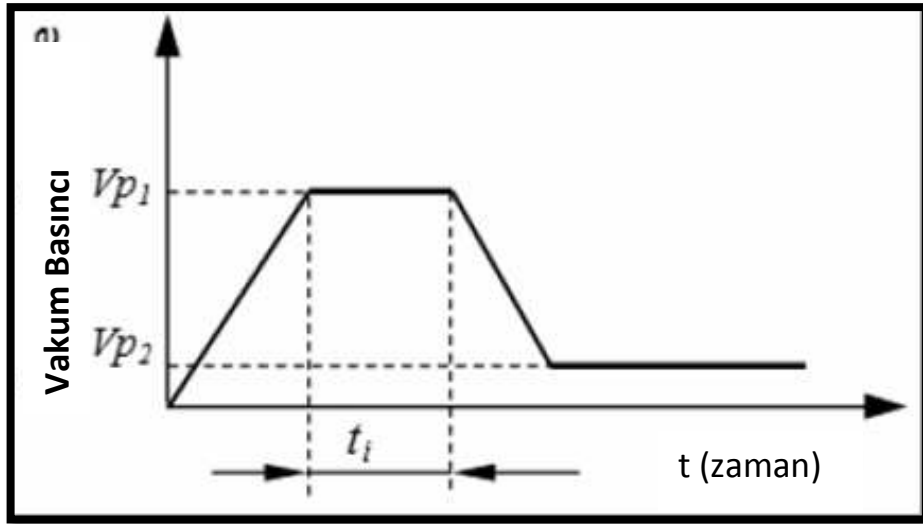
Tezgâhın üretim plakası 1800x1500 mm ölçülerindedir. Tezgâh üretilmekte olan plakaya ısıyı elektrikli rezistanslar aracılığıyla vermektedir. Isının kontrolü ise plaka yüzeyinin altına eşit aralıklarla yerleştirilmiş olan ısıtıcı çiftler sayesinde gerçekleştirilmektedir. Tezgâhta dokunmatik ve PLC sistemine sahip bir kontrol ekranı bulunmaktadır. Bu ekran vasıtasıyla istenilen sıcaklık veya sıcaklıklar zamana bağlı olarak programlanmaktadır. Tezgâhın çıkabildiği en yüksek sıcaklık değeri 200°C’dir. Üretilen malzemenin homojen bir yapıya sahip olması için her bölgede eşit sıcaklıkta katılaşması gerekmektedir. Bunu sağlamak için tezgâh 8 bölgeye ayrılmış ve her bölge kendi içinde yer alan alıcılar yardımıyla verilen ısıyı kontrol etmektedir. Böylece işlem sırasında her bölge yaklaşık olarak eşit $\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kalmaktadır.



Şekil 3.2 Kompozit plaka üretim tezgâhı



Şekil 3.3 Kompozit malzemelerin pişmesi için tepkime sıcaklığı – zaman grafiği (Gören ve Ataş, 2008)



Şekil 3.4 Kompozit malzemelerin pişmesi için vakum basıncı – zaman grafiği (Gören ve Ataş, 2008)

Üretimin tasarlanması için gereken sıcaklık ve basınç değerleri reçineyi ve sertleştiriciyi üreten firmadan alınmaktadır. Bu veriler doğrultusunda tezgâh programlanır. Yukarıdaki grafiklerde T_1 ve T_2 tepkime sıcaklıkları, V_{p1} reçine emdirme basıncı, V_{p2} reçine tepkime basıncı, t_1 ve t_2 bekleme zaman aralıkları, t_i reçine emdirme zamanıdır.

Reçine emdirme vakum basıncını ve tepkime basıncını sağlamak amacıyla tezgâhta vakum pompası, manometre ve filtre vanası bulunmaktadır. Vakum pompası da PLC kontrollü dokunmatik ekran yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Basınç üretim sırasında vana yardımıyla kontrol altında tutulur.

3.2 Üretimde Kullanılan Malzemeler ve Fonksiyonları

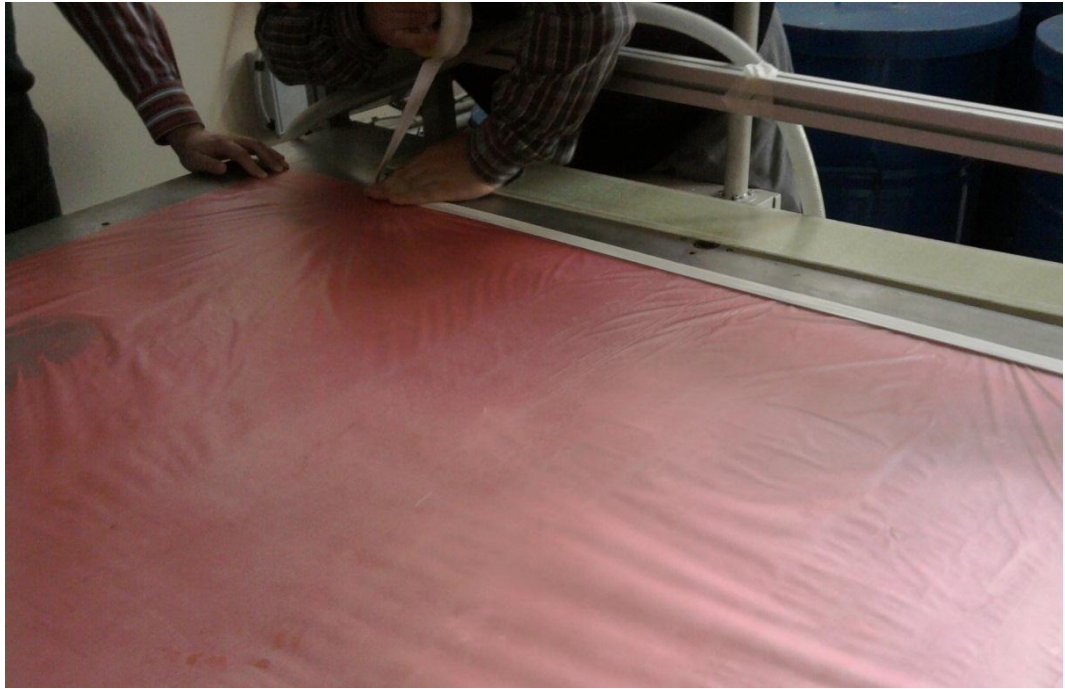
- Vakum Torbası: Kapalı bir sistem oluşturmak ve yalnız reçine ile kumaşların etkileşime girmesini sağlamak amacıyla kullanılır. Etrafında herhangi bir hava girişine izin verilmeyecek şekilde yerleştirilir.
- Sızdırmazlık Macunu: Vakum torbasının etrafından herhangi bir hava girişi veya reçine çıkışı olmasını engellemek amacıyla kullanılır.
- Ayırıcı Film: Kumaşın direk üzerine yerleştirilir. Ayırıcı film üzerine diğer elemanlar (hava boruları, dağıtıcı film vb.) yerleştirilebilir. İşlem bittikten sonra kumaş üzerinden sökülerek elemanların ayrılması sağlanır.
- Soyma Kumaşı: Kumaşın üzerine yerleştirilir. Örülmüş olan kumaşlardır ve ısıya karşı dirençleri yüksektir. Üzerine konan elemanlardan malzemeyi kolayca ayırmak için kullanılır.
- Kalıp Ayırıcı Malzemeler: Üretilen kompozit parçanın kalıp yüzeyine yapışmada kolaylıkla çıkmasını sağlar. Bu amaç doğrultusunda teflon filmler ve ayırıcı sıvılar kullanılabilmektedir.
- Reçine Dağıtıcı: Reçinenin daha hızlı ve mümkün olduğunca eşit şekilde dağılmasını sağlayan filelerdir.
- Havalandırıcı: Vakumlama ve kütleme işlemi sırasında vakum torbası içinden hava ve gaz geçişini sağlamak amacıyla kullanılan kumaşlardır. Ayrıca fazla gelen reçineyi tutma görevi de vardır.

3.3 Üretim Aşamaları

Üretimden önce tezgâhın üretim plakası saf alkol ile iyice temizlenir. Böylelikle tezgâh, malzeme üretimi sırasında soruna neden olabilecek yabancı maddelerden arındırılmış olur. Kompozit yüzeyin kalıp yüzeyine yapışmasını engelleyecek olan teflon kumaş serilir. Bu çalışmada, bu amaçla polilefin filmler kullanılmıştır.

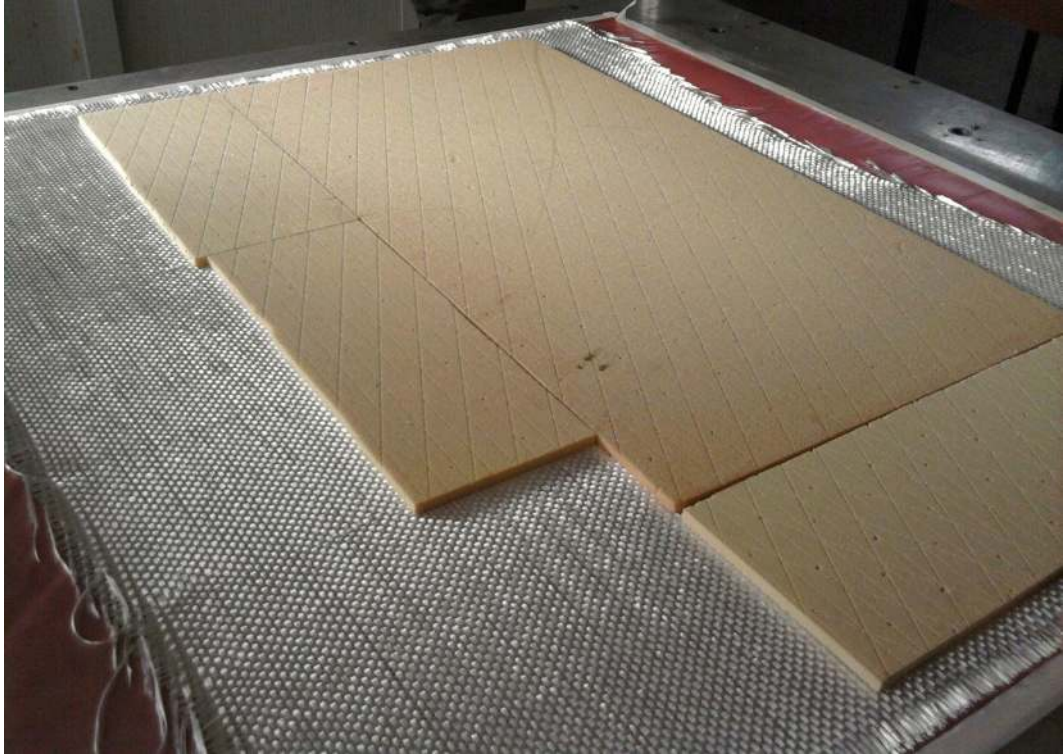


Şekil 3.5 Kalıp ayırıcı olarak kullanılan polilefin filmin serilmesi



Şekil 3.6 Kalıp ayırıcı filmin etrafına sızdırmazlık macunu çekilmesi

İstenilen oryantasyona sahip elyaf lar gereken boyutlarda kesilerek ayırıcı kalıp ayırıcı filmin üzerine yerleştirilir. Ardından ara malzemeyi oluşturacak olan PVC köpük malzeme cam elyaf kumaşların üzerine konur. Alt katmanda bulunan elyaf kumaşlara simetrik yeni elyaf lar kesilerek PVC köpüğün üzerine yerleştirilir.



Şekil 3.7 Elyafların ve PVC köpüğün yerleştirilmesi

Ardından üretim sonrasında vakum poşeti, yayıcı film vb. parçaların kompozit yüzeyinde kalmaması için elyaf tabakanın üzerine soyma kumaşı serilir. Daha sonra yayıcı film konur. Bu filmin amacı reçinenin ilerleyişini hızlandırmak ve elyafların yanal yönlerde de ilerlemesini sağlamaktır.



Şekil 3.8 Elyafların PVC köpüğün üzerine yerleştirilmesi

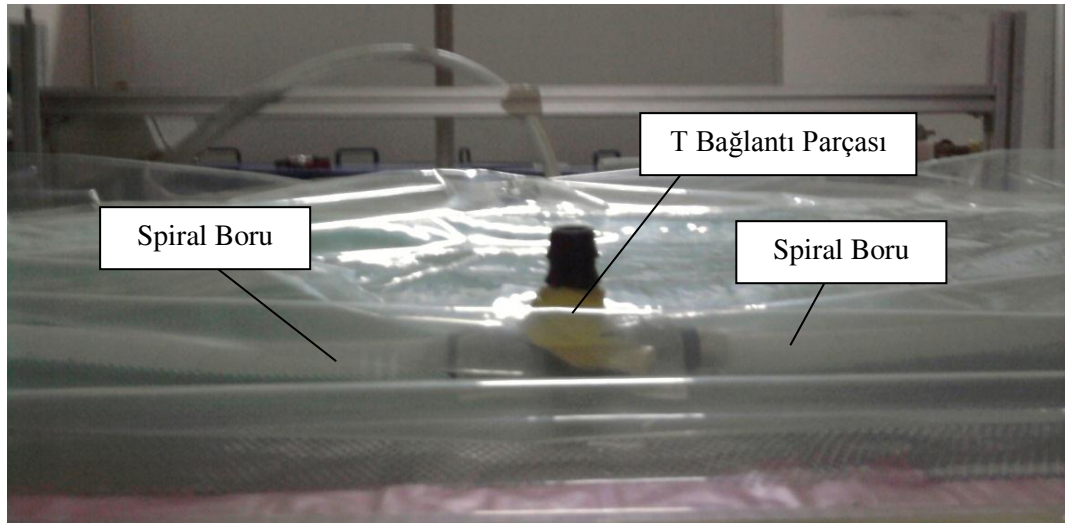


Şekil 3.9 Soyma kumaşının cam-elyaf üzerine yerleştirilmesi

Kumaşların ve köpüğün yerleşiminin bitmesinin ardından vakumlama sistemi hazırlanır. Homojen bir vakumlama için kompozit malzemenin genişliğinde spiral borular yerleştirilir ve aralarına T boru bağlantısı yapılır. Vakum hattı ile elyafların hava alışverişini sağlamak için belirli aralıklarla kumaşlar yerleştirilir. Aynı bağlantı reçinenin verileceği kısma da yapılır. T borular yerleştirildikten sonra vakum poşeti malzemenin üzerine konur. T bağlantıların vakum poşetinden çıkan kısmı sızdırmazlık macunu ile kapatılır ve böylece dış ortamla bağlantısı kesilir.



Şekil 3.10 Vakum torbasının yerleştirilmesi



Şekil 3.11 Reçine hattı spiral borusu ve T bağlantı parçası



Şekil 3.12 Vakum ortamına alınmış, üretime hazır malzemeler ve sistem

Üretimde epoksi reçine sistemi kullanılmıştır. Reçine olarak DURATEK marka 1105 seri epoksi laminasyon reçinesi kullanılmıştır. Sertleştirici karışım oranı üretici firmanın tavsiyesine uygun olarak sertleştirici/reçine: 0.35 şeklinde belirlenmiştir. Tezgâhın vakum sistemi devreye sokularak bu karışım kumaşlara emdirilir. Tezgâh üretimden önce 30 dakika boyunca 60°C'ye kadar ısıtılır. Ardından reçine sisteme verildiğinde 90°C'de 90 dakika boyunca malzeme külemeye bırakılır. Küleme tamamlandıktan sonra malzeme tezgâhtan alınır. Soyma kumaşının yardımıyla borulardan ve vakum torbasından ayrılır.

BÖLÜM DÖRT

DENEY DETAYLARI VE SONUÇLARI

4.1 Giriş

Deneyler için kesilen numunelerin uç kısımlarına öncelikle 6 mm çapında pim delikleri açılmıştır. Daha sonra bazı numunelere pim hasar dayanımını arttırmak için dolgu işlemi uygulanmıştır. Çünkü modifiye edilmemiş delikler mukavemetçe zayıf ara malzeme nedeniyle çok zayıftır. Bu amaçla pim deliklerinden daha büyük çapta delikler açılıp, cam elyaf katkılı reçine ile dolgu yapılmış, pişme ve katılaşmadan sonra orijinal numunede olduğu gibi 6 mm çapında pim delikleri açılmıştır. Deneylerde üç farklı değişken kullanıldı. Numunelerde iki parametre sabit tutularak dolgu çapı, kenar-delik arası mesafe ve dolgudaki kütleli elyaf oranı değiştirildi ve yapılan deneylerin sonuçları bu doğrultuda incelendi.

4.2 Problemin Belirlenmesi

Bu çalışmada tüm numunelerin mekanik özellikleri, boyu (L), genişliği (w) ve bağlantı için kullanılan pimin çapı (d) sabit tutulmuştur. Değişken parametreler ise pim deliğinin etrafındaki dolgu çapı (D), pim deliğinin kenara uzaklığı (E), ve dolgudaki kütleli elyaf oranı (m_f)'dır. (Şekil 4.1) Deneylerde kullanılan söz konusu parametreler Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

D: Dolgu çapı

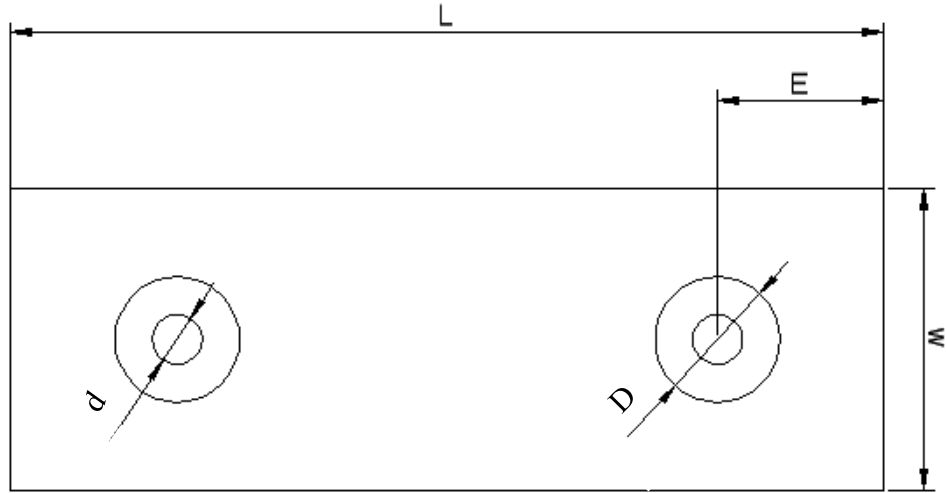
d: Pim çapı

E: Kenar-delik arası mesafe

w: Numune genişliği

L: Numune boyu

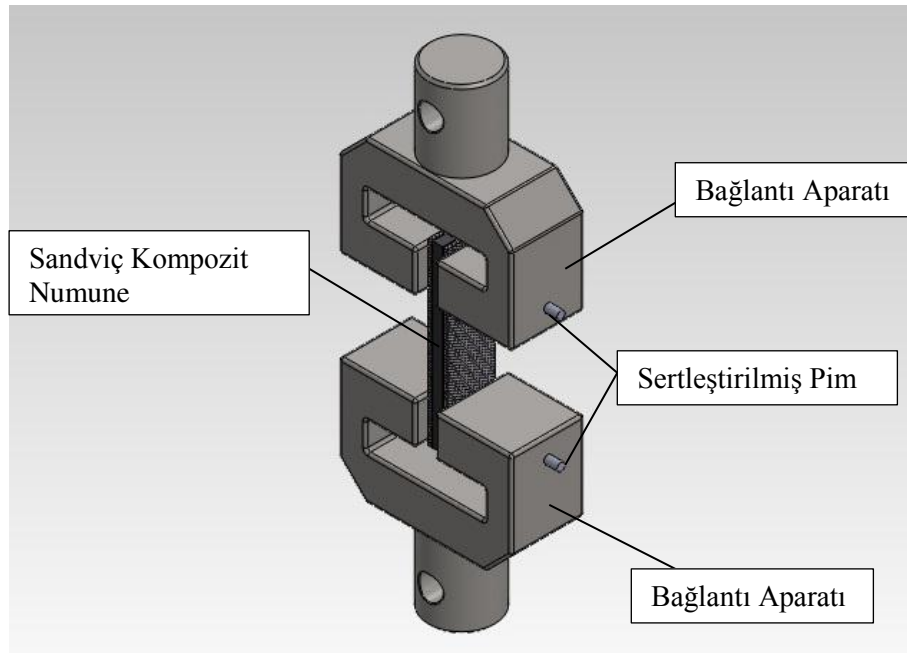
m_f : Dolgudaki kütleli elyaf oranı



Şekil 4.1 Numune ölçüleri

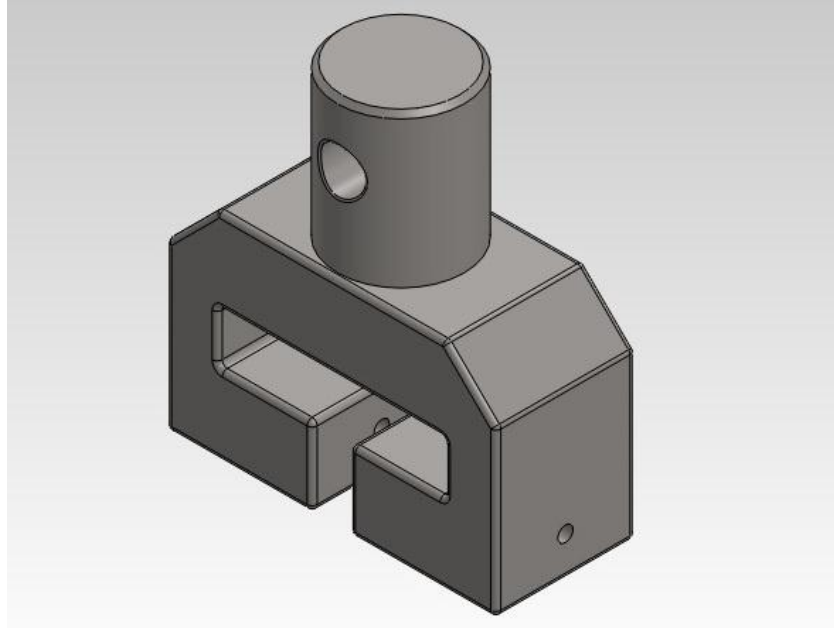
4.3 Numuneleri Hazırlanması ve Deney Prosedürü

Hazırlanan numunelerin çekme testine tabi tutulması amacıyla önceden deney tasarlanmıştır. Bu tasarım doğrultusunda hazırlanacak olan numuneler Şekil 4.2’deki görüldüğü gibi çekme cihazına bağlanmış ve iki taraftan pimler vasıtasıyla çekilmiştir.



Şekil 4.2 Kullanılan çekme deney aparatı

Pimli bağlantı yapılarak deneylerin gerçekleştirilmesi için çekme cihazına özel bir bağlama aparatı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarım sürecinde aparat SolidWorks 2011 programı kullanılarak modellenmiş ve bu doğrultuda imal edilmiştir.



Şekil 4.3 Pimli bağlantı için numune deney bağlantı aparatı 3B tasarımı



Şekil 4.4 İmal edilmiş olan numune bağlantı aparatı

Tablo 4.1 Deney numunelerinin geometri parametreleri

Delğin Kenara Uzaklığı(E) [mm]	Dolgu Çapı (D) [mm]	Dolgu Elyaf- Reçine Kütlesel Oranı (m_f) [%]	Pim Çapı (d) [mm]	Boy x En (Lxw) [mm]
15	10,12,15,18	%2; %4	6	135x36
20	10,12,15,18	%2; %4	6	135x36
25	10,12,15,18	%2; %4	6	135x36



Şekil 4.5 Sandviç kompozit plakanın testerede kesilmesi

Bölüm 3.3'te aşama aşama hazırlanışı anlatılmış olan sandviç kompozit plaka masa tipi testerede birkaç parçaya ayrılarak numune yerleşimine hazır hale getirildi. Deney için belirlenmiş olan numune sayısına uygun olarak plaka üzerine parçaların yerleşimi SolidWorks programı ile yapıldı. Numuneler Şekil 4.5'te görüldüğü gibi masa tipi testere ile uygun ölçülerde kesildi. Uygun ölçülere gelen numuneler Tablo 4.1'de gösterilmiş olan dolgu ölçülerine uygun olarak matkap tezgâhında delindi.

Dolgu malzemesinde kullanılacak olan kırılmış cam elyaf, kumaşlardan alınan ipliklerin çok ince bir şekilde kesilmesi ile elde edildi. (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Dolgu malzemesi için hazırlanmış olan kırılmış cam elyaf



Şekil 4.7 İlk delik delme işlemi uygulanmış olan numuneler

Değişken parametrelerden biri olan dolgudaki elyaf-reçine kütleli oranı Tablo 4.2’de gösterildiği şekilde ayarlanmıştır. Özellikle cam elyafının kütleli miktarı hassas terazide ölçülerek reçinenin içerisine katılmıştır. Kütleli oran şu formül ile hesaplanmıştır:

$$\frac{\text{Elyaf Miktarı [gr]}}{\text{Reçine Miktarı [gr] + Sertleştirici Miktarı[gr]}} \times 100$$

Tablo 4.2 Dolguda kullanılan kütleli elyaf-reçine oranı

Konsantrasyon Kodu	Reçine Miktarı [gr]	Sertleştirici Miktarı [gr]	Elyaf Miktarı [gr]	Kütleli Oran [%]
1	100	32	1,98	% 2
2	100	32	3,99	% 4

Dolgu malzemesi olarak Duratek marka DT 1000 - solventsiz epoksi laminasyon reçinesi ve sertleştirici tercih edildi. Sertleştirici olarak da özellikle hızlı sertleştirici tercih edilmiştir. Bunun sebebi pratikte bu tür bağlantıların doldurulması için hızlı sertleştiricilerin kullanılmasıdır. Hızlı sertleştirici reçineye katıldıktan sonra oda sıcaklığında en az 24 saat kurlaşmaya bırakılması gerekmektedir.



Şekil 4.8 Deliklerin dolgu ile doldurulması işlemi

Hazırlanmış olan iki farklı konsantrasyondaki dolgu malzemeleri sivri uçlu bir aparat yardımıyla, numunelerdeki deliklere dolduruldu. Ardından numuneler reçine üreticisinin öngördüğü şekilde oda sıcaklığında 24 saat kurlaşmaya bırakıldı.

Pim deliklerinin delinmesi işlemine geçilmeden önce dolgu malzemesinin delikten taşan kısımları taşlanarak temizlendi. Böylece deneyler için uygun her iki tarafı düz yüzeyler elde edildi.



Şekil 4.9 Taşlama işlemi

Taşlama işleminden sonra pimlerin takılacağı deliklerin delinme işlemi gerçekleştirildi. Numuneler matkap tezgâhında sertleştirilmiş uçlar vasıtası ile delindi. Deney için sertleştirilmiş ölçüsü sabit ve standart olan 6 mm çapındaki civa çeliği pimler kullanıldı.



Şekil 4.10 Pim deliklerinin delinmesi işlemi

Bu çalışmada, çekme deneyleri Shimadzu AG-X test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Cihaz 1.sınıf diye tabir edilen hassas load cell ile kuvvetleri ölçmektedir. Cihaz, deney yapılan malzemeleri 0.002 N ile 100000 N arasında kuvvetler ile çekme kapasitesine sahiptir.

Numuneler cihaz için tasarlanmış olan bağlantı aparatı ile iki tarafından pimlenmiştir. Numuneler 1mm/dak hız ile çekildi. Deneyler grafikte ilk kırılma anı (hasarı) görüldükten sonra, numune davranışı belirlenene kadar devam ettirilmiştir.

Numuneler deney sonrası inceleme için geometrik parametrelerine göre bir kodlama işlemine tabi tutuldu. Kodlama işleminin ayrıntıları Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3 Numune kodlarına göre değişken değerleri

Numune Kodu	Kenar-Delik Arası Mesafe (E) [mm]	Dolgu Çapı (D) [mm]	Dolgu Elyaf-Reçine Kütlesel Oranı (m_f) [%]	Pim Çapı (d) [mm]	Boy(L) x En(W) [mm]
1510-1	15	10	%2	6	135x36
1510-2	15	10	%4	6	135x36
1512-1	15	12	%2	6	135x36
1512-2	15	12	%4	6	135x36
1515-1	15	15	%2	6	135x36
1515-2	15	15	%4	6	135x36
1518-1	15	18	%2	6	135x36
1518-2	15	18	%4	6	135x36
2010-1	20	10	%2	6	135x36
2010-2	20	10	%4	6	135x36
2012-1	20	12	%2	6	135x36

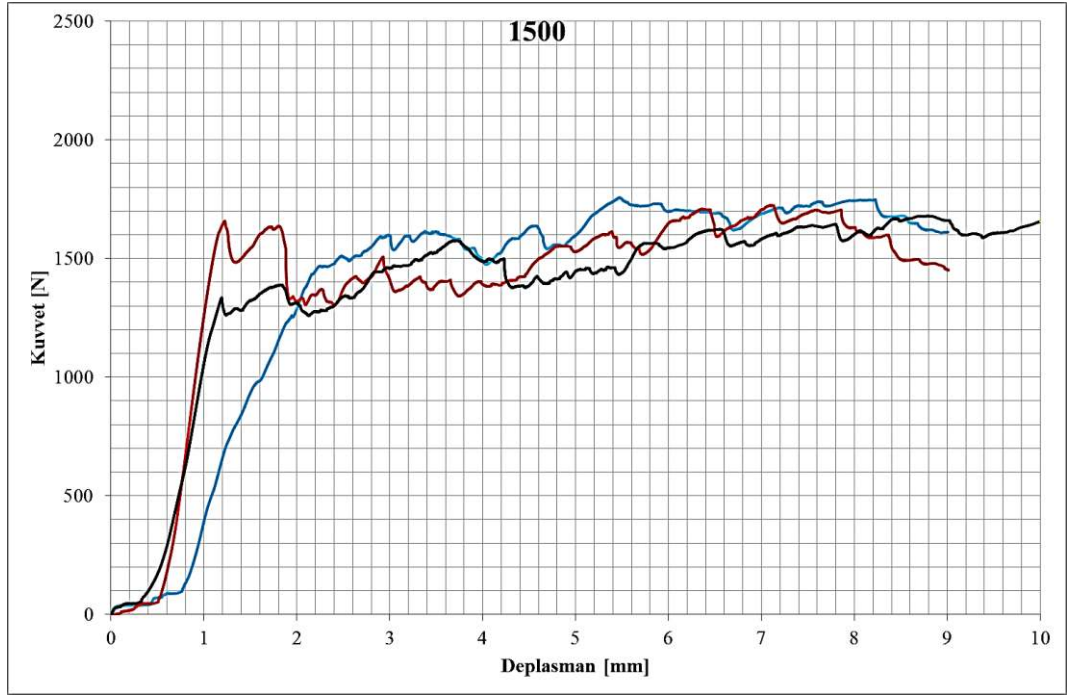
Tablo 4.3 (devam) Numune kodlarına göre değişken değerleri

Numune Kodu	Kenar-Delik Arası Mesafe (E) [mm]	Dolgu Çapı (D) [mm]	Dolgu Elyaf-Reçine Kütlesel Oranı (m_f) [%]	Pim Çapı (d) [mm]	Boy(L) x En(W) [mm]
2012-2	20	12	%4	6	135x36
2015-1	20	15	%2	6	135x36
2015-2	20	15	%4	6	135x36
2018-1	20	18	%2	6	135x36
2018-2	20	18	%4	6	135x36
2510-1	25	10	%2	6	135x36
2510-2	25	10	%4	6	135x36
2512-1	25	12	%2	6	135x36
2512-2	25	12	%4	6	135x36
2515-1	25	15	%2	6	135x36
2515-2	25	15	%4	6	135x36
2518-1	25	18	%2	6	135x36
2518-2	25	18	%4	6	135x36
1500	15	-	-	6	135x36
2000	20	-	-	6	135x36
2500	25	-	-	6	135x36

BÖLÜM BEŞ

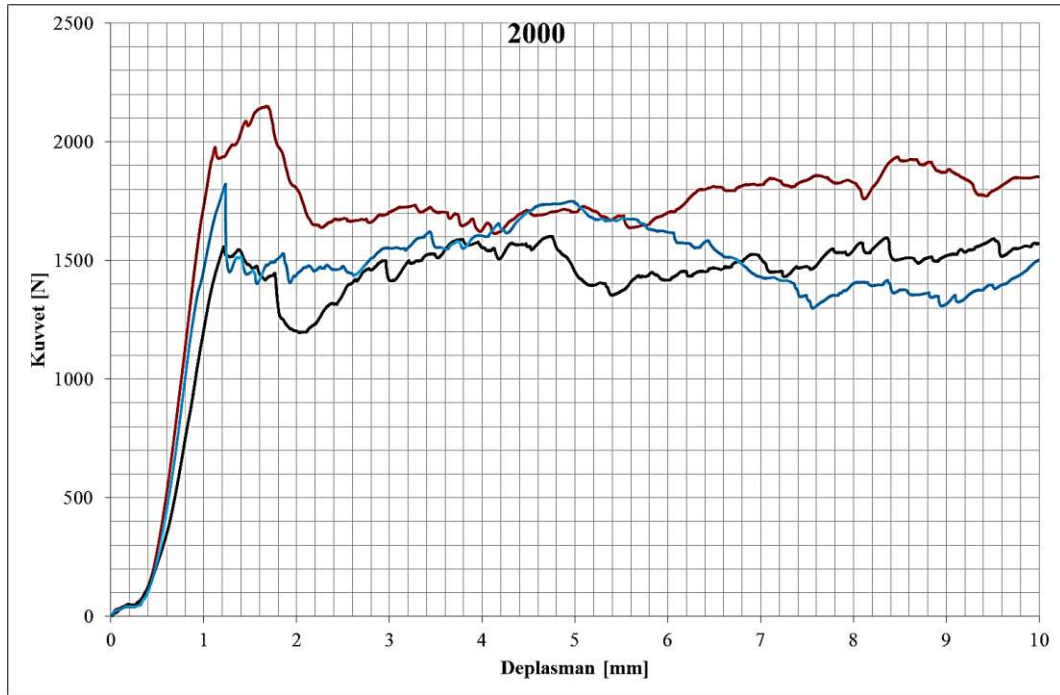
DENEYSEL SONUÇLAR: KARŞILAŞTIRMA VE YORUMLAR

5.1 Dolgusuz Deney Grupları



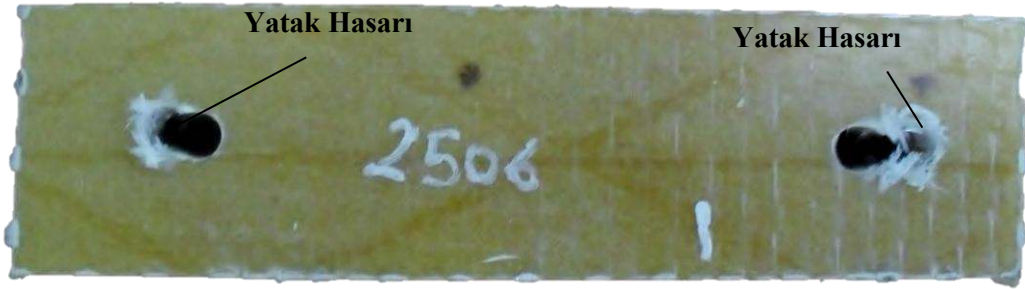
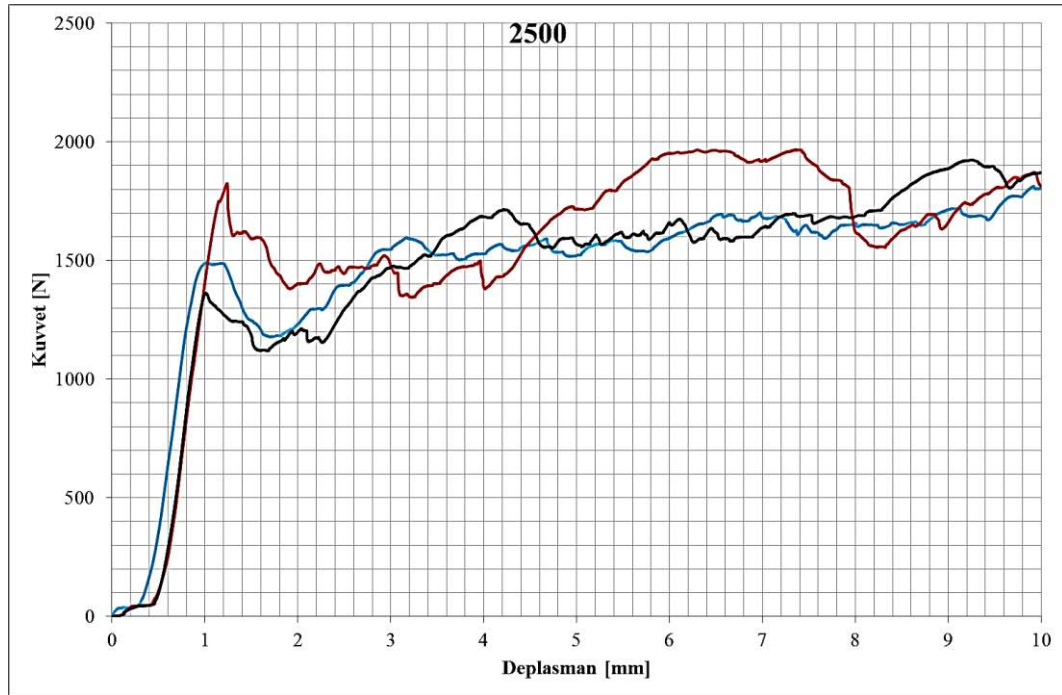
Şekil 5.1 1500 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen hasar

Delğin kenara uzaklığı (E) 15 mm olan dolgusuz numunelerde kayma hasarları görülmüştür. Grafiklerde yaklaşık 1300-1600 N bandında ilk kuvvet düşmesi meydana gelmiş, ardından tek düze kuvvet dalgalanmaları olmuştur. İlk kırılmanın olduğu pim deplasmanı ise 1,30 – 2 mm aralığıdır.



Şekil 5.2 2000 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen hasar

Deliğin kenara uzaklığı (E) 20 mm olan dolgusuz numunelerde yatak hasarları görülmüştür. 1500 kodlu numunelerde olduğu gibi, 2000 kodlu numunelerde de yalnızca tek taraftan hasar olduğu gözlemlenmiştir. Grafikler yaklaşık 1500-2200 N bandında ilk kuvvet düşmesini göstermiş, ardından tek düze kuvvet dalgalanmaları göstermiştir. İlk kırılmanın olduğu pim deplasmanı ise 1,20 – 1,70 mm aralığındadır. Şekil 5.2’deki grafikte görüldüğü gibi numunelerde yaklaşık benzer davranışlar gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3 2500 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen hasar

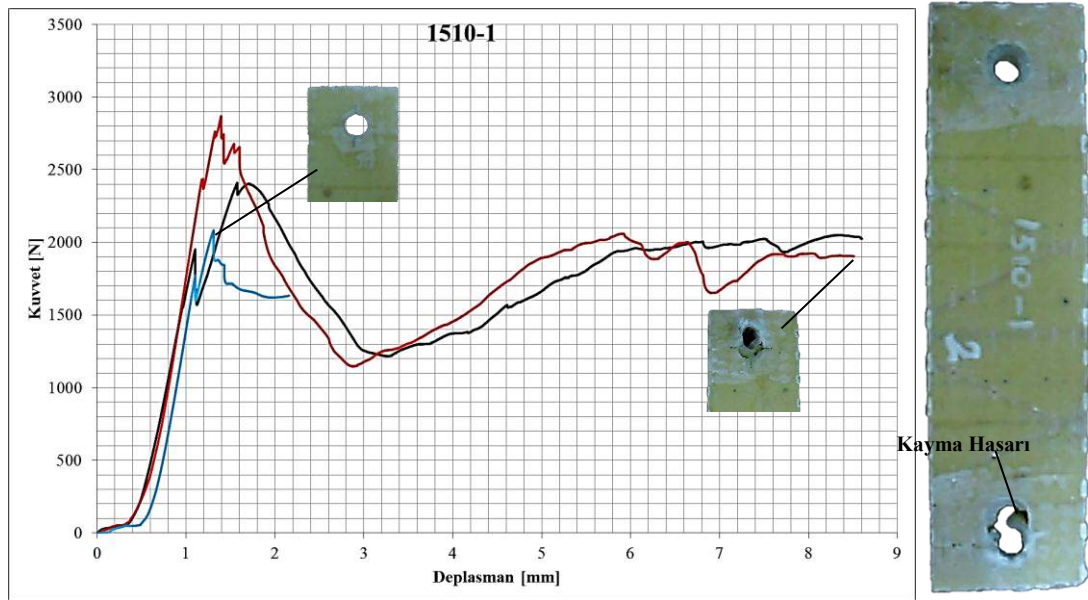
Deliğin kenara uzaklığı (E) 25 mm olan dolgusuz numunelerde de yatak hasarları görülmüştür. 1500 ve 2000 kodlu numunelerin aksine çift taraftan hasarlar meydana gelmiştir. Grafiklerde yaklaşık 1250-1600 N değerleri arasında ilk hasara uğramış olup, ardından diğer numune gruplarında olduğu gibi kuvvet dalgalanmaları göstermiştir. İlk kırılmanın olduğu pim deplasmanı ise 1,00 – 1,20 mm aralığıdır.

Dolgusuz numunelerin deney sonuçları genel olarak özetlenirse, kenar-delik arası mesafesi diğer gruplara göre uzun olan 2500 kodlu numunelerde bu hasar iki pim deliğinde de meydana gelirken, diğer iki deney grubunda yalnızca tek pim deliğinde oluşmuştur. Üç grupta da ilk kırılmadan sonra düzenli kuvvet dalgalanmaları meydana gelmiştir. Ayrıca ilk kırılmadan sonra yüklerde çok büyük ani düşmeler meydana gelmemiştir. Deliğin kenara uzaklığı E=20 mm olan numunelerin ilk

kırılma yüklerinin en yüksek olduğu, diğer iki numune grubunun ilk kırılma yüklerinin ise yaklaşık aynı olduğu gözlemlenmiştir.

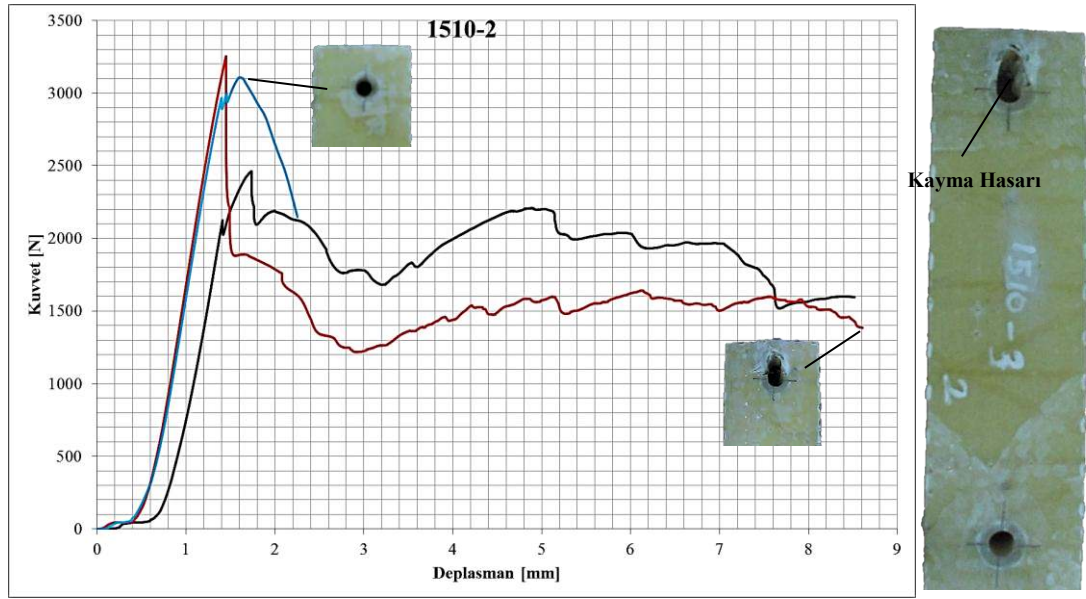
5.2 Dolgulu Deney Grupları

Sandviç kompozit malzemelerde, kırılmış cam elyaf-reçine dolgusuyla güçlendirilmiş pim deliklerinin çekme kuvveti karşısında ne tür davranışlar gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu bölümde belirlenen numune gruplarının genel davranışı kendi içinde incelenmiştir. Grafiklerde “1” kodu %2’lik cam-elyaf/reçine oranını (dolgu kısmı için); “2” kodu %4’lük cam-elyaf/reçine oranını temsil etmektedir.



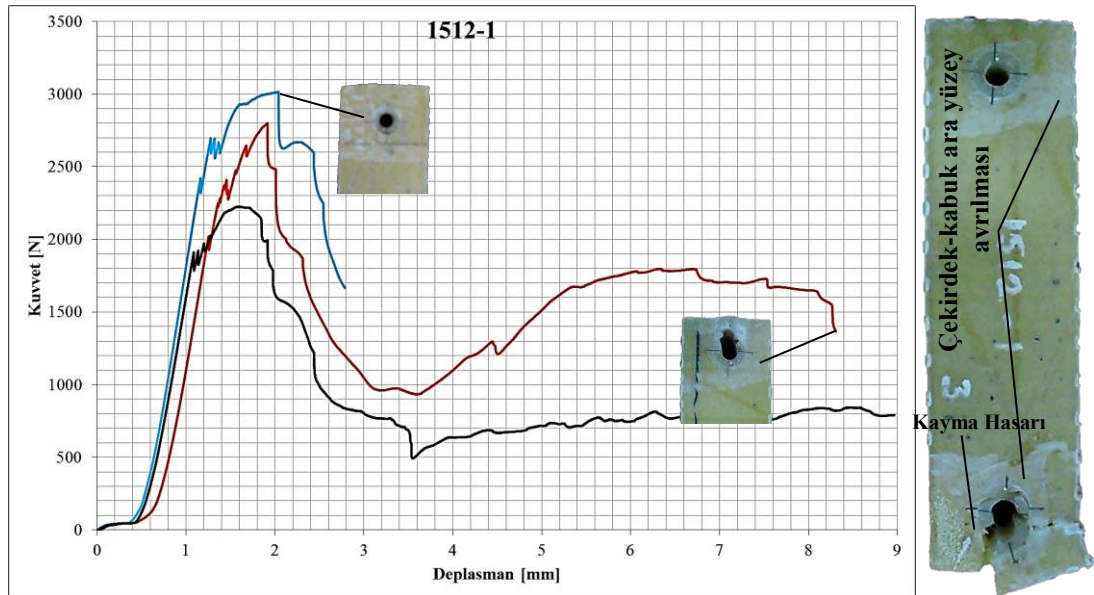
Şekil 5.4 1510-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

$D=10$ mm, $E=15$ mm, $m_f=\%2$ yapılandırmasındaki numunelerde kayma hasarları görülmüştür. Buna ek olarak dolgu çevresinde çekme hasarının başlangıç seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir. Grafiklerde, yaklaşık 2400-2800 N kuvvet bandında ve 1,35 – 1,50 mm pim deplasmanı aralığında ilk kuvvet düşmesi görülmüştür. Bu düşmeden sonra malzeme dolgusuz bağlantı karakteristiğini göstermeye başlar. Dolgu çapı diğer numunelere göre daha düşük olduğundan bu özellik daha belirgindir.



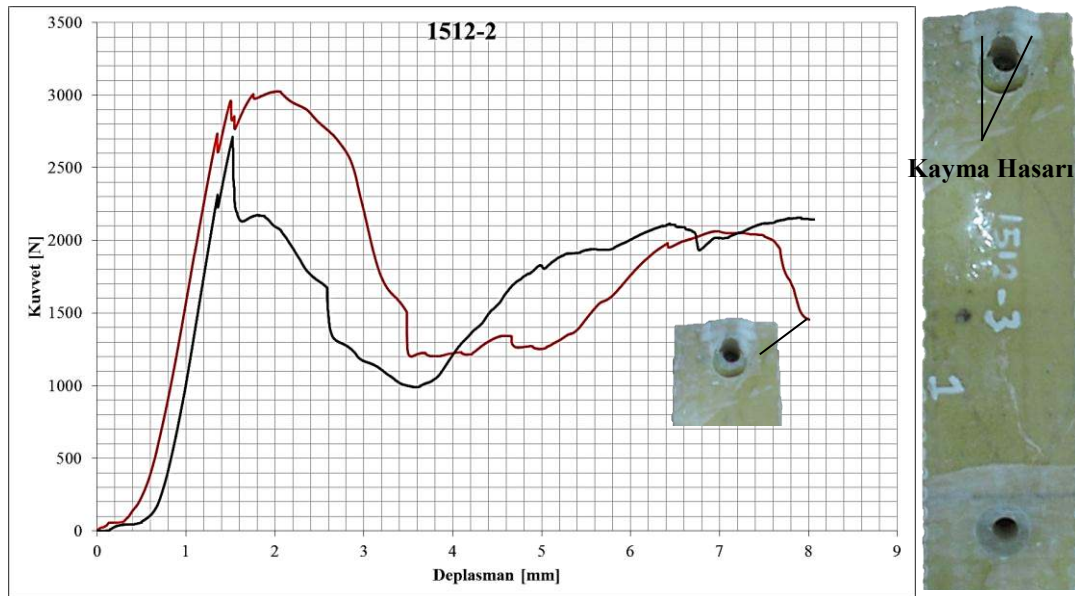
Şekil 5.5 1510-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

D=10 mm, E=15 mm, $m_f=4\%$ yapılandırmasındaki numunelerde kayma hasarları görülmüştür. Oluşan hasar tek taraflıdır ve D=10 mm, E=15 mm, $m_f=2\%$ yapılandırmasındaki numunelere göre daha belirgindir. Grafiklerde yaklaşık 2400-3200 N kuvvet bandında ve 1,42 – 1,65 mm pim deplasmanı aralığında ilk kuvvet düşmesi göstermiştir. Bu geometrideki numunelerin, konsantrasyonu daha düşük olan aynı geometrideki numunelere göre daha yüksek yük taşıdığı ama daha erken kırıldığı görülmüştür.



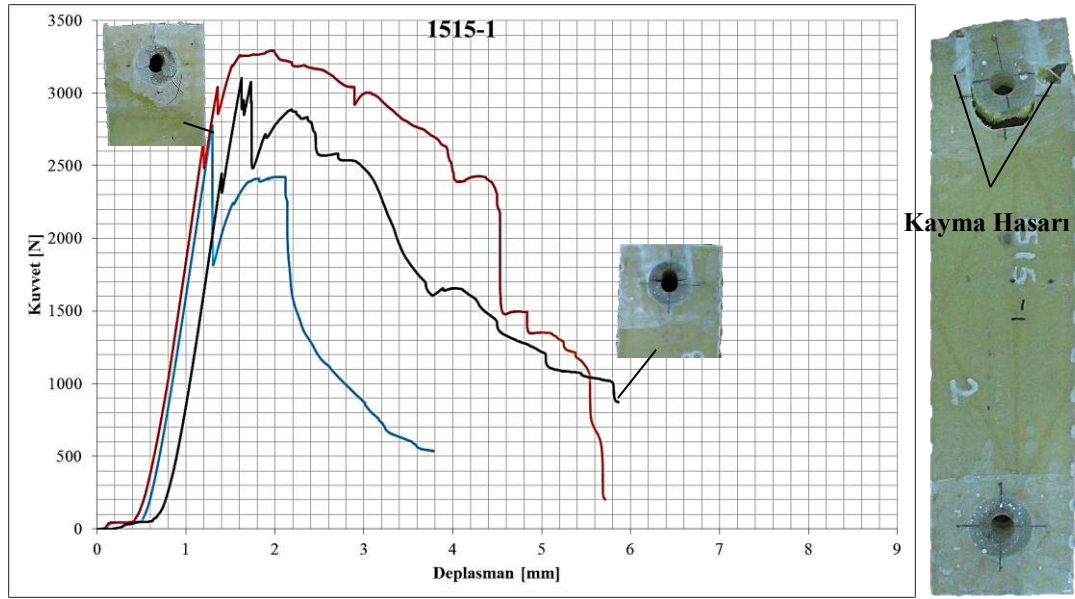
Şekil 5.6 1512-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

D=12 mm, E=15 mm, m_f =%2 yapılandırmasındaki numunelerde de kayma hasarları görülmektedir. Buna ilave olarak delik civarında kabuk-çekirdek ara yüzeyinde ayrılmalar (Şekil 5.6'da numunede beyazlaşan kısımlar) ve devamında dolguda ani kırılmalar gözlemlenmiştir. Her iki pim deliği etrafında da beyazlaşmalar mevcuttur. Ancak dolgudaki kırılma daha gevrek karakterli olduğundan, delik civarındaki dolgu kırılması ani ve tek taraflıdır. Grafikler yaklaşık 2300-2750 N kuvvet bandında ve 1,80 – 1,90 mm pim deplasmanı aralığında ilk kuvvet düşmesi göstermiştir. Hasardan sonraki bu düşüş dolgulu numunelerin genel olarak gösterdiği şekilde çok anidir.



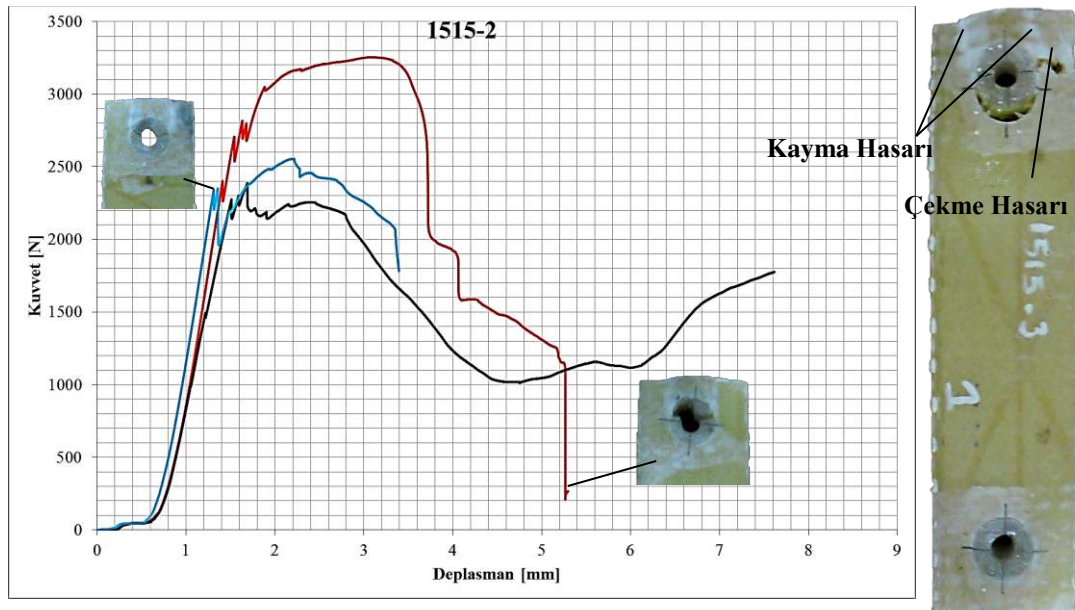
Şekil 5.7 1512-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

D=12 mm, E=15 mm, m_f =%4 geometrisindeki numunelerde kayma hasarları görülmektedir. Oluşan dolgu hasarı diğer numunelerde olduğu gibi tek taraflıdır. Bazı numunelerde dolgunun pim ile birlikte deplasman yaptığı ve köpüğe saplandığı görülmüştür. Grafikler yaklaşık 2650-2900 N kuvvet değerleri arasında ve 1,45 – 1,50 mm pim deplasmanı aralığında ilk kuvvet düşmesi göstermiştir. D=12 mm, E=15 mm, m_f =%2 geometrisindeki numunelere göre daha fazla kuvvet taşınmıştır.



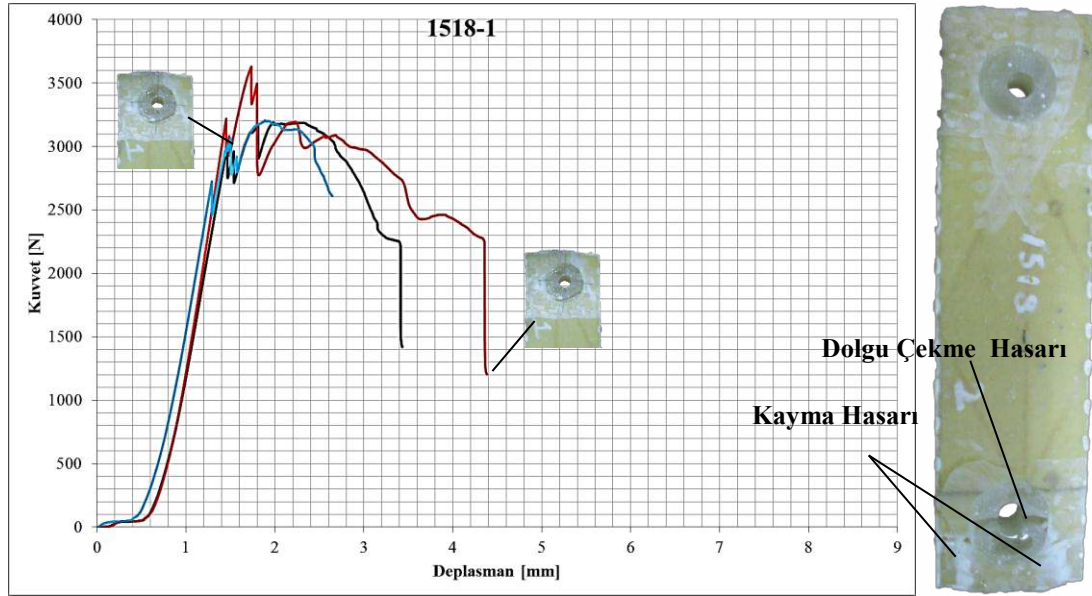
Şekil 5.8 1515-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

$D=15$ mm, $E=15$ mm, $m_f=\%2$ yapılandırmasındaki numunelerde daha önce anlatılan hasarlar görülmüştür. Kayma hasarı daha önce incelenmiş olan numune gruplarına göre daha ön plana çıkmaktadır. Çünkü dolgu çapının (D) artması dolgunun kenara olan uzaklığını azaltmıştır. Ayrıca bu numunelerde çekme hasarları da görülmektedir. Şekil 5.8’de görüldüğü gibi kayma hasarını, çekme hasarı ile dolgu-sandviç kompozit arası açılma (ayrılma) hasarı takip etmiştir. Buna karşılık diğer uçta ise delik civarında beyazlaşmalar meydana gelmiştir.

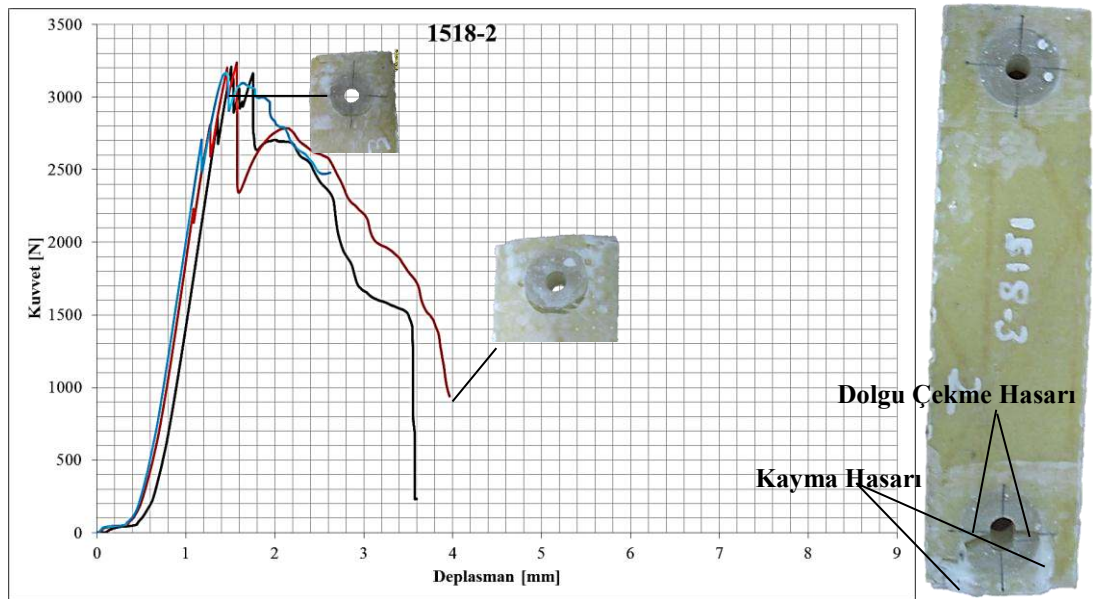


Şekil 5.9 1515-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

D=15 mm, E=15 mm, $m_f=\%4$ yapılandırmasına sahip numuneler aynı geometrideki $\%2$ 'lik dolgu konsantrasyonuna sahip numuneler ile çok benzer hasarlara uğramışlardır. Numunelerde meydana gelen hasarlar Şekil 5.9'da görülebilmektedir. Aynı şekildeki grafik incelendiğinde yaklaşık 2290-2750 N kuvvet bandında ve 1,34 – 1,67 mm pim deplasmanı aralığında hasarlar meydana gelmiştir.

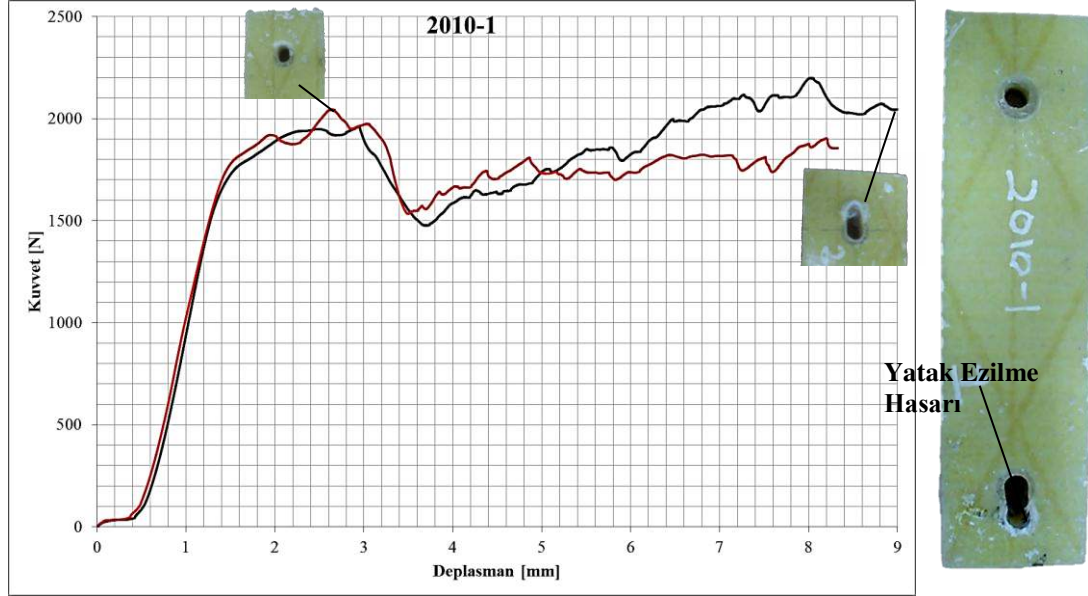


Şekil 5.10 1518-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı



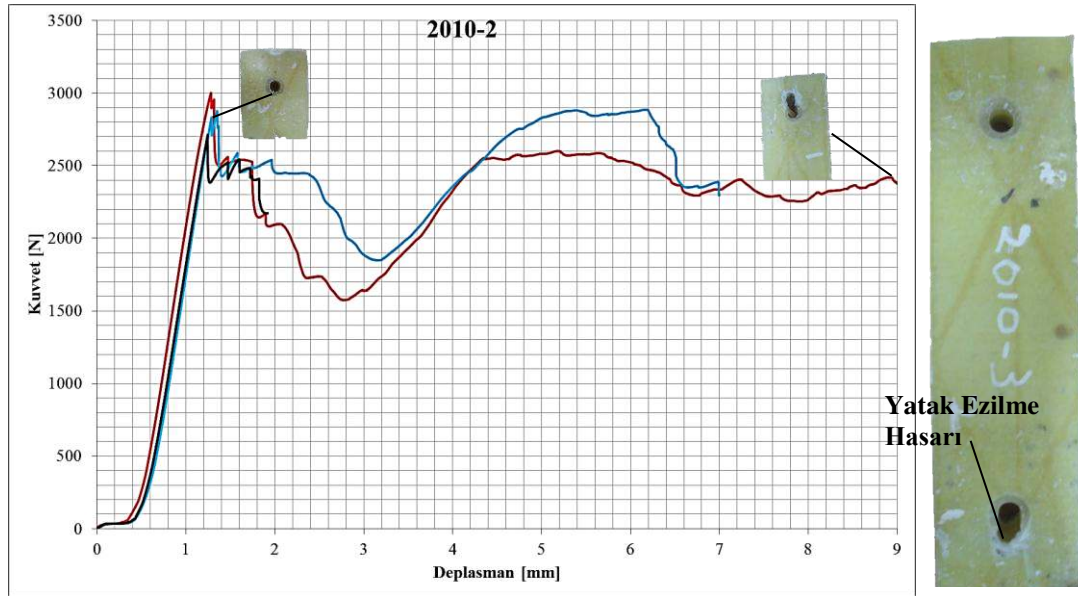
Şekil 5.11 1518-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

$D=18$ mm, $E=15$ mm, $m_f=\%2$ ve $m_f=\%4$ yapılandırmasındaki numunelerde kayma hasarları baskın olarak görülmüştür. Dolgu çapının büyümesinden dolayı sandviç kompozit kısımla beraber dolguda da çekme hasarları görülmüştür. Bu numunelerde meydana gelmiş olan hasarlar Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir.

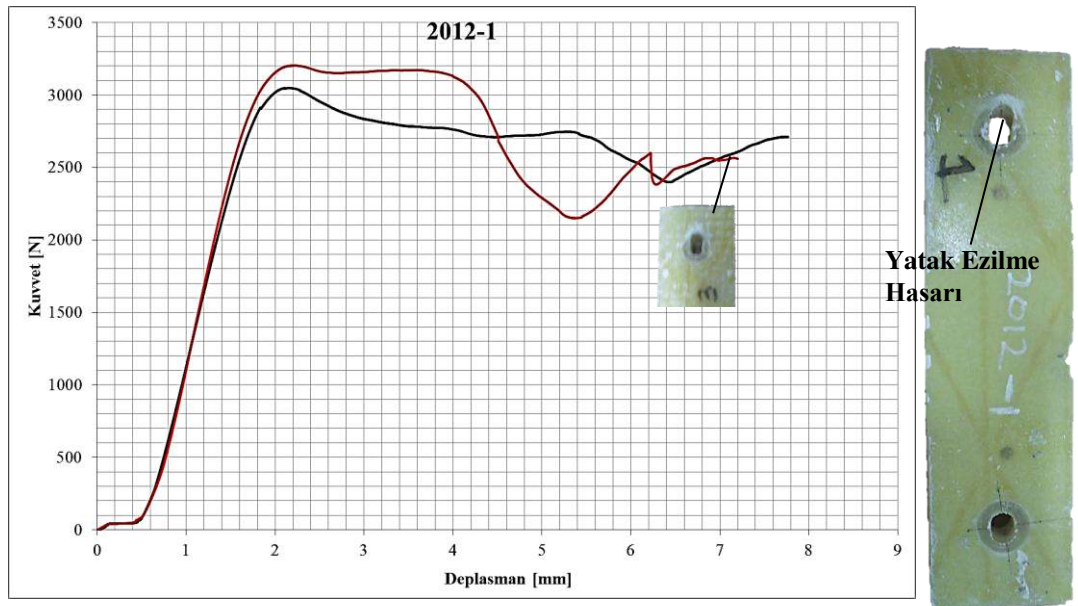


Şekil 5.12 2010-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

$D=10$ mm, $E=20$ mm, $m_f=\%2$ yapılandırmasındaki numunelerde sadece yatak ezilme hasarları oluşmuştur. Grafikler yaklaşık 1970 - 2040 N kuvvet bandında ve 2,67 – 2,75 mm pim deplasmanı aralığında ilk kuvvet düşmesi göstermiştir. En büyük kuvvet değerinde dolgu kısmında kırılmalar olmuştur. Kenara olan uzaklık (E), dolgu çapına göre çok büyük olduğundan, dolgu kırılması sonrası yükü sandviç kısım taşımıştır ve yatak hasarlarının meydana gelmesi gibi dolgunsuz numunelere benzer bir davranış gözlemlenmiştir. (Şekil 5.12) Benzer bir mekanizması $D=10$ mm, $E=20$ mm, $m_f=\%4$ geometri ve dolgu oranına sahip numunelerde de meydana gelmiştir. Bu geometrideki numunelerdeki hasar şekli Şekil 5.13’te görülebilmektedir.

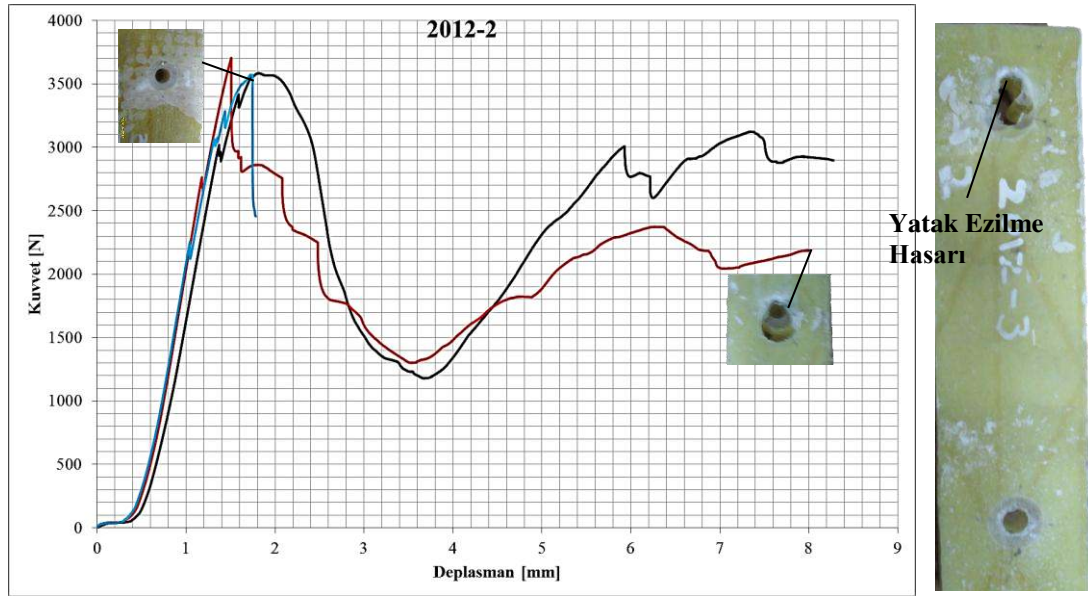


Şekil 5.13 2010-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı



Şekil 5.14 2012-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

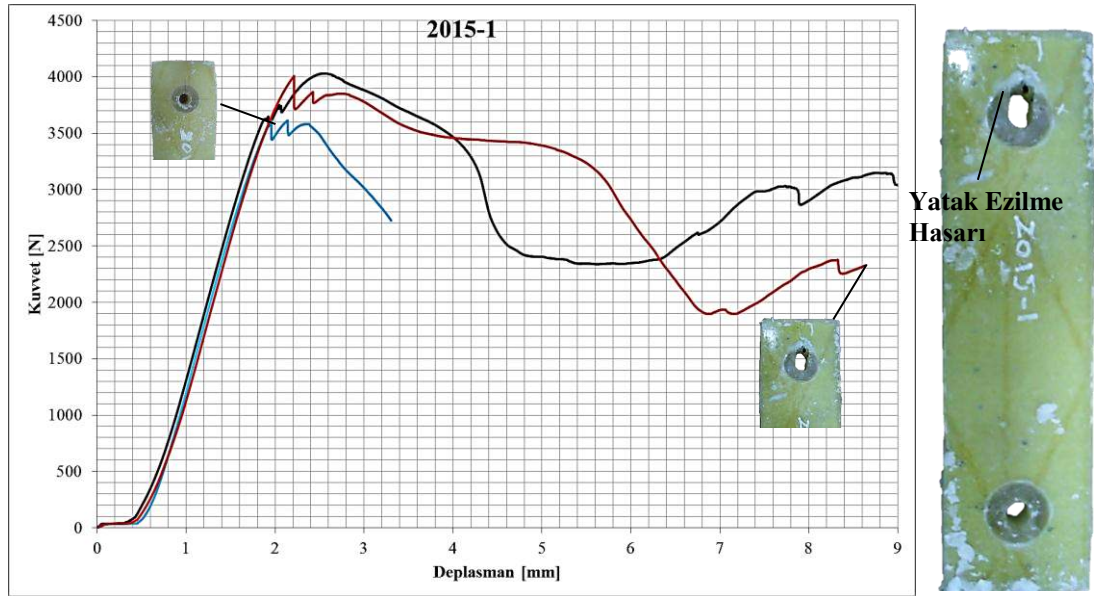
D=12 mm, E=20 mm, $m_f=\%2$ yapılandırmasındaki numunelerde D=10 mm, E= 20 mm, $m_f=\%2$ 'luk numunelerle benzer hasar davranışı meydana gelmiştir. Ancak, farklı olarak en yüksek kuvvetten sonra ani yük düşüşleri gözlemlenmiştir. Numunelerdeki bu davranış Şekil 5.14'deki grafikte görülebilmektedir.



Şekil 5.15 2012-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

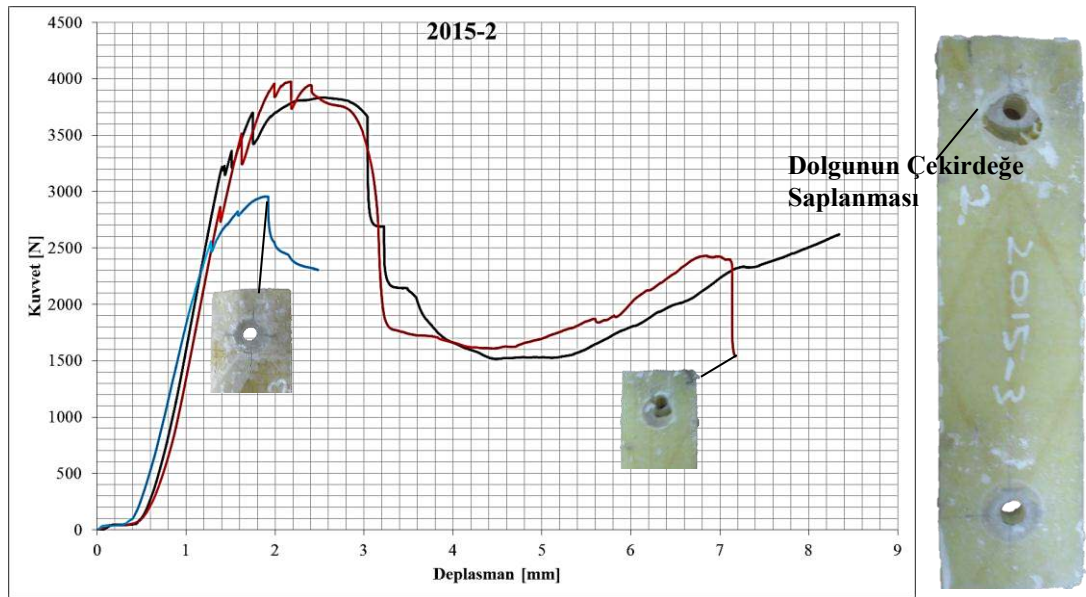
D=12 mm, E=20 mm, $m_f=\%4$ yapılandırmasındaki numunelerde 2012-1 kodlu numunelere benzer şekilde yatak ezilme hasarları görülmüştür. Ancak en yüksek kuvvet değerinden sonra grafikte ani düşüşler görülmektedir. Grafiklerde yaklaşık 3550-3650 N kuvvet bandında ve 1,44 – 1,66 mm pim deplasmanı aralığında ilk kuvvet düşmesi görülmektedir.

2012-1 kodlu numunelerde ise ilk hasar 3100-3200 N değerleri arasında, 2,00 – 2,10 mm pim deplasmanı değerlerinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu yapılandırmadaki numunelerde de yatak ezilme hasarından meydana geldiği görülmüştür.

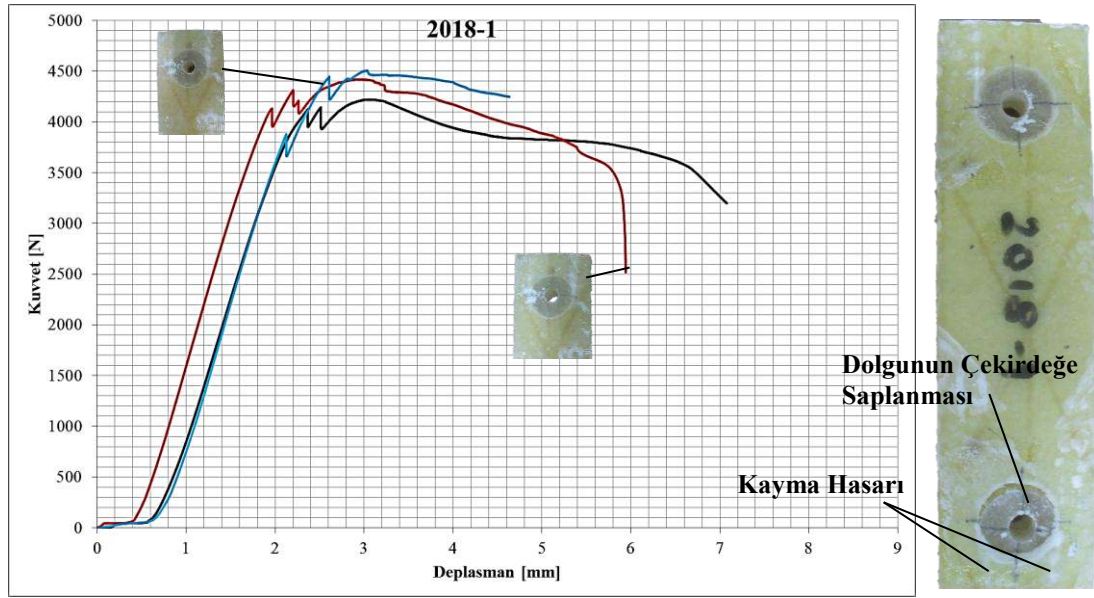


Şekil 5.16 2015-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

2015-1 kodlu numuneler yaklaşık 3540-3930 N kuvvet bandında ve 2,10 – 2,20 mm pim deplasmanı aralığında ilk kuvvet düşmesi göstermiştir. D=12 mm'lik numunelerde olduğu gibi; D=15 mm, E= 20 mm, $m_f=\%2$ geometrisine sahip numunelerde de de %4'lük cam-elyaf reçine kütsel oranına sahip numunelerde en yüksek yükten sonra %2'lik orana sahip numunelere göre daha ani bir yük düşmesi meydana gelmiştir. (Şekil 5.16 ve Şekil 5.17)

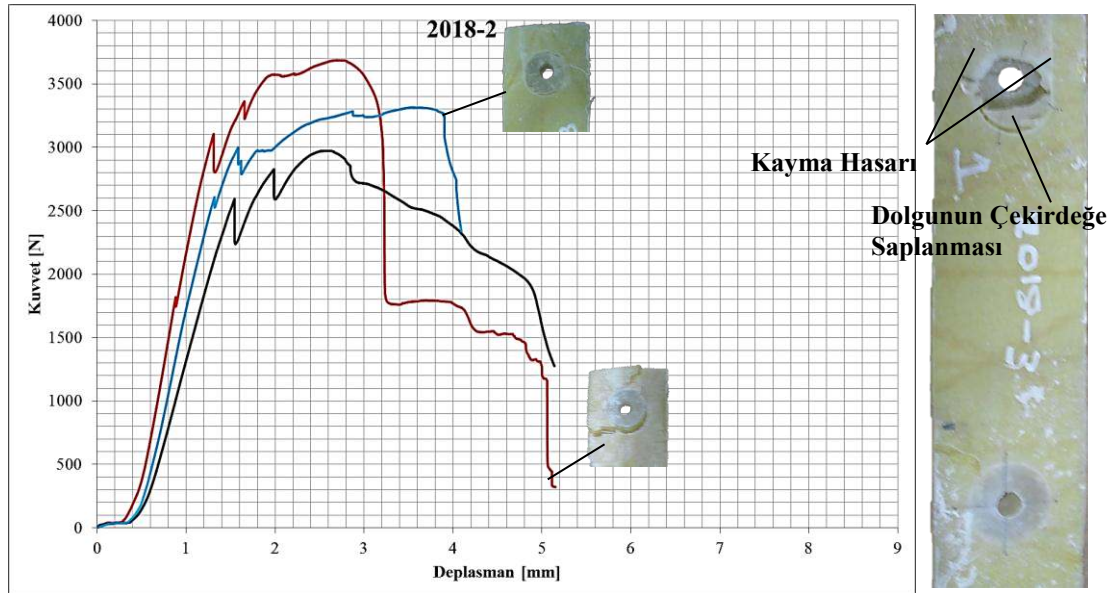


Şekil 5.17 2015-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

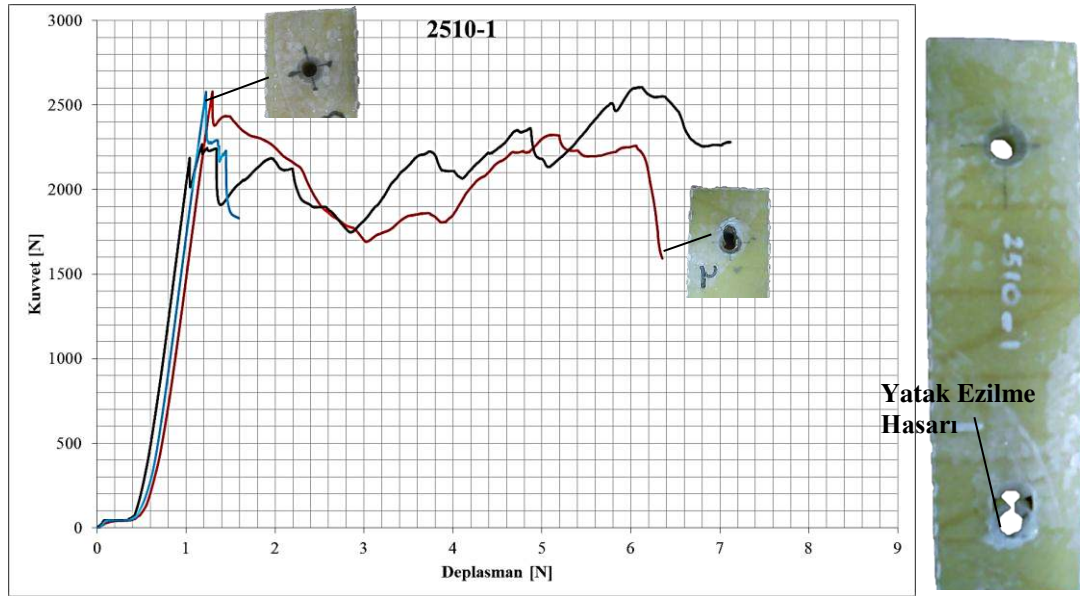


Şekil 5.18 2018-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

Dolgu çapı arttıkça kenar-delik arası mesafesi uzunluğu $E=20$ mm ve dolgu çapı $D=18$ mm olan numunelerde numune kenarlarına olan mesafe azalmakta, kayma ve çekme hasarları başlamaktadır. Ayrıca dolgu bir bütün olarak sandviç yapıdan ayrılarak ara malzemeye gömülmektedir. (Şekil 5.18 ve Şekil 5.19)

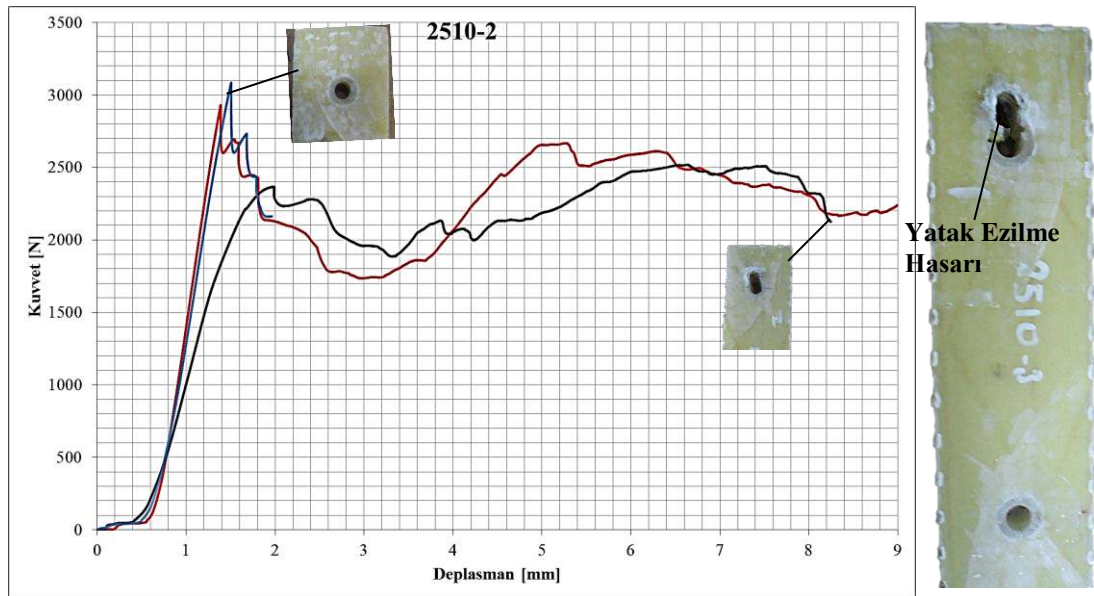


Şekil 5.19 2018-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

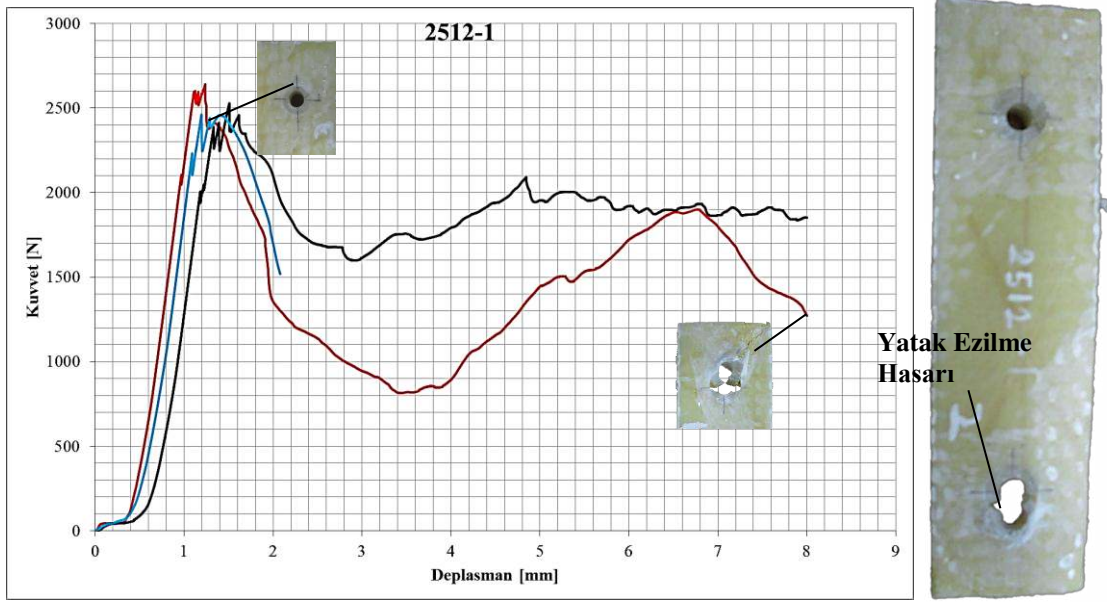


Şekil 5.20 2510-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

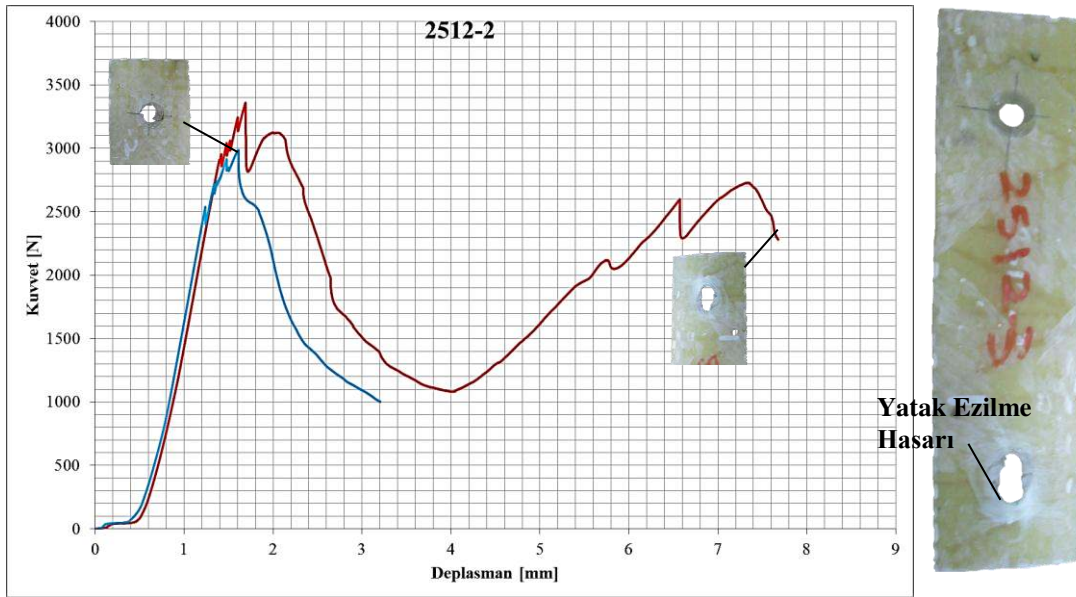
Kenar mesafesi $E=25$ mm olan numuneler için de $D=10$ mm, $D=12$ mm, $D=15$ mm, ve $D=18$ mm olacak şekilde numune geometrisi değiştirilmiştir. Bu geometri parametreleri ile beraber $m_f=\%2$ ve $m_f=\%4$ için deneyler tekrarlanmıştır. Genel olarak, farklı olmakla beraber daha önce açıklanan genel hasar mekanizmaları gözlemlenmiştir. Bu numunelere ait olan kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 5.20'de ve Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.21 2510-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı



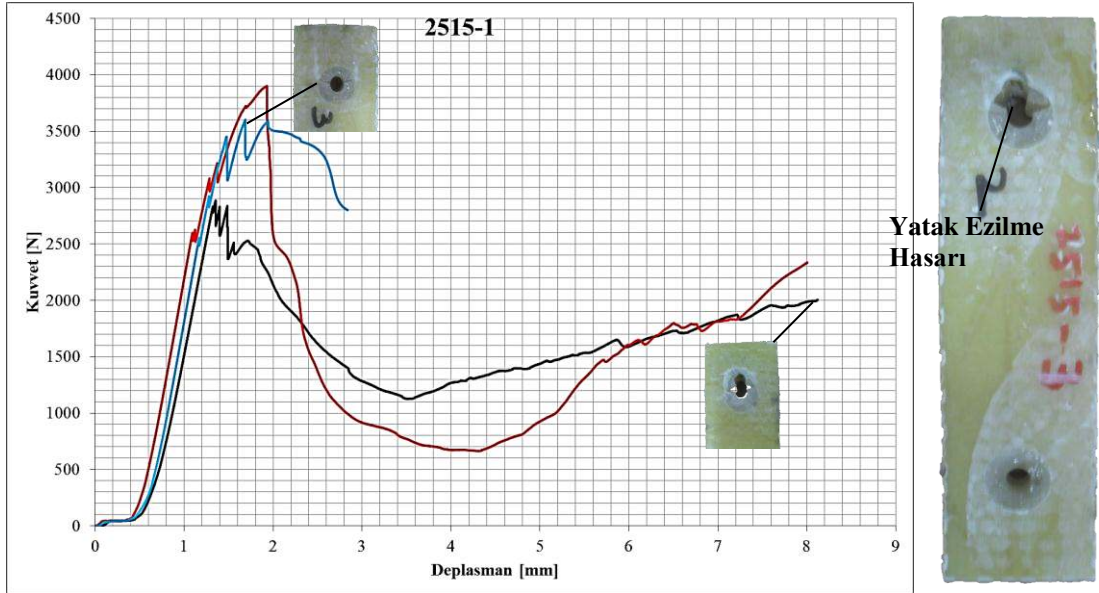
Şekil 5.22 2512-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı



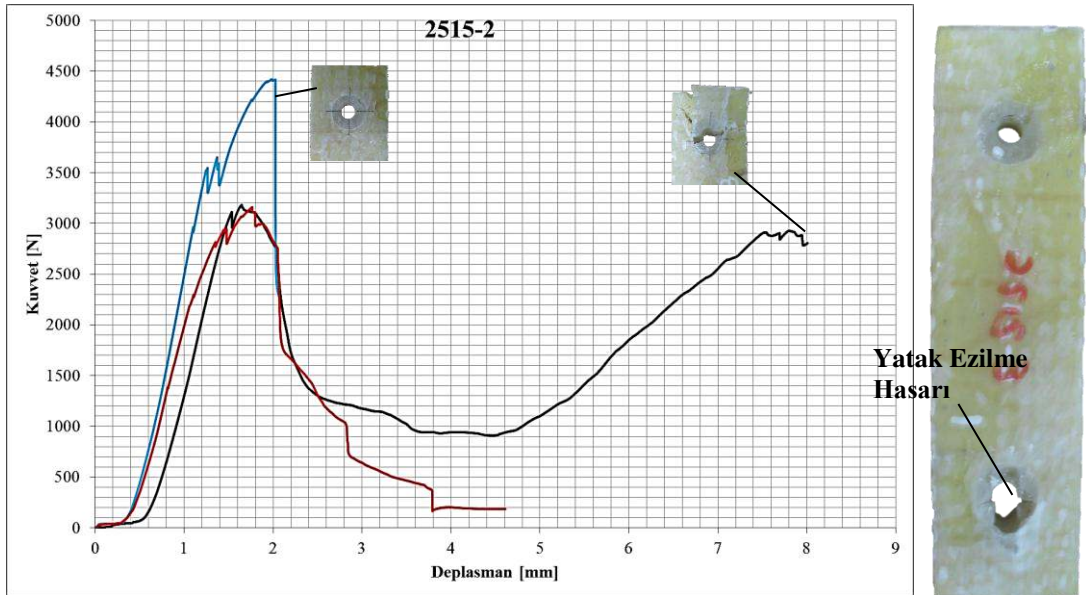
Şekil 5.23 2512-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

2512-1 ve 2512-2 kodlu numunelerde benzer bir şekilde yatak ezilme hasarları meydana gelmiştir. Hasarların birbirinden farkı ise meydana geldikleri kuvvet ve pim deplasmanlarıdır. 2512-1 kodlu numuneler 2410-2450 N kuvvet değerleri arasında ve 1,33 – 1,48 mm pim deplasmanı aralığında ilk kuvvet düşmesi göstermiştir. (Şekil 5.22) 2512-2 kodlu numuneler ise 2900-3300 N kuvvet değerleri arasında ve 1,55 – 1,65 mm pim deplasmanı aralığında ilk hasara uğramıştır.

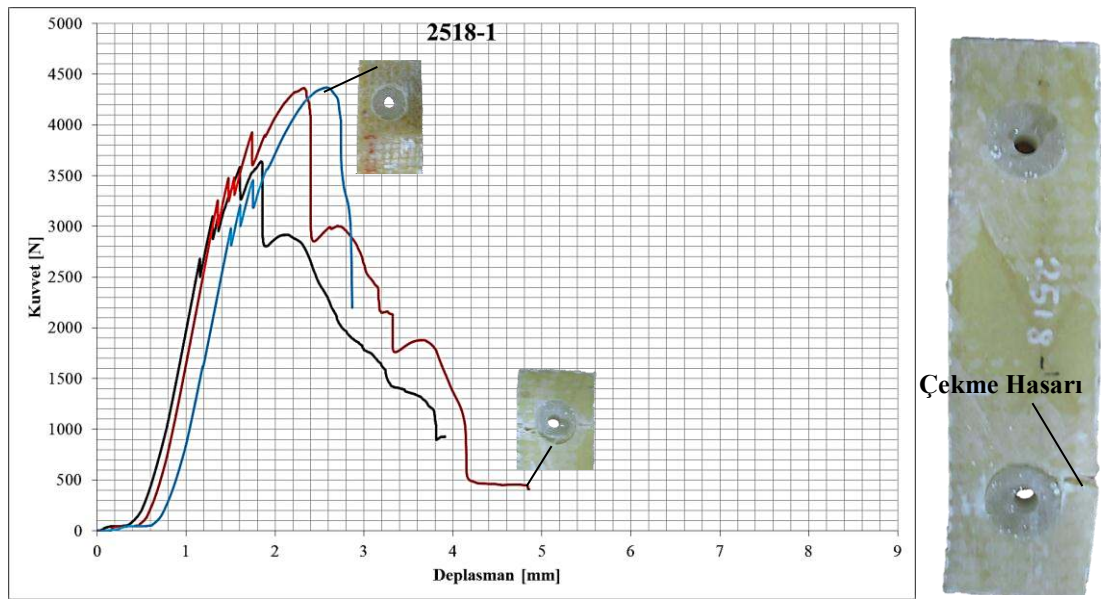
2515-1 ve 2515-2 kodlu numunelerin davranışları birbirine çok benzemektedir. İki deney grubunda da benzer şekilde yatak ezilmeleri gözlenmiştir. Bu numunelerin aldığı hasarlar Şekil 5.24 ve 5.25'te görülmektedir.



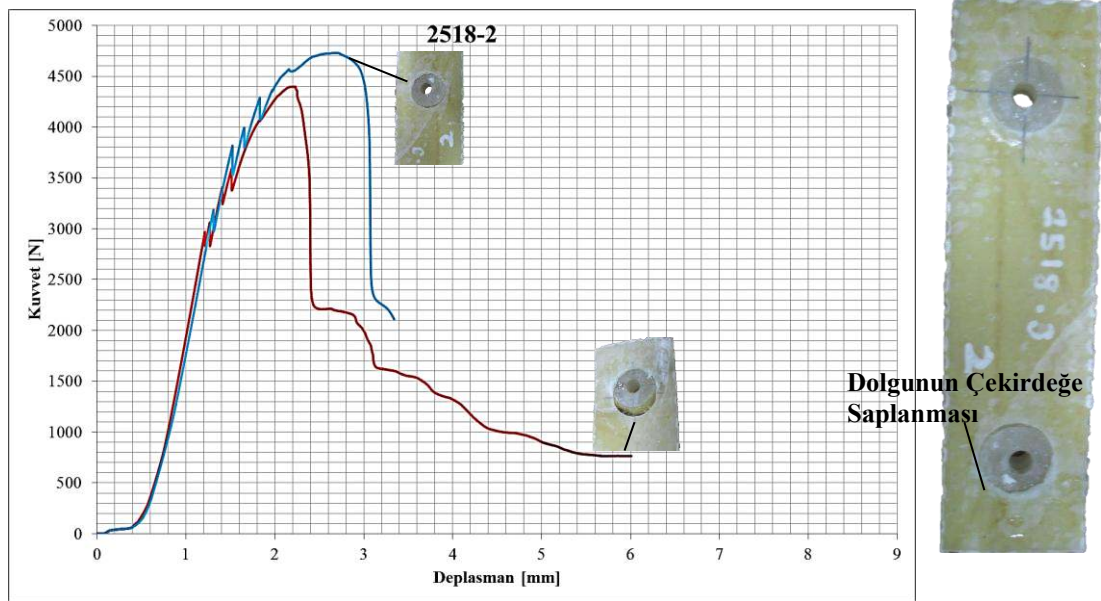
Şekil 5.24 2515-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı



Şekil 5.25 2515-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı



Şekil 5.26 2518-1 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı



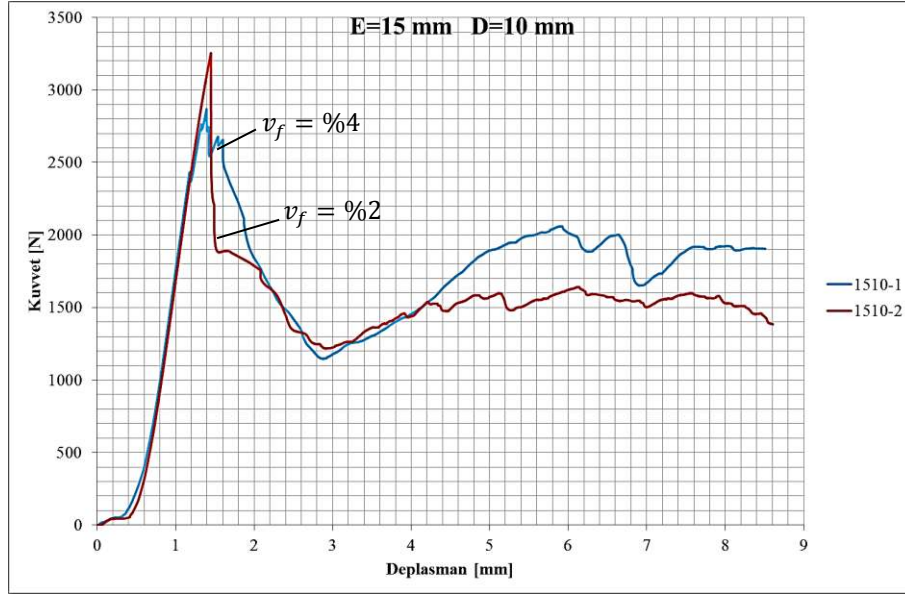
Şekil 5.27 2518-2 kodlu numunelerin kuvvet - deplasman grafiği ve meydana gelen dolgu hasarı

5.3 Deney Sonuçları ve Parametrelerin Karşılaştırılması

5.3.1 Dolgu Konsantrasyonu (m_f) Değişiminin Etkileri

Bu bölümde numunelerde dolgu çapı (D) ve kenar-delik arası mesafesi (E) sabit tutularak elyaf-reçine kütleli oranı (m_f) değiştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Daha önce de Tablo 4.2’de belirtildiği gibi dolguda iki farklı cam-elyaf kütleli oranı kullanılmıştır. Grafiklerde 1 kodu ile belirtilen %2 kütleli oranındaki elyaf-reçine

dolgulu numune grupları, 2 kodu ile gösterilen %4 kütleli oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarıdır.



Şekil 5.28 1510 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

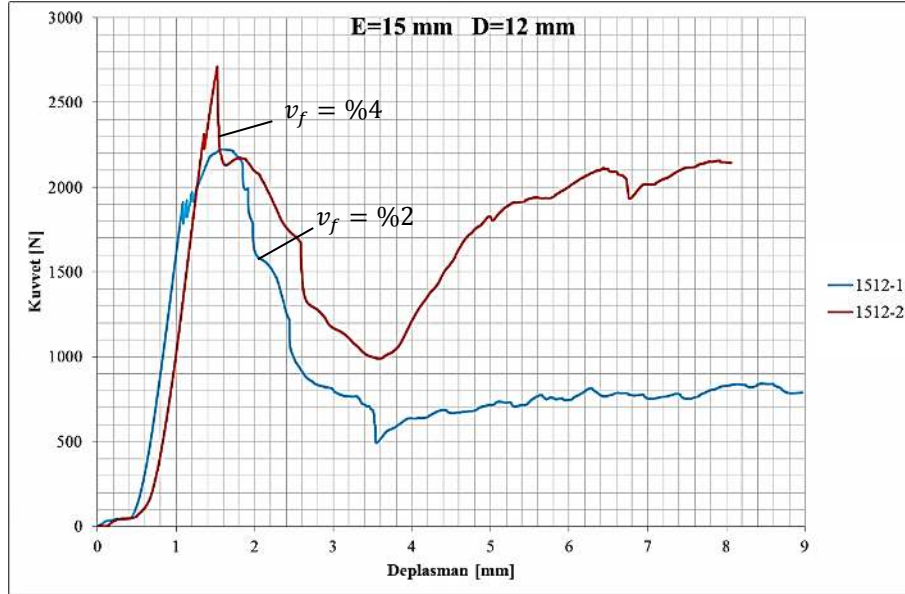
Tablo 5.1 E=15 mm D=10 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1510-1	2860	1,45
1510-2	3254	1,40

Şekil 5.28’de görüldüğü gibi 1510-1 ve 1510-2 kodlu numunelerin ilk hasara uğrama kuvvetleri elyaf-reçine kütleli oranı değişikliğinden dolayı kısmen farklılık göstermektedir. %2 elyaf-reçine kütleli oranına sahip 1510-1 kodlu numune 2860 N kuvvetinde ilk hasara uğrarken, %4’lük 1510-2 kodlu numune 3254 N’da ilk hasara uğramıştır. Bu trend tüm 1510 numune gruplarında aynıdır. Dolayısıyla 1510 kodlu numunelerde dolgudaki elyaf oranının ilk hasara uğrama yükünü yukarılara çektiği söylenebilir.

Pim deplasmanı açısından değerlendirme yapılacak olursa; %2 elyaf-reçine kütleli oranına sahip 1510-1 kodlu numune 1,45 mm deplasmanda ilk hasar meydana gelirken, %4’lük 1510-2 kodlu numunede hasar 1,40 mm’de meydana

gelmiştir. Bu durum, kütleli olarak elyaf oranı artan dolgunun dayanımının arttığını buna karşılık gevrekliğinin de arttığını göstermektedir.

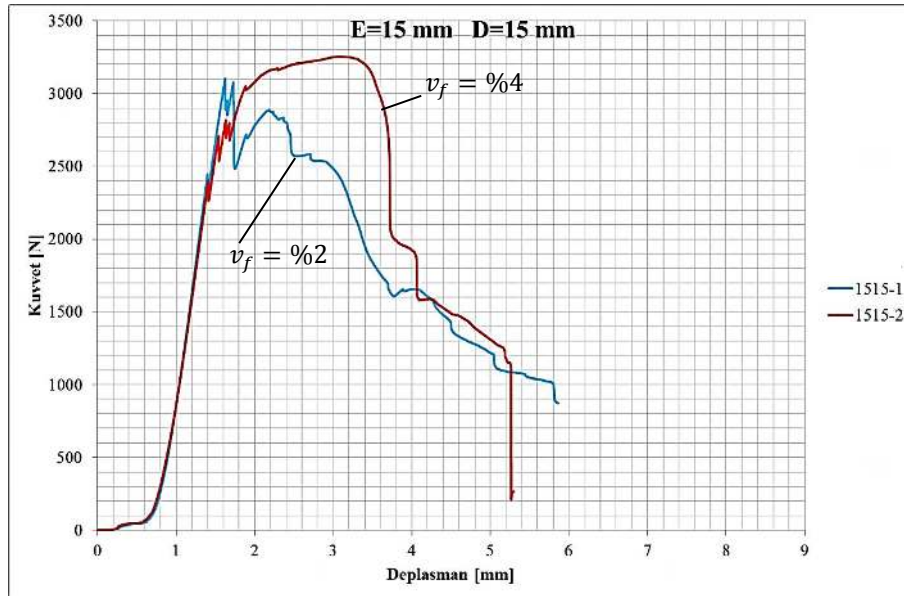


Şekil 5.29 1512 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.2 E=15 mm D=12 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1512-1	2225	1,74
1512-2	2678	1,51

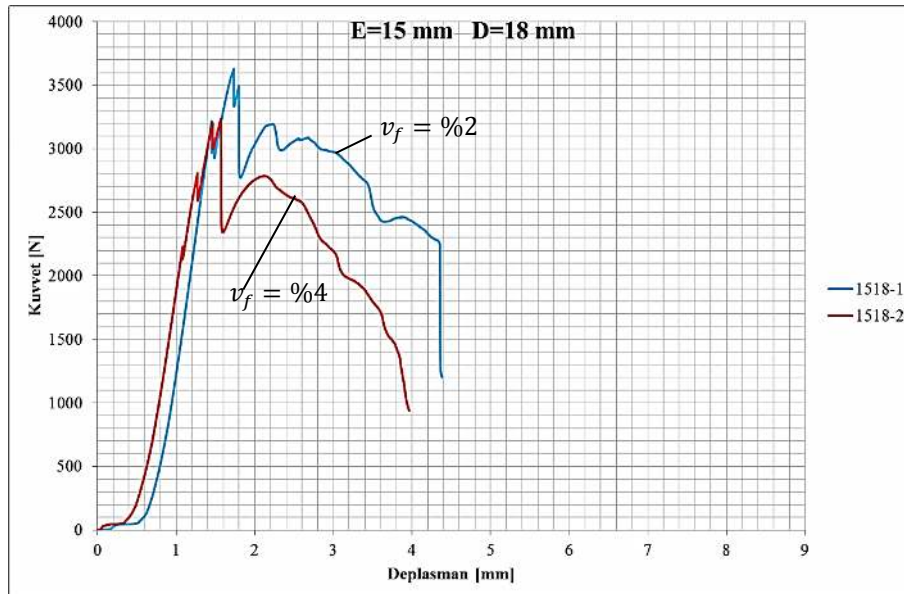
Benzer bir durum E=15 mm, D=12 mm geometrisine sahip numuneler için de geçerlidir. (Şekil 5.29) Ancak E=15 mm, D=15 mm geometrisindeki numunelerde elyaf-reçine kütleli oranı (m_f) %4'e çıkarıldığında hasar yükü azalmıştır. (Şekil 5.30) Aynı yorumlar E=15 mm, D=18 mm geometrisine sahip numuneler için de geçerlidir. (Şekil 5.31)



Şekil 5.30 1515 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.3 E=15 mm D=15 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1515-1	3054	1,62
1515-2	2776	1,83

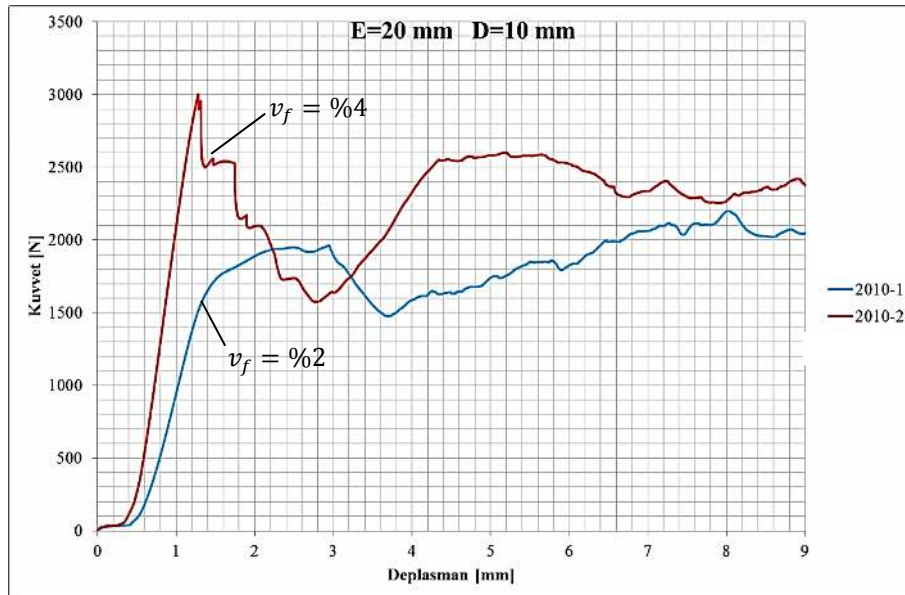


Şekil 5.31 1518 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.4 E=15 mm D=18 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1518-1	3628	1,73
1518-2	3237	1,57

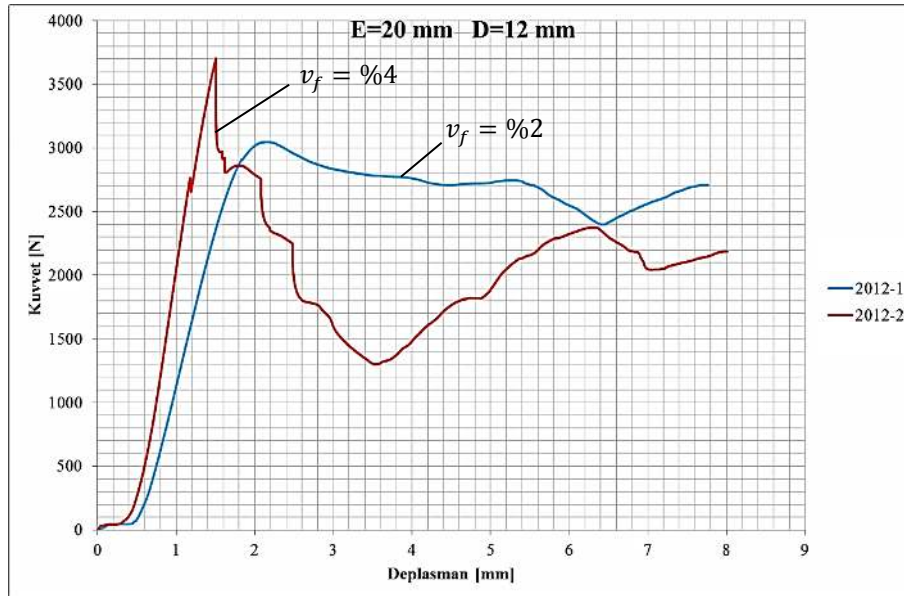
Daha önce yapılmış olan yorumlar E=20 mm ve D=10 mm, D=12 mm, D=15 mm, D=18 mm geometrisine sahip numuneler için de yapılabilmektedir. Bu numunelerin kuvvet- deplasman grafikleri ve meydana gelen hasar yükleri Şekil 5.32, Şekil 5.33, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'te verilmiştir. Her numune kodu için deneylerde elde edilmiş olan hasar yükleri ve hasarın meydana geldiği pim düşey deplasmanı değerleri Tablo 5.5, Tablo 5.6, Tablo 5.7, Tablo 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.32 2010 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.5 E=20 mm D=10 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

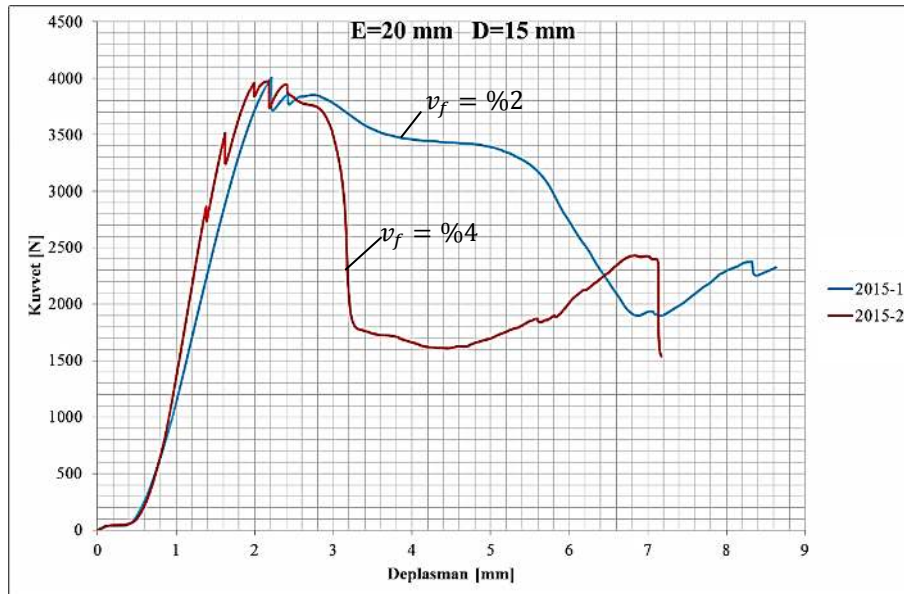
Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2010-1	1942	2,85
2010-2	3001	1,28



Şekil 5.33 2012 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.6 E=20 mm D=12 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

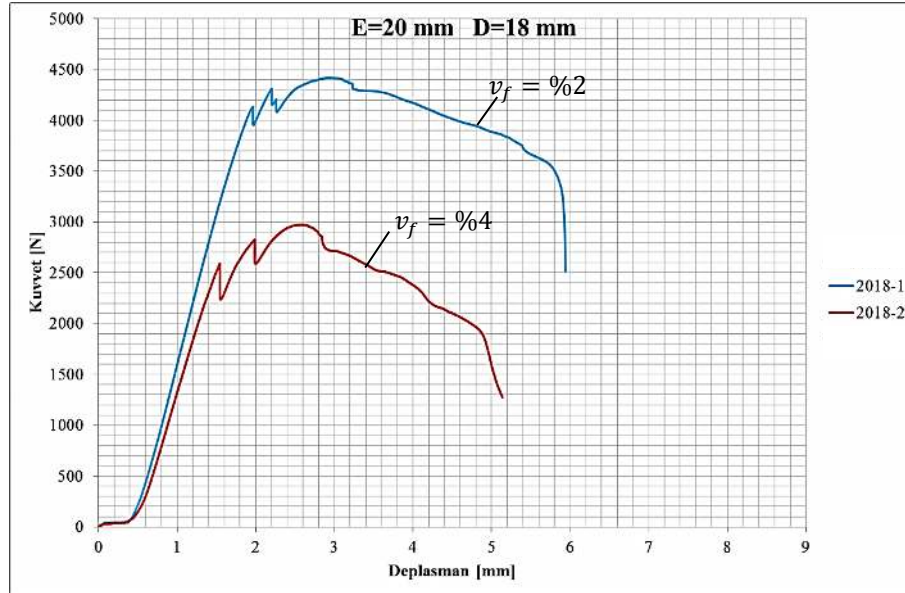
Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2012-1	3046	2,10
2012-2	3704	1,50



Şekil 5.34 2015 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.7 E=20 mm D=15 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2015-1	4005	2,21
2015-2	3936	2,14

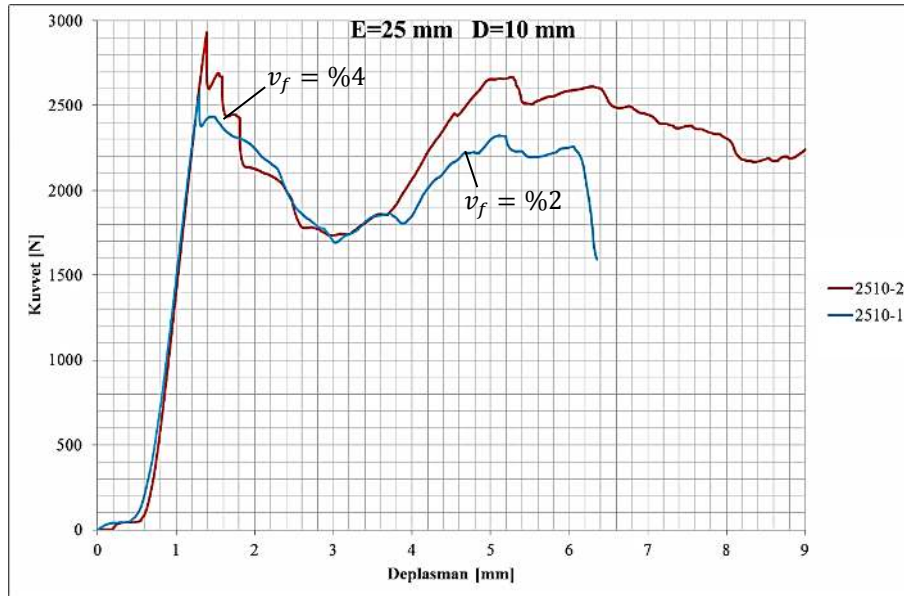


Şekil 5.35 2018 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.8 E=20 mm D=18 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2018-1	4265	2,16
2018-2	2549	1,55

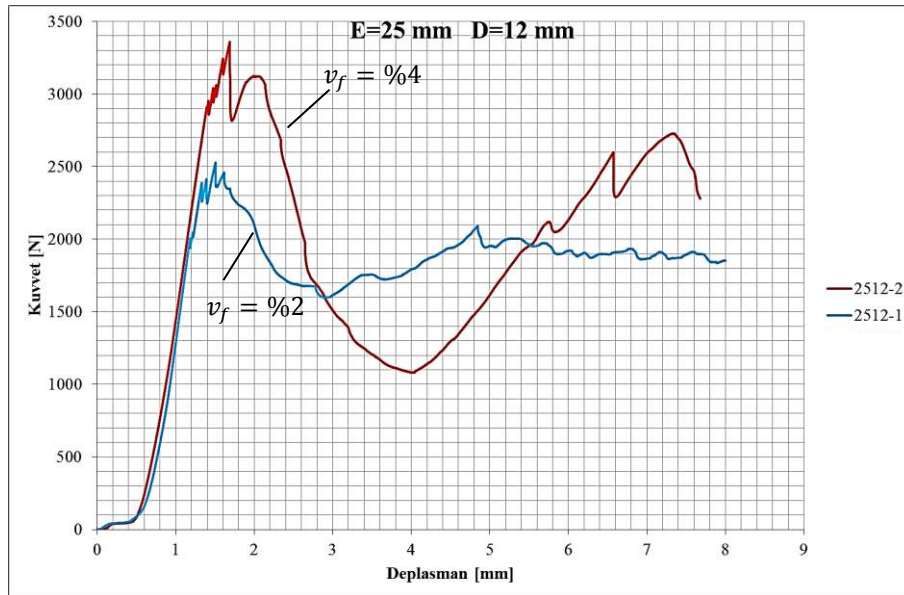
Kenar-delik arası mesafesi E=25 mm ve dolgu çapı D=10 mm, D=12 mm, D=15 mm, D=18 mm geometrisine sahip numuneler için kuvvet deplasman grafikleri Şekil 5.36, Şekil 5.37, Şekil 5.38, Şekil 5.39'da, hasar yükleri ise Tablo 5.9, Tablo 5.10, Tablo 5.11, Tablo 5.12'de verilmiştir. Özellikle E=25 mm, D=18 mm geometrisine sahip numuneler için hasar yükü değeri ve kuvvet-deplasman davranışı birbirine çok yakındır. (%2'lik ve %4'lük dolgular için). Bu durumda dolgu çapının çok artması cam-elyaf oranının etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 5.36 2510 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.9 E=25 mm D=10 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

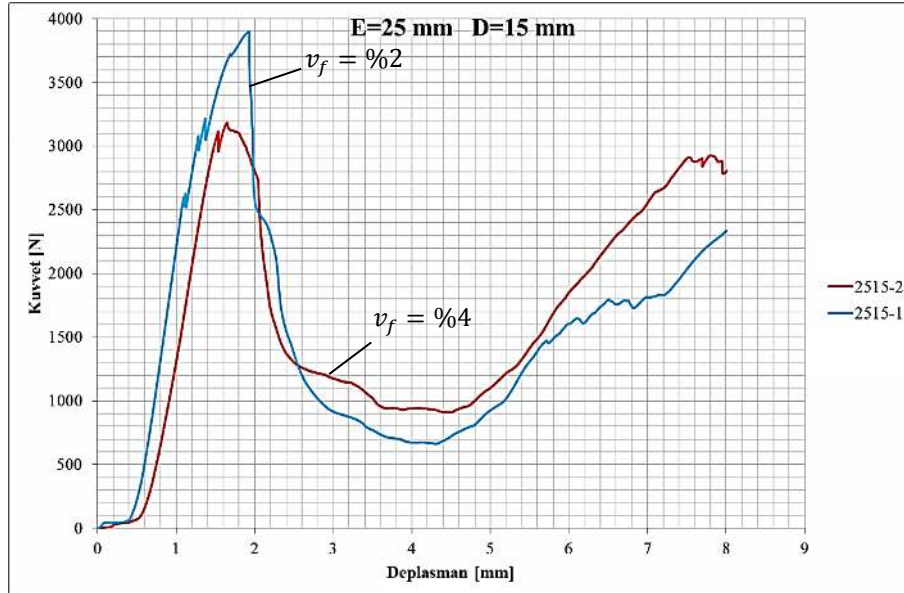
Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2510-1	2579	1,29
2510-2	2930	1,38



Şekil 5.37 2512 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.10 E=25 mm D=12 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

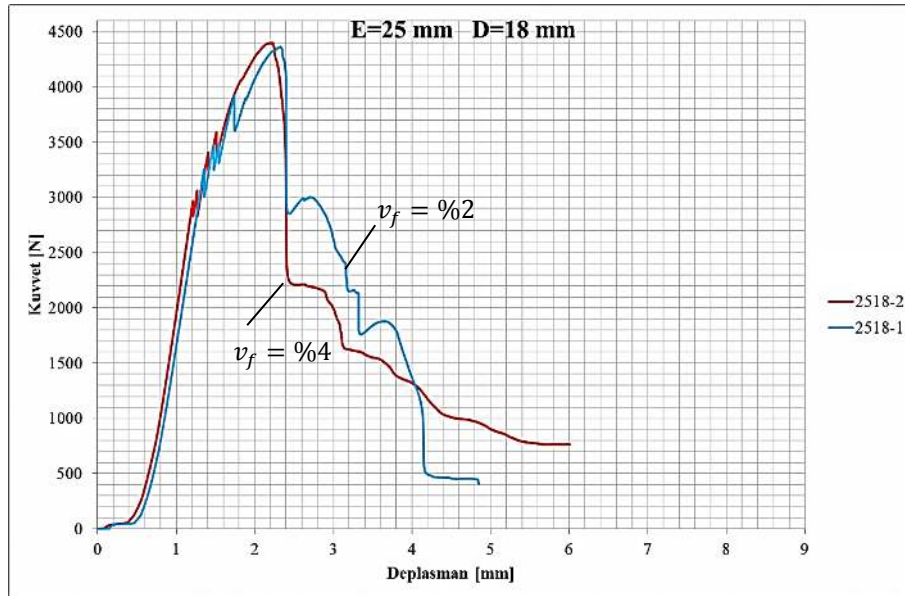
Numune Kodu	Hasar Yüğü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2512-1	2527	1,50
2512-2	3358	1,68



Şekil 5.38 2515 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.11 E=25 mm D=15 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yüğü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2515-1	3900	1,93
2515-2	3183	1,65



Şekil 5.39 2518 kodlu numune gruplarında dolgu konsantrasyonu etkisinin kuvvet - deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.12 E=25 mm D=18 mm yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2518-1	4358	2,33
2518-2	4397	1,18

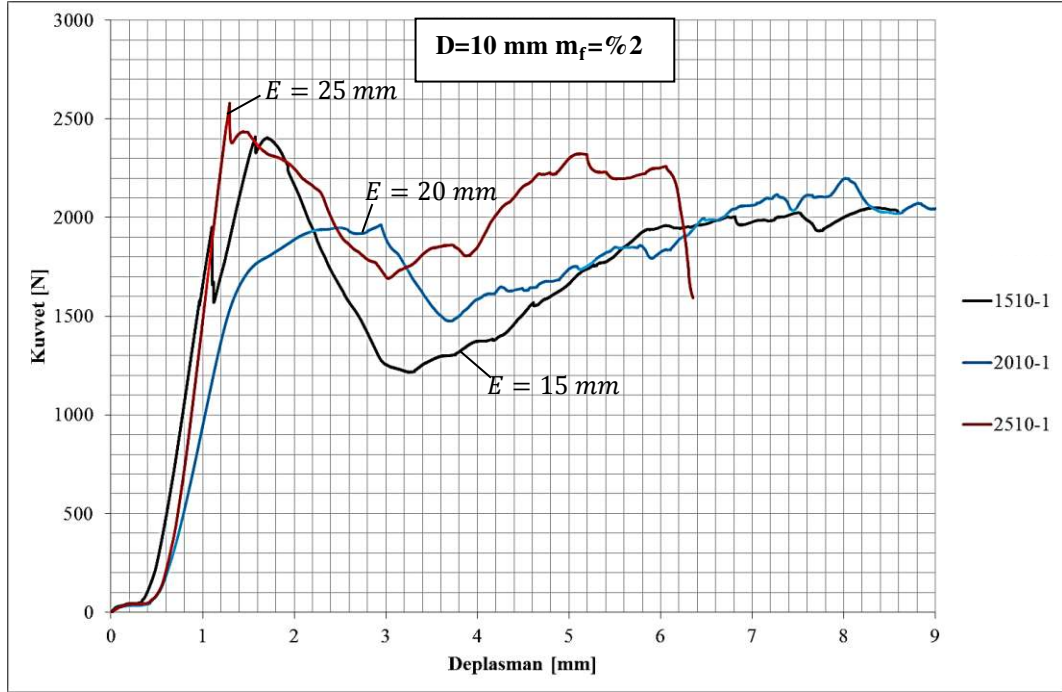
Sonuçlar incelendiğinde dolgu çapı D=10 mm ve D=12 mm olan numunelerde dolgu konsantrasyonun artması mukavemeti arttırıcı bir etki göstermektedir. Bunun aksine D=15 mm ve D=18 mm dolgu çapına sahip numunelerde ise dolgu konsantrasyonun artması hasar alınan yükü düşürmektedir yani mukavemeti de azaltmaktadır.

Numunelerdeki hasar mekanizması dolgu çapı D=10 mm, 12 mm, 15 mm olduğunda dolgunsuz pimli bağlantılara benzer şekilde oluşmaktadır. D=18 mm dolgu çapında ise çekme hasarları da meydana gelmektedir.

5.3.2 Kenar-Delik Arası Mesafesinin (E) Değişiminin Etkileri

Bu bölümde numunelerde dolgu çapı (D) ve elyaf-reçine kütleli oranı (m_f) sabit tutularak kenar-delik arası mesafesi (E) değiştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Numunelerde 15 mm, 20 mm ve 25 mm olmak üzere üç farklı uzunlukta delik kenar

mesafesi kullanılmıştır. Karşılaştırma yapmak için numune gruplarından kendi içinde tutarlılık gösteren verilerden örneklemeler alınmıştır.



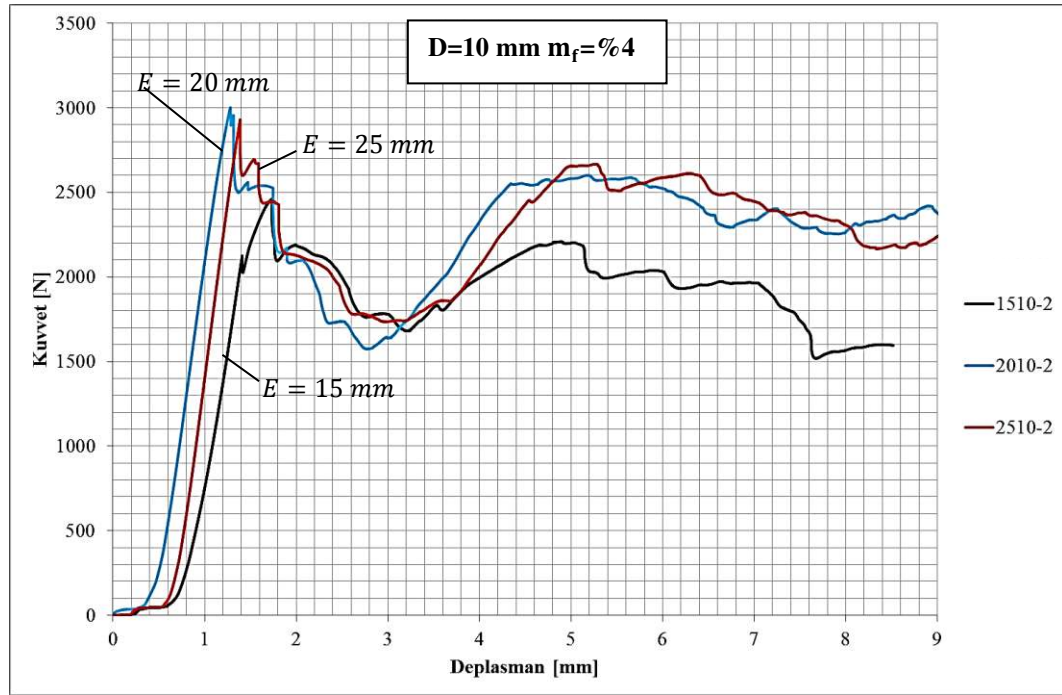
Şekil 5.40 D=10 mm m_f =%2 yapılandırması için numunelerdeki E değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Dolgu çapı D=10 mm olan %2 kütle oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarının çekme deneyindeki kuvvet-deplasman davranışı Şekil 5.40'da gösterilmiştir. Tablo 5.13'te numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı verilmiştir.

Tablo 5.13 D=10 mm m_f =%2 yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1510-1	2363	1,64
2010-1	1943	2,85
2510-1	2503	1,27

Kenar-delik arası mesafesi (E) değiştikçe numunelerde meydana gelen hasar şekli de çeşitlilik göstermiştir. Bu da dolgunun aldığı ilk hasarı etkilemiştir. Tablo 5.13 incelendiğinde E=20 mm olması dolgunun taşıdığı maksimum yükü azaltmış, hasara uğrama zamanını geciktirmiştir.



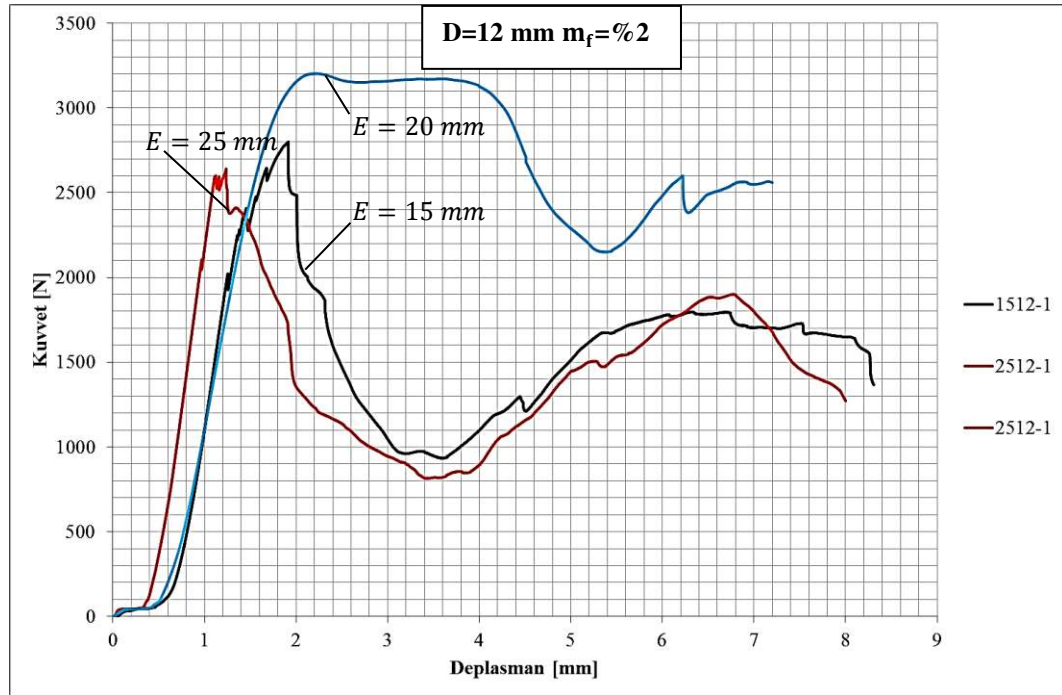
Şekil 5.41 D=10 mm m_f =%4 yapılandırması için numunelerdeki E değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Dolgu çapı D=10 mm olan %4 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarının çekme deneyindeki kuvvet-deplasman davranışı Şekil 5.41’de görülmektedir. Tablo 5.14’te numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı verilmiştir.

Tablo 5.14 D=10 mm m_f =%4 yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1510-2	2509	1,59
2010-2	2930	1,25
2510-2	2863	1,37

Kenar-delik arası mesafesi (E) parametresi değiştikçe numunelerde meydana gelen hasar şekli çeşitlilik göstermiştir. Mesafe düşük iken kayma hasarları etkili olurken, mesafe arttıkça hasar şekli çekme hasarına dönüşmektedir. Genel olarak bakıldığında kenar-delik arası mesafesinin artması hasara uğrama yükünü arttırırken, E=20 mm’den sonra bu etki çok fazla artmamaktadır. Genel olarak D=10 mm olan %4 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune yapılandırmasına bakıldığında kenar-delik arası mesafesinin hasar şekli dışında kuvvet-deplasman eğrisine etkisi çok olmamaktadır.



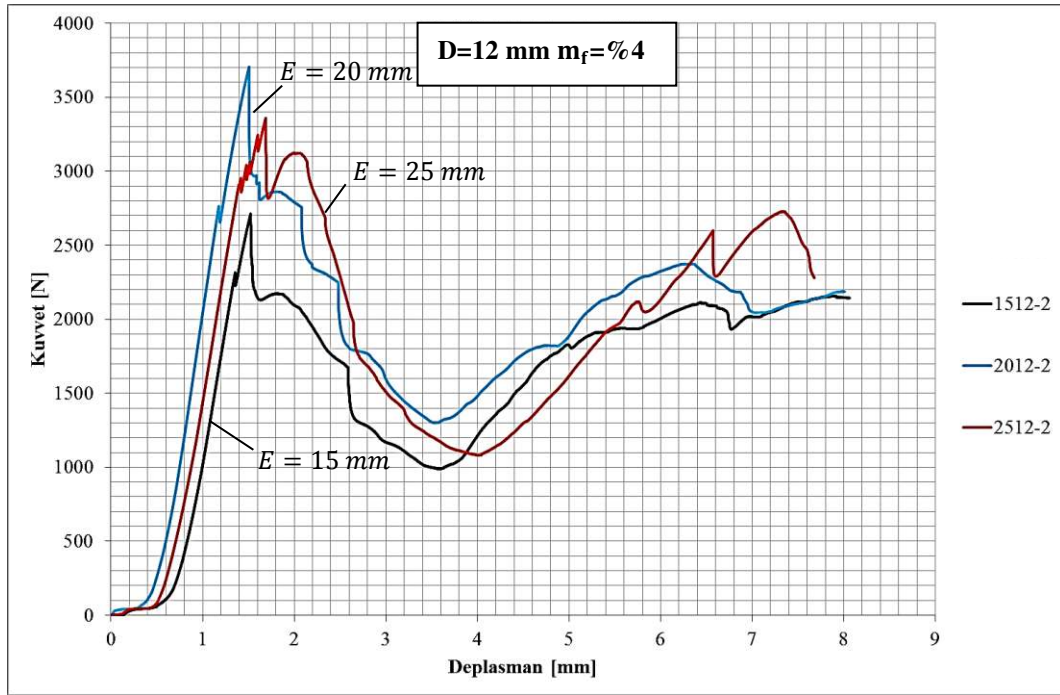
Şekil 5.42 D=12 mm $m_f=\%2$ yapılandırması için numunelerdeki E değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Dolgu çapı D=12 mm olan %2 oranındaki elyaf-reçine dolgulusuna sahip numunelerin deneyi ile elde edilmiş olan kuvvet-deplasman davranışı Şekil 5.42’da verilmiştir. Bu numunelere karşılık gelen hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı Tablo 5.15’te verilmiştir.

Tablo 5.15 D=12 mm $m_f=\%2$ yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1512-1	2573	1,10
2012-1	3154	2,01
2512-1	2740	1,82

Kenar-delik arası mesafesi (E) parametresi değiştikçe numunelerde meydana gelen hasar şekli tüm numunelerde olduğu gibi çeşitlilik göstermiştir. Mesafe düşük iken kayma hasarları etkili olurken, mesafe arttıkça hasar şekli çekme hasarına dönüşmektedir. Genel olarak bakıldığında kenar-delik arası mesafesinin artması hasara uğrama yükünü arttırırken, E=20 mm’den sonra bu tersine dönmektedir. Bunun nedeni hasar alma şeklinin çekme hasarına dönüşmesi ve kritik noktanın artık bu yapılandırmada numunenin eni olmasıdır.

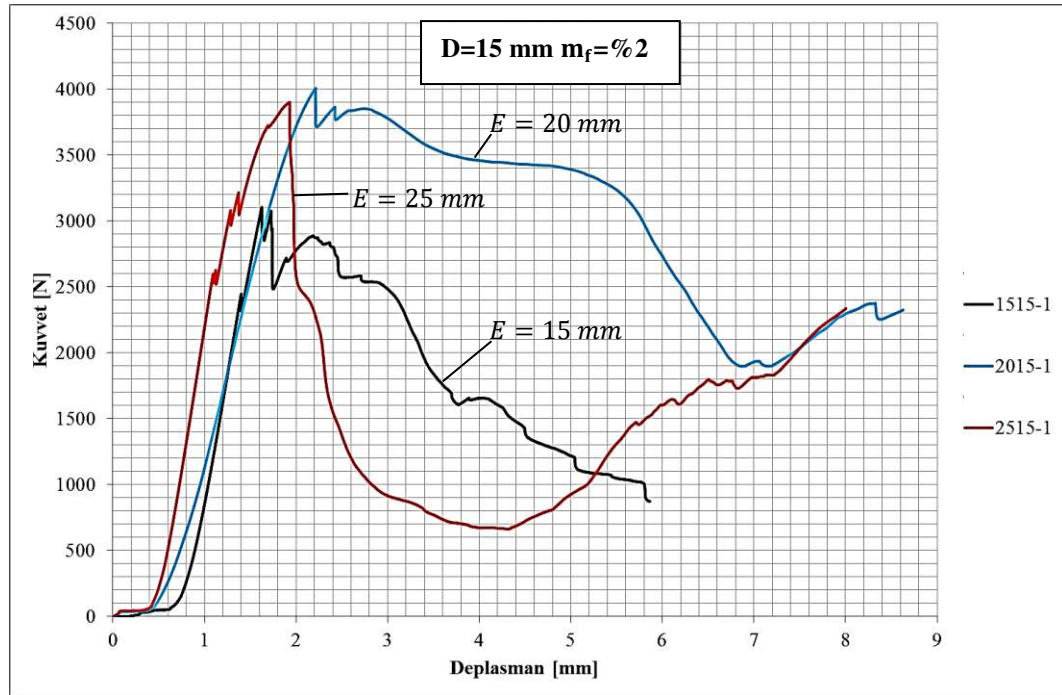


Şekil 5.43 D=12 mm m_f =%4 yapılandırması için numunelerdeki E değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Dolgu çapı D=12 mm olan %4 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarının çekme deneyindeki kuvvet-deplasman davranışı Şekil 5.43'te gösterilmiştir. Tablo 5.16'da numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı verilmiştir. Hasar davranışı aynı geometrik parametrelere sahip numunelere çok benzerdir.

Tablo 5.16 D=12 mm m_f =%4 yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1512-2	2648	1,50
2012-2	3627	1,48
2512-2	3275	1,65



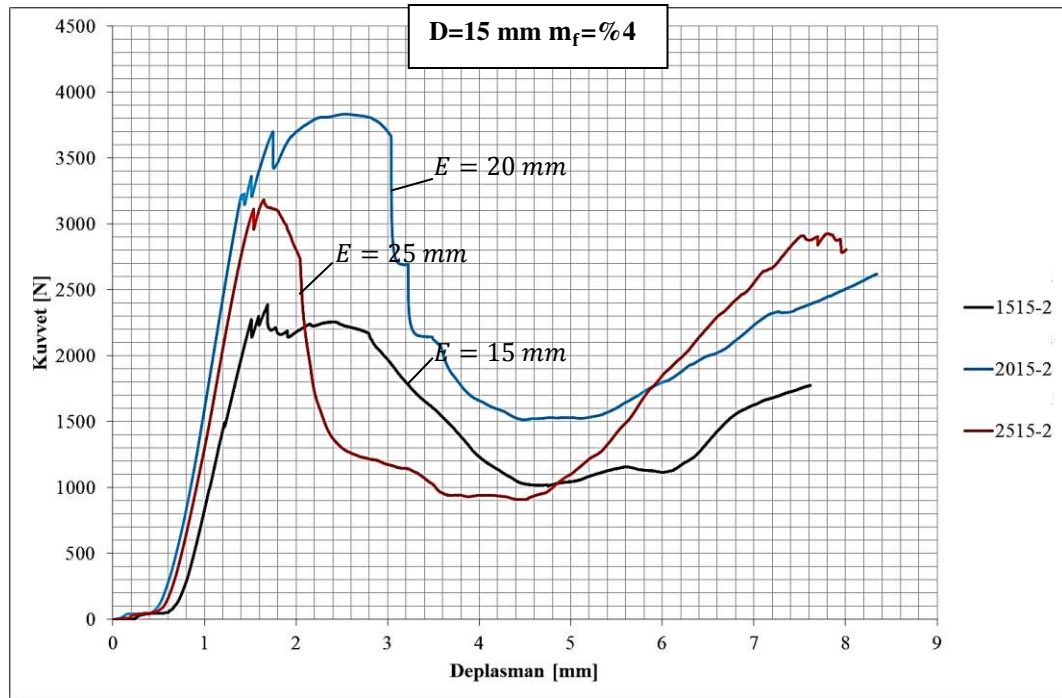
Şekil 5.44 D=15 mm $m_f=\%2$ yapılandırması için numunelerdeki E değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

1515-1, 2015-1, 2515-1 kodlu numune gruplarına ait çekme deneyinde elde edilen kuvvet-deplasman davranışı Şekil 5.44'te, numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı Tablo 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.17 D=15 mm $m_f=\%2$ yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1515-1	2987	1,66
2015-1	3919	2,13
2515-1	3874	1,88

Dolgu çapı D=15 mm olduğu numunelerde, diğer numunelere benzer bir davranış görülmektedir. Kenar-delik arası mesafesi arttıkça numunenin hasar yükü de artmaktadır. Ancak tekrar 2015-1 ile 2515-1 arasında çok fazla kuvvet farkı görülmemiştir.



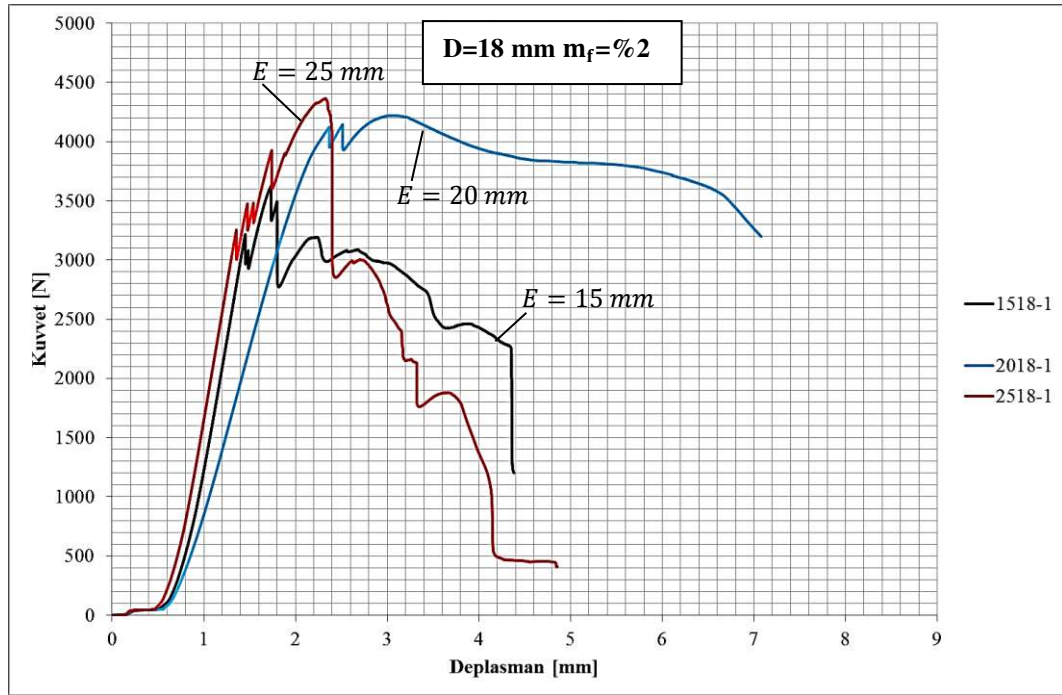
Şekil 5.45 D=15 mm $m_f=\%4$ yapılandırması için numunelerdeki E değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Dolgu çapı D=15 mm olan %4 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarının çekme deneyindeki kuvvet-deplasman davranışı Şekil 5.45'te gösterilmiştir. Tablo 5.18'de numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı verilmiştir.

Tablo 5.18 D=15 mm $m_f=\%4$ yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1515-2	2285	1,58
2015-2	3817	2,39
2515-2	3280	1,51

D=15 mm olan %4 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune yapılandırmasına benzer bir davranış görülmektedir. Kenar-delik arası mesafesi arttıkça numunenin hasar yükü de artmaktadır. Ancak bu mesafe eldeki numune gruplarına göre arttırılınca hasar yükü azaltmaktadır.



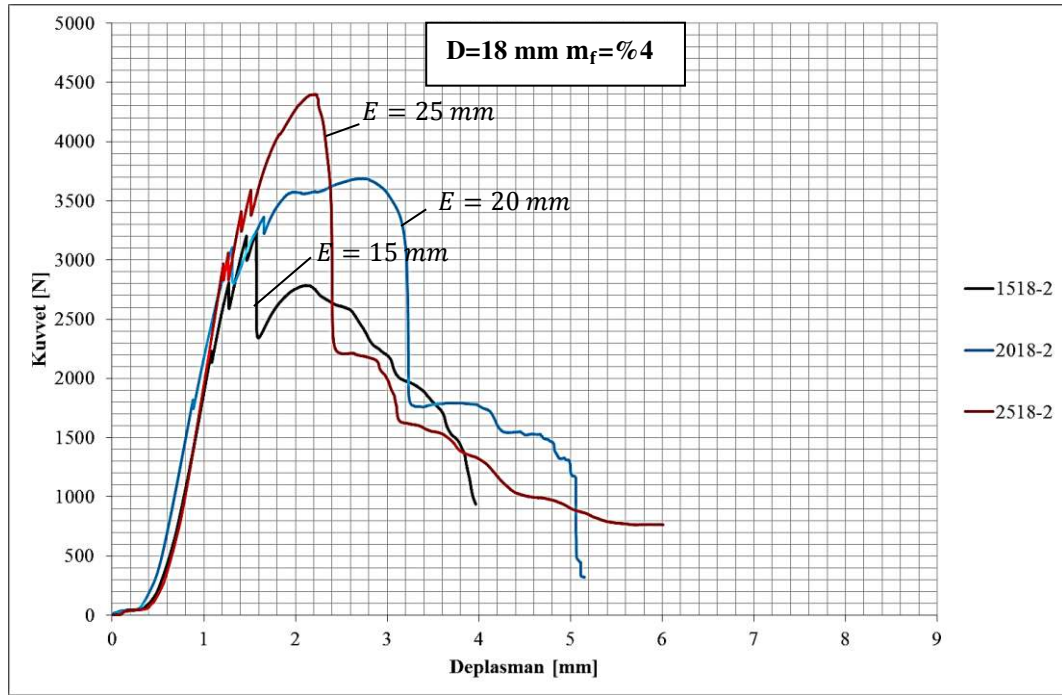
Şekil 5.46 D=18 mm m_f =%2 yapılandırması için numunelerdeki E değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Dolgu çapı D=18 mm olan %2 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarının çekme deneyindeki kuvvet-deplasman davranışı Şekil 5.46'da, numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı Tablo 5.19'da verilmiştir.

Tablo 5.19 D=18 mm m_f =%2 yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1518-1	3626	1,74
2018-1	4063	2,46
2518-1	4342	2,28

Bu yapılandırmada özellikle dolgu çapı artmasından dolayı çok kritik yüklemeler meydana gelmektedir. Dolgu çapından dolayı taşınan yükler diğer numune gruplarına göre daha yüksektir. Kenar-delik arası mesafesi arttıkça numunenin taşıdığı hasar yükünün de arttığı görülmektedir.



Şekil 5.47 D=18 mm m_f =%4 yapılandırması için numunelerdeki E değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Dolgu çapı D=18 mm olan %4 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarının çekme deneyindeki kuvvet-deplasman davranışı Şekil 5.47’de gösterilmiştir. Tablo 5.20’de numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı verilmiştir.

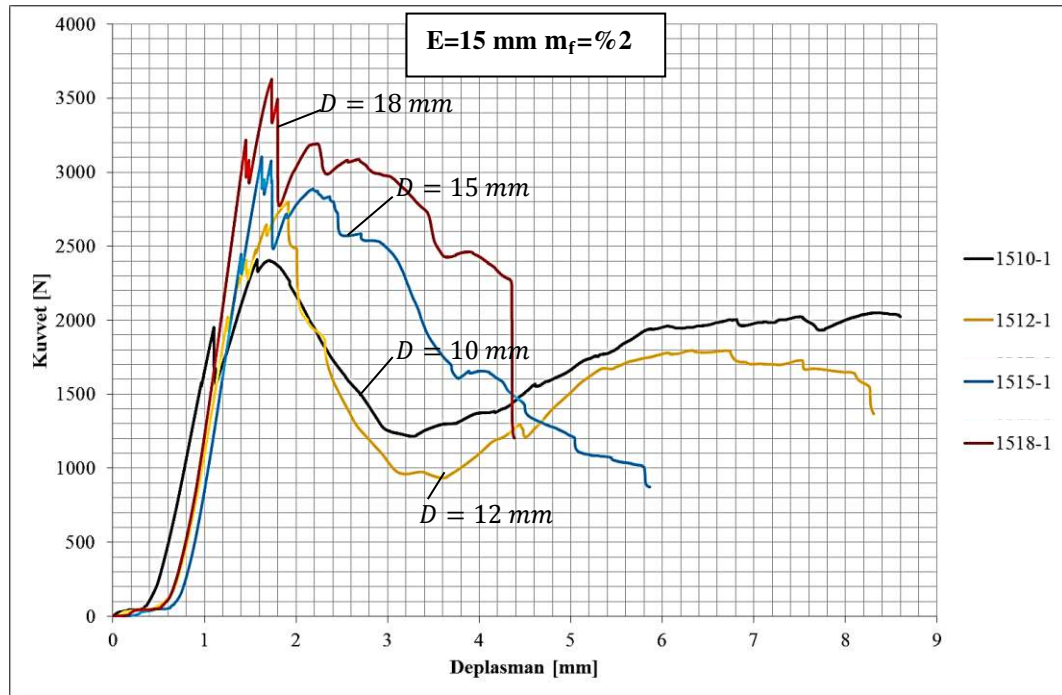
Tablo 5.20 D=18 mm m_f =%4 yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1518-2	3136	1,50
2018-2	3682	2,79
2518-2	4373	2,12

D=18mm olan %2 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune yapılandırmasına benzer bir davranış görülmektedir. Kenar-delik arası mesafesi arttıkça numunenin hasar yükü de artmaktadır. Ancak bu mesafe eldeki numune gruplarına göre arttırılınca hasar yükü azaltmaktadır.

5.5.3 Dolgu Çapı (D) Değişiminin Etkileri

Bu bölümde numunelerde kenar-delik arası mesafesi (E) ve elyaf-reçine kütleli oranı sabit tutularak dolgu çapı (D) değiştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Numunelerde 10 mm, 12 mm, 15 mm ve 18 mm olmak üzere dört farklı çapta dolgu deliği ölçüsü kullanılmıştır. Karşılaştırma için kendi içinde tutarlılık gösteren numunelerden örneklemeler alınmıştır.



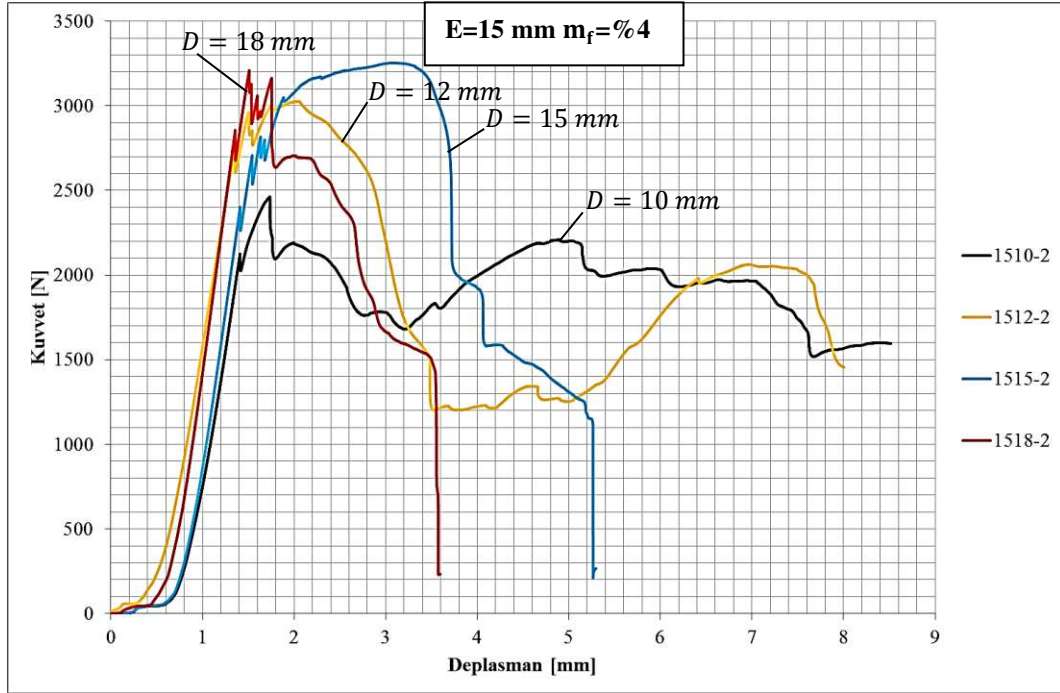
Şekil 5.48 $E=15 \text{ mm}$ $m_f=\%2$ yapılandırması için numunelerdeki D değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Kenar-delik arası mesafesi $E=15 \text{ mm}$ ve $\%2$ oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarının çekme deneyindeki dolgu çaplarındaki (D) değişiminin kuvvet - deplasman davranışına etkisi Şekil 5.48’de görülmektedir.

Tablo 5.21 $E=15 \text{ mm}$ $m_f=\%2$ yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
1510-1	2518	1,74
1512-1	2872	1,80
1515-1	3017	1,51
1518-1	3533	1,68

Bu yapılandırmada numunelerde görülen hasar şekilleri dolgu çapları ile alakalı olarak değişiklik göstermektedir. Dolgu çapı büyüdükçe ilk hasara uğrama yükü de artmıştır, ancak aynı zamanda dolgu çapı arttıkça ilk hasara uğradıktan sonra meydana gelen düşüş miktarı da artmaktadır. Özellikle büyük dolgu çapları olan $D=18\text{ mm}$ ve $D=15\text{ mm}$ çaplarında çok numunede çok kritik hasarlar kuvvetle meydana gelmektedir.



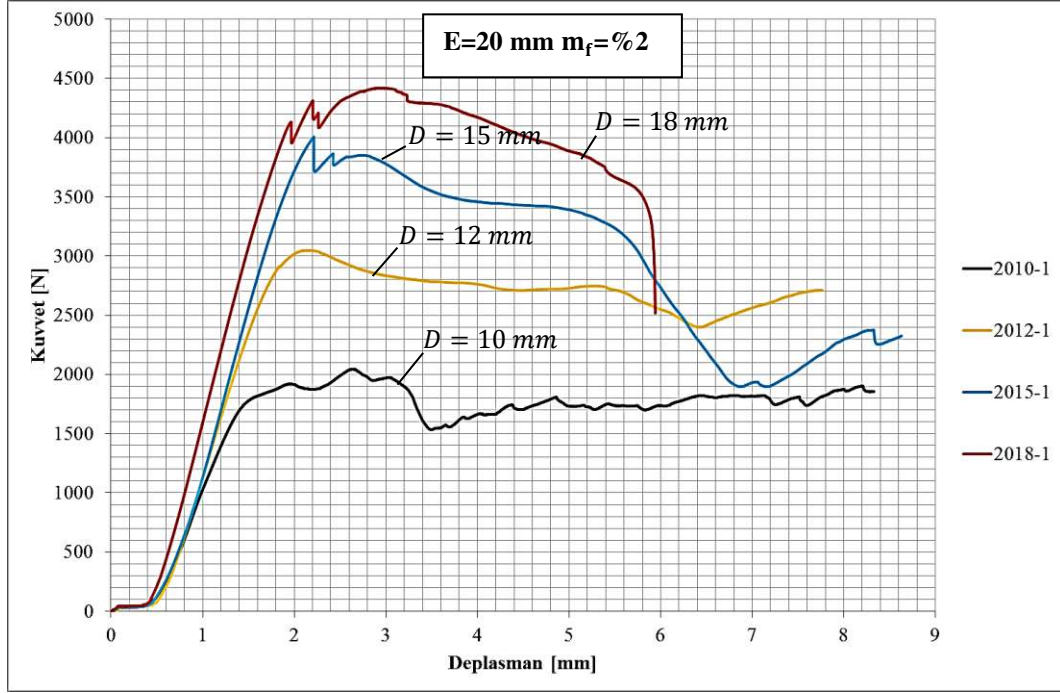
Şekil 5.49 E=15 mm $m_f=\%4$ yapılandırması için numunelerdeki D değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Kenar-delik arası mesafesi E=15 mm ve %4 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarının çekme deneyindeki dolgu çaplarındaki değişiminin (D) kuvvet - deplasman davranışına etkisi Şekil 5.49'da görülmektedir. Tablo 5.22'de numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı verilmiştir.

Tablo 5.22 E=15 mm $m_f=\%4$ yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü[N]	Pim Deplasmanı [mm]
1510-2	2379	1,63
1512-2	2949	1,65
1515-2	3081	1,71
1518-2	3117	1,48

Numunelerde görülen hasar çeşidi dolgu çaplarına göre değişiklik göstermiştir. Bu yapılandırmasına bakıldığında dolgu çapı büyüdükçe ilk hasara uğrama yükü de artmıştır, ancak ilk hasar sonrası ani yük düşüşleri meydana gelmektedir.



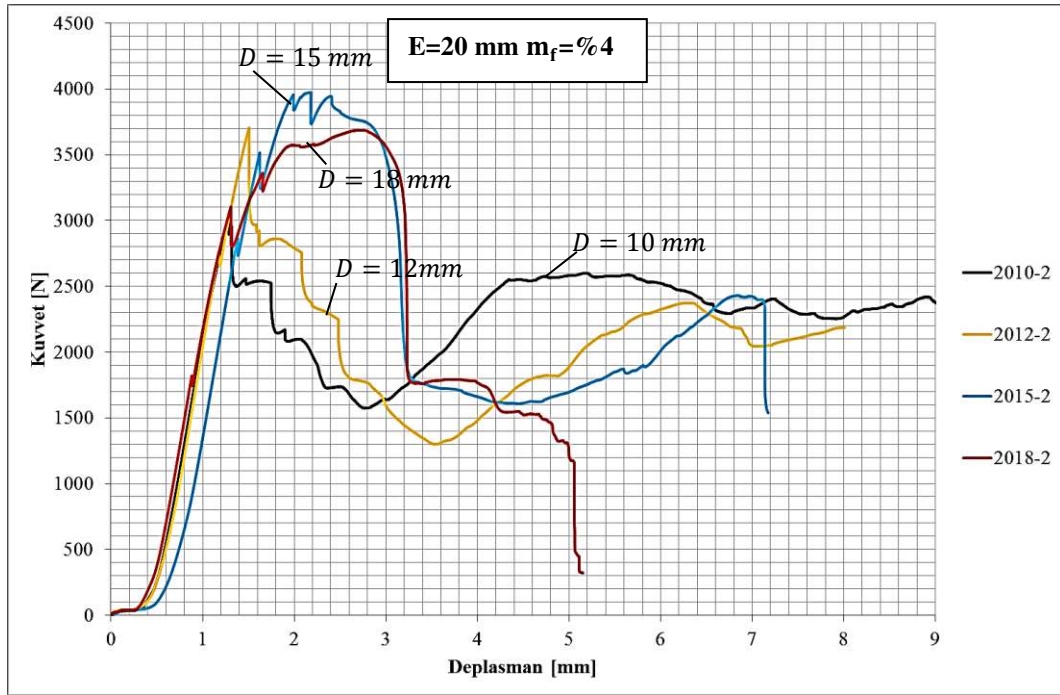
Şekil 5.50 E=20 mm m_f =%2 yapılandırması için numunelerdeki D değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Kenar-delik arası mesafesi E=20 mm ve %2 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarının çekme deneyindeki dolgu çaplarındaki değişiminin (D) kuvvet - deplasman davranışına etkisi Şekil 5.50'de verilmiştir. Tablo 5.23'te numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı verilmiştir.

Tablo 5.23 E=20 mm m_f =%2 yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2010-1	1932	3,13
2012-1	3036	2,04
2015-1	4100	2,26
2018-1	4165	2,10

Görülen hasar çeşitleri genellikle kayma ve çekme hasarı şeklinde görülmektedir. Dolgu çapı büyüdükçe ilk hasara uğrama yükü de belirgin biçimde artmıştır.

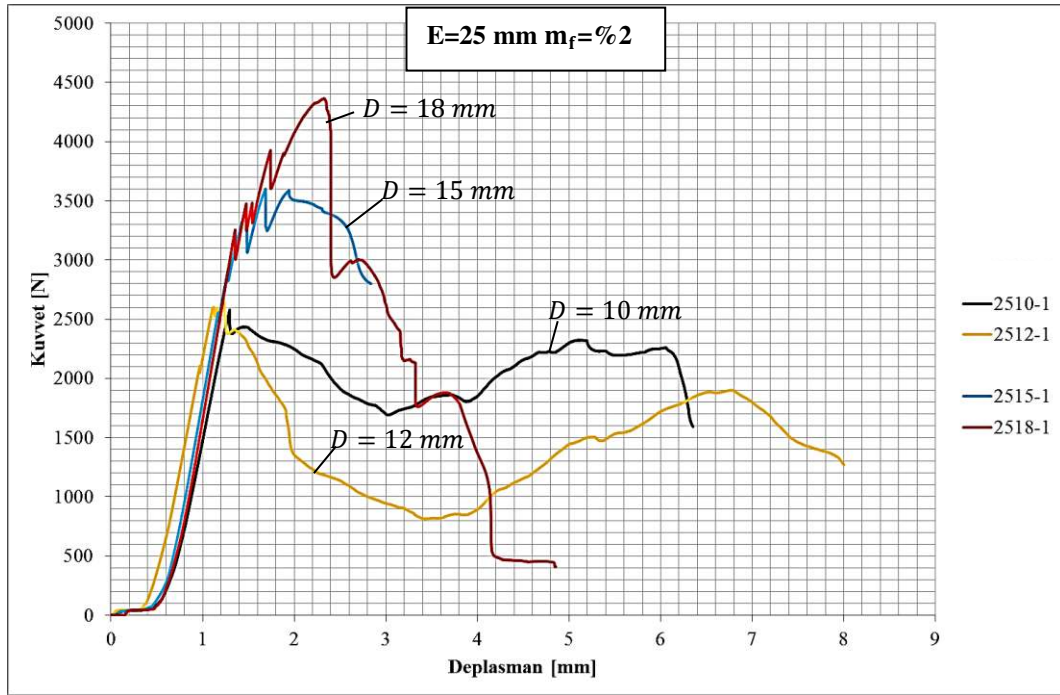


Şekil 5.51 $E=20 \text{ mm}$ $m_f=\%4$ yapılandırması için numunelerdeki D değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.24 $E=20 \text{ mm}$ $m_f=\%4$ yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2010-2	2839	1,20
2012-2	3448	1,41
2015-2	3922	2,34
2018-2	3685	2,70

Dolgu çapının artması, belli bir çap değerinden sonra negatif etki yaratmaktadır. $E=20 \text{ mm}$ için; genel olarak dolgu çapı artarken ilk hasar kuvveti $D=18 \text{ mm}$ numunesi hariç artmaktadır.

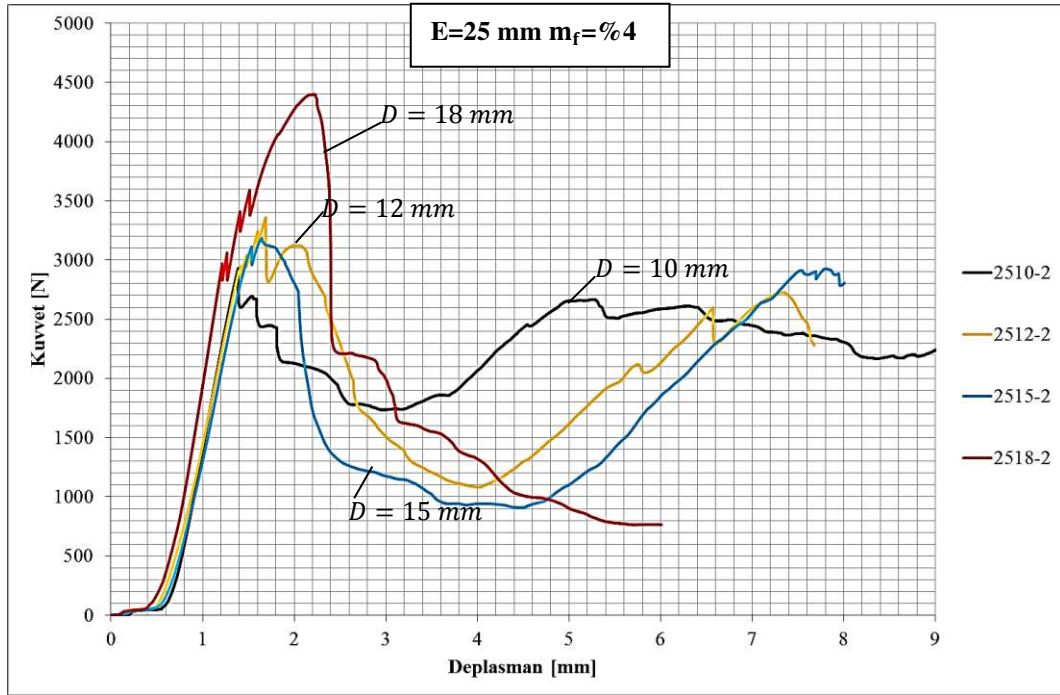


Şekil 5.52 $E=25 \text{ mm}$ $m_f=\%2$ yapılandırması için numunelerdeki D değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

$E=25 \text{ mm}$ ve $D=10 \text{ mm}$, 12 mm , 15 mm , 18 mm için ilgili grafik ve Tablo Şekil 5.52 ve Tablo 5.25'te verilmiştir.

Tablo 5.25 $E=25 \text{ mm}$ $m_f=\%2$ yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2510-1	2523	1,19
2512-1	2439	1,17
2515-1	3411	1,80
2518-1	4326	2,23



Şekil 5.53 E=25 mm m_f =%4 yapılandırması için numunelerdeki D değişiminin kuvvet-deplasman grafiğinde karşılaştırılması

Tablo 5.26 E=25 mm m_f =%4 yapılandırması için numune kodlarına göre hasar yükü ve hasarın gerçekleştiği pim deplasmanı

Numune Kodu	Hasar Yükü [N]	Pim Deplasmanı [mm]
2510-2	2483	1,31
2512-2	3465	1,54
2515-2	3074	1,51
2518-2	4354	1,31

Bu yapılandırma grubunda görülen hasar kenar-delik arası mesafesi E=25 mm ve %2 oranındaki elyaf-reçine dolgulu numune gruplarında olduğu gibi genellikle çekme hasarı şeklindedir. Konsantrasyon artışı ile ilk hasarın meydana geldiği pim deplasmanı da daha küçüktür. Dolguların ilk hasara uğradığı hasar şekli çekme hasarıdır. Dolgu çapları ilk hasar yükünü arttırırken olgu çapının 15 mm veya 12 mm olması durumunda benzer davranışlar gerçekleşmektedir.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Bu çalışmada, sandviç kompozit plaklarda elyaf-reçine dolgusu ile takviye edilmiş pimli bağlantıların hasar mekanizmaları incelenmiştir. Numunelerde; kenar mesafesi (E), dolgu çapı (D) ve elyaf-reçine kütleli oranı m_f gibi parametreler değiştirilmiş ve deneysel olarak elde edilen veriler ile aşağıda özetlenen sonuçlar ortaya çıkmıştır.

- Dolgusuz pimli bağlantılar incelendiğinde kenar-delik arası mesafesi değişiminin pim deliklerindeki hasar şeklini etkilediği görüldü. Pimli bağlantılarda kenar-delik arası mesafesi küçükse kayma hasar modu, daha büyükse çekme ve yatak hasar modları görülmektedir.
- Dolgusuz pimli bağlantılarda pim deliği hasara uğradıktan sonra numunenin taşıdığı kuvvet nispeten düzenli yatay kuvvet dalgalanmaları göstermektedir.
- Dolgusuz pimli bağlantılarda ilk hasar meydana geldiğinde numunenin taşıdığı yük çok keskin bir biçimde düşmemektedir.
- Dolgusuz pimli bağlantılar farklı kenar-delik arası aralığına sahip olmalarına rağmen yakın pim deplasmanı değerlerinde hasara uğramışlardır.
- Elyaf-reçine dolgusu ile takviye edilmiş pimli bağlantılar incelendiğinde, numunelerdeki hasar mekanizması dolgu çapı $D=10$ mm, $D=12$ mm, $D=15$ mm olan dolgusuz pimli bağlantılara benzer şekilde hasarlar oluşmaktadır. $D=18$ mm dolgu çapına sahip numunelerde ise çekme hasarları da meydana gelmektedir.
- Dolgulu pimli bağlantılar ilk hasara uğradıktan sonra, dolgusuz pimli bağlantılara göre daha keskin ve ani bir kuvvet düşüşü göstermektedir.
- Dolgu takviyesi, pimli bağlantıların (dolgu çapı ne olursa olsun) daha fazla kuvvet taşımasına yardımcı olmaktadır.
- Dolgu çapı küçük olan ($D=10$ mm, $D=12$ mm) numuneler ilk hasar sonrası hemen hemen dolgusuz pimli bağlantı davranışı göstermektedir.
- Dolgu takviyesinde elyaf oranının (dolgu konsantrasyonunun) artmasının etkisi dolgu çaplarına göre farklılık göstermiştir. Dolgu çapı $D=10$ mm ve $D=12$ mm olduğunda; kenar-delik arası mesafesi ne olursa olsun,

konsantrasyon oranı arttıkça dolgu mukavemeti de artmaktadır. Yani konsantrasyon arttıkça numunenin taşıdığı yük miktarı da artmaktadır. $D=15$ mm olduğunda, konsantrasyon miktarı değişimi taşınan yükü çok etkilememektedir. $D=18$ mm olduğunda ise hasar yükü konsantrasyon miktarının artması ile azalmıştır. Bunun nedeni, bu yapılandırmanın yapısı gereği çekme hasar moduna da maruz kalması ve sertleşen dolgunun kırılmadan köpüğe zarar vermesidir.

- Kenar-delik arası mesafesinin (E) değişimi dolgu çapı $D=10$ mm olan numuneleri pek etkilememiştir. Yani mesafenin artması ya da azalması numunenin taşıdığı kuvveti pek değiştirmemiştir.
- Dolgu çapı $D=12$ mm, $D=15$ mm ve $D=18$ mm için kenar-delik arası mesafesi $E=20$ mm olduğunda maksimum kuvveti taşımıştır. Bunun nedeni bu yapılandırmada yatak ezilme hasarlarının görülmesidir. Bu hasar modu, diğer hasar modlarına göre daha az kritiktir.
- Dolgu çapları büyüdükçe numunelerin taşıdığı yük miktarı da buna paralel olarak artmaktadır. Bununla beraber hasar pim deplasmanı da düşmektedir. Başka bir deyişle dolgunun ve dolayısıyla numunenin mukavemeti artmakta ancak dolgunun gevrek karakteri arttığı için hasar şekil değiştirmesi düşmektedir.
- Özellikle dolgu çapı $D=18$ mm olan numuneler diğerlerine göre daha fazla yük taşımasına rağmen, Daha küçük deformasyonlarda hasarlar görülmüştür. Aynı zamanda özellikle kenar-delik arası mesafesi $E=20$ mm ölçüsünde bu numunelerin, diğer numunelere göre daha farklı davrandığı görülmüştür. Bunun nedeni dolgunun da kompozit kısım gibi çekme hasarlarına uğramasıdır.

KAYNAKLAR

- Ahn, H. S., Kweon, J. H., Choi J.H. (2005). Failure of Unidirectional-woven Composite Laminated Pin-loaded Joints. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24, 7/2005.
- Aktaş, A., İmrek, H., Cunedioğlu, Y. (2009). Experimental and numerical failure analysis of pinned - joints in composite materials. *Composite Structures*, 89, 459-466.
- Camanho, P.P., & Matthews, F.L. (1999). A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 33, 24, 2248- 2280.
- Camanho, P.P., & Matthews, F.L. (1999). Delamination onset prediction in mechanically fastened joints in composite laminate. *Journal of Composite Materials*, 33, 10, 906-927.
- Chang, F.K., Scott, R.A., Springer, G.S. (1984). Design of Composite Laminates Containing Pin Loaded Holes. *Journal of Composite Materials*, 18, 279-289.
- Chang, F.K., Chang, K.Y. (1987). A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations. *Journal of Composite Materials*, 21, 834-855.
- Chang, F.K., Chang, K.Y. (1987). Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-out Mode Failure. *Journal of Composite Materials*, 21, 809-833.
- Chang, K.Y., Liu, S., Chang, F.K. (1991). Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to tensile loadings. *Journal of Composite Materials*, 25, 274-301.

- Dano, M., Gendron, G., Picard, A. (2000). Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates. *Composite Structures*, 50, 287-296.
- Dursun, T. (2006). *Civata bağlantılı kompozit levhalarda hasar analizi*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Echavarria, C., Haller, P. Salenikovich, A. (2005). Analytical study of a pin-loaded hole in elastic orthotropic plates. *Composite Structures*.
- Girard, C., Dano, M. L., Picard, A., Gendron, G., (2003). Bearing Behavior of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates I. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 10, 1-21.
- Girard, C., Dano, M. L., Picard, A., Gendron, G., (2003). Bearing Behavior of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates II. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 10, 23-42.
- Gören, A., Atas, C., (2008) Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding, *Archives of Materials Science and Engineering*, 34, 117-120.
- Hung, C.L. and Chang, F.K. (1996). Strength Envelope of Bolted Composite Joints under Bypass Loads. *Journal of Composite Materials*, 30, 1402-1435.
- Ho, Choi j. (2003). Failure load prediction of mechanically fastened composite joints. *Journal of Composite Materials*, 37, 2167-2177.
- İçten, B. M., Karakuzu, R. (2002). Progressive failure analysis of pin-loaded carbon-epoxy woven composite plates. *Composites Science and Technology*, 62, 1259-1271.
- İçten, B. M., Sayman, O. (2003). Failure analysis of pin-loaded aluminum-glass-epoxy. *Composite Science and Technology*, 63, 727-737.

- İçten, B. M., Karakuzu, R., Toygar, M. E. (2006). Failure analysis of woven kevlar fiber reinforced epoxy composites pinned joints. *Composite Structures*, 73, 443-450.
- Ireman, T. (1998). Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints. *Composite Structures*, 43, 195-216.
- Ireman, T. (1999). *Design of Composite Structures Containing Bolt Holes and Open Holes*. Department of Aeronautics, Kunliga Tekniska Högskolan, İsveç, 1-30.
- Ireman, T. (2000). On damage development in mechanically fastened composite. *Composite Structures*, 49, 151-171.
- Johannes, M., Jakobsen J., Thomsen O.T., Bozhevolnaya E. (2009). Examination of the failure of sandwich beams with core junctions subjected to in-plane tensile loading. *Composıte Science and Technology*, 9, 1447-1457.
- Jurf, R.A., Vinson, J.R., (1990). *Failure Analysis of Bolted Joints in Composite Laminates*", *Composite Materials: Testing and Design* (Ninth Volume), ASTM STP 1059, S.P. Garbo, Ed., American society for Testing and Materials, Philadelphia, , 165-190.
- Kim, S.J., Hwang, J.S. (1998). Progressive failure analysis of pin-loaded laminated compsites using penalty finite element method", *AIAA Journal*, 36, 75-80.
- Lessard, L.B., Shokrieh, M. M. (1995). Two-dimensional modeling of composite pinned-joint failure. *Journal Of Composite Materials*, 29 (5), 671-697.
- Mackerle, J.(1984). Finite Element Analyses Of Sandwich Structures - A Bibliography . *Engineering Computations*, 19, 206-245.
- Mazumdar, S.K. (2002). *Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering*. CRC Press LLC, New York.

- Okutan, B. (2001). *Stress and failure analysis of laminated composite pinned joints*. D.E.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Okutan, B., Karakuzu, R. (2003). The strength of pinned joints in laminated composites. *Composite Science and Technology*, 63, 893-905.
- Okutan, B. (2005). Behavior of Pin - loaded laminated composites. *Experimental Mechanics*, 46, 589-600.
- Padhi, G.S., McCarthy, M.A., McCarthy, C.T.(t.b.) BOLJAT - A Tool for Designing Composite Bolted Joints using Three-Dimensional Finite Element Analysis. *Composites, Part A*, 11, 1573-1584.
- Perugini, P., Riccio, A., Scaramuzzino, F. (2001). Three-dimensional progressive damage analysis of composite joints. Proceedings of the 8th International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Civil-Comp Press, 18-21 Eylül 2001.
- Peters, S.T. (1998). *Handbook of Composites*, (2.baskı).Chapman & Hall, London.
- Seng, C.T. (1991). A Progressive Failure Model for Composite Laminates Containing Openings. *Journal Of Composite Materials*, 25, 556-577.
- Southward, T. Horrigan, D.P.W., Mallinson, G.D. Jayaraman, K. (2007). Failure of sandwich composite structure containing face-sheet - core disbonds. 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007.
- Sun, H.T., Chang, F.K., Qing, X. (2002). The response of composite joints with Bolt-clamping loads, part I: Model Development. *Journal of Composite Materials*, 36 (1), 47-67.
- Sun, H.T., Chang, F.K., Qing, X. (2002). The response of composite joints with Bolt-clamping loads, part I: Model Development. *Journal of Composite Materials*, 36 (1), 69-92.

- Tserpes, K.I., Papanikos, P., Kermanidis. (2001). A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading. *Blackwell Science Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 24, 663-675.
- Tserpes, K.I., Labeas, G., Papanikos, P., Th. Kermanidis (2002). Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates. *Composites Part B3* 33, 521-529.
- Xiao, Y. (2005). Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints. *Composite Science and Technology*, 65, 1022-1031.
- Wang, H.S., Hung, C.L., Chang, F.K. (1996). Bearing failure of bolted composite joints part I: experimental characterization. *Journal of Composite Materials*, 30, 1284-313.
- Whitworth, H.A., Othieno, M., Barton, O. (2003). Failure analysis of composite pin loaded joints. *Composite Structures*, 59, 261-266.
- Yang, B., Pan, E., Yuan, F.G. (2003). Three-dimensional stress analyses in composite with an elastically pinned hole. *International Journal of Solids and Structures*, 40, 2017-2035
- Yogeswaren, E.K., Reddy, J.N.. (1988). A study of contact stresses in pin-loaded orthotropic plates. *Computers & Structures*, 30 (5), 1067-1077.