



YAPIŞTIRICI VE PERÇİNLE BİRLEŞTİRİLMİŞ ÇİFT BİNDİRME BAĞLANTILARINDA İLERLEMELİ HASAR ANALİZİ

Murat Yavuz SOLMAZ ¹ Fırat Üniv. Mak. Müh. Böl. Elazığ	Tolga TOPKAYA ² Batman Üniv. Mak. Müh. Böl. Batman
---	---

ÖZET

Bu çalışmada, yapıştırıcı ve perçin kullanılarak birleştirilmiş çift bindirme bağlantılarında ilerlemeli hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Bağlantılarda ana malzeme olarak örgü tipi cam fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılmıştır. Analizler APDL (Parametric Design Language) kodları kullanılarak yazılan bir program yardımı ile ANSYS 12.1 sonlu elamanlar paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 30, 45 ve 60 mm olmak üzere üç farklı bindirme mesafesi için yapıştırıcı ve perçin kullanılarak birleştirilmiş bağlantıların ilerlemeli hasar analizi sonucunda elde edilen hasar yükleri ve hasar tipleri Maksimum Kayma Gerilmesi Teorisi ve Hashin Kriterine göre tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar birleştirme tipine ve bindirme mesafesine göre karşılaştırılarak sunulmuştur.

1. GİRİŞ

Havaçılık ve uzay başta olmak üzere savunma, otomotiv gibi sektörlerde ki hızlı gelişim ve artan rekabet yeni ve ihtiyaca cevap veren malzeme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla yirminci yüzyılın ortalarından itibaren kompozit malzemeler üretilmeye başlanmış ve gelişimi büyük bir hızla devam etmiştir. Kompozit yapılar yapıştırma veya civata/pim bağlantılarıyla bir araya getirilmektedir. İki bağlantı türünün de avantaj ve dezavantajları olmakla beraber hangi bağlantı türünün daha uygun olduğu araştırmacılar tarafından çok kez araştırılmıştır.

Aktaş ve diğerleri cam epoksi kompozit plakaların tek pimle ve paralel çift pimle birleştirilmesiyle oluşturulan bağlantının kopma yükü ve hasar tipini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Araştırmacılar pimlerin levha serbest kenarına olan uzaklığının pim çapına oranı ve levha genişliğinin pim çapına oranı için 4 farklı değer kullanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinin ANSYS programında yapan araştırmacılar hasar kriteri olarak Yamada-Sun kriterini kullanmıştır. Araştırmacılar pim deliğinin serbest uçtan uzaklaştıkça gerilmenin arttığını tespit etmiştir [4]. Khalili ve diğerleri kompozit plakaların yapıştırıcı ile birleştirilmesi ile oluşturulmuş tek bindirmeli bağlantılarda çekme ve eğilme momenti etkisiyle oluşan gerilme dağılımını sayısal olarak sonlu elemanlar metoduyla incelemiştir. Maksimum kayma ve soyulma gerilmesinin yapıştırıcı bölgenin uç kısımlarında ortaya çıktığını tespit eden araştırmacılar soyulma gerilmesindeki değişimin kayma gerilmesindeki değişiminden fazla olduğunu göstermiştir [6]. Kishore ve diğerleri aynı doğrultulu cam lifli epoksi kompozit malzemelerin çoklu pim bağlantısı ile birleştirilmesi sonucu yapılan gerilme analiziyle ortaya çıkan hasar davranışı ve hasar yükünü deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Sonlu elemanlar analizinde Tsai-Wu hasar kriterini kullanan araştırmacılar pim deliği çapının pim deliğinden kenara olan mesafeye oranı, pim deliği çapının pim delikleri arasındaki mesafeye oranı ve pim deliği çapının levha genişliğine oranının önemli olduğunu göstermiştir [5]. Pekbey pim bağlantılı 0/90/±60 dizilimine sahip cam lifli epoksi kompozit plakanın hasar yükü ve hasar tipini deneysel olarak tespit etmiştir. Araştırmacı deneylerinde plakanın bir kenarından delik merkezine olan mesafenin delik çapına oranı ve plaka genişliğinin delik çapına oranı değerlerine bağlı olarak yataklama, kayma, net çeki ve bunların kombinasyonlarının oluştuğunu tespit etmiştir [8].

1 Arş. Gör. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: mysolmaz@firat.edu.tr

2 Arş. Gör., Makine Müh. Böl., E-posta: tolga.topkaya@batman.edu.tr

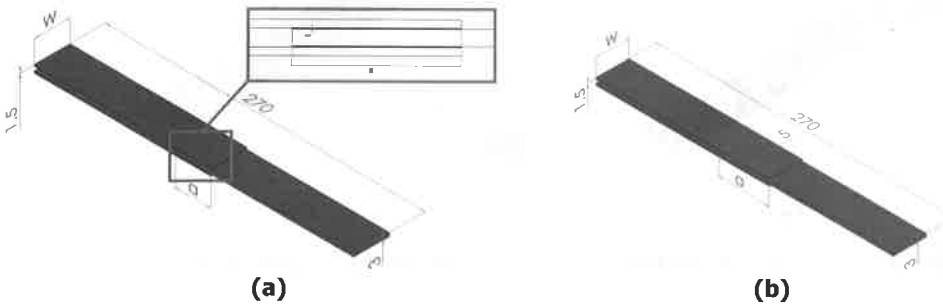
Karakaya ve Soykasap epoksi yapıştırıcıyla birleştirilmiş polimer matrisli dokumalı 0/45/90/-45 dizilimine sahip kompozitlerin eğilme halindeki davranışını deneysel olarak incelemiş ve sonlu elemanlar modellemesi yapmıştır. Üç nokta eğilme deneyi esnasında numunede oluşan eğrilik yarıçapını belirleyen araştırmacılar oluşun hasarın eğrilik yarıçapı ile ilişkisini araştırmışlardır [7]. Solmaz ve Turgut iki farklı yapıştırıcı kullanarak birleştirilen bağlantılarda serbest uç açısının ve bindirme mesafesinin bağlantı mukavemetini nasıl etkilediğini deneysel ve sayısal olarak tespit etmiştir. Çalışmada 0, 15, 30, 45, 60, 75 olmak üzere 6 farklı uç açısı ve 25,4 ve 38,1 mm olmak üzere 2 farklı bindirme mesafesinde hazırladıkları numuneleri çekme deneyine tabi tutarak kopma kuvvetlerini tespit etmiştir. Araştırmacılar sonuç olarak ucu açılı numunelerin açısız numunelere göre daha yüksek mukavemete sahip olduğunu tespit etmiştir [3]. Atas ve diğerleri ANSYS programını kullanarak karbon epoksi kompozit bir plakanın kademeli hasar analizini fiber ve matriste ayrı ayrı tespit edebilen Hashin hasar kriterini kullanarak yapmıştır. Araştırmacılar geliştirdikleri kademeli hasar analizi programıyla elde edilen hasar yükünün deneysel sonuçlarla %5 farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir [2]. Dursun, cıvata bağlantılı tabakalı kompozit levhaların çekme kuvveti altındaki davranışlarını incelemek, meydana gelen hasar biçimlerini belirleyebilmek ve maksimum yük taşıma kapasitelerini doğru şekilde hesaplayabilmek amacıyla üç boyutlu hasar ilerleme modellemesi yapabilen bir program geliştirmiştir. Geliştirdiği programda hasar kriteri olarak Hashin kriterini kullanan Dursun, geliştirdiği hasar ilerleme modeliyle literatürde yer alan deneysel çalışmalarını karşılaştırmış ve % 2 oranında farklılık elde etmiştir [9].

Bu çalışmada ise, yapıştırıcı ve cıvata ile birleştirilmiş çift bindirmeli (double lap) bağlantılarda ilerlemeli hasar analizi gerçekleştirilmiştir. 3 farklı bindirme mesafesinde yapıştırıcı ve pim kullanılarak oluşturulan modeller ANSYS 12.1 sonlu elemanlar paket programına hasar kriteri olarak Hashin [11] ve Maksimum Kayma Gerilmesi Teorisi kriterlerini esas alarak hazırlanmış APDL kodları okutarak gerçekleştirilmiştir. Analiz neticesinde bağlantıların hasar kuvvetleri ve seçilen kriterlere göre hasar ilerlemeleri gözlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Malzeme Özellikleri Ve Geometri

Çalışmada kullanılan bağlantı tiplerine ait geometrik değerler Şekil 1de verilmiştir. Perçin ve yapıştırıcı bağlantılarında genişlik (w) değeri 30 mm, bindirme mesafesi (a) ise 30 mm, 45 mm ve 60 mm olmak üzere 3 farklı değer alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Bağlantıların geometrik boyutları (a) Perçin bağlantısı (b) Yapıştırıcı bağlantısı

Çalışmada kullanılan $[0/90]_s$ dizilimine sahip olan cam elyaf epoksi dokuma (woven) plakanın [10], kompozit malzemeyi birleştirmede kullanılan AV-2015 yapıştırıcısının [1] ve perçin malzemesinin mekanik özellikleri ve mukavemet değerleri Tablo 1 de verilmiştir.

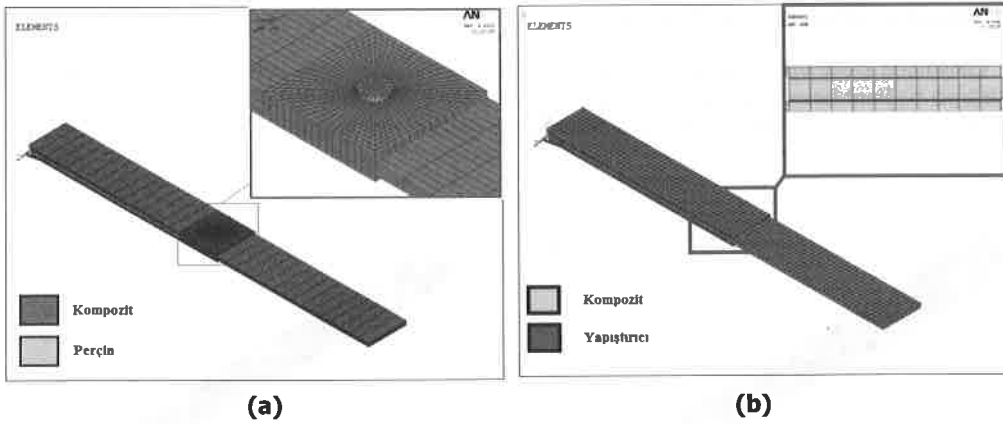
Tablo 1. Bağlantılarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

Özellik	Kompozit Plaka	AV 2015	Perçin
E_1 (MPa)	20769	1850	210000
E_2 (MPa)	20769		
G_{12} (MPa)	4133	560	
ν_{12}	0,09	0,33	0,3
X_f (MPa)	395		
X_c (MPa)	260		
Y_f (MPa)	395		
Y_c (MPa)	260		
S (MPa)	75	17,9	

2.2 Sonlu Elemanlar Metodu

Gerçekleştirilen çalışmada sonlu elemanlar paket programı ANSYS 12.1 kullanılmıştır. Perçin ve yapıştırıcı bağlantısının sonlu eleman modelleri Şekil 2 de verilmiştir. Oluşturulan modellerde kompozit plakalar için orthotropic malzeme özellikleri ile tanımlanan 8 düğüm noktası ve her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine (U_x , U_y , U_z) sahip Solid 46 elemanı kullanılmıştır. Yapıştırıcı ve perçin için ise Solid 46 eleman tipiyle aynı özelliklere sahip ancak izotropik malzeme özellikleriyle tanımlanan Solid 45 eleman tipi kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen analizlerin gerçeğe en yakın sonucu verebilmesi için sonlu elemanlara bölme işleminin olabildiğince küçük elemanlara bölerek yapılması gerekir. Ancak eleman ve düğüm sayısının artması analiz süresini uzatmaktadır. Eleman sayısı analiz sonuçlarını direk etkilediğinden sonlu elemanlara bölme işleminin uygun değerinde yapılması gereklidir. Yapılan çalışmada sonlu eleman yapılarına ait eleman ve düğüm sayıları Tablo 2 de verilmiştir.

**Şekil 2.** Sonlu eleman modelleri (a) perçin bağlantısı (b) yapıştırıcı bağlantısı.

Tablo 2. Yapıştırıcı ve perçin bağlantılara ait düğüm ve eleman sayıları.

Bindirme mesafesi		Yapıştırıcı Bağlantı	Perçin Bağlantı
30 mm	Düğüm Sayısı	3366	13650
	Eleman Sayısı	1700	10469
45 mm	Düğüm Sayısı	3564	18850
	Eleman Sayısı	1890	14117
60 mm	Düğüm Sayısı	3696	24050
	Eleman Sayısı	2050	17765

Oluşturulan modellere ait sınır şartları Şekil 3 deki gibidir. Bağlantılar bir ucundan sabitlenmiş ve diğer ucundan uygulanan gerilme ile çekilmiştir. Parçanın stabilitesini sağlamak için gerilme uygulanan ucunun y yönünde ki hareketi sınırlandırılmıştır. Analizler gerçekleştirilirken uygulanan kuvvet kademeli olarak artırılmış ve her yük değerinde kompozit plaka için Hashin Hasar Kriterine göre, perçin ve yapıştırıcı malzeme için ise Maksimum Kayma Gerilmesi Kriterine göre hasar kontrolü yapılmıştır. Belirtilen hasar kriterlerine göre hasar kontrolü yapılan elemanların mekanik özellikleri çok küçük değerler ile çarpılarak (10^{-5}) bir sonraki analiz adımında hasara uğramış elemanın, malzemenin mukavemetine etkisi sıfıra çok yakın olacak şekilde bir değere indirgenmiştir.

**Şekil 3.** Sınır şartları ve yükleme durumu.

Hashin Hasar Kriterine göre elemanların hasara uğrayıp uğramadığı aşağıdaki şartlara göre kontrol edilmiştir.

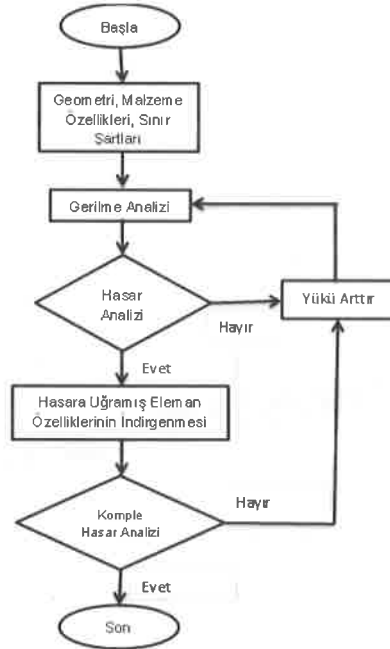
1. Matriks çekme hasarı $\sigma_2 > 0$ için $\left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1$
2. Matriks basma hasarı $\sigma_2 < 0$ için $\left(\frac{\sigma_2}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1$
3. Kayma hasarı $\sigma_1 < 0$ için $\left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1$
4. Elyaf çekme hasarı $\sigma_1 > 0$ için $\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1$
5. Elyaf basma hasarı $\sigma_1 < 0$ için $\left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right) \geq 1$

Şekil 4 te hasar analizi neticesinde kompozit malzeme üzerinde meydana gelen hasarı ifade etmek seçilen renklerin hangi hasar tipine karşılık geldiği verilmiştir.

- : Elyaf çekme hasarı
- : Elyaf basma hasarı (Yataklama hasarı)
- : Matris çekme hasarı
- : Matris basma hasarı
- : Kayma hasarı

Şekil 4. Kompozit malzemede oluşan hasar tiplerini ifade eden renkler.

Yukardaki kriterlere göre hasar kontrolü yapılan yapıda hasar analiz programının işleyişi sırasıyla Şekil 5 de verilen algoritma ile özetlenmiştir.











Şekil 5. Hasar analizi programının işleyiş algoritması.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapıştırıcı bağlantısı için 30 mm bindirme mesafesinde uygulanan yüklere göre hasar ilerlemesine ait başlıca resimler Tablo 3 de verilmiştir. Bağlantı tipi çift bindirmeli bağlantı olduğundan alt ve üst tabakadaki hasar dağılımı aynıdır. Bundan dolayı Tablo 3 de yapıştırıcı malzemenin yalnızca üst tabakasının resimleri gösterilmiştir.







Tablo 3. 30 mm bindirme mesafesi için uygulanan kuvvete göre yapıştırıcıda meydana gelen hasar dağılımı (◐ : Hasara uğramamış eleman, ◑ : Hasara uğramış eleman)

 0 N	 14670 N	 15570 N	 16650 N
 16830 N	 17235 N	 17325 N	 17460 N

Tablo 3 incelenecek olursa ilk hasar 14670 N da yapıştırıcı tabakanın sağ uç kısmında başlamış ve yük değerinin 16650 N a ulaşması ile yapıştırıcı tabakanın sol kısmında da başlayarak tabakanın iç kısımlarına doğru ilerlemiştir. Yük değeri 17460 N a ulaştığında her iki uçtan başlayarak merkeze doğru ilerleyen hasar birleşmiş ve bağlantı hasarı gerçekleşmiştir.

Çalışmada bindirme mesafesinin hasar yüküne etkisini incelemek için 30, 45 ve 60 mm olmak üzere 3 farklı bindirme mesafesi seçilmiştir. Maksimum hasar yükünün 60 mm bindirme mesafesinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bindirme mesafelerine göre hasar yüklerinin hasardan hemen önceki ve hasar anındaki durumları karşılaştırmalı olarak Tablo 4 de verilmiştir.



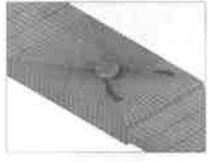



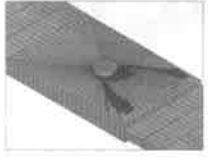

Tablo 4. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda meydana gelen hasar yükleri ve ilerlemesi.

30 mm	 17325 N	 17460 N
45 mm	 18090 N	 18180 N
60 mm	 18720 N	 18810 N

Perçin bağlantısında 60 mm bindirme mesafesine bağlantının üst katmanında bulunan 1.5 mm lik levhaya ait hasarın ilerlemesini belirten resimler Tablo 5 de verilmiştir. Orta katmanı

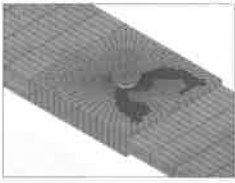
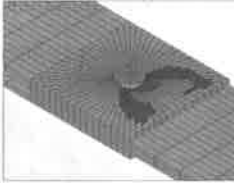


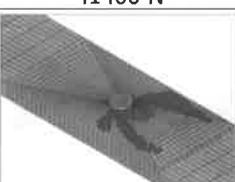
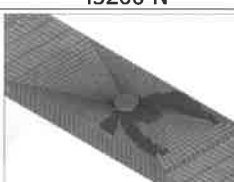
oluşturan 3 mm et kalınlığına sahip levhada yıkıcı hasar meydana gelmediğinden tabloda orta katmana ait resimlere yer verilmemiştir. Alt ve üst katmanda meydana gelen hasar tipleri ve uygulanan yüke göre oluşan hasar miktarı aynı olduğundan sadece üst katmana ait resimler verilmiştir.

Tablo 5. Perçin ile birleştirilmiş 45 mm bindirme mesafesine sahip bağlantının hasar ilerleme durumu ve meydana gelen hasar yükleri.

			
0 N	10800 N	18000 N	25200 N
			
30600 N	34200 N	41400 N	43200 N

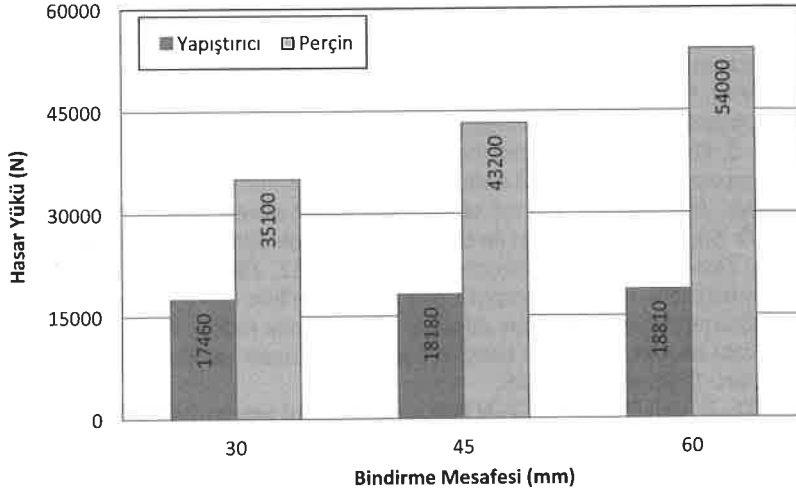
Her üç bindirme mesafesinde ortaya çıkan hasar yükleri yapıştırıcı bağlantı hasar yüklerinden büyük olmakla birlikte yapıştırıcı bağlantıda olduğu gibi büyükten küçüğe sırasıyla 60, 45, 30 mm bindirme meydana gelmiştir. Bindirme mesafelerine göre hasar yükleri Tablo 6 da verilmiştir.

Tablo 6. Perçin ile birleştirilmiş bağlantılarda meydana gelen hasar yükleri ve ilerlemesi.

30 mm		
	33300 N	35100 N
45 mm		
	41400 N	43200 N
60 mm		
	49500 N	54000 N

Şekil 6 da farklı bindirme mesafeleri ve farklı bağlantı tipleri için hasar analizleri neticesinde elde edilen hasar yükleri verilmiştir. Bindirme mesafelerinin artışına bağlı olarak her iki bağlantı tipinde de hasar kuvvetleri artmıştır.

Bağlantı tiplerinin etkisi göz önüne alındığında, 30 mm bindirme mesafesi için yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantının hasar yükü 17460 N iken aynı bindirme mesafesinde perçinli bağlantının hasar yükü yaklaşık 2 kat artarak 35100 N a yükselmiştir. Bu oran 45 mm bindirme mesafesi için 2.37 ve 60 mm bindirme mesafesi için ise yaklaşık olarak 2.87 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6. Bindirme mesafelerine göre hasar yükleri

4. SONUÇLAR

Perçin bağlantılarının hasar yükü tüm bindirme mesafeleri için yapıştırıcı bağlantılarına göre daha yüksek çıkmıştır. Sonuçlar irdelendiğinde literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Perçin bağlantılarında kompozit plakalarda meydana gelen hasar perçin deliğinin çevresinde başlamış ve serbest uçlara doğru ilerleyerek sonuçlanmıştır.

Perçin bağlantısı incelendiğinde bindirme mesafesinin artması hasar yükünün artmasına sebep olduğu gibi hasar tipinin değişmesine de sebep olmuştur. 30 mm bindirme mesafesinde kayma, 45 mm bindirme mesafesinde kayma ve çekme hasarı oluşurken 60 mm bindirme mesafesinde çekme hasarı meydana gelmiştir. Üç bindirme mesafesi içinde yataklama hasarı meydana gelirken bindirme mesafesinin artması oluşan yataklama hasarı miktarını arttırmıştır.

Yapıştırıcı bağlantılarda tüm bindirme mesafeleri için hasar yapıştırıcı tabakanın uç kısımlarında başlamış ve her iki uçtan da iç kısımlara ilerlemiş ve iç kısımlarda birleşerek bağlantı hasarı ile sonuçlanmıştır.

5. KAYNAKLAR

- [1]. A.M.G. Pinto, R.D.S.G. Campilho, I.R. Mendes, S.M. Aires, A.P.M. Babtista, Effect of hole drilling at the overlap on the strength of single-lap joints, *International journal of adhesion and adhesives*, 31, 380-387, 2011.
- [2]. A. Ataş, T. K. Demirciođlu, N. Arslan, C. Soutis, Civata bağlantılı karbon/epoksi kompozit plakaların kademeli hasar analizi, 2. Ulusal tasarım imalat ve analiz kongresi, 2010.
- [3]. M. Y. Solmaz, A. Turgut, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş basit bindirme bağlantılarında serbest uç açısı ve bindirme mesafesinin bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin deneysel olarak araştırılması, *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 173-182, 2009.
- [4]. A. Aktaş, H. İmrek, Y. Cunediođlu, Experimental and numerical failure analysis of pinned-joints in composite materials, *Composite Structures*, 89;459-456, 2009.
- [5]. A. Nanda Kishore, S.K. Malhotra, N. Siva Prasad, Failure analysis of multi-pin joints in glass fibre/epoxy composite laminates, *Composite Structures*, 91, 266-277, 2009.
- [6]. S.M.R. Khalili, S. Khalili, M.R. Pirouzhshemi, A. Shokuhfar, R.K. Mittal, Numerical study of lap joints with composite adhesives and composite adherends subjected to in-plane and transverse loads, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 28,411-418, 2008.
- [7]. Ş. Karakaya, Ö. Soykasap, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirmeli dokumalı kompozit yapıların eğilme hasarı, *Yapı teknolojileri elektronik dergisi*, 2, 43-52, 2008.
- [8].Y. Pekbey, Pim bağlantılı tabakalı kompozit plakada ön gerilme momenti ile geometrik parametre değişiminin hasar analizine etkisi, 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı, 2007.
- [9]. T. Dursun, Civata bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda hasar analizi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi*, 2006.
- [10]. R. KARAKUZU , T. GÜLEM, B.M. İÇTEN Failure analysis of woven laminated glass-vinylester composites with pin loaded hole, *Composite structures*, 72, 27-32, 2006.
- [11]. Z. HASHIN, Failure criteria for unidirectional fibre composites, *Journal of applied mechanics*, 47, 329-334, 1980.
- [12]. ANSYS, Version 12.1, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, TX, USA.