

SANDVIÇ L, T ve Pİ ŞEKLİ BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKLERİ ALTINDAKİ ANALİZLERİ

Umut ÇALIŞKAN* ve M. Kemal APALAK†
Erciyes Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi, KAYSERİ

ÖZET

Bu çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş farklı tipteki sandviç bağlantıların düşük hızlı darbe yükleri altındaki analizleri enerji sönümlemesi ve hasar gelişimi açısından incelenmiştir. Yapıştırıcı ile çok ince metallerin birleştirilmesi ve hafif bir bağlantı elde edilmesi mümkündür. Deniz yapılarında, otomotiv sanayinde ve uçak yapılarında metalik olmayan (kompozit) malzemelerden imal edilmiş plakaların dayanımını arttırmak amacıyla farklı şekillerde yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar kullanılmaktadır. Pratikteki yaygın kullanımına rağmen, geometrik boyutlarının tespit edilmesi daha basit geometriye bağlantıların davranışlarından elde edilen tecrübeye dayanır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların oluşturulmasında araştırmacılar farklı birleştirme teknikleri kullanmışlardır. Bu çalışmada L biçimli (tek destekli), T biçimli (çift destekli) ve Pi biçimli sandviç bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları Abaqus® sonlu elemanlar paket programı kullanılarak incelenmiştir. Sandviç bağlantı gelen darbe yüklerini daha iyi sönümleyebilmek ve yeterince hafif olmasını sağlamak için, çekirdeği polimer köpük malzemesinden (PVC C.70-75) ve plakaları da hava ve uzay yapılarında kullanımına uygun olan (Alüminyum 6061-T6) malzemelerden seçilmiştir. Darbe davranışına farklı şekillerde oluşturulan birleştirme biçimlerinin etkisi incelenmiştir. Birleştirme biçimlerinde tamamen yapıştırıcı kullanılmıştır ve yapıştırıcı tabakası kohezif bölge modeli (Cohesive Zone Model) kullanılarak modellenmiştir. Bu sayede, ayrılmalar daha başarılı bir şekilde ortaya konmuştur. Sandviç yapıların temas kuvvetleri, enerji ve yer değiştirme grafikleri karşılaştırıldığında aşırı farklılıklar ortaya çıkmamakla birlikte deformasyon, hasar ve ayrılma modları arasında oldukça farklılıklar gözlemlenmiştir. Pi biçimli bağlantı daha rijit bir davranış sergilerken L biçimli bağlantının oldukça fazla deforme olduğu ortaya çıkmıştır.

GİRİŞ

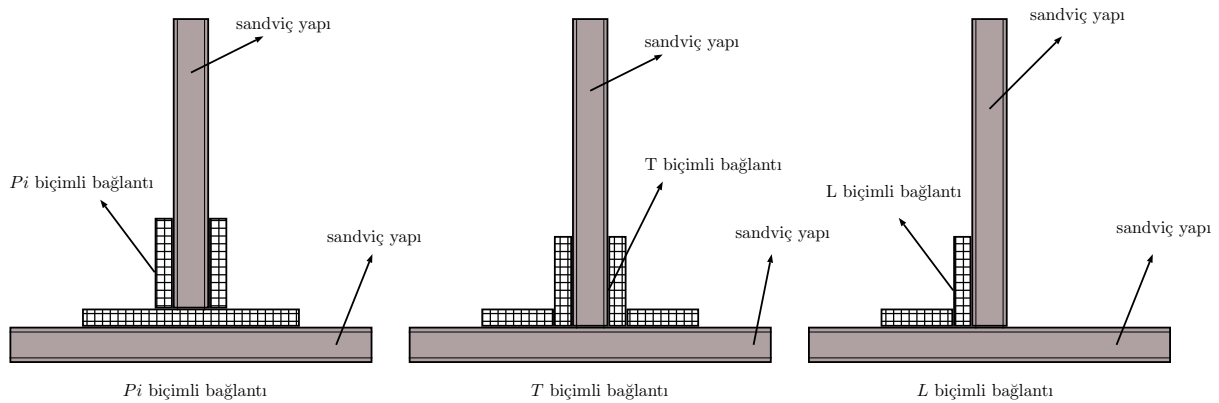
Yapıştırıcı ile bağlama tekniği bir çok mühendislik sahasında başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Geleneksel metotlara göre bazı avantajlarından dolayı, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar birçok araştırmacı tarafından klasik analitik metod ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir.

*Araştırma görevlisi, Makine Müh. Böl., E-posta: ucaliskan@erciyes.edu.tr

†Prof. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: apalakmk@erciyes.edu.tr

Yapıştırıcı ile çok ince metallerin birleştirilmesi ve hafif bir bağlantı elde edilmesi mümkündür. Kullanım amacına ve uygulama yerine göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir ve mühendislikte mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek bir darbeye karşı istenmeyen sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin en uygun davranışı göstermesi istenir. Metallerin darbe davranışı elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir. Metallerde darbe hasarı genellikle çarpma yüzeyinde gelişir ve başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Kompozit malzemelerde ise bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpma türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan tabakalar arası ayrılma şeklinde başlayabilir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek önem arzeder.

Yapıştırıcı ile birleştirme tekniği sandviç yapıların elemanlarının birleştirilmesinde bilinen bir tiptir. Örneğin, T bağlantı uçak kanat yapısının başlıca elemanlarının (skin-stringer, skin-rib, skin-spar) birleştirilmesinde kullanılır. Çünkü, yapı geometrisindeki ani değişimler ve süreksizlikler istenmeyen durumlardır ve T bağlantılar bu istemeyen durumları ortadan kaldırır [Guo ve Morishima, 2011]. Bu açıdan bir çok araştırmacı bu farklı durumları ve meydana gelebilecek olan hasar durumlarını farklı bağlantı geometrileri açısından incelemiş, farklı çalışmalar yapmıştır. Shenoi ve arkadaşları [Jackson, Read, and Shenoi, 1998] sandviç T bağlantılarda çekme yükleri altındaki yük transferini araştırmışlardır. Çalışmalarında hasara uğrayan bölgenin T bağlantının birleşme kısmında olduğu sonucuna varmışlardır. Parametrik çalışmaları sonucunda bağlantının mukavemetine ve rijitliğine etki eden en önemli parametrenin destek yarı çapı ve kalınlığı olduğuna kara verdiler. Modern uçak yapıları gittikçe daha fazla yüksek performanslı kompozit sandviç malzemelerden üretilmektedir. Daha önceki zamanlarda mekanik bağlayıcılar ile üretilen uçak yapıları, yapıştırıcı endüstrisinin gelişmesi ile daha düşük maliyet ve ağırlık sunması ile tercih edilen yapıştırıcı bağlantılara yerine bırakmıştır. Joosten ve diğerleri [David, Kelly, Joosten and Thomson, 2014] çok fonksiyonlu sandviç Pi bağlantıların statik ve dinamik yükler altında enerji absorbe etme kabiliyetini araştırdılar. Enerji absorbe edebilen sandviç gövdeler Pi olarak tariflenen yapı yardımı ile birleştirilmiştir. Böylece Pi bağlantı sayesinde yapı daha fazla yük taşıyabilmektedir. Zhou ve arkadaşları [Liu, Zhou, Zhang, Zhao, Zhou, Zhang and Thomson, 2016] eğilme yükü altında vidalanmış kompozit Pi bağlantının tasarımını ve analizini yapmışlardır. Bu yeni tasarım sayesinde Pi bağlantının yük taşıma kapasitesi arttırılmıştır. Pi bağlantının geometrisi sayesinde ayrılmalar önlenmiştir. Bu çalışmanın amacı farklı şekillerde yapıştırıcı ile birleştirilmiş sandviç bağlantıların düşük hızlı darbe davranışını araştırmaktır. Sandviç L, T ve Pi bağlantıların darbe yükleri altında hasar başlangıcı, gelişimi ve ayrılmalar başarılı bir şekilde modellenmiş ve sonuçlar ortaya konmuştur. Şekil 1' de sandviç bağlantıların yapılandırma biçimleri görülmektedir. Bağlantıların gövdesi, çekirdeği köpük olan ve plakaları metal olan sandviç yapıdır. Bu sayede daha hafif bir yapı ile enerji absorbe etme kabiliyeti arttırılmıştır.

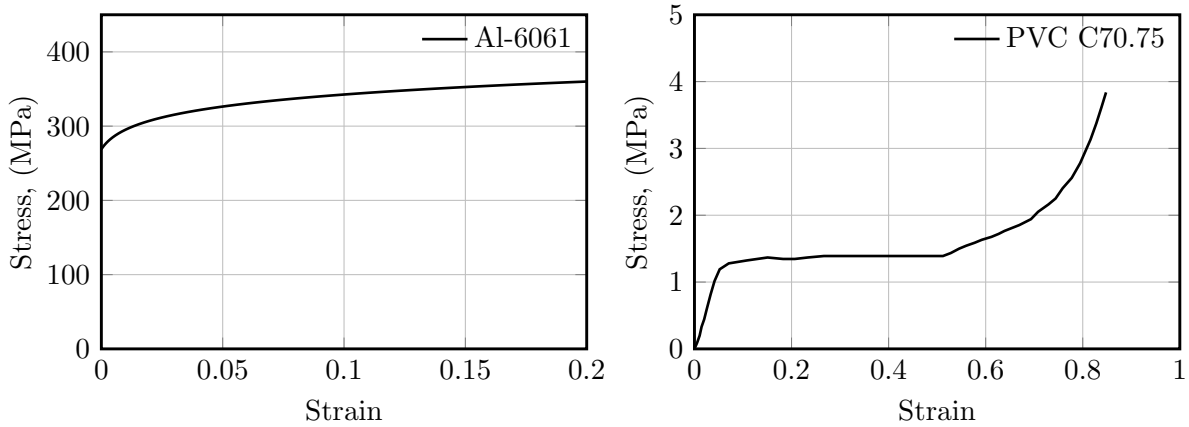


Şekil 1: Sandviç bağlantıların biçimleri

YÖNTEM

Sonlu elemanlar modeli

Analizler, Abaqus® sonlu elemanlar metodu programı kullanılarak 100, 150 ve 200 J darbe enerjileri için yapılmıştır. Sandviç L, T ve Pi bağlantılar köpük çekirdek malzemesi (PVC köpük), metal (Al 6061-T6) yüzey plakaları ve destekleyici elemanları ve bu malzemeleri yapıştırılmasında kullanılan yapıştırıcı tabakası içermektedir. Yapının geometrisindeki ve oluşturulmasındaki değişim enerji sönümlemesi açısından incelenmiştir. Sandviç yapının elemanları metal plakalar ve köpük malzemesi 30x200 mm boyutlarındadır. Destekleyici plakaların uzunlukları ise 50 mm boyunda L şeklindedir. Yapıyı oluşturan tüm plakaların kalınlıkları 1 mm ve köpük çekirdek malzemesinin kalınlığı 10 mm'dir ve yapıştırıcı kalınlığı 0.25 mm 'dir. Metal ve köpük malzemesi elastik-plastik malzeme modeline uygun şekilde modellenmiş ve her bir malzemeye ASTM standartlarına uygun bir şekilde çekme ve basma testi uygulanmıştır. Şekil 2'de bu malzemelerin gerilme - şekil değiştirme eğrileri gösterilmiş, Tablo 1 de ise bu malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir. Köpük malzemesi için CRUSHABLE FOAM malzeme modeli kullanılmıştır.



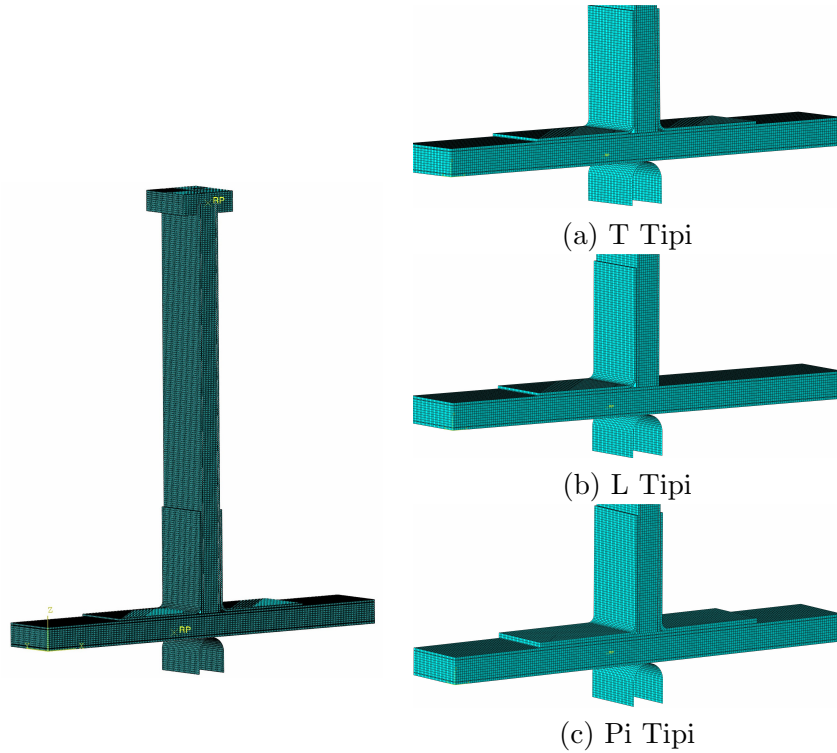
Şekil 2: Sandviç bağlantılarda kullanılan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme diagramları

Çizelge 1: Bağlantıları oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Young modülü(GPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Akma gerilmesi (MPa)
Al 6061 T6	69	0.33	2710	250
PVC C70.75	0.104	0	80	

Analizler de 10 kg ağırlığında ve 10 mm çapında silindirik uçlu vurucu kullanılmıştır ve rijit olarak modellenmiştir. Bağlantılar uygulamadaki yüklemeye maruz kalabileceği durumlar düşünülerek yan taraflardan ankastre mesnetlenmiş ve üst ucunda harekete izin verilmemiştir. Metal ve köpük malzemeleri C3D8R 3 boyutlu ve her bir düğüm noktası 9 serbestlik dereceli katı (solid) eleman tipi kullanılarak modellenmiştir. Köpük malzemesi yüksek şekil değiştirme kabiliyetine sahip olduğunu eleman içi bozulmaları ve ortaya çıkabilecek negatif hacim hataları önlemek için köpük malzemesinde 'hourglass control' uygulanmıştır. Vurucu ile bağlantı arasında ve diğer yüzeyler arasında GENERAL CONTACT temas algoritması kullanılmıştır. Birbirine temas eden yüzeylerin birbirinden ayrılmaması ve birlikte hareket etmesi için ise yüzeyler tek tek seçilerek TIE SURFACE TO SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Oluşturulan yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 3'de verilmiştir.

Kohezif bölge modeli (Cohesive zone modeling): Analizler, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların soyulma gerilmeleri için zayıf olduğunu ve yapıştırıcı ucu civarında yüksek gerilme yığılmasının meydana geldiğini göstermiştir. Yapıştırıcı (adhesive), ASTM tarafından "yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen madde" olarak tanımlanmaktadır [ASTM, 1974]. Yapıştırıcı ile birleştirme kompozit yapıların özellikle sandviç yapıların vidasız veya diğer birleştirme aparatları



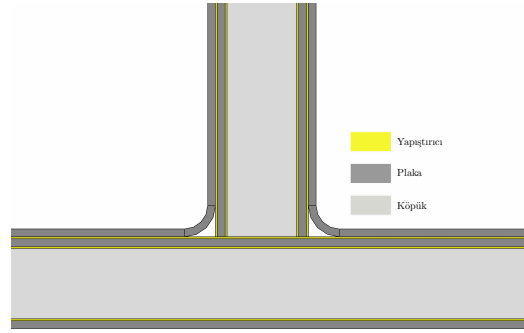
Şekil 3: Sandviç bağlantıların sonlu elemanlar modeli

olmaksızın oluşturulmasında etkili bir tekniktir. Fakat yapının oluşturulması ve imalatı yapılacak olan tasarıma göre oldukça maliyetli olabilir. Yapı tamamen yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu açıdan yapıştırıcı malzemesinin seçilmesi ve modellenmesi son derece önemli bir husustur. Yapılan literatür araştırması sonucunda çift fazlı endüstriyel yapıştırıcı olan ARALDITE 2015 ticari isimli yapıştırıcı seçilmiştir. Araştırmacılar tarafından bu malzemenin mekanik özellikleri detaylı bir şekilde araştırılmış ve ortaya konulmuştur [Banea, Campilho, da Silva and Neto, 2013] (Tablo 2). Şekil 4’de ise yapıştırıcının nerelerde kullanıldığı ve örnek olarak T bağlantının elemanları detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 2: Yapıştırıcı ARALDITE 2015 ’ in mekanik özellikleri [Banea, Campilho, da Silva and Neto, 2013]

Özellik	Araldite 2015
E [GPa]	1.85
G [GPa]	0.56
t_n^0 [MPa]	21.63
t_s^0 [MPa]	17.9
G_n^c [N/mm]	0.43
G_s^c [N/mm]	4.70

Yapıştırıcı malzemesi kohezif bölge modeli (Cohesive Zone Model) ve 3 boyutlu kohezif elemanlar (COH3D8) kullanılarak modellenmiştir. Sandviç yapıların imalatında yapıştırıcı önemli bir yere sahiptir. Yapıştırıcılar havacılık, uzay, denizcilik ve otomotiv gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Yapıştırıcının bir başka tanımı ise, “yüzeylere uygulandığında onları bir arada tutabilen ve ayrılmayı önleyen polimerik malzemedir” şeklindedir. Yapışmış bölge modeli gerilme-şekil değiştirme eğrisi esas alınacak olursa, eğrinin tepe noktasına kadar elastik olarak yüklenir, hasar bu nihai yüklemeden sonra başlar ve sonunda kopma meydana gelir. Yapışmış bölge yöntemi genel olarak düğüm noktalarını birleştiren yapıştırıcıya ait elemanların, yapışma gerilmeleri ile karşılık gelen yer



Şekil 4: T biçimli sandviç bağlantının elemanları

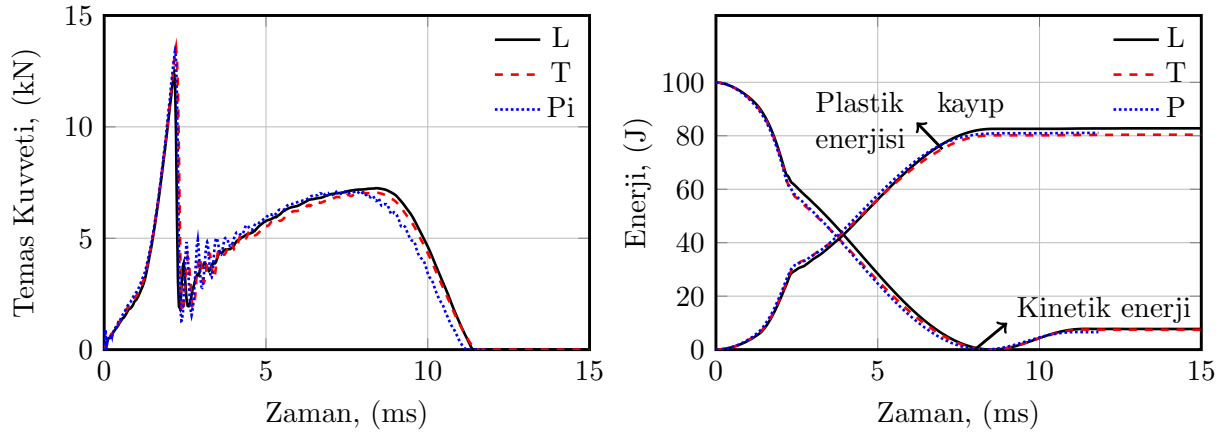
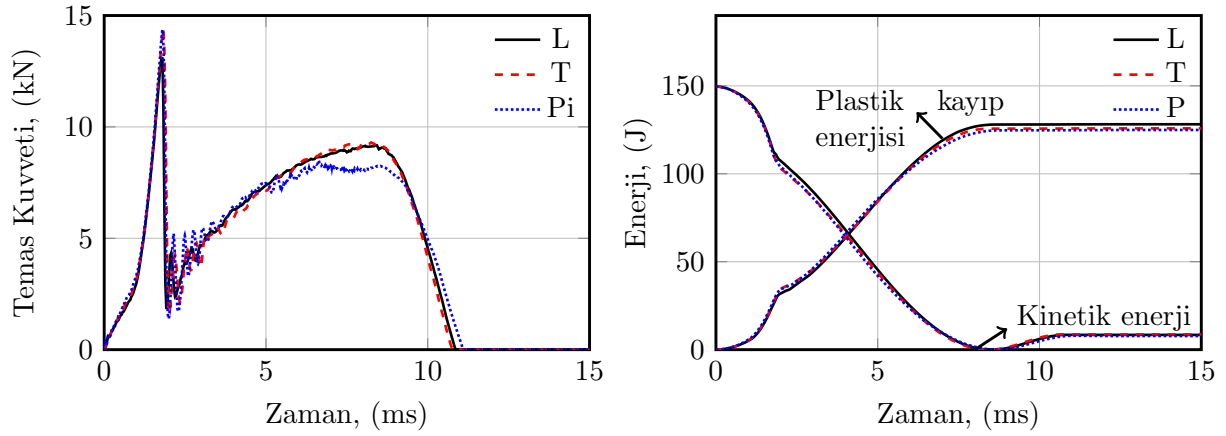
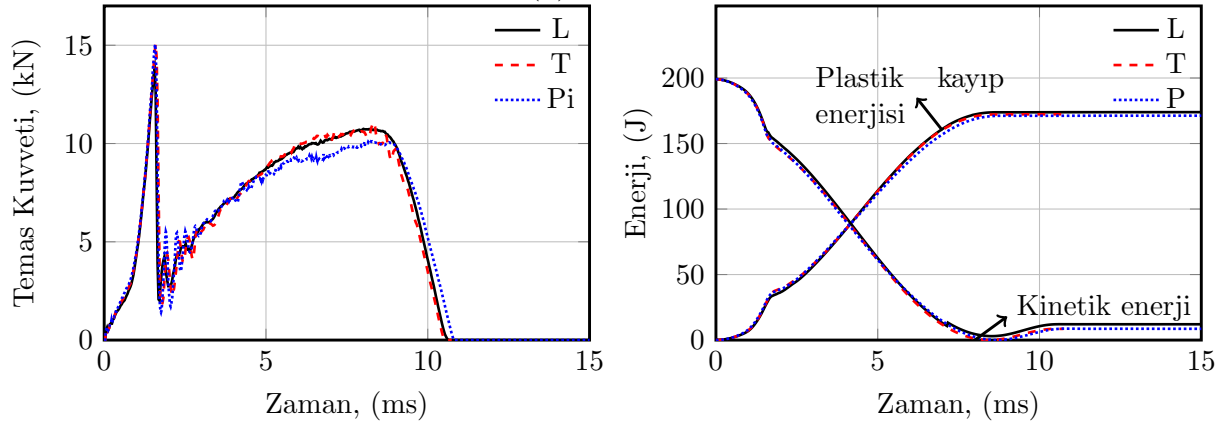
değiştirmeleri (normal ve kayma) arasındaki ilişkilerden faydalanır. Ayrıca bu model eğrinin tepe noktaları t_n^0 (normal) veya t_s^0 (kayma) ' a kadar elastik davranışını, bunu takip eden rijitlik azalışını, malzemedeki son kopmaya kadar olan elastik bozunumu da kullanır [Banea, Campilho, da Silva and Neto, 2013].

UYGULAMALAR

Darbe analizleri 100, 150 ve 200 J darbe enerjileri için yapılmıştır. Geometrik dizayn parametreleri enerji sönümlemesini geliştirmek için araştırılmıştır. Temas kuvveti, kinetik ve plastik kayıp enerji - zaman grafikleri ve yapının darbeye maruz kaldığı bölgenin kalıcı deformasyonları üç farklı darbe enerjileri için ortaya konmuştur. Darbe enerjisi değişimine göre delaminasyonların meydana gelişi araştırılmıştır. Şekil 5' de sandviç L, T ve Pi bağlantıların 100, 150 ve 200 J darbe enerjisi altındaki temas kuvveti, kinetik ve plastik kayıp enerji-zaman grafikleri görülmektedir. Darbe enerjisi arttıkça temas kuvveti seviyeleri artmaktadır. Fakat toplam temas süreleri azalmaktadır. Sandviç L bağlantının en büyük temas kuvveti seviyeleri sırasıyla 12.37, 13.11 ve 13.78 kN olarak 100, 150 ve 200 J darbe enerjisi için ölçülürken toplam temas süreleri 11.4, 10.8 ve 10.6 ms olarak ölçülmüştür. Sandviç T bağlantının en büyük temas kuvveti seviyeleri aynı darbe enerjileri için sırasıyla 13.57, 14.4 ve 15.07 kN olurken toplam temas süreleri ise 11.4, 10.7 ve 10.5 ms olmuştur. Sandviç Pi bağlantının ise en büyük temas kuvveti seviyeleri 13.42, 14.3 ve 15.04 kN olarak ve toplam temas süreleri 11.1, 11.1 ve 10.8 ms olarak sırası ile aynı darbe enerjileri için ölçülmüştür. Sonuçlar karşılaştırıldığında en büyük temas kuvveti seviyesi sandviç T bağlantıda ortaya çıkmıştır. En düşük temas kuvveti seviyesi ise sandviç L bağlantıda ortaya çıkmıştır. Toplam temas süreleri ise oldukça birbirine yakındır.

Sandviç L bağlantı 100, 150 ve 200 J darbe enerjisi seviyeleri sırası ile 7.7, 8.3 ve 12.06 J seviyelerine düşürmüştür ve plastik kayıp enerji seviyesini 82.7, 128.1 ve 173.9 J seviyelerine çıkarmıştır. Böylece analizi yapılan aynı darbe enerji seviyeleri altında sandviç L bağlantı % 92.3, 94.5 ve 93.8 enerji absorbe etmiştir. Sandviç T bağlantı ise aynı darbe enerjisi seviyelerini sırası ile 7.4, 8.7 ve 8.5 J darbe enerjisi seviyelerine düşürmüştür ve plastik kayıp enerji seviyelerini 80.4, 125.8 ve 172.3 J enerji seviyelerine çıkarmıştır. Sonuç olarak 100, 150 ve 200 J darbe enerjisi seviyeleri sırası ile sandviç T bağlantı tarafından % 92.6, 94.2 ve 95.7 olarak absorbe edilmiştir. Aynı darbe enerjileri altında sandviç Pi bağlantı ise darbe enerjisi seviyelerini sırası ile 6.5, 7.7 ve 8.6 J seviyelerini indirmiştir ve plastik kayıp enerji seviyelerini sırası ile 81.1, 124.9 ve 171.2 J seviyelerine çıkarmıştır. Analizler sonucunda başlangıçtaki darbe enerjileri sandviç Pi bağlantı tarafından % 93.5, 94.8 ve 95.7 absorbe edilmiştir. Plastik deformasyona harcanan enerji en fazla sandviç L bağlantıdır. Yapı destek elemanları açısından yetersiz olduğu için oldukça fazla plastik deformasyona maruz kalmıştır. Sandviç bağlantılar arasında enerji absorbe etme yeteneği açısından anlamlı farklar ortaya çıkmamıştır. Sandviç yapı etkisini göstermiş ve gelen darbe enerjisinin çok büyük bir kısmını absorbe etmiştir. Sandviç bağlantının üst kısmı burkulmaya maruz kalarak enerji absorbe edilmiş, aradaki çekirdek köpük bağlantı sayesinde burkulmadan dolayı meydana

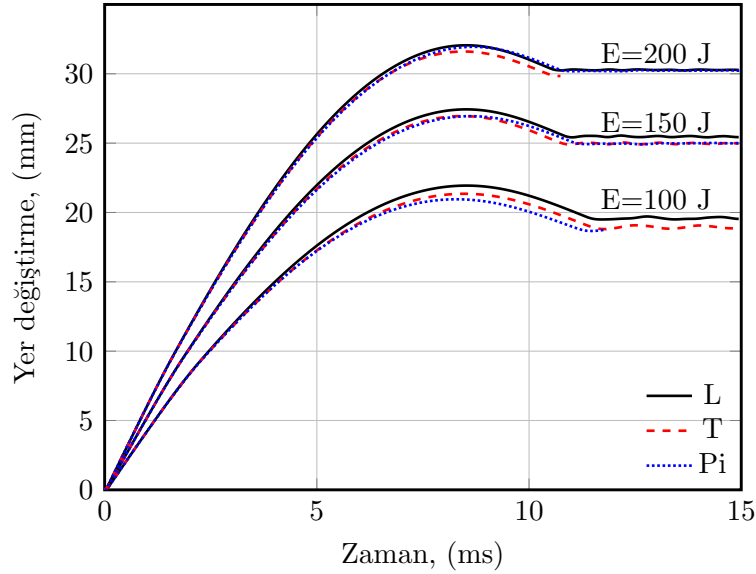
gelebilecek hasar ve kopmalar önlenmiştir. Sandviç bağlantılar tarafından absorbe edilen enerjinin büyük bir kısmı plastik deformasyona harcanmıştır. Yapıların darbe enerjisi arttıkça enerji absorbe etme kabiliyeti artmaktadır.

(a) $E=100\text{ J}$ (b) $E=150\text{ J}$ (c) $E=200\text{ J}$

Şekil 5: Sandviç L, T ve Pi bağlantıların (a) 100, (b) 150 ve (c) 200 J darbe enerjileri altında temas kuvveti, kinetik enerji ve plastik kayıp enerji - zaman grafikleri

Şekil 6 sandviç L, T ve Pi bağlantıların 100, 150 ve 200 J darbe enerjisi altındaki darbeye maruz kalan bölgedeki zamana bağlı yer değiştirmelerini göstermektedir. Darbe enerjisi arttıkça yer değiştirmeler artmaktadır. Sandviç L bağlantısının darbe bölgesinde 100, 150 ve 200 J darbe enerjisi altındaki kalıcı yer değiştirmeleri sırası ile 19.6, 25.4 ve 30.2 mm olarak elde edilmiştir. Sandviç T bağlantısının ise aynı darbe enerjileri altındaki kalıcı yer değiştirmeleri 18.8, 24.9 ve 29.8 mm'dir.

Sandviç Pi bağlantısının kalıcı yer değiştirmeleri de 18.7, 25.1 ve 30.2 mm olarak ölçülmüştür. En büyük yer değiştirmeler sandviç L bağlatıda ortaya çıkmıştır fakat yer değiştirmeler arasında da oldukça düşük farklar vardır. Darbe enerjisinin artışı yer değiştirmeleri doğru orantılı olarak arttırmıştır ve 50 J enerji artışı yaklaşık 5 mm'lik darbe bölgesindeki kalıcı olarak yer değiştirme artışına neden olmuştur.

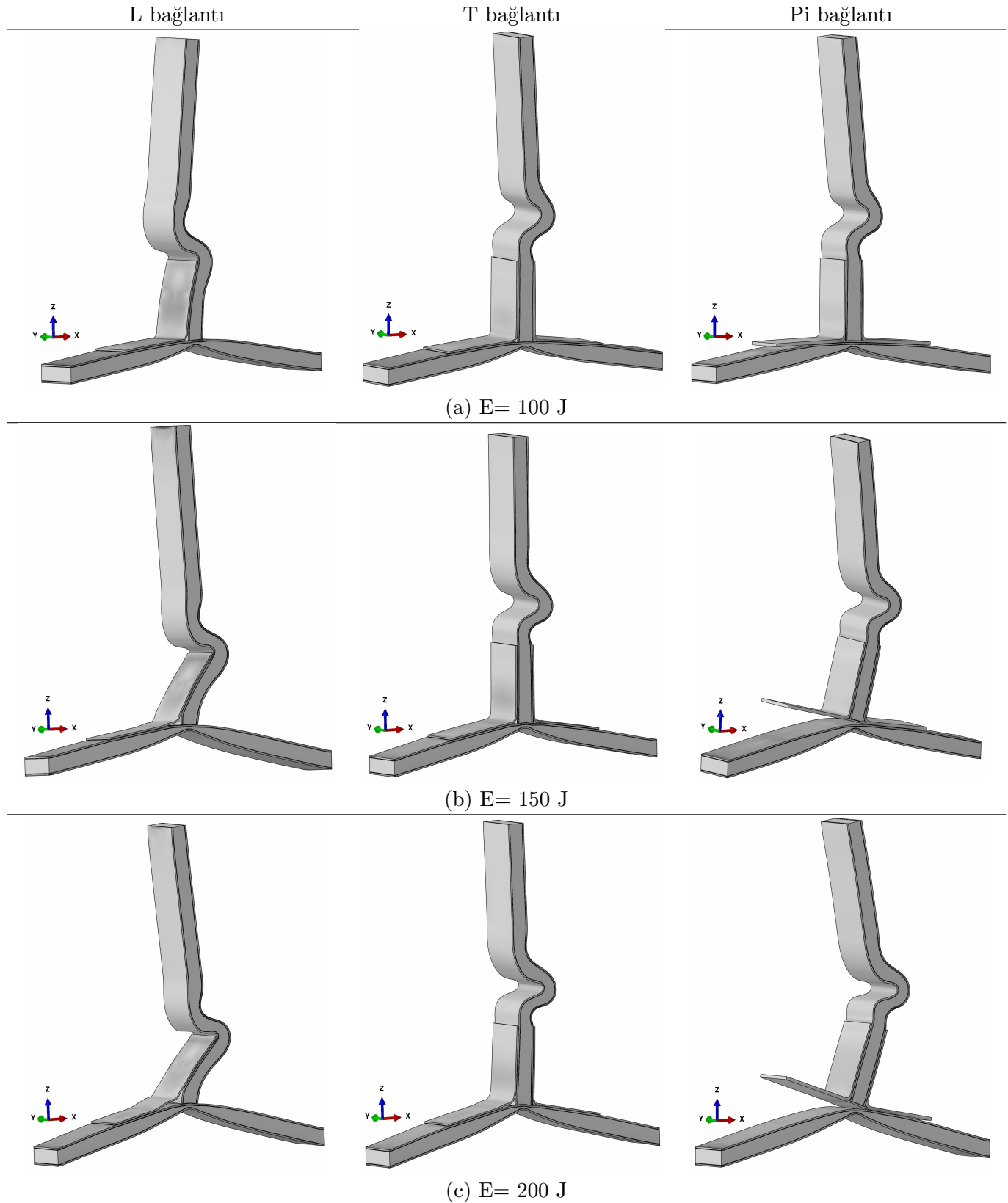


Şekil 6: Sandviç L, T ve Pi bağlantılarının 100,150 ve 200 J darbe enerjileri altındaki yer değiştirme grafikleri

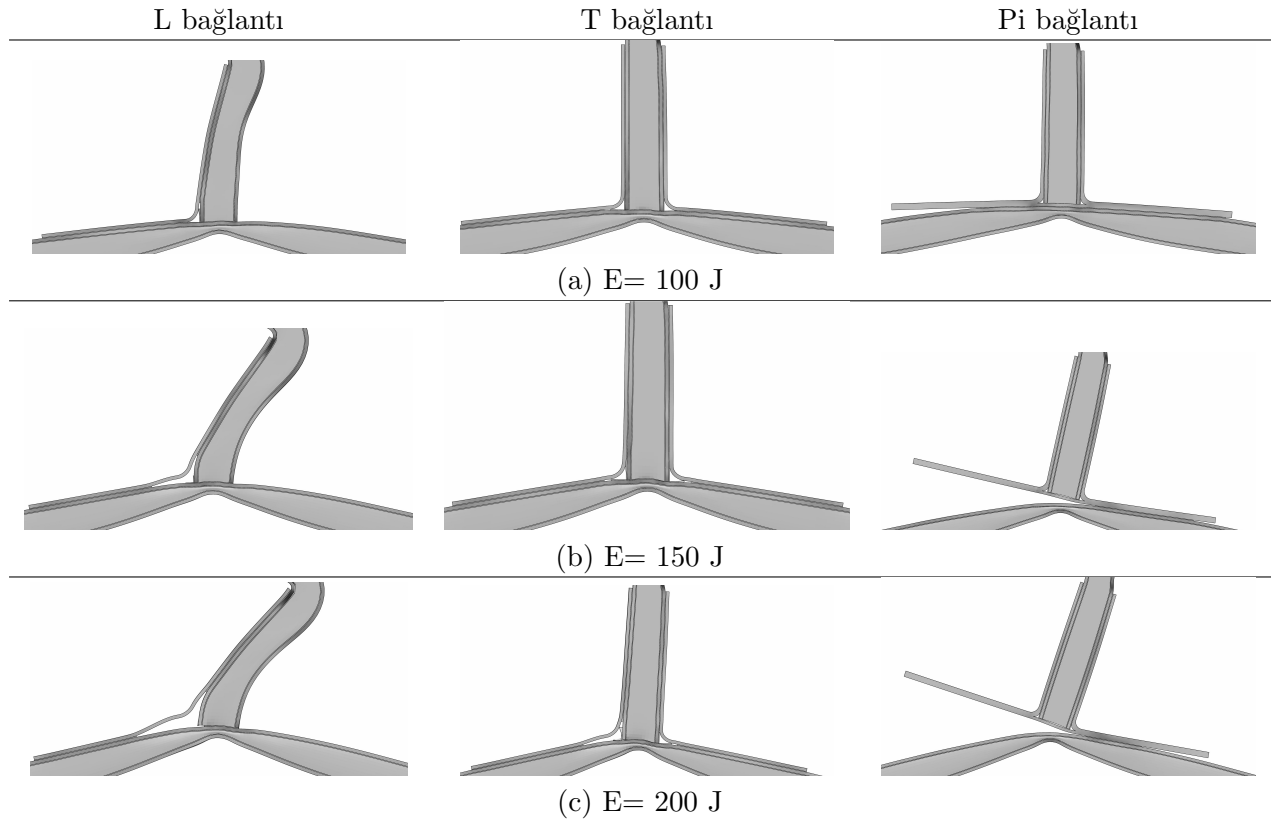
Şekil 7 sandviç L, T ve Pi bağlantılı yapıların 100, 150 ve 200 J darbe enerjileri altındaki deformasyon modlarını göstermektedir. Darbe enerjisi arttıkça destek plakalarında meydana gelen hasarlar artmaktadır. Bağlantı şeklinin değişmesi sandviç bağlantısının burkulma eğilimini değiştirmektedir. Sandviç L yapı tek taraflı destek plakasına sahip olduğu için destek plakasının olduğu taraf yönünde sandviç bağlantısının üst kısmı burkulmuştur. Darbe enerjisi arttıkça destek plakası deforme olarak yapıyı daha fazla hasara uğratmıştır. Hasar modları dikkate alındığında üç yapıda farklı davranış sergilemiştir. Sandviç T bağlantı hasarı önlemede başarılı olmuştur. Destek plakaları bağlantı ile şekil değiştirmiş ve ayrılmalarda önlenmiştir. Darbe enerjisi arttıkça bağlantının üst kısmı daha fazla burkulmuştur. Sandviç Pi bağlantıda ise oldukça fazla hasar meydana gelmiştir. Yapıştırıcı Pi destek plakası karşısında zayıf kalmış ve destek plakası sandviç yapıdan soyulmaya başlamıştır. Darbe enerjisi arttıkça bu soyulma daha belirgin bir şekilde meydana gelmiştir ve burkulmada aynı oranda artmıştır. Pi bağlantı diğer bağlantı tiplerine göre daha rijit davranmıştır ve yapıştırıcı bölgesi zayıf kalmıştır.

Şekil 8 de ise sandviç L, T ve Pi bağlantılarının 100, 150 ve 200 J darbe enerjileri altındaki darbe bölgesindeki bağlantı noktalarının delaminasyonları görülmektedir. Bütün bağlantılarda darbe enerjisinin artışı yapıştırıcı bölgesindeki hasarı arttırmaktadır. Analiz sonuçları kohezif bölge modelinin başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Sandviç L bağlatıda ayrılmalarda destek plakasının büküm noktalarından başlayarak devam etmektedir. Bunun nedeni diğer tarafta destek plakası olmadığı için bu yönde bir eğilim vardır ve büküm noktası en fazla zorlamaya maruz kalan bölgedir. Destek plakasının uç noktaları bu yüzden zorlanmaya maruz kalmamıştır. Sandviç T bağlantı dikkate alındığında ise ayrılmaları ve hasarı başarılı bir şekilde önlediği görülmektedir. Bu bağlantıda da en fazla zorlanan bölge destek plakalarının büküm noktalarıdır. Sandviç bağlantının burkulduğu tarafın diğer yönündeki destek plakası daha fazla zorlanmaya maruz kalmıştır ve yapıştırıcı hasarı bu bölgede daha fazladır. Sandviç Pi bağlatıda ise hasara uğrayan bölge oldukça fazladır. Destek plakası yekpare olması açısından daha rijit davranmıştır ve yapıştırıcı bölgesindeki zorlanma destek plakasının uç kısımlarında başlamıştır. Darbe enerjisi arttıkça Pi destek plakası alt

taftaki sandviç yapıdan ayrılmıştır. Destek plakası hasara uğramamıştır fakat sandviç bağlantılar arasındaki bağ neredeyse kopma derecesine gelmiştir.



Şekil 8: Sandviç L, T ve Pi bağlantılı yapıların (a) 100, (b) 150 ve (c) 200 J darbe enerjileri altındaki deformasyon modları



Şekil 7: Sandviç L, T ve Pi bağlantılı yapıların (a) 100, (b) 150 ve (c) 200 J darbe enerjileri altındaki ayrılma modları

SONUÇ

Bu çalışmada sandviç L, T ve Pi bağlantıları farklı darbe enerjileri altındaki düşük hızlı darbe davranışları lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Geometrik tasarım parametreleri enerji absorbe etme kabiliyeti açısından incelenmiştir. Temas kuvveti, kinetik ve plastik kayıp enerjisi ve darbe bölgesindeki kalıcı yer değiştirme - zaman grafikleri farklı darbe enerjileri ve sandviç bağlantı tipleri için irdelenmiştir. Yapıştırıcı ile oluşturulan sandviç bağlantı tipleri enerji absorbe etme kabiliyeti incelenirken yapıştırıcının önemine vurgu yapılmış ve kırılma mekaniği yaklaşımı ile yapıştırıcı bölgeleri kohezif bölge metodu kullanılarak modellenmiştir. Bu modelde üç boyutlu kohezif elemanlar kullanılmış, normal ve kayma yönündeki soyulma gerilmeleri esas alınarak hasar parametreleri belirlenmiştir. Metal plakaların (Al 6061-T6) ve köpük malzemesinin (PVC C70.75) plastik davranışı dikkate alınmış ve köpük malzemesi 'Crushable Foam' malzeme modeli ile modellenmiştir. 100, 150 ve 200 J darbe enerjisi ile yapılan analizler sonucunda sandviç yapıların ayrılma ve deformasyon modları ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılar belirli bir enerji seviyesinde geldikten sonra burkulmaya maruz kalmıştır. Bu açıdan temas kuvveti, kinetik ve plastik kayıp enerjileri aralarında aşırı farklar ortaya çıkmamıştır. Fakat hasar modları açısından farklar ortaya çıkmıştır. Sandviç L bağlantı daha fazla deforme olmuştur, destek plakaları yapıyı muhafaza etmede yetersiz kalmıştır. Sandviç T bağlantıda ise destek plakaları hasarın meydana gelmesini önlemiş yapıyı muhafaza etmiş ve sadece burkulmalar meydana gelmiştir. En fazla hasar ise sandviç Pi bağlantıda meydana gelmiştir. Yapıştırıcı destek plakası karşısında yetersiz kalmış ve destek plakası alt taraftaki sandviç yapıdan soyulmaya başlamıştır. Darbe enerjisinin artışı tüm yapılarda temas kuvveti, yer değiştirme ve hasarları arttırmıştır. Ayrılmalar başarılı bir şekilde modellenmiş ve yapıştırıcı tabakasının önemi ortaya konmuştur. Sandviç T bağlantı bütün koşullar dikkate alındığında daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğuna karar verilmiştir.

Kaynaklar

ASTM, 1974. *Definition of Terms Relating to Adhesive*

Banea, M.D., Campilho, R.D.S.G., da Silva, L.F.M. and Neto, J.A.B.P 2016. *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*, International Journal of Adhesion & Adhesives, Cilt.44, s.48-56

David, M., Kelly, D., Joosten M.W., and Thomson, R., 2014. *Static and dynamic evaluation of a multifunctional crashworthy pi-joint/sandwich energy absorbing structure*, Composite Structures, Cilt.118, s.423-431

Guo, S., Morishima, R., 2011. *Numerical analysis and experiment of composite sandwich T-joints subjected to pulling load*, Composite Structures, Cilt.94, s.229-238

Jackson, C. L., Read, P. J. C. L., and Sheno, R.A., 1998. *Influence of joint geometry and load regimes on sandwich tee joint behaviour*, Reinforced Plastics & Composites, Cilt.17, s.725-740

Liu, F., Zhou, L., Zhang, D., Zhao, L., Zhou, X., Zhang, J. and Thomson, J., 2016. *Design and analysis of a novel bolted composite π joint under bending load*, Materials and Design, Cilt.98, s.201-208