



YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ SANDVIÇ T TİPİ BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞI

Umut Çalışkan¹, M. Kemal Apalak² ve Kemal Arslan³

^{1,2}Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği, KAYSERİ

³Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, KAYSERİ

ABSTRACT

Adhesive bonding technique is used in many engineering areas successfully. Adhesive bonding presents the new possibilities to manufacture with low cost because of many advantages in application. It is possible to bond very thin metal plates and obtain lightweight joints with adhesive. Tee joints are used to strengthen plates which are made by non-metal (composite) in marine structures, automotive industry and aircraft industry. Although it is used extensive in practice, confirming the geometric dimensions are related with experience of more simple bonding behaviour. Researchers used different bonding technics in tee joints. In this study, the impact behaviour of tee joints with double support was investigated by using Abaqus[®] finite element packaged software. Tee joints were formed as sandwich structure with two different polymer foam core materials (Expanded polystyrene, EPS and Polivinil klorür, PVC) and reinforced metal plates (Aluminum 2024-T3). The effect of the foam density and support geometry on the impact behaviour were investigated for different impact energies. Sandwich structure was bonded using adhesive. Adhesive layers were modelled by using cohesive zone model and cohesive elements.

ÖZET

Yapıştırıcı ile bağlama tekniği birçok mühendislik sahasında başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Uygulamadaki birçok avantajından dolayı yapıştırıcı ile birleştirme düşük maliyetli üretim için yeni imkânlar sunar. 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 T bağlantılar kullanılmaktadır. Pratikte ki yaygın kullanımına rağmen, geometrik boyutlarının tespit edilmesi daha basit geometrili bağlantıların davranışlarından elde edilen tecrübeye dayanır. T tipi bağlantıların oluşturulmasında araştırmacılar farklı birleştirme teknikleri kullanmışlardır. Bu çalışmada, çift destekli T tipi bağlantıların düşük hızlı darbe davranışı Abaqus[®] sonlu elemanlar paket programı kullanılarak incelenmiştir. T bağlantı, gelen darbe yüklerini daha iyi sönmüleyebilmek ve yeterince de hafif olmasını sağlamak için, çekirdeği iki farklı polimer köpük malzemesi (Expanded polystyrene, EPS ve Polivinil klorür, PVC) olan ve metal plakalarla (Alüminyum 2024-T3) desteklenmiş sandviç yapı şeklinde oluşturulmuştur. Darbe davranışına köpük yoğunluğu etkisi ve destekleyici yapının geometrisinin etkisi farklı darbe enerjileri için incelenmiştir. Yapı tamamen yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuştur. Yapıştırıcı malzemesi kohezif bölge modeli (Cohesive Zone Model) ve kohezif elemanlar (Cohesive element) kullanılarak modellenmiştir.

GİRİŞ

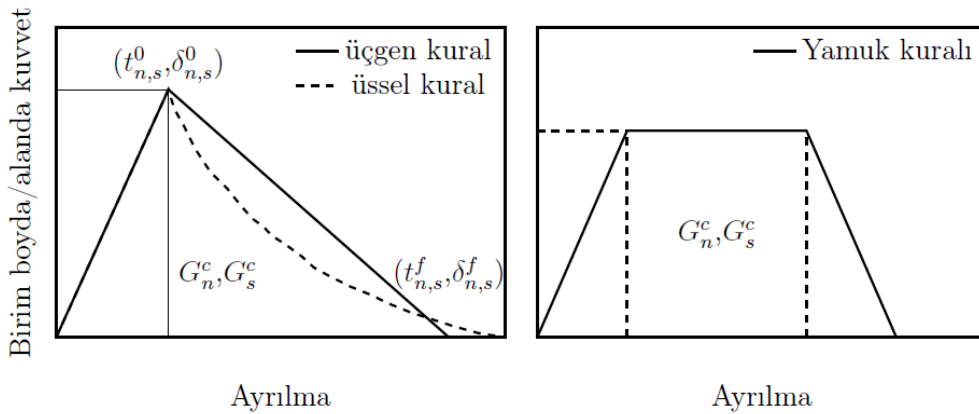
Dünyada gelişen teknoloji ile birlikte mühendislik uygulamalarında kompozit malzemelerin yeri gün geçtikçe artmaktadır. Saçtan, tahtadan yapılan tekneler, yatlar yerlerini polyester cam elyaftan yapılan benzerlerine bırakmaktadır. Bakım onarım yönünden daha avantajlı olan kompozit malzemelerden yapılan teknelerin esas avantajları ise aynı zamanda hafif, uzun ömürlü ve süratli olmalarıdır. Ahşap yapılarda ve uçak konstrüksiyonlarında yapılandırılmış yapıların dayanımı ve gerilme değişimlerine olan dayanımı yıllardır gösterilmiştir. Geleneksel metotlara göre bazı avantajlarından dolayı, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar birçok araştırmacı tarafından klasik analitik metot ve sonlu eleman metodu kullanılarak incelenmiştir. Tek ve çift bindirme bağlantıları basit geometriye sahip olmalarından dolayı ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Analizler, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların soyulma gerilmeleri için zayıf olduğunu ve yapıştırıcı ucu civarında yüksek gerilme yığılmasının meydana geldiğini göstermiştir (1).

YÖNTEM

Kohezif Bölge Modeli (Cohesive Zone Modelling)

Sandviç yapıların imalatında yapıştırıcı önemli bir yere sahiptir. Yapıştırıcı (adhesive), ASTM tarafından “yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen madde” olarak tanımlanmaktadır (2). Yapıştırıcılar havacılık, uzay, denizcilik ve otomotiv gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Yapıştırıcının bir başka tanımı ise, “yüzeyle 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 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. Yapışmış bölge modeli genel olarak çalışmalarda, üçgen, üssel ve ikizkenar yamuk kuralları şeklinde uygulanmaktadır (Şekil 1 (3)).



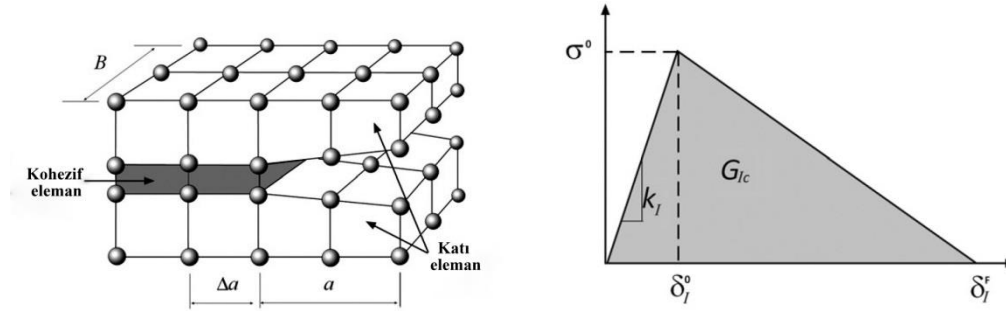
Şekil 1. Yapışmış Bölge Modeli Kuralları

Üssel kuralda t_n^0 ve t_s^0 e kadar lineer bir davranış vardır ve bu değerlerden sonra kopmaya kadar üssel olarak bir yumuşama dikkate alınır. Ancak üçgen kuralda gerilmede ani bir düşüş söz konusudur. G_n ve G_s yapışmış bölge yöntemi kurallarının çekme ve kayma durumlarındaki eğrinin altında kalan alandır. Yapışmış bölge yönteminde lineer

elastik davranış arayüzeyde o anki kayma ve çekme durumlarına karşılık gelen gerilme ve şekil değiştirme halleri cinsinden matris biçiminde tarif edilir (3).

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = [K] \tilde{\varepsilon} \quad (1)$$

$$G_{IC} = \int_0^{\delta_i^F} \sigma d\delta \quad (2)$$



Şekil 2. Yapışmış Bölge modeli davranışı

Şekil 2 de gösterildiği gibi eğrinin eğimi rijitliği vermektedir (4). Bu değer özellikle kırılma davranışlarında oldukça yüksektir. Tip I ve Tip II de normal veya kayma gerilmeleri kritik değere geldiğinde rijitlik 0' a düşer. Gerçek yapılarda genellikle kuvvet çatlak önünde yer alır, bu yüzden genel olarak karışık tip ayrılma formülasyonunu çıkartmak gerekmektedir. Tip I ve Tip II (normal ve kayma) için ilk ayrılma meydana geldiği anda G_I veya G_{II} (kırılma toklukları) kritik değerlerinin hesaplanması gereklidir. (G_{Ic} veya G_{IIc}).

Tablo 1. T bağlantı elemanlarının özellikleri

Malzeme	Elastiklik Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Akma Gerilmesi (MPa)
Al 2024-T3	73.1	0.33	2780	350
EPS 100	0.031	0	100	-
PVC500	0.105	0	500	-

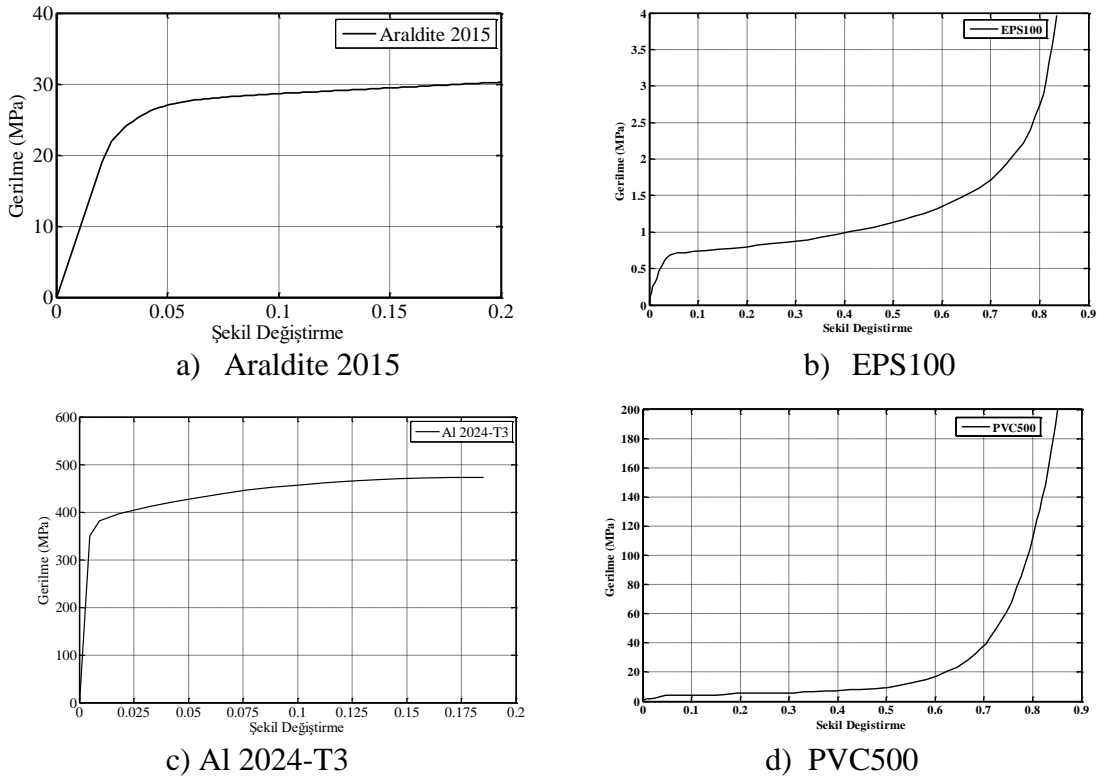
Tablo 2. Araldite 2015 yapıştırıcı malzemesi özellikleri

Malzeme	Araldite 2015
Elastiklik Modülü (GPa),E	1.85
Kayma Modülü (GPa),G	0.56
Ayrılma Gerilmesi (Normal,MPa), t_n^0	21.63
Ayrılma Gerilmesi (Kayma,MPa), t_s^0	17.9
Ayrılma Tokluğu (Normal,N/mm), G_n^c	0.43
Ayrılma Tokluğu (Normal,N/mm), G_s^c	4.70

Sonlu Elemanlar Modeli ve Sayısal Analizler

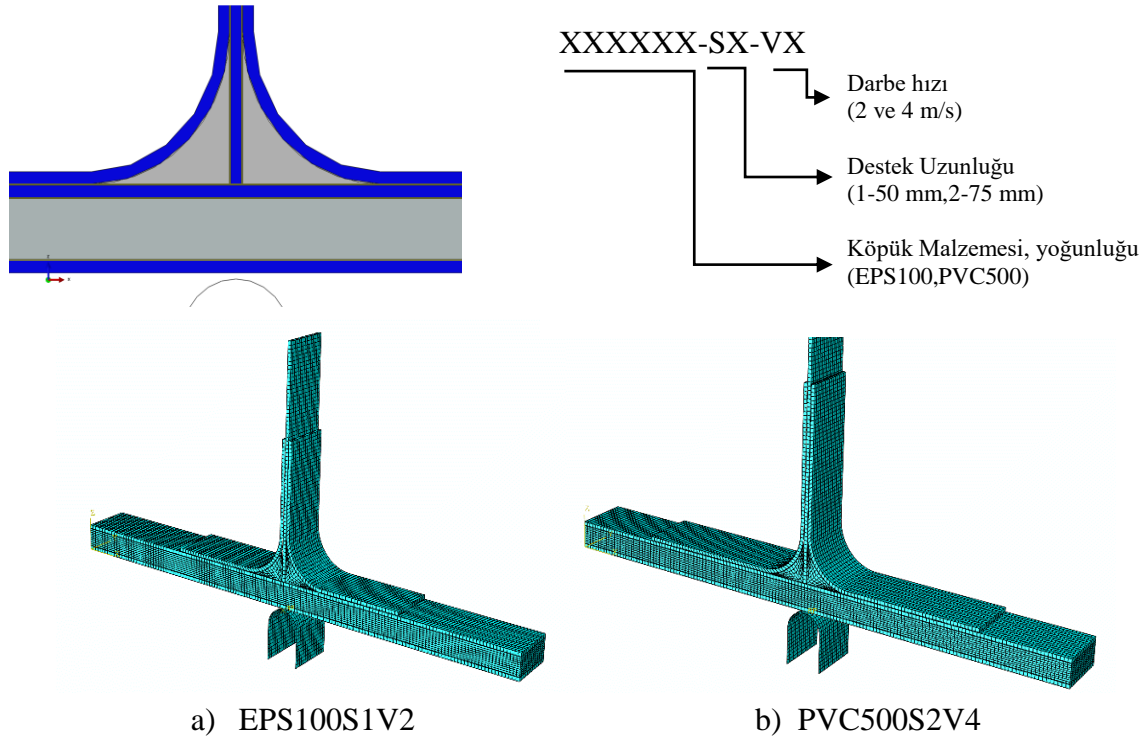
Analizler Abaqus[®] sonlu elemanlar metodu paket yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Malzemeler elastik-plastik malzeme modeline uygun bir şekilde modellenmiştir. Bunun için her bir malzeme ASTM standartlarına uygun bir şekilde çekme ve basma testine maruz tutulmuş ve analizlerde bu sonuçlar kullanılmıştır. Şekil 3 de bu malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri gösterilmiş, Tablo 1’de ise bu malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir [5,6]. Köpük malzemesi için CRUSHABLE FOAM malzeme modeli kullanılmıştır. Yapının oluşturulmasında başlıca faktör olan yapıştırıcı malzemesi ise, ayrılmaları ve hasarı incelenebilmesi için kırılma mekaniği temelli COHESIVE ZONE MODEL kullanılmıştır. Tablo 2’de bu model için gerekli olan mekanik özellikler verilmiştir [3]. Metal plakalarda ve köpük malzemesinde eleman tipi olarak 8 düğüm noktalı katı (solid) elemanlar kullanılmıştır. Yapıştırıcı malzemesi ise malzeme modeline uygun olarak özel formülasyonu olan kohezif (cohesive) elemanlar kullanılarak modellenmiştir.

Darbe analizleri için vurucu, t bağlantı geometrisine uygun olarak silindirik uçlu ve rijit olarak modellenmiştir. Vurucu kütlesi sabit ve 5.302 kg’dır ve vurucu hızının değiştiği (2 ve 4 m/s) iki farklı darbe enerjisinde (10.6 J ve 42.4 J) yapılmıştır. Yapılan ön analizlerde darbe süresinin 20 ms ‘yi geçmediği görülmüş ve bu süre dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Analizlerde bir diğer önemli nokta ise temas algoritmasıdır. Vurucu ile T 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. Analiz sonuçlarına etki edecek bir diğer faktör ise sınır şartlarıdır. Yapı araştırıldığında çalışma şartlarına uygun olacak sınır şartları oluşturulmuştur.



Şekil 3. T bağlantıda kullanılan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri

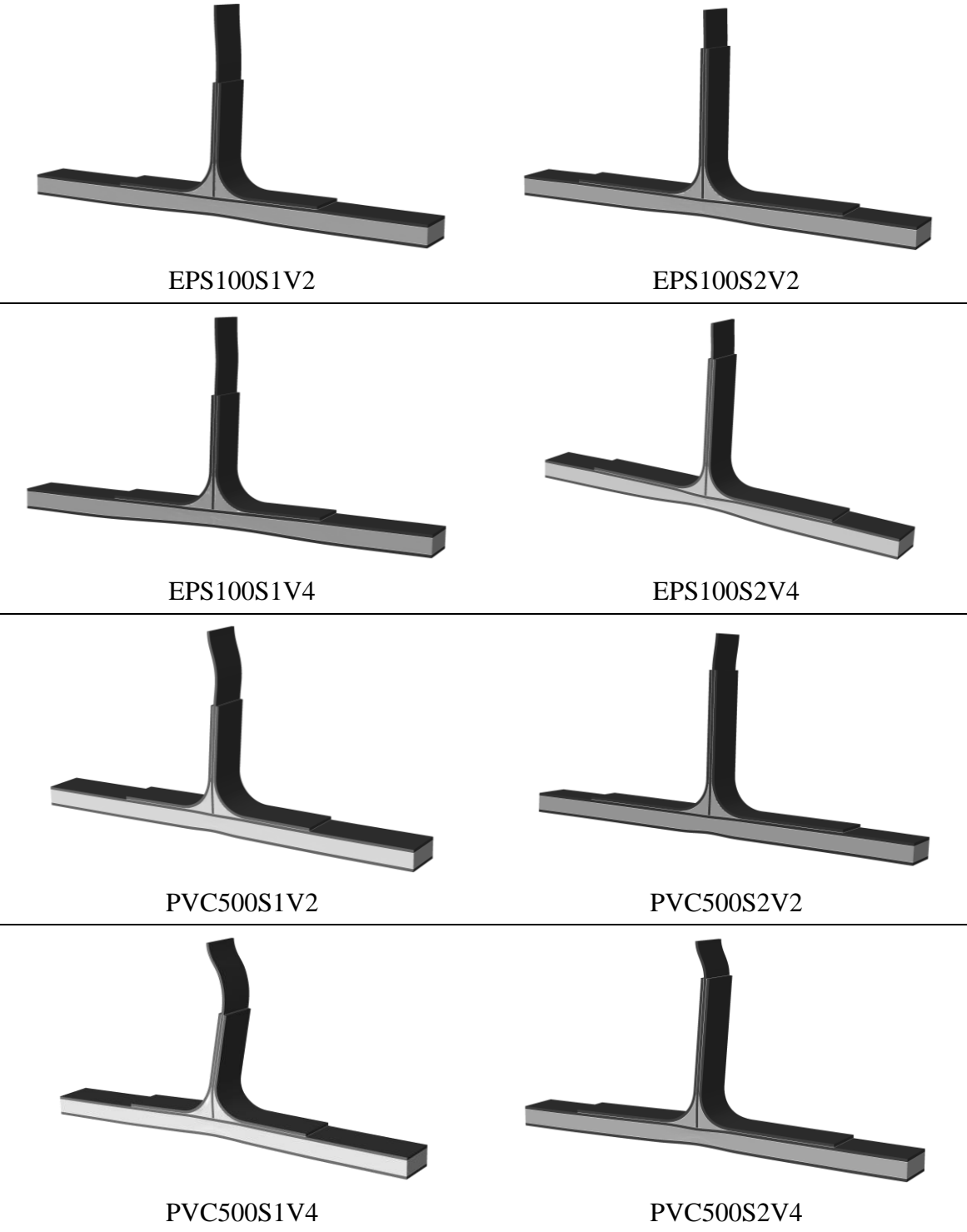
Analizler destekleyici plakaların farklı iki geometrisi dikkate alınarak ve değişen iki farklı yoğunluğa sahip yumuşak ve sert köpük malzemelerinin darbe davranışına etkisi araştırılarak yapılmıştır. Enerji sönmleme kabiliyeti oldukça yüksek olan köpük malzemeleri T bağlantının darbe yükünün geldiği tarafa konumlandırılarak, yapının zarar görmeden darbeyi sönmleyebilmesi amaçlanmıştır. T bağlantının uzunluğu 300 mm, genişliği 30 mm ve yüksekliği ise 140 mm ' dir. Alüminyum plakalar 2 mm kalınlığına sahipken, köpük kalınlığı 10 mm ve yapıştırıcı kalınlığı ise yaklaşık 0.2 mm' dir. Destekleyici plakaların boyları ise 50 ve 75 mm olarak değişmektedir. Şekil 5 de aynı malzeme türü aynı renk olacak şekilde model ve T bağlantının sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir. Numuneleri yorumlayabilmek ve ayırt edebilmek için kodlama tekniği kullanılmıştır. Köpük malzemesinin ismi, yoğunluk, destekleyici plakaların (stiffer) çeşidi ve darbe hızı bu kodlama içerisinde yer almaktadır (Şekil 5). Sonlu elemanlar modeli ve oluşturulan eleman ağı yapısı da Şekil 5 de gösterilmektedir.



Şekil 5. T tipi bağlantının sonlu elemanlar modeli ve numune ismi kodlaması

Analiz sonuçları ve deformasyon görüntüleri sıralı bir şekilde Şekil 6 da gösterilmektedir. Düşük yoğunluklu ve 1. çeşit destek plakasına sahip yapı (EPS100S1V2) 2 m/s darbe hızı için 2. çeşit destek plakalı yapıya göre daha fazla burkulmuştur. Destekleyici plaka boyunun daha uzun olması (2. çeşit) yapıyı daha rijit hale getirmiştir. Darbe hızı arttığında bu durum daha belirgin olarak görülmektedir. Darbe hızının artmasıyla 1. çeşit destekleyici yapı için (EPS100S1V4) yapıya etkileyen darbe enerjisinin büyük bir kısmı t bağlantının dikey kısmı tarafından alınmış ve burkulmaya harcanmıştır. 2. çeşit plakaya sahip yapıda ise (EPS100S2V4) köpük malzemesi daha fazla sıkışmıştır ve sandviç yapının metal plakaları daha fazla plastik deformasyona maruz kalmıştır. Bu durumun temel nedeni destek plakalarının boyunun daha uzun olması ve bu durumun burkulmayı önlemesidir. Yüksek yoğunluklu köpük malzemesine sahip (PVC500S1V2) sandviç t bağlantılara bakıldığında ise destek plakası etkisi aynı sonuçları vermiştir. Destek plakası daha uzun olan yapılarda (PVC500S2V2) daha az burkulma meydana gelmiş fakat daha fazla köpük sıkışması oluşmuştur. Yüksek yoğunluklu bağlantıdaki köpük sıkışması düşük yoğunluklu bağlantıdaki gibi bariz bir şekilde görülmemektedir. Bunun nedeni, yüksek yoğunluğun sıkışma oranını etkilemesidir. Yoğunluk etkisi araştırıldığında ise,

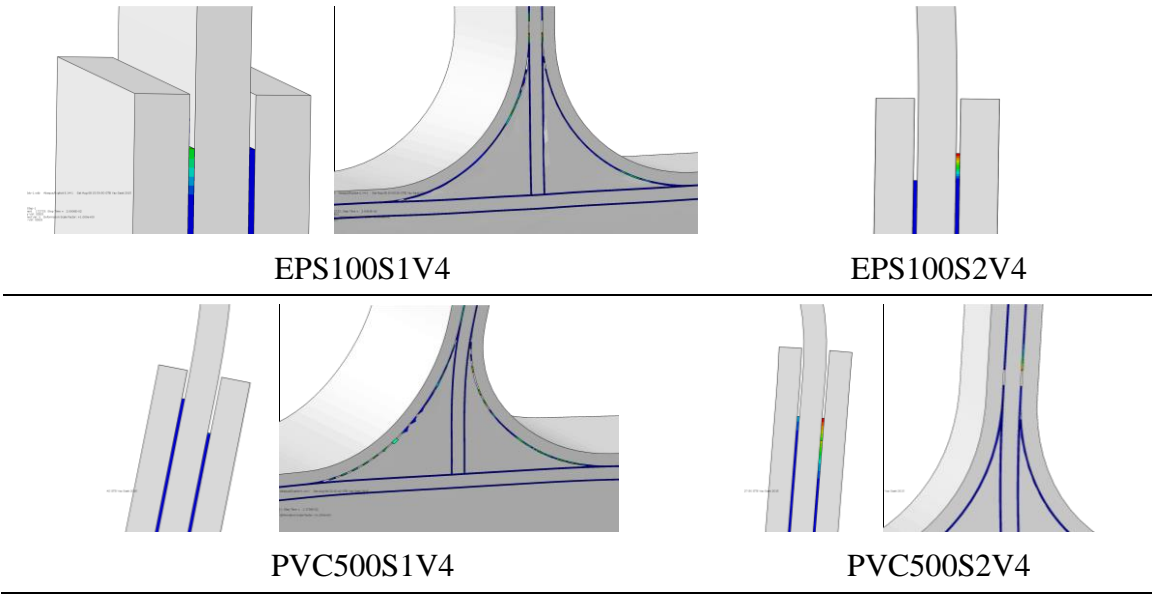
yüksek yoğunluklu köpük daha sert bir yapıya sahip olduğu için t bağlantılarda burkulma daha fazla görülmektedir. Yoğunluğun artması yapıyı rijitleştirmiştir. T bağlantının kullanım yerlerine göre yüksek darbe enerjisine maruz kalan yapılarda yüksek deformasyonlar gözükmemektedir. Yapıya etki eden darbe enerjisi başarılı bir şekilde sönmülmüştür. Yapının oluşturulmasının temel amacı gelen darbe enerjisini başarılı bir şekilde sönmülebilmektir.



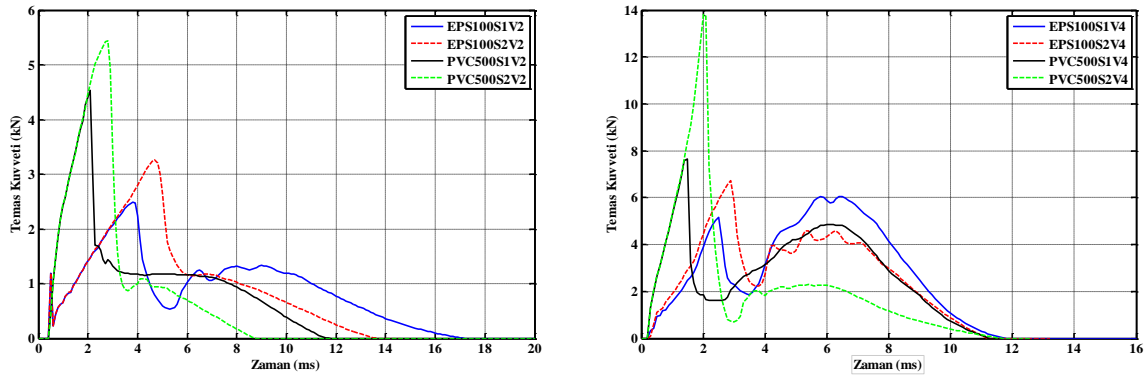
Şekil 6. Sandviç T Tipi bağlantıların deformasyon görüntüleri

Şekil 7 de ise kohezif bölge metodu ile modellenen yapıştırıcı tabakasında meydana gelen hasarlar gösterilmektedir. 2 m/s darbe hızına maruz yapılarda herhangi bir hasar ve

ayrılma oluşmamaktadır. 4 m/s darbe hızına maruz yapılarda ise T bağlantının sandviç kısmıyla, dikey plakaların birleştirilme noktasında ve destek plakalarının başlangıç noktalarında ayrılmalar meydana gelmiştir. Ayrılmalara neden olan temel faktör burkulmaların meydana gelmesidir.



Şekil 7. Yapıltırıcı bölgesi hasara uğramış numuneler



a) $V=2$ m/s, $E=10.6$ J

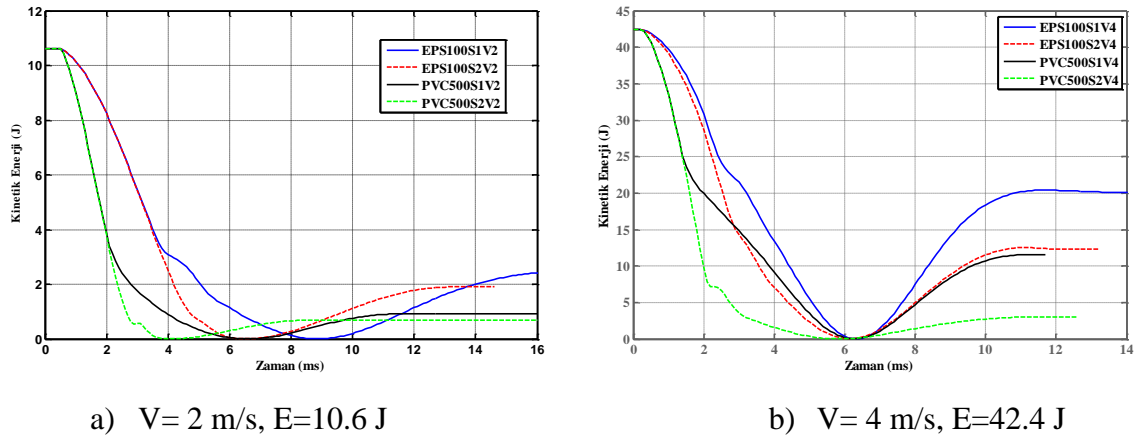
b) $V=4$ m/s, $E=42.4$ J

Şekil 8. Sandviç T tipi bağlantıların temas kuvveti-zaman grafikleri

Şekil 8'de T tipi bağlantıların temas kuvveti-zaman grafikleri gösterilmektedir. Düşük köpük yoğunluklu ve 1. tip destek plakasına sahip yapı (EPS100S1V2) 2 m/s darbe hızı için ($E=10.6$ J) 2.4925 kN en büyük temas kuvvetine sahipken, 2. tip destek plakasına sahip yapı ise (EPS100S2V2) 3.2610 kN en büyük temas kuvvetine sahiptir. Daha büyük yoğunluklu köpük malzemesine ve 1. tip destek plakasına sahip yapı 4.5266 kN, 2. tip destek plakasına sahip numune ise 5.4397 kN en büyük temas kuvvetine sahiptir. Temas sürelerine bakıldığında ise, en büyük temas süresi 17 ms olarak düşük yoğunluklu köpük malzemesi ve 1. tip destek plakasına sahip yapıda ortaya çıkmaktadır. 2. destek plakasına sahip yapıda ise 14.6 ms temas süresi oluşmaktadır. Yüksek yoğunluklu ve 1. tip destek plakasına sahip yapıda 11.8 ms temas süresi oluşurken 2. tip destek plakasına sahip numune ise 8.7 ms temas süresi oluşmuştur. En büyük temas kuvvetleri köpük yoğunluğu arttıkça artmaktadır. Destek plakası değişimi dikkate alındığında ise, 2. tip destek plakası daha uzun olduğu için yapıyı daha da rijit hale getirmiştir ve temas

kuvvetinin artmasına neden olmuştur. Temas süreleri ile temas kuvvetleri arasında da uyum olduğu gözükmemektedir. Temas kuvveti arttıkça temas süresinin azaldığı gözlemlenmektedir.

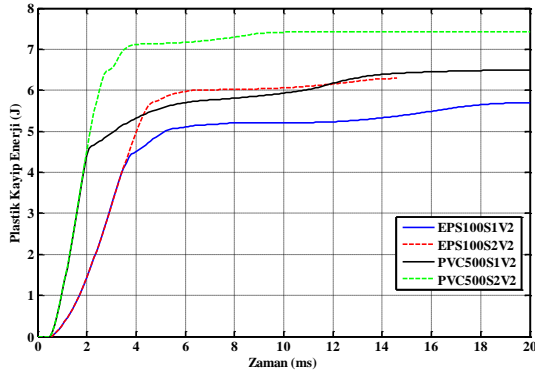
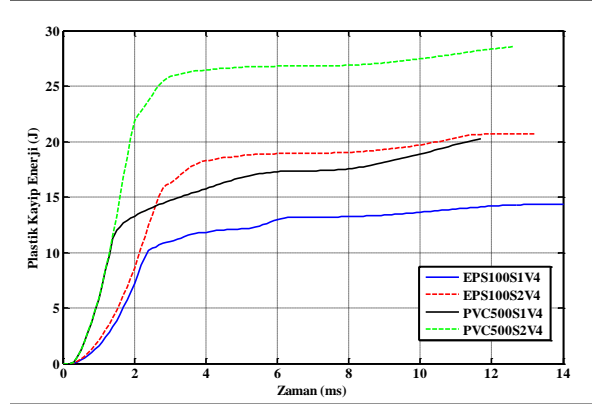
Darbe hızı 4 m/s olduğunda ise ($E=42.4$ J) düşük yoğunluklu ve 1. tip destek plakasına sahip yapıda 6.0514 kN en büyük temas kuvveti ve 11.8 ms temas süresi oluşturmaktadır. 2. tip destek plakasına sahip yapıda ise 6.7184 kN en büyük temas kuvveti ve aynı şekilde 11.8 ms temas süresi oluşturmaktadır. Yüksek yoğunluklu köpük malzemesi ve 1. tip destek plakasına sahip yapıda 7.6583 kN en büyük temas kuvveti verirken 2. tip destek plakasına sahip yapı ise 13.8109 kN en büyük temas kuvveti vermektedir. Temas süreleri ise aynı şekilde 11.8 ms olup değişmemektedir. Darbe hızı arttığında da köpük yoğunluğu değişimi darbe davranışını aynı şekilde etkilemiştir ve daha büyük temas kuvvetlerine neden olmaktadır. Fakat darbe hızının artması temas sürelerini değiştirmemiştir. Temas artık olabildiğince kısa sürede meydana gelmektedir.



Şekil 9. Sandviç T tipi bağlantıların kinetik enerji-zaman grafikleri

Şekil 9'da sandviç T tipi bağlantıların kinetik enerji-zaman grafikleri gözükmemektedir. Kinetik enerji grafikleri vurucu üzerinden alınmıştır. 2 m/s darbe hızı için sonuçlar incelendiğinde, ($E=10.6$ J) düşük yoğunluklu ve 1. tip destek plakasına sahip yapı yaklaşık olarak 8.2 J enerji sönümlerken 2. tip destek plakasına sahip yapı ise 8.7 J enerji sönümlenmiştir. Daha yüksek köpük yoğunluğuna ve 1. tip destek plakasına sahip yapı 9.7 J enerji sönümlerken 2. tip destek plakasına sahip yapı ise 10 J enerji sönümlenmiştir. Köpük yoğunluğunun artması enerji sönümleme kabiliyetini arttırmaktadır. Aynı zaman da daha uzun olan destek plakası tipi de enerji sönümleme kabiliyetini arttırmaktadır. Sönümlenen enerji hem elastik şekil değiştirmeye hemde plastik şekil değiştirmeye harcanan enerjidir.

Darbe hızı 4 m/s ($E=42.4$ J) olduğunda ise EPS100S1V4 isimli yapı 22.3 J enerji sönümlenmiştir. EPS100S2V4 isimli yapı ise 30.1 J enerji sönümlenmiştir. Daha yüksek yoğunluklu köpük malzemesine sahip yapılar ise PVC500S1V4 30.8 J enerji sönümlenmiştir. PVC500S2V4 isimli yapı ise 39.4 J enerji sönümlenmiştir. Darbe hızı arttığında yine köpük yoğunluğunun artışı enerji sönümleme kabiliyetini arttırmaktadır. Fakat köpük yoğunluğu düşük ve 2. tip destek plakasına sahip yapı ile köpük yoğunluğu yüksek ve 1. tip destek plakasına sahip yapı yaklaşık olarak aynı şekilde enerji sönümlenmiştir. Destek plakasının uzun olması yapıyı rijitleştirirken yüksek köpük yoğunluklu yapının sergilediği davranışa yaklaşmaktadır.

a) $V=2\text{ m/s}$, $E=10.6\text{ J}$ b) $V=4\text{ m/s}$, $E=42.4\text{ J}$

Şekil 10. Sandviç T tipi bağlantıların plastik kayıp enerjisi-zaman grafikleri

Şekil 10'da sandviç T tipi bağlantıların plastik kayıp enerjisi-zaman grafikleri gösterilmektedir. Darbe hızı 2 m/s ($E=10.6\text{ J}$) iken köpük yoğunluğu düşük olan ve 1. tip destek plakasına sahip yapıda (EPS100S1V2) 5.7 J enerji plastik şekil değiştirmeye harcanmıştır. Bu numunenin sönmülediği toplam enerji ise 8.19 J 'dür. 2.49 J enerji ise elastik şekil değiştirmeye harcanmıştır. 2. tip destek plakasına sahip numune de ise 6.29 J enerji plastik deformasyona harcanmıştır. Bu yapının sönmülediği toplam enerji 8.7 J, elastik şekil değiştirmeye harcanan enerji ise 2.41 J'dür. Yüksek yoğunluklu köpük malzemesine ve 1. tip destek plakasına sahip yapıda (PVC500S1V2) 6.5 J enerji plastik deformasyona harcanmıştır. Bu yapının sönmülediği toplam enerji 9.7 J iken elastik deformasyonlara harcanan enerji ise 3.2 J 'dür. 2. tip destek plakasına sahip yapıda (PVC500S2V2) 7.42 J enerji plastik şekil değiştirmeye harcanırken, numune toplam 10 J enerji sönmülemiştir ve 2.58 J enerji elastik deformasyonlara harcanmıştır. Köpük yoğunluğunun artması plastik deformasyonu arttırmıştır. Destek plakasının uzunluğu da plastik deformasyonu etkileyen önemli bir değişkendir. Yüksek köpük yoğunluklu yapının davranışı, düşük köpük yoğunluklu yapıda 2. tip destek plakası kullanılarak sağlanmıştır. Harcanan enerjilerin büyük bir kısmı plastik deformasyonlara harcanmıştır.

Darbe hızı 4 m/s ($E=42.4\text{ J}$) olduğunda ise düşük yoğunluklu ve 1. tip destek plakasına sahip yapıda 14.3 J enerji plastik deformasyona harcanmıştır. EPS100S1V4 isimli yapının sönmülediği toplam enerji 22.3 J olurken, 8 J enerji elastik deformasyonlara harcanmıştır. 2. tip destek plakasına sahip yapıda 20.7 J enerji plastik deformasyonlara harcanmıştır. Bu yapıda totalde 30.1 J enerji sönmülerken bunun 9.4 J enerjisi elastik olarak harcanmıştır. Köpük yoğunluğu arttırıldığında ve 1. Tip destek plakasına sahip yapıda (PVC500S1V4) plastik deformasyona harcanan enerji 20.26 J'dür. Bu yapının sönmülediği toplam enerji 30.87 J olurken elastik şekil değiştirmelere harcanan enerji ise 10.61 J'dür. 2. tip destek plakalı yapıda (PVC500S2V4) 28.5 J enerji plastik deformasyona harcanmıştır. Yapı toplam 39.38 J enerji sönmülerken bunun 10.88 J enerji elastik deformasyonlara harcanmıştır. Darbe hızı arttığında ise yine destek plakasının uzaması köpük yoğunluğu artışı ile aynı etkiyi yaratmıştır. Köpük yoğunluğunun artması daha fazla plastik deformasyona sebebiyet vermiştir.

SONUÇLAR

Sandviç T bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları; farklı destek plaka boyları için, sandviç yapıyı oluşturan köpük malzemesinin farklı yoğunlukları ve farklı darbe hızları için araştırılmıştır. Destek plakasının boyunun uzaması yapıyı daha fazla rijit hale getirirken, destek plakasının boyunun kısa olması burkulma deformasyonunun artmasına izin vermiştir. Köpük yoğunluğunun artması ile birlikte yapı daha da rijit hale gelmiştir. Yapının rijit olması ile birlikte en büyük temas kuvvetleri uzun destek plakalı ve yüksek köpük yoğunluklu yapılarda ortaya çıkmıştır. Destek boyu plakası kısa (1. tip) olan yapı burkulabildiği için temas kuvvetleri daha düşük çıkmıştır. Temas süreleri rijitliğin artması ile azalmıştır. Artan darbe hızı, temas kuvvetlerini arttırırken temas süreleri bu hızlarda sabit kalmıştır. Köpük yoğunluğunun artması yapının enerji sönümleme kabiliyetini arttırmıştır. Destek plakasının uzaması da aynı şekilde enerji sönümleme kabiliyetini arttırmıştır. Yapıya etkiyen çarpma enerjisinin büyük bir kısmının plastik deformasyonlara harcadığı görülmektedir. Ancak uzun destek plakalı ve düşük köpük yoğunluklu numune ile yüksek köpük yoğunluklu ve kısa destek plakalı numune hemen hemen aynı miktarda enerji sönümlemiş ve aynı deformasyonları göstermiştir. Destek plakasının boyunun uzaması köpük yoğunluğu etkisini karşılamıştır.

Kaynaklar:

- [1] Z.G. Apalak, *Yapıştırıcı ile birleştirilmiş T-tipi bağlantıların sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz ve tasarımı*, Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1995.
- [2] Definition of Terms Relating to Adhesive,. ASTM, 1974.
- [3] Campilho, R., Banea, M., Neto, J., and da Silva, L.. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 44:48 – 56, 2013
- [4] Mollon, V., Bonhomme, J., Elmarakbi, A., Argüelles, A., and Vina, J., Finite element modelling of mode I delamination specimens by means of implicit and explicit solvers, *Polymer Testing*, 31(3):404 – 410, 2012.
- [5] Ozturk, U.E. and Anlas, G., Finite element analysis of expanded polystyrene foam under multiple compressive loading and unloading, *Materials & Design*, 32(2):773-780, 2011.
- [6] Shah, Q.H. and Topa, A., 2014. Modeling large deformation and failure of expanded polystyrene crushable foam using LS-DYNA, *Modelling and Simulation in Engineering*, 2014.