

PAPER DETAILS

TITLE: Yapistirma ile Olusturulmus Al-Çe Katmanli Saclarin Dizilime Bagli Olarak Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

AUTHORS: Cengiz Görkem DENGİZ,Kemal YILDIZLI

PAGES: 114-134

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2675853>

Yapıştırma ile Oluşturulmuş Al-Çe Katmanlı Sacların Dizilime Bağlı Olarak Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Cengiz Görkem DENGİZ^{1*} , Kemal YILDIZLI² 

Öz

Katmanlı saclar iki veya daha fazla metalin farklı yöntemler ile birleştirilmesi ile oluşturulan kompozit yapılardır. Sac metaller haddeme yöntemi ile üretildikleri için yöne bağlı olarak farklı mekanik özellikler gösterebilirler. Dolayısı ile bu sacların birleştirilmesi ile oluşturulan katmanlı sacların da dizilim yönlerine göre farklı özellik göstermesi beklenir. Bu çalışma kapsamında alüminyum ile çelik sacların birleştirilmesi ile oluşturulmuş katmanlı sacların mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada öncelikle tekil ve katmanlı sacların mekanik özellikleri çekme testi ile belirlenmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen akma gerilmesi, kopma dayanımı, uzama miktarı, pekleşme üsteli gibi farklı parametreler karşılaştırılmıştır. Ayrıca sacların anizotropi katsayıları belirlenerek derin çekme işlemlerinde oluşabilecek olan kulaklanma durumu hakkında yorum yapılmıştır. Çalışma sonucunda katmanlı sacların mekanik özelliklerinin kendisi oluşturan sacların mekanik özelliklerinin arasında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca alüminyum sac üzerine hadde yönüne göre farklı dik, paralel ve diagonal şekilde çelik sac yapıştırılarak anizotropik özelliklerin minimize edilebileceği belirlenmiştir. Dolayısı ile derin çekme gibi sac metal şekillendirme işlemlerinde daha kısa kulak yükseklikleri elde etmek mümkün olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı sac, anizotropi, kulaklanma, derin çekme

Change of Mechanical Properties of Al-St Layered Sheets Formed by Adhesion Depending on Sheet Arrangement

Abstract

Layered sheets are composite structures that combine two or more metals with different methods. Since sheet metals are produced by the rolling method, they can show different mechanical properties depending on the direction. Therefore, it is expected that the layered sheets formed by combining them will show different properties according to their arrangement directions. In this study, the mechanical properties of laminated sheets formed by combining aluminum and steel sheets were investigated. The mechanical properties of single and layered sheets were determined by the tensile test. Different parameters such as yield stress, tensile strength, elongation, and hardening exponent were compared as a result of the tensile test. In addition, anisotropy coefficients of the sheets were determined, and comments were made about the earing situation that may occur in deep drawing processes. As a result of the study, it was determined that the mechanical properties of the layered sheets are between the mechanical properties of the sheets that form them. In addition, it has been determined that anisotropic properties can be minimized by bonding steel sheets in different alignments on the aluminium sheet according to the rolling direction. Therefore, obtaining shorter ear heights in sheet metal forming processes such as deep drawing will be possible.

Keywords: Layered sheet, anisotropy, earing, deep drawing.

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, gorkem.dengiz@omu.edu.tr

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, kyildizli@omu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-1308-3223>

²<https://orcid.org/0000-0001-9532-2560>

1. Giriş

Katmanlı sac, iki veya daha fazla aynı veya farklı metal sacların soğuk haddeleme, basınç kaynağı, sıcak haddeleme veya yapıştırıcı ile yapıştırma gibi çeşitli yöntemler ile üretilmektedir. Bu saclar, tek metal ile sağlanamayacak özellikleri sağlayabilmek amacıyla tercih edilmektedir. Geliştirilen çift katman metalik saclar ile istenilen elektriksel ve termal karakteristik, hafiflik, korozyon dayanımı ve şok emici yapı sağlanabilmektedir. Çok katmanlı sac uygulamalarının temel amacı, farklı metallerin üstün özelliklerini birleştirmek ve şekillendirilebilirliği düşük olan sacın şekil alma kabiliyetini yükseltmektir.

Katmanlı sacların mekanik özellikleri sac metal şekillendirme işlemlerinde elde edilecek sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple literatürde pek çok araştırmacı katmanlı saclar ile farklı çalışmalar yapmış ve elde ettikleri sonuçları mekanik özellikleri dikkate alarak değerlendirmişlerdir. Fereshteh-Saniee ve ark. (2008), çift katmanlı levhaların derin çekme prosesinde sürtünme koşulları ve tabaka temas koşullarının etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca, hasar oluşabilecek bölgeyi öngörmek için gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarını kullanmışlardır. Aghchai ve ark. (2013) malzemelerin mekanik özelliklerinin Al 3004/St 12 çift katmanlı sacın şekillendirilebilirliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Maleki ve ark. (2013), analitik, sayısal ve deneysel yaklaşımları kullanarak alüminyum/çelik çift katmanlı sacların haddeleme işleminde yapışma mukavemetini ve kalınlık azalmasını incelemiştir. Yapışma mukavemetinin ve kritik kalınlık azalmasının, katmanların akma dayanımından ve başlangıç kalınlığından önemli ölçüde etkilenebileceğini bildirmişlerdir. Kagzi ve ark. (2016), çift katmanlı sacların geri esneme durumlarını pekleşme ve kalınlıktaki değişimleri dikkate alarak analitik olarak modellemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda araştırmacılar düşük büküm açılarında geri esneme değerlerinin sabit kaldığını göstermişlerdir. Ayrıca yüksek mukavemetli çeliklerin sahip olduğu yüksek geri esneme değerlerinin, ince ve düşük mukavemetli bir sac ile çift katmanlı yapı oluşturularak azaltılabileceğini göstermişlerdir. Uscinowicz (2019), Al/Cu çift katmanlı sacların elastoplastik özelliklerinin hadde yönüne göre değişimini incelemiştir. Çalışmada Al ve Cu saclar soğuk haddeleme yöntemi ile birleştirilmiştir. Farklı kalınlıklarda bakır sac kullanarak farklı kalınlıkta çift katmanlı sac elde edilmiştir. Çalışma sonucunda farklı oranlarda oluşturulmuş çift katmanlı sacların elastoplastik özellikleri hadde yönüne göre yüksek oranda değişiklik gösterdiği ortaya konulmuştur. Ayrıca kompozit malzemeler için geçerli olan karışım kuralının bu malzeme için elastik sabitleri hesaplarken doğru sonuç vermediği gösterilmiştir. Zahedi ve ark. (2019), patlamalı kaynak ile birleştirilmiş Al/Cu çift katmanlı sacların hasar ve boyun verme şekil değiştirmelerini iki farklı dizilimde araştırmışlardır. Oluşturdukları saclara çekme testi ve düzlem dışı gerdirme testi yapmışlardır. Çalışmalarını sonlu elemanlar yöntemi ile destekleyerek sac üzerinde oluşacak olan hasarları doğru bir şekilde tahmin

etmişlerdir. Satheeshkumar ve Narayanan (2014), çelik iki katlı sacların şekillendirilebilirliği için yapışma özelliklerinin önemini araştırmışlardır. Deneysel çekme testlerine dayanarak, sertleştiricinin reçineye oranının artırılmasıyla şekillendirilebilirliğin arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, yapıştırıcı ile oluşturulmuş katmanlı sacların, yapıştırıcı kullanılmayan katmanlı saclar veya tek bir saca göre daha iyi boyuna uzama gösterebileceğini belirtmişlerdir. Kim ve ark. (2003), haddeleme ile yapıştırılmış Al/PP/Al (HYLITE®) malzemenin mekanik davranışını belirlemişler ve akış sınır eğrisi ile akma fonksiyonunu hesaplamışlardır. Çalışmalarında sandviç panelin yüksek şekil değiştirme oranı hassasiyetinin olumlu etkisinin, düşük pekleşme üstelinin olumsuz etkisi tarafından nötrlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca sandviç panellerin yüksek şekil alma kabiliyetinin temel nedeninin daha kalın olmalarından kaynaklandığını da ortaya koymuşlardır.

Bu çalışma kapsamında alüminyum ve çelik sacların yapıştırıcı ile birleştirilmesi sonucu oluşan çift katmanlı yapının mekanik özellikleri incelenmiştir. Sacların hadde yönüne göre farklı yönlerde dizilmesi ile oluşturulmuş yeni katmanlı saclara çekme testi yapılarak akma, kopma gerilmesi gibi özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca tekil ve çift katmanlı sacların anizotropi katsayıları belirlenerek derin çekme işlemlerinde oluşabilecek kulaklanma durumu açısından değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Katmanlı Sac Bileşenleri

Çalışma kapsamında 0.5 mm kalınlığında DC01 çelik sac, yapıştırma yöntemiyle 1 mm kalınlığında EN AW 5754 alüminyum sac ile birleştirilerek çift katmanlı sac oluşturulmuştur. DC01 çelik sacı şekil alma kabiliyeti yüksek ancak korozyon direnci düşük olup; buzdolabı ve çamaşır makinesi gibi ev eşyalarından, otomotiv sanayine, büro malzemeleri ve aydınlatma ekipmanlarından galvaniz kaplama ürünlerine kadar pek çok yerde kullanılmaktadır. Alüminyum sac ise korozyon dayanımı yüksek, kaynak kabiliyeti iyi, özellikle endüstriyel atmosfere ve deniz suyuna karşı dayanımı yüksektir. Ayrıca yorulma dayanımı yüksek olup, soğuk şekillendirme ve kaplama için uygun bir malzemedir. Çalışmada kullanılan sac metallere ait kimyasal içerikler Tablo 1’de verilmiştir. Sacların kimyasal kompozisyonları Samsun Uluslararası Akredite Metal Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarında (SAMLAB) Spectrolab marka M12 Hibrit model metal analiz cihazında belirlenmiştir.

Tablo 1. Çelik ve alüminyum sacın kimyasal içerikleri

Malzeme	%C	%Si	%Mn	%P	%Cr	%Ni	%Cu	%Mg	%Ti	%Zn	%V	%Al	%Fe
DC01	0,062	0,017	0,246	0,017	0,039	0,052	0,057	-	-	-	-	0,041	99,46
EN AW 5754	-	0,33	0,2	-	0,05	0,012	0,07	2,7	0,02	0,06	0,017	96,17	0,37

Çelik ve alüminyum sac metallerin yapıştırılmasında poliüretan bazlı Polymex 3002 reçine kullanılmıştır. Reçineye ait firmanın sunmuş olduğu özellikler Tablo 2’de verilmiştir. Yapıştırıcı değişik koşullarda ve farklı sıcaklıklarda kullanılabilir. Elektrik direnci ve dielektrik katsayısı yüksektir. Korozyon (asit vb.) maddelere karşı dayanıklıdır. Düşük sıcaklıklarda önemli bir hacim değişikliği göstermeden sertleşmektedir. Katalizörler sayesinde kurlenme süresi kısaltılabilmektedir. Bu yapıştırıcının seçilmesindeki başlıca sebep kurlenme süresinin ayarlanabilmesidir. Ayrıca katalizör sayesinde iki sac arasında hava ile temas olmasa dahi yapıştırıcı kuruyabilmektedir. Diğer taraftan Polymex 3002 ile yapılan denemelerde sertleşme sonrası hava ile temas eden numunelerin gevrekleştiği görülürken sacın arasında kalan yapıştırıcının sünekliliğini koruduğu tespit edilmiştir. Bu durum çift katmanlı saclar için önemli bir avantajdır.

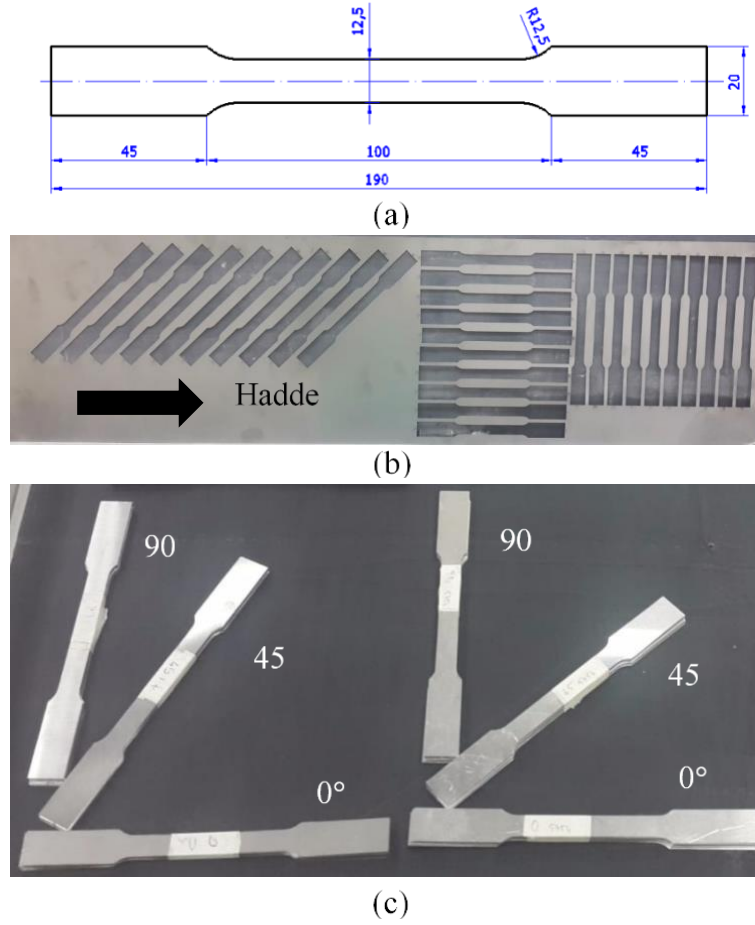
Tablo 2. Polymex 3002 yapıştırıcının teknik özellikleri (Polymex, 2020)

Özellik	Değer
Yapıştırıcının yoğunluğu	1,43 g/cm ³
Sertleştiricinin yoğunluğu	1,22 g/cm ³
Sıcaklık dayanımı	-45 / +280 °C
Shore sertlik	90-95
Dielektrik katsayısı	3,5 F/m
Uygulama sıcaklığı	5-35 °C

Katmanlı saclar oluşturulurken sac yüzeyleri kir ve pastan temizlenmesi için zımparalanmış ve alkol ile silinmiştir. Temizlenen sacların bir yüzeyine yapıştırıcı uygulanarak çelik ve alüminyum saclar birleştirilmiş ve kurlenmeye bırakılmıştır. Hazırlanan çift katmanlı saclar yapıştırıcının kuruması için 24 saat bekletilmiştir.

2.2. Sac Metallerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Sac metallerin uzama, akma dayanımı, kopma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan DC01 ve EN AW 5754 H111 kalite saclar ASTM E8 (2013) standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Standart numune ölçüleri Şekil 1a’da verilmiştir. Numuneler hadde yönü ile paralel (0°), diagonal (45°) ve dik (90°) olacak şekilde lazer ile koruyucu gaz altında kesilmiştir (Şekil 1b). Kesilen numuneler Şekil 1c’de görülmektedir.



Şekil 1. Çekme testi numuneleri (a) ASTM E8 standart numune ölçüleri (b) Numunelerin çıkartıldığı sac (c) Lazer ışını ile kesilmiş çekme numuneleri

Tek eksenli çekme deneyleri, Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezinde (KİTAM) bulunan Instron Marka 5982 Model 100 kN yükleme kapasiteli 0.01 N hassasiyetli çekme cihazında 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme hızı deney standardında (ASTM-E8/E8M-15a, 2015) belirtildiği üzere 10 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Deneyler esnasında şekil değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla numuneye ölçü boyu 50 mm olan ekstansometre bağlanarak gerilme ve şekil değiştirme (σ - ϵ) verileri alınmıştır.

2.2.1. Pekleşme üstelinin belirlenmesi

Malzemelerin pekleşme üsteli Holloman (1) eşitliğine göre hesaplanmıştır. Bu eşitlikte K mukavemet katsayısı, n ise pekleşme üstelini ifade etmektedir.

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad (1)$$

Hollomon eşitliğindeki K ve n katsayıları hesaplanırken gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme değerlerinin logaritması alınarak grafikleri çizdirilmiştir. Plastik bölgeye $y=ax+b$ doğru denklemi uydurulur. Bu doğru denklemi $\log(\sigma)=n \log(\varepsilon) + \log(K)$ ile benzerdir. Burada doğrunun eğimi (a) pekleşme üstelini (n) vermektedir. $\varepsilon=1$ veya $\log(\varepsilon)=0$ olduğunda buna karşılık gelen gerçek gerilme değeri mukavemet katsayısını (K) vermektedir.

2.2.2. Anizotropi katsayısının hesaplanması

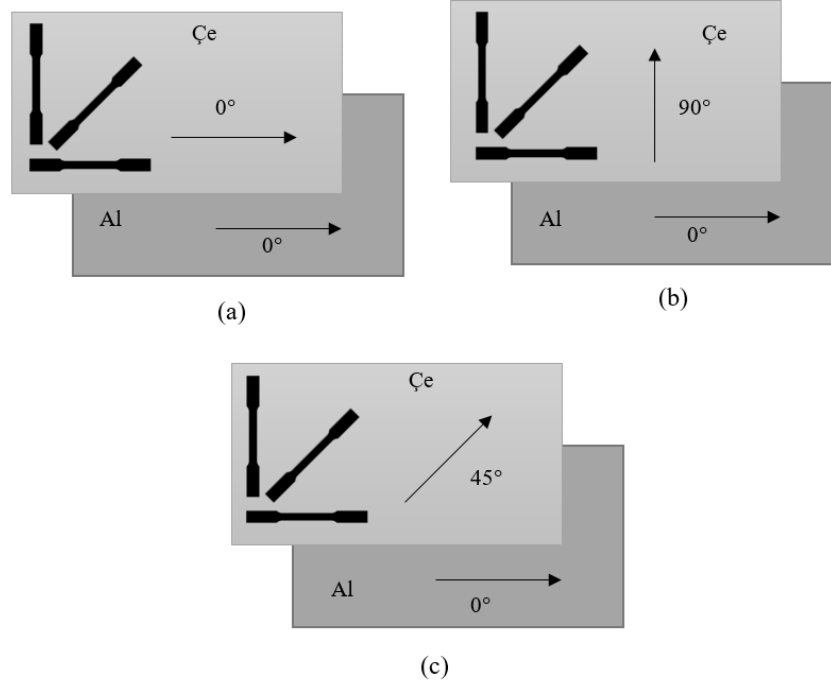
Anizotropi katsayılarını belirlemek için sac metalden hadde yönünde, hadde yönüne dik ve hadde yönü ile 45° açı yapan çekme numuneleri hazırlanarak çekme testine tabi tutulmuştur. Yükleme yönüne bağlı olarak değişiklik gösteren anizotropi durumu R değeri ile ifade edilmektedir. Bu değer genişlikteki (w) şekil değişiminin (ε_w), kalınlıktaki (t) şekil değişimine (ε_t) oranıdır. Kalınlık ölçümünün hassas olarak yapılamadığı durumlarda anizotropi katsayısı sabit hacim varsayımı ile uzunluk (l) ve genişlik (w) ölçümlerinden (2) denklemindeki gibi hesaplanabilmektedir (ASTM-E517-00, 2011). Burada 0 alt indisi ile ilgili geometrik boyutun ilk ölçüsü simgelenmektedir.

$$R = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 l_0}{w l}\right)} \quad (2)$$

Anizotropi katsayısını belirlemek için yapılan uzunluk ve genişlik ölçümleri genellikle belirli bir şekil değiştirme değerinde yapılır. Çekme testi ile maksimum uzama değeri belirlenen parça, yeni bir çekme testi yapılarak maksimum kopma dayanımının olduğu şekil değiştirme değerinden daha düşük bir değere kadar çekilerek test sonlandırılır (ASTM-E517-00, 2011). Bu çalışmada numuneler %15 uzama değerine kadar çekilerek anizotropi katsayıları hesaplanmıştır.

2.2.3. Katmanlı sacların yapıştırma doğrultuları

Sacın üzerinde hadde yönleri oklar ile gösterilmiştir. Bu dizilimlere bakıldığında yapıştırma işlemi ile 3 farklı sac elde edilmiş gibi düşünülebilir. Şekil 2a'da iki sac hadde yönleri paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 9b'de birbirine dik olacak şekilde, Şekil 2c'de ise bir sac diğerine göre 45° döndürülerek yapıştırılmıştır. Katmanlı sacların yeni ve farklı birer sac olduğu düşünülerek bu 3 sacdan 0° , 45° ve 90° lik doğrultularda üçer adet numune çıkarılmıştır. Çıkarılan numunelerin tek sacların dizilimleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Hadde yönüne göre farklı şekillerde dizilmiş saclar (a) 0°-0° (b) 0°-90° (c) 0°-45°

Tablo 3. Çift katmanlı saclardan kesilen çekme numunelerinin sac dizilimleri

	(a)	(b)	(c)
0°	0°-0°	0°-90°	0°-45°
45°	45°-45°	45°-45°	45°-0°
90°	90°-90°	90°-0°	90°-45°

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Tekil Sacların Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramları

Çalışma kapsamında yapılan çekme deneyleri sonucunda kopan numuneler Şekil 3'te verilmiştir. Numunelerin tümü boyun vererek sünek kırılma göstermiş ve yükleme yönü ile 45° açı yapacak şekilde kopmuşlardır.



(a)

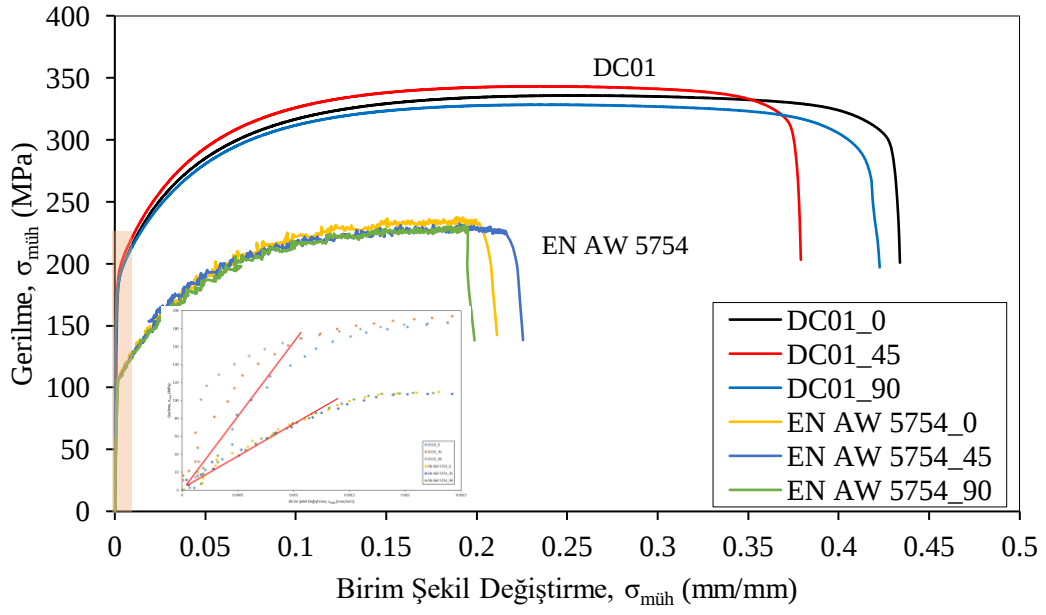


(b)

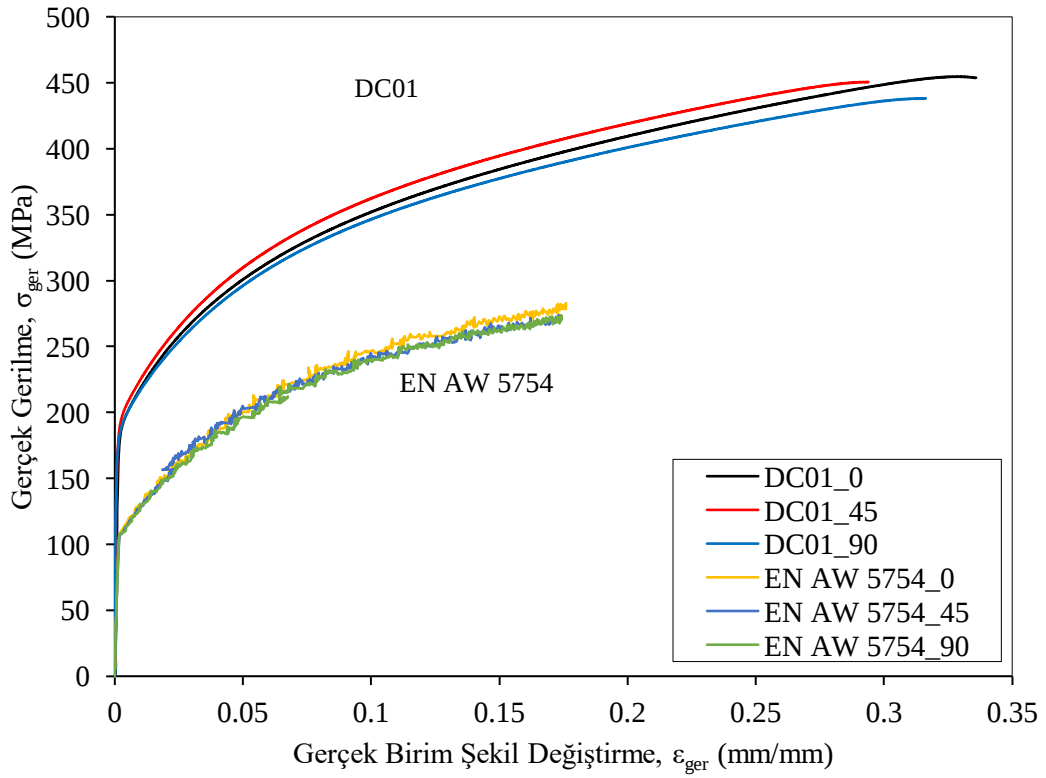
Şekil 3. Çekme testinde kopan numuneler (a) Düşük karbonlu çelik sac (DC01) (b) Al-Mg alaşımı sac (EN AW 5754)

Tek saclara yapılan çekme testleri sonucu gerilme – şekil değiştirme eğrileri Şekil 4a’da verilmiştir. Çekme testi yapılan malzemelerin tümünde belirgin bir akma sınırı gözlenmemiştir. Çekme eğrilerinin elastik bölgeleri yakınlştırıldığında lineer bölge açıkça görölmektedir. Malzemelerin belirgin akma göstermediğinden dolayı %0,2’lik uzamaya ($\epsilon = 0,002$) karşılık gelen çekme gerilmesi değeri akma dayanımı olarak alınmıştır (Off-set kuralı). Çekme testleri sonucunda DC01 çelik sacın ortalama %40,6 uzama gösterdiği görölürken EN AW 6764 alüminyum sacın ortalama %20,4 uzadığı görölmektedir. Çelik sacın ortalama akma dayanımı 204 MPa değerlerinde iken alüminyum sacın akma dayanımı 120 MPa değerlerindedir. Çekme dayanımları karşılaştırıldığında ise çelik sacın ortalama 335,9 MPa’a çıktığı görölürken, alüminyum alaşımı sacın 237,5 MPa’a dayandığı görölmektedir.

(a) Mühendislik eğrileri



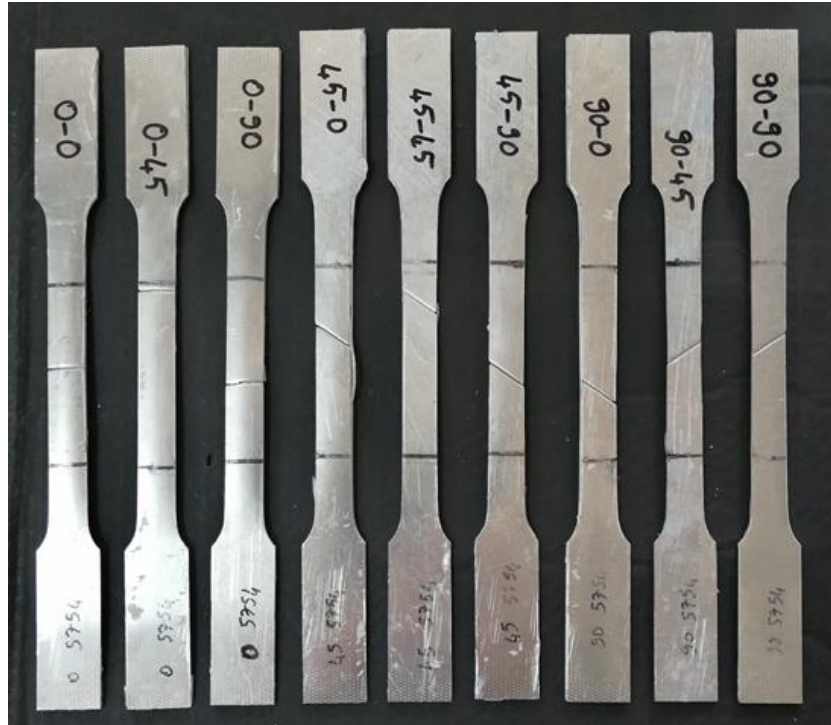
(b) Gerçek eğriler



Şekil 4. Çalışmada kullanılan sac metallere ait mühendislik (a) ve gerçek (b) çekme eğrileri

3.2. Çift Katmanlı Sacların Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramları

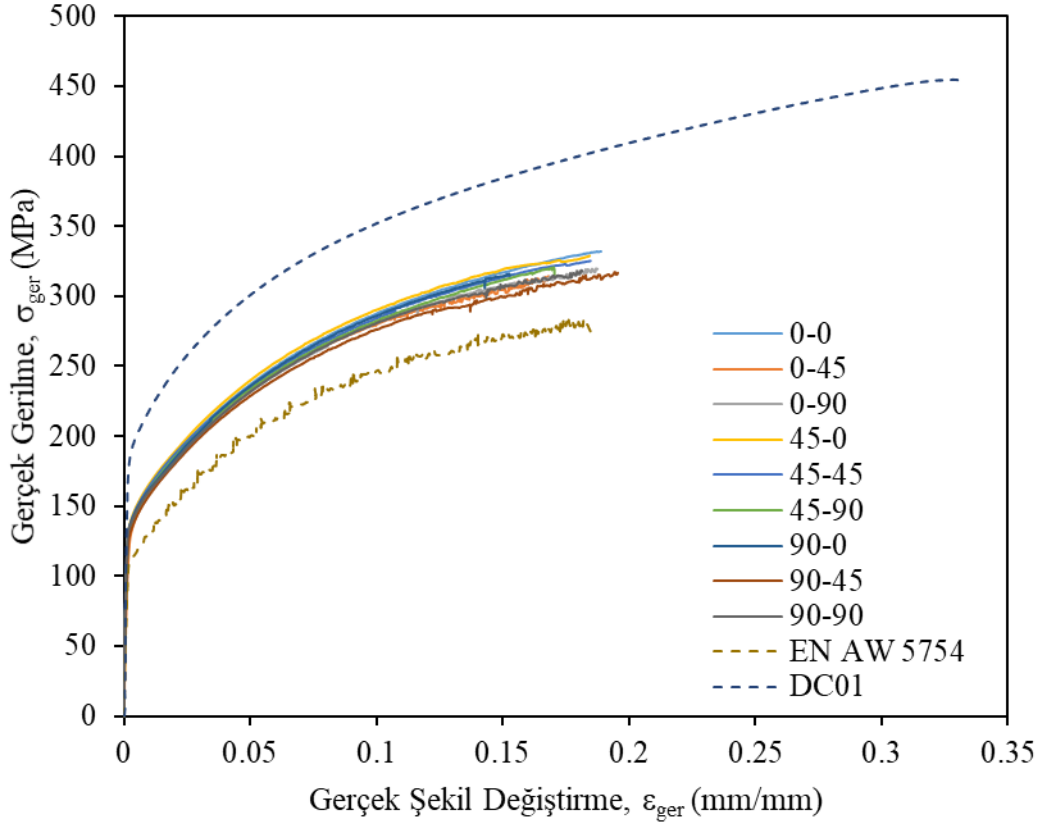
Çalışma kapsamında yapılan çekme deneyleri sonucunda kopan çift katmanlı numuneler Şekil 5'te verilmiştir. Çekme testleri çift katmanlı saclardan herhangi biri hasara uğrayana kadar devam etmiştir. Numunelerin tümünde sadece alüminyum sacın koptuğu gözlenmiştir. Deney numunelerinde hadde yönünde kesilmiş alüminyum numunelerin yükleme yönüne dik olarak koptuğu gözlenirken, diğer numunelerin yükleme yönüne göre 45° açıda koptukları gözlenmiştir. Daha öncede farklı çalışmalarda yapıştırıcı ile oluşturulmuş katmanlı sacların mekanik özelliklerinin, katman saclarının özellikleri arasında olduğu görülmektedir (Reyes and Kang, 2007; Aghchai, Shakeri and Mollaei-Dariani, 2008; Harhash, 2017). Harhash (2017) aynı çelik katmanları polimer katmanla birleştirmiş, Reyes ve Kang (2007) ise alüminyum katmanları katkılı polipropilen ile birleştirmiştir. Katmanların aynı metalden olduğu çalışmalarda çift katmanlı yeni sacın mekanik özelliklerinin, tek sacın mekanik özelliğinden daha zayıf olduğu görülmüştür. Katmanların farklı sac metallere oluşması durumunda ise her katmanın tekil mekanik özelliklerin katmanların mekanik özellikleri arasında kaldığı görülmüştür. Bu özelliklerin katmanların kalınlığı ile doğru orantılı değiştiği ve kalınlığı fazla olan katmana daha yakın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. Çekme testinde kopan EN AW 5754 – DC01 çift katmanlı sac numuneler

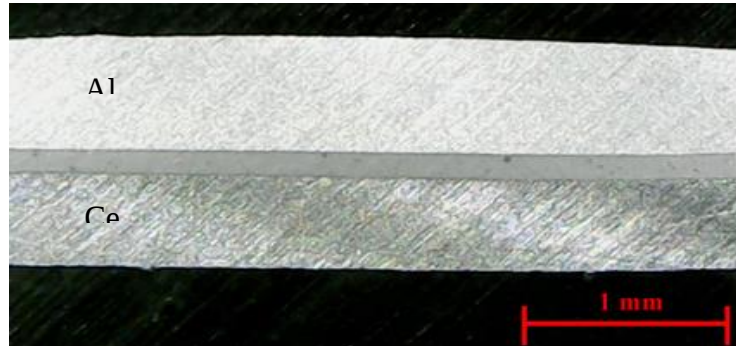
Yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme – şekil değiştirme grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Çekme testi yapılan çift katmanlı sacların tümünde tek sacların çekme testlerindeki gibi

belirgin bir akma sınırı gözlenmemiştir. Çift katmanlı sacların dayanımları beklenildiği üzere katmanlı yapıyı oluşturan sacların dayanımları arasında çıkmıştır. Çift katmanlı sacın şekil değiştirme miktarı ise alüminyum sacdan yaklaşık %20 daha fazladır. Şekil değiştirme miktarı alüminyum sac ile benzer çıkmıştır.



Şekil 6. EN AW 5754-DC01 sacların çekme testlerinden elde edilen gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme grafikleri

Şekil 7’de çift katmanlı çekme numunelerinden test sonrası optik mikroskop ile alınmış görüntüler verilmiştir. Alüminyum ve çelik sac katmanları arasında katılaşmış yapıştırıcı katmanın bozulmadan kaldığı görülmektedir. Yapıştırıcı katman kalınlığının kesit boyunca yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.



Şekil 7. Çekme numunesinin optik mikroskop ile alınmış kesit görüntüsü

3.3. Tek ve Çift Katmanlı Sacların Pekleşme Üstellerinin Karşılaştırılması

Şekil 4 ve 6’da verilen gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme eğrilerinin logaritması alınarak grafikleri çizdirilmiştir. Eğrilerin plastik bölgede kalan kısımlarına lineer regresyon yapılmış ve Tablo 4’teki değerler elde edilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde en yüksek pekleşme üstelinin alüminyum (EN AW 5754 H111) sacda, en düşük pekleşme üstelinin ise çelik (DC01) sacda olduğu görülmektedir. Hesaplanan mukavemet katsayıları (K) incelendiğinde en yüksek dayanıma çelik, en düşüğüne ise alüminyum sacın sahip olduğu görülür.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan sac metallerin pekleşme üsteli (n) ve mukavemet katsayıları (K)

	DC01			EN AW 5754		
	0	45	90	0	45	90
K	580,4	586,6	561,9	449,9	425,1	435,7
n	0,216	0,210	0,210	0,267	0,252	0,265
R²	0,997	0,996	0,996	0,991	0,993	0,991

Yapılan çekme testleri sonucunda sac metallere ait mekanik özellikler Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Çekme testi sonucuna göre tek sacların ortalama mekanik özellikleri

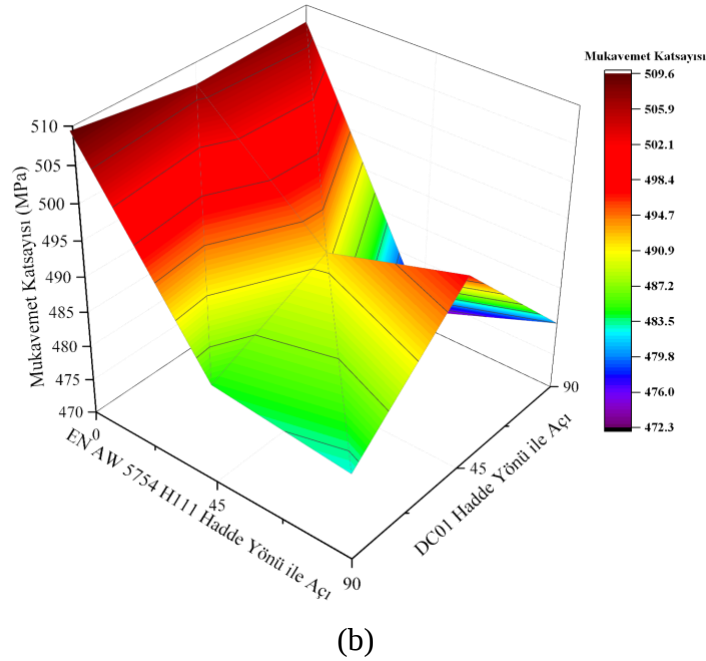
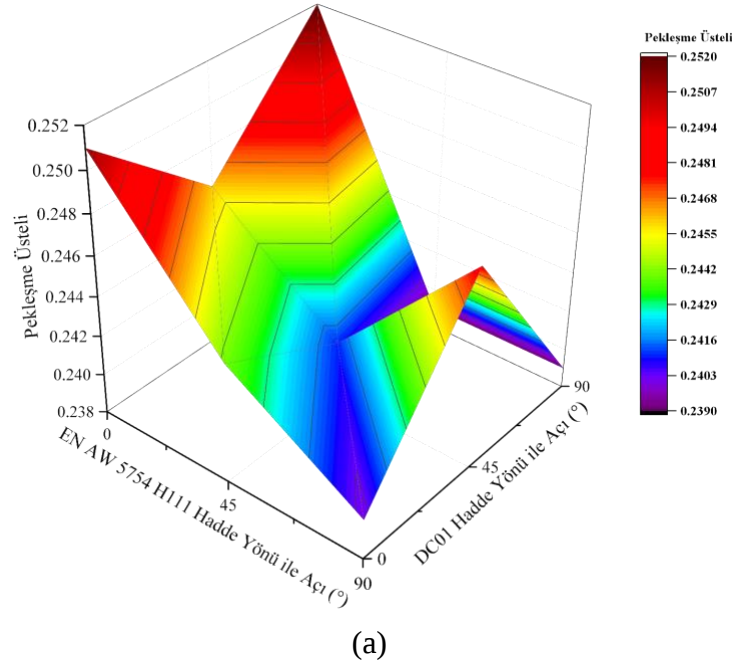
Mekanik Özellikler	DC01	EN AW 5754
Elastisite modülü, E (GPa)	194,7	77,03
Akma dayanımı, $\sigma_{0,2}$ (MPa)	204,3	120,2
Çekme dayanımı, σ_c (MPa)	335,9	237,5
Uniform uzama, ε (mm/mm)	0,241	0,188
Kopma uzaması, ε_k (mm/mm)	0,406	0,204
Pekleşme üsteli, n	0,212	0,261
Mukavemet katsayısı, K (MPa)	576,3	436,9

Pekleşme üsteli, malzemenin şekil alabilirliği hakkında kullanıcıya bilgi vermektedir. Pekleşme üsteli daha yüksek olan malzemeler daha fazla şekillendirilebilirken, düşük olan malzemeler daha az şekillendirilebilmektedir (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002).

Çift katmanlı sacların çekme testleri sonuçlarından elde edilen gerçek gerilme - gerçek şekil değiştirme eğrilerinden her bir numunenin K ve n değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 6’da verilmiştir. Ayrıca Şekil 8a’da n değerinin çift katmanlı sacların hadde yönüne göre değişimi verilmiştir. Şekil 8b’de ise K değerinin çift katmanlı sacların hadde yönüne göre değişimi verilmiştir. Grafiklerde K ve n değerlerinin alüminyum sacın hadde yönüne göre daha fazla değiştiği görülmektedir. En yüksek değerleri alüminyum sacın hadde yönünün 0° olduğu durumda elde edilmiştir. Diğer taraftan alüminyum sac sabit tutulup çelik sac farklı yönlerde birleştirildiği zaman K ve n değerlerinin çok fazla değişmediği görülmektedir. Alüminyum sacın çift katmanlı sacın mekanik özellikleri üzerinde etkili olmasının sebebi sac kalınlığının çelik sacdan daha fazla olmasıdır.

Tablo 6. EN AW 5754–DC01 çift katmanlı sacının hadde yönüne farklı dizilimlerdeki K ve n değerleri

	0 - 0	0 - 45	0 - 90	45 - 0	45 - 45	45 - 90	90 - 0	90 - 45	90 - 90
K	509,6	507,1	507,7	484,5	491,9	472,4	482,6	497,5	479,8
n	0,251	0,246	0,252	0,244	0,241	0,239	0,240	0,248	0,239
R²	0,994	0,992	0,991	0,993	0,993	0,994	0,992	0,994	0,992

**Şekil 8.** EN AW 5754 – DC01 çift katmanlı sacların n (a) ve K (b) değerlerinin karşılaştırılması

Yapılan çekme testleri sonucunda çift katmanlı sac ile onu oluşturan sacların mekanik özellikleri Tablo 7’de verilmiştir. Verilen mekanik özellikler hadde yönüne göre farklı açılarda

kesilmiş numunelerin çekme testi sonuçlarından elde edilen değerlerin ortalaması olarak bulunmuştur. Çift katmanlı sacların mekanik özelliklerinin, tek sacların mekanik özelliklerinin arasında olduğu görülmektedir.

Tablo 7. Çekme testi sonucunda EN AW 5754/DC01 sacı için belirlenen mekanik özellikler

Mekanik Özellikler	DC01	EN AW 5754	EN AW 5754 / DC01
Elastisite modülü, E (GPa)	194,7 ± 7,4	77,03 ± 3,2	99,8 ± 6,5
Akma dayanımı, $\sigma_{0,2}$ (MPa)	204,3 ± 4,02	120,2 ± 1,21	147,88 ± 2,74
Çekme dayanımı, σ_c (MPa)	335,9 ± 4,5	237,5 ± 3,9	269,5 ± 4,4
Maks. uzama, ε (mm/mm)	0,406 ± 0,03	0,204 ± 0,02	0,218 ± 0,03
Pekleşme üsteli, n	0,212 ± 0,01	0,261 ± 0,01	0,244 ± 0,01
Mukavemet katsayısı, K (MPa)	576,3 ± 15,7	436,9 ± 11,4	493 ± 13,6

Diğer taraftan çift katmanlı sac kompozit bir malzeme olarak da düşünülebilir. Kompozit malzemelerin elastisite modüllerinin hesaplanmasında sıklıkla kullanılan üç farklı model ve bu modellere göre EN AW 5754/DC01 çift katmanlı sacı için hesaplanmış elastisite modülleri Tablo 8’de verilmiştir. Bu modellerde $V_{Al+Çe}$, V_{Al} , $V_{Çe}$ sırasıyla çift katmanlı sacın, alüminyum sacın ve çelik sacın hacimlerini, $E_{Al+Çe}$, E_{Al} , $E_{Çe}$ ise sırasıyla çift katmanlı sacın, alüminyum sacın ve çelik sacın elastisite modüllerini göstermektedir. Önerilen modellerden 1 ve 3 numaralı model deney sonuçlarına uzak değerler verirken, 2 numaralı model %3,3’lük mutlak hata oranı ile deneysel sonuçlara oldukça yakın değer vermiştir.

Tablo 8. Kompozit malzemelerin elastisite modüllerinin tahmini için önerilmiş modeller

No	Model	Elastisite modülü (GPa)	Mutlak hata oranı
1	$E_{Al+Çe} = \frac{V_{Al} \cdot E_{Al} + V_{Çe} \cdot E_{Çe}}{V_{Al+Çe}}$ (Voigt, 1889)	116,25	% 16,4
2	$\frac{V_{Al+Çe}}{E_{Al+Çe}} = \frac{V_{Al}}{E_{Al}} + \frac{V_{Çe}}{E_{Çe}}$ (Reuß, 1929)	96,46	% 3,3
3	$\log E_{Al+Çe} = \frac{V_{Al} \cdot \log E_{Al} + V_{Çe} \cdot \log E_{Çe}}{V_{Al+Çe}}$ (Lichtenecker, 1926)	104,92	% 5,1

Tablo 9’da 2 numaralı model ile hesaplanan mekanik özellikler deneysel olarak elde edilen veriler ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Teorik model, mekanik özellikleri genel olarak deneysel değerlerin daha altında hesaplamıştır. Hata oranı düşük olmasına karşın sadece maksimum uzama miktarında teorik model deneysel değerden %12 daha yüksek bir değer vermiştir.

Tablo 9. Çift katmanlı sacın mekanik özelliklerinin teorik değerler ile karşılaştırılması

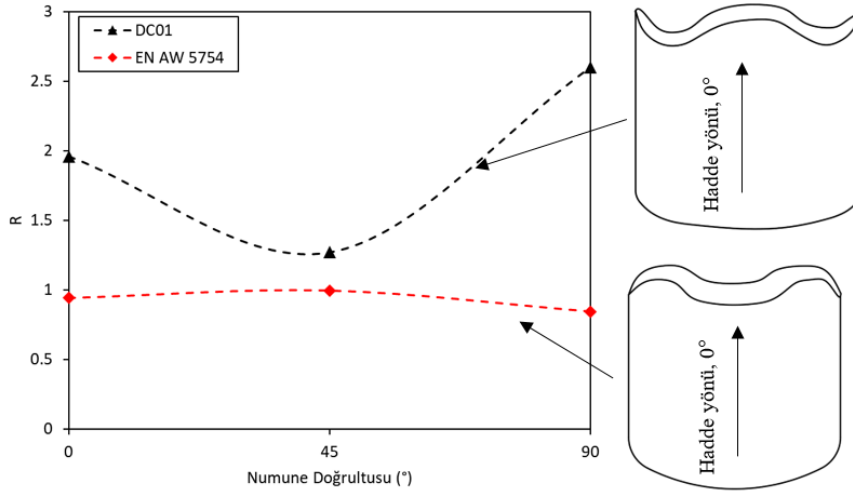
Mekanik Özellikler	EN AW 5754 / DC01	Teorik	Mutlak Hata Oranı
Elastisite modülü, E (GPa)	99,8 ± 6,5	96,5	% 3,36
Akma dayanımı, $\sigma_{0,2}$ (MPa)	147,88 ± 2,74	139,32	% 5,79
Çekme dayanımı, σ_c (MPa)	269,5 ± 4,4	263,2	% 2,35
Maks. uzama, ε (mm/mm)	0,218 ± 0,03	0,245	% 12,18
Pekleşme üsteli, n	0,244 ± 0,01	0,242	% 0,87
Mukavemet katsayısı, K (MPa)	493 ± 13,6	475,2	% 3,52

Katmanlı saclar lamine dizilmiş kompozit malzemeler olarak düşünülebilir. Bu durumda çift katmanlı sacların mekanik özellikleri teorik olarak karışım kuralı ile belirlenebilmelidir. Ancak, Lesuer ve ark. (1996) tarafından çelik/pirinç katmanlı sacların kopma uzamaları karışım kuralı ile doğru tahmin edilememiştir. Bunun sebebi olarak hasar oluşumunun katmanlar arası ayrılma, katman kalınlığı, çatlak yeri gibi birçok farklı parametreye bağlı olmasını işaret etmişlerdir. Başka bir çalışmada, Mg/Al/Paslanmaz çelik (AZ31/Al3004/AISI 430) üç katmanlı sacının hasara uğradığı şekil değiştirme miktarının karışım kuralına uymadığını belirtilmiştir (Kim ve Hong, 2013). Yapılan bazı çalışmalarda katmanlı sacların akma gerilmesi, kopma gerilmesi, elastisite modülü gibi mekanik özellikleri karışım kuralı ile belirlenmiştir (Choi ve ark., 1997; Oya ve ark., 2010; Uscinowicz, 2013). Bu çalışmada ise literatürde kompozitler için önerilen 3 farklı karışım kuralı kullanılarak üretilen çift katmanlı sacın elastisite modülü tahmin edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda deneysel değerlere en yakın sonuç Reuss (1929) modeli ile elde edilmiştir. Üretilen çift katmanlı sacın akma dayanımı, kopma dayanımı, maksimum uzama miktarları gibi mekanik özellikleri Reuss modeli ile hesaplanmıştır. Literatüre benzer şekilde maksimum uzama miktarı dışındaki tüm özellikler deneysel sonuçlara yakın olarak tahmin edilmiştir. Teorik model uzama değerini malzemelerin hacimsel yüzdelelerini esas alarak ve mükemmel yapışma kabulü ile hesaplamaktadır. Ancak deneysel süreçte katmanlı sac yapıştırıcı ile yapıştırılmasına rağmen uzama esnasında katmanlar arasında ayrılmalar olmaktadır. Bu durumda katmanlar aynı anda hasara uğramamakta, bir başka deyişle sadece biri hasara uğramakta ve deney sonuçlandırılmaktadır. Dolayısı ile ilk hasara uğrayan numunenin uzama değeri kadar bir uzama elde edilmektedir. Deneysel ve teorik uzama değeri arasındaki fark bundan kaynaklanmaktadır.

3.4. Tek ve Çift Katmanlı Sacların Anizotropi Katsayılarının Karşılaştırılması

Çalışmada kullanılan sac metaller maksimum uzama değerlerinin %15'ine kadar çekilmiş, çekme testi boyun vermeden önce sonlandırılmıştır (ASTM-E517-00, 2011). Test edilen numunelerin daralma, uzama ve incelme durumları 0,01 mm hassasiyetli mikrometre ile belirlenmiştir.

Hadde yönüne göre 0, 45 ve 90°'de belirlenen anizotropi katsayıları Şekil 9'da verilmiştir. Yöne bağlı anizotropi katsayıları ve grafiğin şekli derin çekme sonrasında sac metalde oluşacak olan kulaklanma hakkında bilgi vermektedir. Buna göre DC01 sacında 0 ile 90° açıları arasında kulaklanma görülmesi beklenmektedir (Şekil 9). Diğer taraftan EN AW 5754 alüminyum alaşımı sacda anizotropi katsayılarının 3 farklı açı değeri için birbirine yakın olması bu sacda kulaklanmanın çok az miktarda olacağını göstermektedir.



Şekil 9. Sac metallerin hadde yönüne göre anizotropi katsayıları ve kulaklanma yönleri

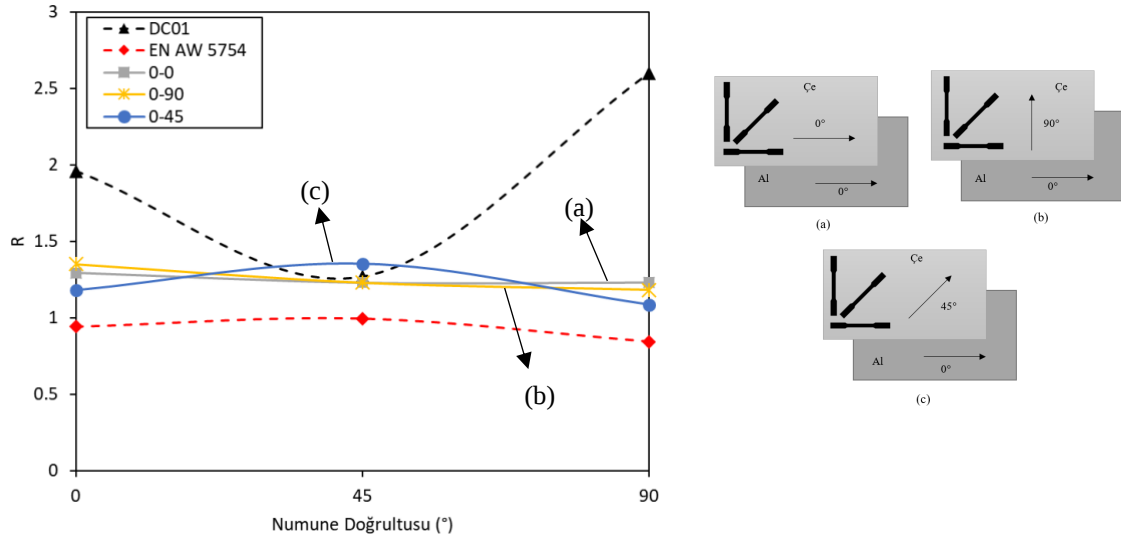
Tablo 10'da yöne bağlı anizotropi katsayılarına ek olarak normal ve düzlemsel anizotropi katsayıları verilmiştir. Burada $|\Delta R|$ değeri daha büyük olan sac metalde daha yüksek kulak uzunluğu görülecektir. Sayısal değerler incelendiğinde en yüksek kulak uzunluğunun DC01 sacında olacağı görülmektedir. Kulaklanma sac şekillendirmede istenmeyen bir durumdur. Çünkü sac şekillendirme sonrası bu kulakların kesilmesi gerekir ve bu durum ek bir maliyet ve israf getirmektedir. Bu sebeple sac metallerde düşük $|\Delta R|$ değeri tercih sebebidir. Alüminyum magnezyum alaşımı (EN AW 5754) sacda $|\Delta R|$ değeri sıfıra yakın olması sebebiyle kulak oluşumu minimum olacaktır. Diğer taraftan $\bar{R}$ değerinin yüksek olması, daha derin parçalar çekilmesini sağlamaktadır. Ayrıca otomobil dış panelleri gibi daha sık ve düzgün hatlı parçalarda yüksek $\bar{R}$ değeri parçadaki kırışıklık oluşumunu azaltmaktadır (Marciniak ve Duncan, 2002). Tablo 10'daki sac metaller incelendiğinde en yüksek $\bar{R}$ değerine düşük karbonlu çeliğin sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda sacın şekillendirilmesi esnasında, düzlem içerisindeki şekil değişiminin incelmedeki şekil değişiminden daha fazla olmakta ve daha geç yırtılmaktadır. Bir başka deyişle, çelik sac alüminyum saca göre incelmeye karşı daha dayanıklıdır.

Tablo 10. Sac metallerin anizotropi katsayıları

	DC01	EN AW 5754
R_0	1,962	0,942
R_{45}	1,271	0,995
R_{90}	2,600	0,846
ΔR	1,010	-0,101
$\bar{R}$	1,776	0,945

Çift katmanlı sacların hesaplanan anizotropi katsayılarını mevcut haliyle değerlendirmek zor olmaktadır. Anizotropi katsayılarını daha iyi ifade edebilmek için Şekil 9'daki sac dizilimleri verilmiştir.

Çift katmanlı saclarda, saclar eğer birbirine paralel yerleştirilmemiş ise hadde yönü olgusu anlamsızlaşmaktadır. Bu durumda sadece yeni oluşan sac üzerinden farklı yönlerde numune keserek bu numunelerin anizotropisine bakmak uygundur. Hadde yönüne göre 0, 45 ve 90°'de belirlenen anizotropi katsayıları Şekil 9'da verilmiştir. Yöne bağlı anizotropi katsayıları ve grafiğin şekli derin çekme sonrasında sac metalde oluşacak olan kulaklanma hakkında bilgi vermektedir. Tek saclarda, DC01 çelik sacının kulaklanma eğiliminin fazla olduğu Şekil 9'dan anlaşılmaktadır. Tek çelik sacda 45°'de anizotropi katsayısı en düşük çıkmakta 0 ve 90° yönlerinde ise yüksek çıkmaktadır. Bu durum derin çekme işlemi sonrasında oluşan kulakların hadde yönü ve ona dik doğrultuda oluşacağını göstermektedir (Şekil 9a). Diğer taraftan tek alüminyum sacda ise kulaklanma oluşumu oldukça az görülmektedir. Çünkü grafikte 0, 45 ve 90° doğrultuları için anizotropi katsayısında belirgin değişim olmamaktadır. Bu iki sacın birleştirilmesi ile oluşturulan çift katmanlı sacda ise tek sacların dizilimlerine göre 3 farklı durum oluşmuştur. Buna göre iki metal sac Şekil 10a ve Şekil 10b'de olduğu gibi birleştirildiğinde kulaklanmanın azaldığı görülmektedir. Çift katmanlı saclar çekme testine tabi tutulduğunda, çift katman içerisindeki çelik sac, serbest haldeki gibi uzayamamaktadır. Çünkü alüminyum sac, çelik sacın uzamasını kısıtlamaktadır. Dolayısı ile anizotropi katsayısı için çekme testine tabi tutulan çift katmanlı sac ancak alüminyum sacın izin verdiği ölçüde uzamaktadır. Bu sebeple tek çelik sac 0 ve 90° doğrultularında göstermiş olduğu anizotropi çift katmanlı sacda azalmaktadır. Sacların (c) dizilimindeki gibi birleştirilmesi durumunda kulak oluşumunun daha fazla olacağı görülmektedir.



Şekil 10. Çift katmanlı sacların anizotropi katsayıları

Tablo 11’de yöne bağlı anizotropi katsayılarına ek olarak normal ve düzlemsel anizotropi katsayıları verilmiştir. Değerler incelendiğinde çift katmanlı saclarda en fazla kulak oluşumunun (c) tipi sacda yani 0-45 diziliminde olacağı görülmektedir. Sac metallerde düşük $|\Delta R|$ değeri tercih sebebidir. Tablo 11’de en düşük $|\Delta R|$ değerinin (a) ve (b) tipi sacda olduğu görülmektedir. Ayrıca Tablo 11’deki çift katmanlı saclarda (a) ve (c) tipi sacların yüksek $\bar{R}$ değerine sahip olduğu görülmektedir. Tek saclara göre çift katmanlı saclarda elde edilen $|\Delta R|$ ve $\bar{R}$ değerleri birbirine yakındır. Dolayısıyla genel bir değerlendirme yapıldığında çift katmanlı sacların üst üste hangi yönde dizildiğine (istiflendiğine) bakılmaksızın derin çekmede çelik saca göre daha az kulaklanma görüleceği belirlenmiştir.

Tablo 11. EN AW 5754 H111/DC01 çift katmanlı sacların anizotropi katsayıları

	DC01	EN AW 5754	(a)	(b)	(c)
R_0	1,962	0,942	1,294	1,352	1,181
R_{45}	1,271	0,995	1,230	1,230	1,353
R_{90}	2,600	0,846	1,232	1,183	1,088
ΔR	1,010	-0,101	0,033	0,037	-0,219
$\bar{R}$	1,776	0,945	0,939	0,941	0,906

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada tekil ve yapıştırma ile oluşturulmuş katmanlı sacların mekanik özellikleri çekme testi ile belirlenmiş ve çift katmanlı sacların akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma uzaması gibi mekanik özellikleri tekil saclar ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ayrıca malzemelerin anizotropi

katsayıları belirlenerek sac metal şekillendirme işlemlerinden biri olan derin çekme işlemine olası etkileri üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları aşağıda verilmiştir:

- Çekme testleri ile çelik sacın akma ve çekme dayanımları sırasıyla 204,3 MPa ve 335,9 MPa, alüminyum sacın ise 120,2 MPa ve 237,5 MPa olarak belirlenmiştir. Uzama miktarları ise çelik için %24,1, alüminyum için %18,8 olduğu görülmüştür.
- Çift katmanlı sacın akma dayanımı 147,88 MPa, çekme dayanımı ise 269,5 MPa olarak belirlenmiştir. Maksimum uzama değerinin ise %21,8 olduğu görülmüştür.
- Çift katmanlı saclara yapılan çekme testleri sonucunda sacların dayanım ve uzama miktarları kendilerini oluşturan sacların değerlerinin arasında çıkmıştır.
- Çalışma sonucunda çift katmanlı sacların mekanik özelliklerinin kompozit malzemeler için kullanılan karışım kuralına ile belirlenmiştir. Tek malzemelerin mekanik özellikleri ve karışım kuralı formülleri kullanılarak çift katmanlı sacın mekanik özellikleri ortalama %4,6'lık bir hata oranı ile belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı 2014/2 (Başvuru numarası: 1649B031405081) ile desteklenmiştir.

Bu çalışma, Yüksek Öğretim Kurulu (YÖK) Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) kapsamında hazırlanmıştır.

Bu çalışma PYO.MUH.1905.16.002 nolu Bilimsel Araştırma Projesi olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir..

Yazarların Katkısı

Bu çalışma Dr. Cengiz Görkem DENGİZ'in doktora çalışmasının bir bölümü olup, Prof. Dr. Kemal YILDIZLI danışmanlığında hazırlanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Aghchai, A.J., Shakeri, M., and Dariani, B.M., (2013). Influences of material properties of components on formability of two-layer metallic sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5–8), 809–823.
- Aghchai, A.J., Shakeri, M., and Mollaei-Darini, B., (2008). Theoretical and experimental formability study of two-layer metallic sheet (Al1100/St12). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(9), 1131–1138.
- ASTM-E517-00, (2011). Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal. *ASTM Standard*.
- ASTM-E8/E8M-15a, (2015). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. *ASTM Standard*.
- Choi, S.H., Kim, K.H., Oh, K.H., and Lee, D.N., (1997). Tensile deformation behavior of stainless steel clad aluminum bilayer sheet. *Materials Science and Engineering A*, 222(2), 158–165.
- Fereshteh-Saniee, F., Alavi-Nia, A., and Atrian-Afyani, A., (2008). An experimental investigation on the deep drawing process of steel–brass bimetal sheets. *Proceedings of metal forming p. Krakow, Poland*.
- Harhash, M., (2017). *Forming Behaviour of Multilayer Metal/Polimer/Metal Systems*. Technische Universitat Clausthal.
- Kagzi, S.A., Gandhi, A.H., Dave, H.K., and Raval, H.K., (2016). An analytical model for bending and springback of bimetallic sheets. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 23(1), 80–88.
- Kim, I.K., and Hong, S.I.G., (2013). Roll-bonded tri-layered Mg/Al/stainless steel clad composites and their deformation and fracture behavior. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 44(8), 3890–3900.
- Kim, K.J., Kim, D., Choi, S.H., Chung, K., Shin, K.S., Barlat, F., et al., (2003). Formability of AA5182/polypropylene/AA5182 sandwich sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1–3), 1–7.
- Lesuer, D.R., Syn, C.K., Sherby, O.D., Wadsworth, J., Lewandowski, J.J., and Hunt, W.H., (1996). Mechanical behaviour of laminated metal composites. *International Materials Reviews*, 41(5), 169–197.
- Lichtenecker, K., (1926). Dielectric constant of natural and synthetic mixtures. *Phys. Z*, 27, 115.
- Maleki, H., Bagherzadeh, S., Mollaei-Darini, B., and Abrinia, K., (2013). Analysis of bonding behavior and critical reduction of two-layer strips in clad cold rolling process. *Journal of materials engineering and performance*, 22(4), 917–925.
- Oya, T., Tiesler, N., Kawanishi, S., Yanagimoto, J., and Koseki, T., (2010). Experimental and numerical analysis of multilayered steel sheets upon bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(14), 1926–1933.
- Polymex, (2020). P-3002 Poliüretan Protolin Döküm Reçinesi. URL <https://www.polymex.com.tr/urunler/p-3002-poliuretan-protolin-dokum-recinesi/> [accessed 10 February 2017]
- Reuß, A., (1929). Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 9(1), 49–58.
- Reyes, G., and Kang, H., (2007). Mechanical behavior of lightweight thermoplastic fiber–metal laminates. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1), 284–290.
- Satheeshkumar, V., and Narayanan, R.G., (2014). Investigation on the influence of adhesive properties on the formability of adhesive-bonded steel sheets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228(3), 405–425.
- Standard, A., (2013). ASTM E8/E8M-13a. *Standard test methods for tension testing of metallic materials*.
- Uscinowicz, R., (2013). Experimental identification of yield surface of Al-Cu bimetallic sheet. *Composites Part B: Engineering*, 55, 96–108.
- Uscinowicz, R., (2019). Characterization of Directional Elastoplastic Properties of Al/Cu Bimetallic Sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(3), 1350–1359.

- Voigt, W., (1889). Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. *Annalen der physik*, 274(12), 573–587.
- Z. Marciniak, J.L. Duncan, (2002). *Mechanics of Sheet*. Butterworth Heinemann: Springer.
- Zahedi, A., Mollaei Dariani, B., Mirnia, M.J., Dariani, B.M., and Mirnia, M.J., (2019). Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 153–154, 341–358.