

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARE KESİTLİ TÜPLERDE ÖN ŞEKİL VERMENİN
KATLANMA DAVRANIŞINA ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömür KAVAS

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kenan GENEL

Ocak 2020

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARE KESİTLİ TÜPLERDE ÖN ŞEKİL VERMENİN
KATLANMA DAVRANIŞINA ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

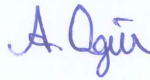
Ömür KAVAS

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 28.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Kenan GENEL
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Ahmet OĞUR
Üye



Doç. Dr.
Ergün NART
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ömür KAVAS

23.12.2019

TEŞEKKÜR

Kare kesitli tüplerde ön şekil vermenin katlanma davranışına etkisinin deneysel olarak incelenmesi konulu yüksek lisans tezim süresince akademik çalışmalarım ve tez sürecinde desteklerini esirgemedikleri için başta tez danışmanım olan Prof.Dr. Kenan GENEL'e ve Ar. Gör Muhammed Muaz YALÇIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni bugünlere getiren ve bana hayatımın her alanında olduğu gibi yüksek lisans eğitimin boyunca da destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca teknik ve manevi desteğinden dolayı meslektaşım olan Murat KONAR'a, Yön Proses çalışanı Recep KESER'e ve Yön Proses kurucuları Sn. Yalçın PELİN'e ve Sn. Önder CUROĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY.....	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Alüminyum Alaşımları.....	1
1.1.1. 6XXX serisi alüminyum alaşımları.....	7
1.2. Alüminyum Isıl İşlem Şartları.....	9
1.3. Literatür Araştırması.....	10
BÖLÜM 2.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	14
2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	14
2.1.1. Kare kesitli alüminyum tüplerin hazırlığı.....	14
2.1.2. Kalıp tasarımı ve malzeme seçimi.....	16
2.2. PVC Köpük.....	18
2.3. Poliüretan Kalıp Yayları (Vulkolon çubukları).....	20
2.4. Kullanılan Cihazlar.....	21
2.4.1. Isıl işlem fırını.....	22
2.4.2. İç cidar ezme işleminde kullanılacak hidrolik pres.....	22
2.4.3. Eksenel ezme deneylerinde kullanılacak hidrolik pres.....	23

BÖLÜM 3.

DENEYSEL SONUÇLAR.....	24
3.1. 6063-T0 Alüminyum Tüplerin Eksenel Ezme Deneyi Sonuçları.....	24
3.2. 6063-T6 Alüminyum Tüplerin Eksenel Ezme Deneyi Sonuçları.....	31

BÖLÜM 4.

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	52



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 6xxx serisi alaşımlardan imal edilmiş çeşitli ürünler [11].	9
Şekil 1.2. Farklı otomobil markalarına ait elemanlar [12]	9
Şekil 2.1. 60x60mm ölçülerinde 2mm cidar kalınlığında 6063 alüminyum alaşımlı kutu profil.....	15
Şekil 2.2. Soğuk iş takım çeliği ısıtılma işlem süreci	16
Şekil 2.3. İçeriden ezme kalıbı orta parçasının tasarımına ait 2D ve 3D görünüm....	17
Şekil 2.4. İçeriden ezme kalıbı alt parçasının tasarımına ait 2D ve 3D görünümü....	17
Şekil 2.5. İçeriden ezme kalıbı üst parçasının tasarımına ait 2D ve 3D görünüm	18
Şekil 2.6. İçeriden ezme kalıbının 3D görünümü ve alüminyum tüpün kalıba yerleştirildikten sonraki montaj görünümü	18
Şekil 2.7. PVC köpüğün alüminyum tüpe montajının görünümü.....	19
Şekil 2.8. Deneylerde kullanılan PVC köpüğün basma zorlanması altındaki gerilme birim şekil değişim eğrisi [36]	20
Şekil 2.9. Farklı sertlikteki vulkolon çubukları.....	21
Şekil 2.10. PVC köpük ve vulkolon çubuk takviyeli kare kesitli alüminyum numuneye ait görüntü	21
Şekil 2.11. Numunelerin sertleştirilmesinde kullanılan ısıtılma fırını.....	22
Şekil 2.12. Cidar ezme işlemi ve içeriden cidar ezme işlemi uygulanmış tüp yapıya ait görüntüler	23
Şekil 2.13. Eksenel ezme deneyinde kullanılan hidrolik pres.....	23
Şekil 3.1. Deney grubu isimlerinin yazım sistematığı	24
Şekil 3.2. 6063-T0-0-0-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	25
Şekil 3.3. 6063-T0-0-0-0 tüpün eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	25

Şekil 3.4. 6063-T0-E-0-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	26
Şekil 3.5. 6063-T0-E-0-0 tüpün eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	27
Şekil 3.6. 6063-T0-0-K-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	28
Şekil 3.7. 6063-T0-0-K-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	28
Şekil 3.8. 6063-T0-E-K-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	29
Şekil 3.9. 6063-T0-E-K-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	29
Şekil 3.10. 6063-T0 grubu alüminyum tüplerin iç cidardan ezme işlemi ve PVC köpük takviyesiyle sönmölenen enerjilerin karşılaştırılması	30
Şekil 3.11. 6063-T0 grubu tüplerde uygulanan takviyelerin enerji kazanımları	31
Şekil 3.12. 6063-T6-0-0-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	32
Şekil 3.13. 6063-T6-0-0-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	32
Şekil 3.14. 6063-T6-E-0-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	33
Şekil 3.15. 6063-T6-E-0-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	33
Şekil 3.16. 6063-T6-0-K-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	34
Şekil 3.17. 6063-T6-0-K-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	35
Şekil 3.18. 6063-T6-E-K-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	36
Şekil 3.19. 6063-T6-E-K-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	36

Şekil 3.20. 6063-T6 grubu alüminyum tüplerin iç cidardan ezme ve PVC köpük takviyesiyle absorbe edilen enerjilerin karşılaştırılması	37
Şekil 3.21. 6063-T6 grubu tüplerde uygulanan takviyelerin enerji kazanımları	38
Şekil 3.22. 6063-T6-0-K-1 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	39
Şekil 3.23. 6063-T6-0-K-1 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	39
Şekil 3.24. 6063-T6-E-K-1 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	40
Şekil 3.25. 6063-T6-E-K-1 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	40
Şekil 3.26. 6063-T6-0-K-2 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	41
Şekil 3.27. 6063-T6-0-K-2 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	42
Şekil 3.28. 6063-T6-E-K-2 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği	43
Şekil 3.29. 6063-T6-E-K-2 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü	43
Şekil 3.30. 6063-T6 grubu alüminyum tüplerin iç cidardan ezme, 80 ve 90 shore sertliğinde kalıp yayların takviyesiyle absorbe edilen enerjilerin karşılaştırılması	44
Şekil 3.31. Deney numunelerinin sönmledikleri ortalama enerji miktarı, takviyesiz durumlarına göre enerji kazanımları ve spesifik enerjileri.....	46

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1.1. Alüminyum fiziksel, kimyasal, mekanik özellikleri ve diğer metaller ile karşılaştırılması [8].....	6
Tablo 1.2. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanlarının malzeme türüne göre sınıflandırması [30].	7
Tablo 2.1. 6063-T6 Alaşımının mekanik ve fiziksel özellikleri	15
Tablo 2.2. 6063-T0 Alaşımının mekanik ve fiziksel özellikleri	15
Tablo 2.3. AIREX C70.75 PVC Köpük [35]	19

ÖZET

Anahtar kelimeler: Alüminyum kare kesitli tüp, Enerji sönümleme, İç yüzey ezme

Kare kesitli alüminyum tüp yapılar uzun zamandır enerji sönümlemede kullanılmaktadırlar. Tüp yapıların cidarları içeriden ezilerek enerji sönümleme oranının artırılması hedeflenmektedir. Bu çalışma kapsamında ekstrüzyon ürünü olan 6063-T0 ve 6063-T6 alüminyum alaşımlı 60x60mm dış kesit ölçülerinde ve 2mm cidar kalınlığında kare kesitli tüpler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda herhangi bir takviye uygulanmamış, cidarları içeriden ezilmiş, PVC köpük ile takviye edilmiş ve vulkolon çubukları ile desteklenmiş tüplerin deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen verilerle enerji grafikleri oluşturulmuş ve sönümlenen enerjiler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda yapılan işlemlerin enerji sönümlemesine katkısı belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda; 6063-T0 alüminyum tüplere ezme işlemi uygulanıp ardından PVC köpük ile takviye edildiğinde enerji sönümleme kabiliyetlerinin %56 oranında arttığı gözlenmiştir. 6063-T6 alüminyum tüplere ezme işlemi uygulanıp ardından PVC köpük ve 80 shore sertliğinde vulkolon yay takviyesi uygulandığında enerji sönümleme kabiliyetinin %63, aynı T6 alüminyum tüpe 80 shore sertliğinde vulkolon yayı yerine 90 shore sertliğinde vulkolon yayı takviyesi uygulandığında enerji sönümleme kabiliyetinin %72 arttığı deneysel çalışmalarda görülmüştür.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRE-SHAPING ON SQUARE SECTION TUBES FOLDING BEHAVIOR

SUMMARY

Keywords: Aluminum square section tube, Energy absorption, Inner surface crushing

Square section aluminum tubes structures have been used for energy absorption for a long time. It is aimed to improve the energy absorption capacity of the tube structure by crushing it from inside. Within the scope of the study, extruded aluminum (6063) square tubes tubes in T0 and T6 conditions, 60x60mm dimensions with 2mm wall thickness were used. In experimental studies, tubes with crushed or pressed wall, inner reinforced with PVC foam and vulcolon rod were tested under axial load. Force-displacement graphs were drawn from the experiments and the energy absorption capability were calculated.

As a result of the studies; it was observed that the absorbed energy increased by 56% if PVC foam was reinforced to 6063-T0 aluminum tubes which were crushed. Crushing into T6 treated tubes increased 63% of the absorbed energy if reinforced with PVC foam and vulcanized spring rod of 80 shore hardness. If the vulcolon rod is 90 shore, it is determined that this value reaches 72%.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Alüminyum dünyada en çok tüketilen demir dışı metaldir. Yüzyıllardır kullanımını artan bir şekilde insanoğluna hizmet etmektedir. Günümüzde yaşantımızın hemen hemen her konumunda kullanılan ve vazgeçilmez bir malzemedir. 19.yy. başlarında Sir Humphrey Davy tarafından alüminyum elementinin varlığının açıklandığı kabul edilmektedir. 1825 yılında ilk olarak Hans Christian Oersted laboratuvar ortamında alüminyumu ayrıştırarak alüminyum varlığını ortaya koymuştur. 1886 yılına kadar geçen süre içerisinde laboratuvar ortamında birçok çalışma yapılmıştır ve az miktarda üretimi gerçekleştirilmiştir. Ticari olarak üretimi ise 1886 yılında birbirinden habersiz olan ve iki farklı kıtada yaşayan Charles Martin Hall (ABD), Paul Heralt (France) tarafından gerçekleştirilmiştir [1-3].

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, ticari hayatta öncelikle bakır pirinç ve bronzun yerine geçmiştir. Ticari anlamda üretimin ilk yıllarında yaşanan problemlerden dolayı 1885 yılında yıllık 200ton alüminyum üretilirken 2015 yılında bu rakam 105 milyon tona ulaşmıştır. Alüminyumun keşfinden günümüze kadar olan süreçte muadili malzemelere göre mukavemet, hafiflik, iletkenlik, uzun ömürlülük gibi özelliklerinden dolayı hava, kara ve deniz taşıtlarından mutfak eşyasına kadar yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

1.1. Alüminyum Alaşımları

Antik dönemde Heredot alüminyum bileşikleri için alumen adından bahsetmiştir. 1754 yılında Marggraf kil ve alüminyum bileşiklerinin aynı metale bağlı olduğu tespitinde bulunmuştur. 1786'da De Merveau bu metale alumine adını vermiştir. 1807'de Sir

Humphrey Davy ise bu metale önceleri alumium, sonra aluminum ve daha sonrada aluminium demiştir [5].

1807 yılında Sir Humphrey Davy alüminada oksijene bağlı bir metalin olabileceğini tahmin etmiştir. Alüminanın elektrolizinde demir katot kullanıldığı için demiralüminyum alaşımı elde etmiş, alüminyum ayırmayı başaramamıştır. 1821 yılında M. Pierre Berthier Güney Fransa’da Les Baux kasabasında boksit madenini keşfetmiştir. Bu yerin adına ithafen bauxit adını vermiş ve kimyasal formülünü de $Al_2O_3 \cdot H_2O$ olarak belirlemiştir. 1825 yılında Danimarkalı fizikçi Christian Oersted, alüminyum susuz alüminyum klorürden kalsiyum amalgamı ile redükleyerek ilk metalik alüminyum imal etmiştir. 1827’de Friedrich Wöhler susuz alüminyum kloriti saf potasyumla redükte ederek pulverize bir toz elde etmiş, bu tozun içinde alüminyumun ana özelliklerine çok yakın özellikte pul pul metallerin bulunduğunu tespit etmiştir. Böylece artık kimyasal yöntemden elektrolitik yöntemine geçilmiştir.

1845’te Wöhler bu yöntemle toplu iğne başı büyüklüğünde bilyalar halinde alüminyumun tüm özelliklerine sahip biraz daha fazla miktarda metal üretmiştir. 1852’de Robert Bunsen elektrotik yöntemi daha da geliştirmiştir [5,6].

1850–1860 yılları arasında Fransız araştırmacı Henry Sainte-Clarie Deville 3. Napolyon’un maddi desteğini alarak endüstriyel alüminyumun kazanılmasına temel adımları atmıştır. 200ton alüminyum üreterek alüminyumun fiyatını 2400 DM’den 25 DM’ye düşürmeyi başarmıştır. 1855 yılında, Deville tarafından ilk olarak üretilen alüminyum Paris’te bir fuarda, “balçıkta gümüş” sloganı ile sergilenmiştir. 1883’te Charles S. Bradley alüminyum oksitlerin kriyolit kullanılarak elektrolizi için bir patent çıkarmış, ancak uygulamaya geçmeyi başaramamıştır [6].

1886 modern alüminyum endüstrisinin resmen başladığı yıl olmuştur. Fransa’da Paul T. Heroult ve Amerika’da Charles Martin Hall birbirlerinden habersiz olarak kriyolitte çözülmüş alüminanın elektrolitik parçalanması ile ilgili patent almışlardır. Günümüzde bütün cevherden alüminyum üreten tesisler bu patente göre üretim yapmaktadırlar. Yine 1886 yılında Almanya’da Deville’in kimyasal metodu ile çalışan

ilk alüminyum fabrikası kurulmuştur. 1887 – 1888 yıllarında Heroult İsviçre firması Metallurgischen Gesellschaft ilk elektroliz tesisini kurmuştur. Daha sonra bu firma Alman Edison Gesellschaft (AEG) firması ile birleşmiştir. 1887 – 1892 tarihleri arasında Avusturyalı Dr. Karl J. Bayer kendi ismi ile anılan Bayer Prosesinde (alümina üretimi) ilk patenti almıştır. Bayer Metodu ile çalışan ilk alüminyum fabrikası 1908 – 1914 yılları arasında Almanya’da kurulmuştur. Alüminyum boksit cevherlerinden üretiminin geliştirilmesinden sonra alüminyum hızla endüstride kullanılmaya başlanmıştır [6].

Alüminyumun başlıca ilk gelişim adımları;

- 1889: Mutfak eşyalarında kullanımı (tencere ve tabak),
- 1891: Gemi inşaatında kullanımı (yatlarda),
- 1892: Havacılık sektöründe kullanımı,
- 1893: Sanat eserlerinde kullanımı,
- 1890: Alüminyum sert lehim,
- 1905: Alüminyum dökümden ticari motor üretimi,
- 1906: Yüksek mukavemetli sertleşebilir duralümin (Al-Cu-Mg) keşfi,
- 1909: Bira kutularında kullanımı,
- 1910: Bant haddeleme ile folyo üretimi,
- 1918: Sertleşebilir korozyona karşı Al-Mg-Si alaşımlarının geliştirilmesi,
- 1919: Konserve kutularında kullanımı
- 1920: Alüminyum boruların büyük ölçekte kullanılması,
- 1928: İlk alüminyum tank (30,3 m³’lük) imalatı,
- 1931: Süt kapaklarında kullanımı,
- 1933: Köprü inşaatında kullanılması,
- 1951: Almanya’da yaya köprüsü inşaatı.
- 1960–2000: Motor blokları, otomotiv jantları, cephe giydirme, dış macunu tüpleri, televizyon kuleleri, roket komponentleri, gaz taşıma üniteleri, doğalgaz sıvılaştırma üniteleri, zırh plakaları, v.b. imali [6].

Alüminyum ve alaşımlarının sağladığı üstün özellikler sebebiyle, tüketimleri büyük bir hızla artmakta ve her geçen gün yeni kullanım alanları ortaya çıkmaktadır. Saf

alüminyum galvanik seride çok aktif bir metal olmasına karşın, yüzeyinde kolaylıkla oluşan koruyucu oksit tabakası onun yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan bu geçirimsiz, sert ve koruyucu oksit tabakası alüminyumun korozyon direncini önemli ölçüde arttırmaktadır. Buna bağlı olarak alüminyum saflaştırıldıkça korozyon direnci ve iletkenliği de artar. Bu nedenle, korozyona karşı oldukça hassas olan alüminyum alaşımları günümüzde saf alüminyum giydirilmesi yöntemiyle korozyondan korunmaktadır. Diğer yandan saf alüminyum oldukça düşük olan mukavemeti soğuk işleme arttırılabilir.

Bugün alüminyum ve alaşımları sahip olduğu özellikleri itibariyle endüstride kullanılan en önemli yapı ve mühendislik malzemelerinden birisi halini almıştır. Saf halde yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, korozyon direnci gibi özelliklere sahipken, alaşımlama ile bu özellikler çok daha geniş bir spektruma yayılarak yaygın bir kullanıma sahip olmuştur. Bugün endüstride geniş çaplı olarak 100'ün üstünde alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. En önemli özelliklerinden bazıları aşağıdaki gibidir [7];

Hafifliği: Saf alüminyumun özgül ağırlığı yaklaşık 2,7 gr/cm³'tür. Kütlesi demirin %35'i, bakırın ise %9'u kadardır. Bu düşük ağırlık özelliği başta uçak ve otomobil endüstrisinde olmak üzere, tüm taşımacılık sanayinde önemli bir yer edinmektedir.

Mekanik Özellikleri: Çeşitli alüminyum alaşımlarının ısı işlemleri sonucu, istenilen şekilde mukavemet, tokluk, sertlik ve diğer mekanik özellikleri geliştirilebilir. Özellikle küçük miktarlarda Mn, Mg, Si, Cu, Zn, Ti ilavesiyle mukavemeti daha da arttırılan alaşımlarında, ısı işlem ile bugün çok yüksek çekme mukavemeti değerlerine ulaşabilmektedir. Alüminyumun elastisite modülü çeliğin 1/3'üne eşit olduğundan, çelik yerine alüminyumu kullanılmaya karar verildiğinde, esnemenin çeliğe göre 3 kat daha fazla olacağı göz önüne alınmalıdır. Alüminyumun sertliği 19-20 BHN değerinde olmakla birlikte, alaşımlarında ise 120 BHN değerine kadar çıkarılabilmektedir. Çekme dayanımı ise 90 MPa değerinden, bazı yaşlanabilir alaşımlarında 650 MPa değerine kadar ulaşabilmektedir.

Korozif Özellikler: Alüminyum yaygın olarak kullanım nedenlerinden biri de onun yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır. Bu özelliği sebebiyle, kimya ve besin sanayinden, inşaat sanayine ve ev eşyalarına kadar geniş bir alanda kullanılabilir. Alüminyum yüzeyler, atmosferik korozyona maruz kaldığında, çok ince (20–25 Å) görünmez bir oksit tabakası oluşur ve bu tabaka daha fazla oksitlenmeyi önlemektedir. Alüminyumun bu özelliği yüksek korozyon direncini temel nedeni olup, birçok aside karşıda aynı dayanımı göstermektedir. Ancak bazı alkaliler bu oksit tabakasına zarar verme özelliğine sahiptir. Elektrolitik ortamlarda bazı metallerle doğrudan temas etmesi sonucunda galvanik korozyon ortaya çıkabilir. Bu durumda boya ya da yalıtkan bant uygulaması yapılması önerilmektedir.

Isı ve Elektrik İletkenliği: Alüminyum ve alaşımları yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptirler. Yüksek ısı iletkenliği (çeliğin 6 katı); ısıtma/soğutma endüstrilerinde, gıda, kimya, petrol, havacılık sektörlerinde alüminyum ısı değiştiricilerinin yaygın olarak kullanımına neden olmuştur. Alüminyum elektrik iletkenliği 37 siemens mertebelerindedir. Elektriksel iletkenliği bakırın %62'si civarındadır. Bakırın yoğunluğu 8,9 gr/cm³, alüminyumun ise 2,7 gr/cm³ olduğu düşünülürse; ağırlıkça kıyaslandığında alüminyumun bakırdan daha iyi iletken olduğu ortaya çıkmaktadır.

Yüksek Isı ve Işık Yansıtması: %80'in üzerinde ışık yansıtma özelliği ile aydınlatmada, yüksek ısı yansıtma özelliği dolayısıyla da çatı kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özelliğin dolayı ışık reflektörlerinin kaplanması ve aynaların geri yansıtıcılığında da kullanılmaktadır.

Kolay Şekillendirilebilirliği ve İşlenebilirliği: Kolayca dökülebilir, kağıttan daha ince şekilde haddelenebilir (folyo), çekilebilir (tel, ekstrüzyon ürünleri, profil), dövülebilir. Alüminyum kolayca ve hızlı bir şekilde tornalama, frezeleme, delme işlemlerine tabi tutulabilir.

Kaynaklanabilirliği: birçok birleştirme yöntemi uygulanabilir (kaynak, perçinleme). Ayrıca havacılık ve otomotiv sektöründe yapıştırma uygulamaları da oldukça yaygındır.

Düşük maliyet; alüminyumun ekonomik yönden avantajı diğer metallere göre büyük bir hızla yükselmektedir. Bunun başlıca nedeni birim ünitesinin maliyetinin diğer metallere göre daha ekonomik olmasından kaynaklanmaktadır. Alüminyumun diğer metallere göre daha hafif olması dökümde büyük bir avantaj sağlamaktadır. Aynı boyuttaki diğer metallere göre daha fazla döküm yapabilmek mümkündür. Ayrıca çok yüksek olmayan ergime sıcaklığı, döküm sırasında daha fazla enerji harcanması ve kalıp aşındırması sebebiyle önemli bir tercih nedenidir.

Alüminyum, fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak çelik, bakır, prınç, nikel, kurşun veya titanyum gibi bir metaldir eritilebilir, dökülebilir ve şekil verilebilir. Günümüzde saf alüminyum; mutfak malzemeleri, bina kaplamaları, elektrik iletkenleri üretimi ve gıda endüstrisinde, alüminyum alaşımları; makine imalat, havacılık ve taşıt endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanım alanına sahiptir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının başlıca endüstriyel kullanım alanları ve Tablo 1.1. ve Tablo 1.2’de özetlenmiştir.

Tablo 1.1. Alüminyum fiziksel, kimyasal, mekanik özellikleri ve diğer metaller ile karşılaştırılması [8].

Özellik	Alüminyum	Demir	Nikel	Bakır
Kristal kafe yapısı	YMK	HMK	YMK	YMK
Yoğunluğu (g/cm ³)	2,7	7,85	8,9	8,93
Ergime sıcaklığı (°C)	660	1536	1455	1083
Özgül ısısı (J/ kg K)	930	448	440	385
Isıl iletkenliği (W/m K)	235	79,6	92,1	389,4
Isıl genleşme katsayısı ($\Delta l/l$ °C)	$33,9 \times 10^{-6}$	12×10^{-6}	1×10^{-6}	$16,5 \times 10^{-6}$
Elektrik direnci ($\mu\Omega\text{cm}$)	2,65	9,7	6,8	1,67
Elastisite modülü E (N/mm ²)	$6,7 \times 10^4$	21×10^4	21×10^4	$12,4 \times 10^4$
Maksimum çekme mukavemeti (N/mm ²)	65	235	300	210

Tablo 1.2. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanlarının malzeme türüne göre sınıflandırması [30].

Alüminyum Alaşımları	Ürün Biçimi	Kullanım Alanı
Saf Alüminyum	Folyo, haddelenmiş levha, ekstrüzyon ürünleri	Ambalaj malzemesi, folyo, çatı kaplama, zırhlama, düşük mukavemetli korozyona dirençli kazan ve depolama tankları yapımı.
2XXX Serisi (Al-Cu alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Çok yüksek zorlanmaya maruz parçalar, havacılık ve uzay araçlarında kullanılan yapısal elemanlar, ağır dövme parçalar, taşıt tekerlek jantları, silindir kafaları, pistonlar
3XXX Serisi (Al-Mn alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Ambalaj malzemesi, çatı kaplama ve zırhlama, kimyasal madde varilleri ve tankları, kimyasal madde ve gıda taşıma donanımları.
4XXX Serisi (Al-Si alaşımları)	Tel, döküm parçalar.	Kaynak telleri, silindir kafaları, motor blokları, supap gövdeleri, mimari amaçlı kullanılır.
5XXX Serisi (Al-Mg alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi bos elemanlar ve borular.	Zırhlama, kazan ana yapı levhaları, güçlü yapı elemanları, yapısal elemanlar, kazanlar ve depolama tankları, otomobil, tren vagonu, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
6XXX Serisi (Al-Si-Mg alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi bos elemanlar ve borular	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, otomobil, tren vagonu, deniz taşıtları ve deniz üstü yapı elemanları, mimari amaçlı kullanılan elemanlar
7XXX Serisi (Al-Mg-Zn alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, uçaklarda kullanılan kalın kesitli dövme parçalar, askeri köprüler, zırh levhaları, ağır taşıt ve vagonlarda kullanılan ekstrüzyon ürünleri

1.1.1 6XXX serisi alüminyum alaşımları

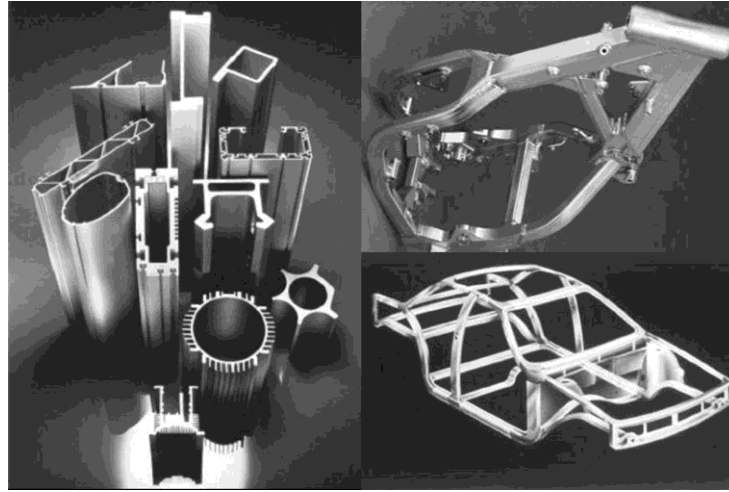
6xxx serisi alaşımlar Magnezyum (Mg) ve Silisyum (Si) içerirler. Isıl işlem uygulanabilen ve yaşlandırılabilen alaşımlardır. Mg_2Si (magnezyum silikat) intermetalik bileşikler, çökelti sertleştirilmesi ile dayanım artışı sağlar [9].

2XXX ve 7XXX serisi alaşımlar kadar dayanıklı olmasalar da 6XXX serisi alaşımlar şekillendirilebilen, kaynaklanabilir, işlenebilir ve korozyon dirençli orta dayanıklı alaşımlardır. Mimari uygulamalar, ulaşım endüstrisi, köprüler ve kaynaklı yapılar bu alaşımların uygulama alanlarıdır [10].

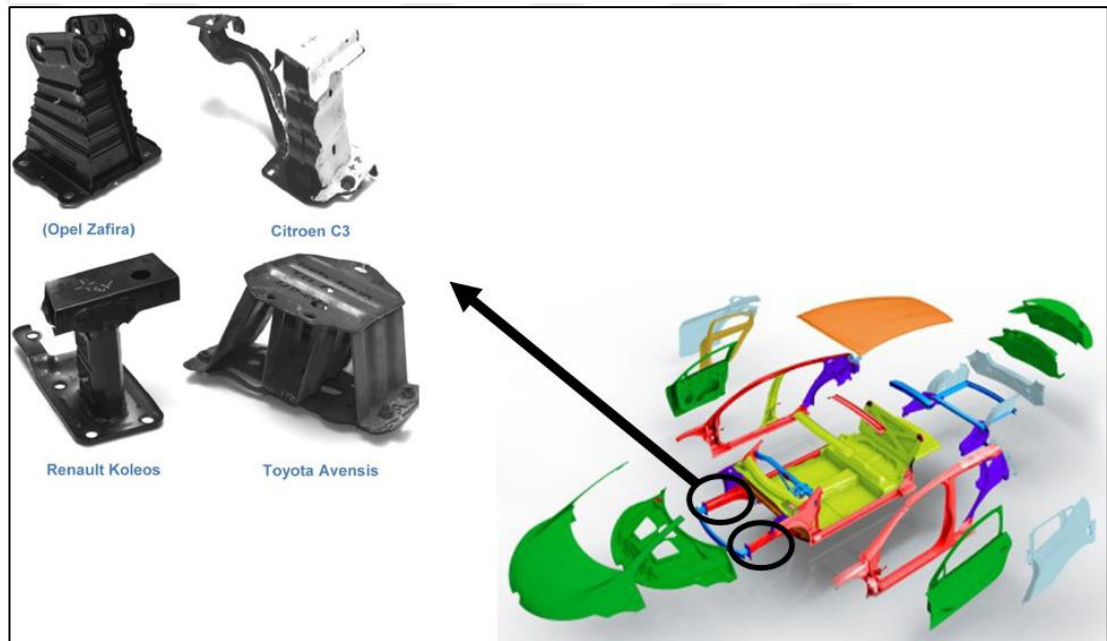
Fe, Cu, Mn, Zn gibi belirli sınırlar içinde farklı değerlerde olmaları, alaşımların kullanılma yerine göre farklı özelliklerde profil üretimini sağlar. Demir miktarı %0,20 veya daha düşük olan alaşımlarda, profil polisaj yapıldığında parlak yüzey elde edilir. Fe miktarının bu değerden yüksek olması durumunda, profil rengi grileşmeye başlar, parlaklık donuklaşır. Mat yüzey elde edilmesi için de demir miktarı en az %0,18 olmalıdır. Demir miktarı yükseldikçe o ölçüde rahat ve cazibeli mat yüzey elde edilir [10].

Mg ve Si miktarının, profil yapay yaşlandırma ısı işlemi sonrası sertliğinde büyük önemi vardır. Ancak, ısı işlem sonrası maksimum sertlik temini için bu elementlerin üst sınırlarda olması ise, üretimin düşük hız ile yapılmasını gerektirir. Çünkü kullanılan alüminyum kütük (billet) de aynı oranda serttir.

Bu alaşımlar doğal olarak çatlama duyarlılığı nedeniyle (ek kaynak metali kullanılmadan) kaynak edilmemelidir. Ark kaynağı yöntemi süresince uygun miktarda ek kaynak metali kullanmak esas metalin ısılanmasını sağlar, bu sayede sıcak çatlama problemi önlenmiş olur. Bu alaşımlar, uygulama ve çalışma isteklerine bağlı olarak 4xxx ve 5xxx ek kaynak metallerinin her ikisi ile de kaynak edilirler [10]. 6xxx serisi alaşımlardan imal edilen çeşitli ürünler Şekil 1.1. ve Şekil 1.2.'de gösterilmiştir. Litaratürde tüp yapı cidarının katlanma kararlılığını (stabilitesini) iyileştirmesi nedeniyle, hafif gözenekli malzemelerin takviye elemanı olarak yaygın bir şekilde kullanıldığı anlaşılmıştır.



Şekil 1.1. 6xxx serisi alaşımlardan imal edilmiş çeşitli ürünler [11].



Şekil 1.2. Farklı otomobil markalarına ait elemanlar [12]

1.2. Alüminyum Isıl İşlem Şartları

Alüminyum ve alüminyum alaşımları ısıtılma durumları harfler ile tanımlanmaktadır. En çok kullanılan ısıtılma işlem göstergeleri O, F, H, W ve T'dir. Bunlar; (O) tavlı; (F) fabrikasyondan sonraki hali; (H) rekristalizasyon sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yapılan plastik şekillendirme sonucu sertlik ve mukavemetin artışı, (W) solüsyona alma ısıtılma işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı göstermekle beraber,

şayet zamanı verilmiş ise o takdirde belirli bir ısı işlem ifade edilmiş olmaktadır. (T) ısı işlem halini göstermektedir. Birden ona kadar T sıcaklık gösterimi mevcuttur (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10). T6 ısı işleminin uygulama alanları Gemi inşaat sektörü, kamyon korkulukları, köprü yapımında, kazan imalatı, hidrolik sistem ve parçalar vb. kullanılmaktadır [10]. Deneysel çalışmada korozyon dayanımı yüksek, kaynak yapılabilirliği iyi, soğuk şekillendirilebilme kabiliyeti yüksek olmasından dolayı T6 ısı işlemi tercih edilmiştir.

1.3. Literatür Araştırması

Hanssen, A.G., ve Lengseth, M. ince cidarlı alüminyum tüplerin köpüklerle doldurulmasının etkileriyle alakalı kapsamlı deneysel çalışmalar yapmış köpük dolgulu alüminyum ekstrüzyon malzemenin yarı statik yükleme koşulu altında eksenel ezme davranışlarını incelemişlerdir [13,14]. Köpüğün duvar ile etkileşiminden dolayı dayanımının arttığı, katlanma uzunluğunun azaldığı ve kırılma direncini önemli ölçüde arttırdığı sonucuna varılmıştır. Benzer deneysel sonuçlar Seitzberger M., ve arkadaşlarının çelik boruları alüminyum köpüklerle takviye ederek yaptığı çalışmalarda da elde edilmiştir [15]. Yukarıda bahsedilen çalışmalar Thornton P.H. [16], Lampinen B.H., Jeryan J.A., [17], Reid S.R. ve arkadaşlarının [18] daha önceden düşük yoğunluklu poliüretan dolgu köpüklerin enerji sönümlemesine katkısını incelemiş oldukları deneysel çalışmaları doğrular niteliktedir.

H.R. Zarei ve M. Kröger'in yapmış olduğu bir çalışmada 6060 serisi ($AlMgSi_{0.5}F_{22}$) kare kesitli alüminyum tüplere farklı yoğunluklarda köpük takviyesi uygulanmıştır [19]. Farklı köpük yoğunluklarıyla oluşturulan deney gruplarına eksenel ezme deneyi yapılarak köpük yoğunluğunun enerji sönümleme kabiliyetine katkısı araştırılmıştır. Köpüğün yoğunluğunun artmasıyla enerji sönümleme kabiliyetinin arttığı, köpük yoğunluğunun 60kg/m^3 'ten 460kg/m^3 'e çıkarılmasıyla enerji sönümleme kabiliyetinin %73,8 arttığı tespit edilmiştir. Köpük yoğunluğunun enerji

sönümleme miktarına katkısı A. Niknejad ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada'da görülmektedir [20].

H.R. Zarei ve M. Kröger'in yapmış olduğu diğer bir çalışmada 6060 serisi kare kesitli alüminyum tüplere bal peteği şeklinde 5052 alüminyum alaşımından oluşan takviye elemanı ile desteklemiş, farklı açılardan gelen kuvvetlerle çarpma testlerine tabi tutmuş, bal peteği şeklindeki takviye elemanın farklı açılardan gelen ani çarpma kuvvetlerine karşı enerji sönümleme kabiliyetleri incelenmiştir [21].

Chen, W. ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [22] alüminyum ekstrüzyon ürünü olan 6063-T7 termik koşusunda imal edilmiş profile alüminyum köpük ve alüminyum peteğin takviye edilmesiyle eğme deformasyon davranışına olan etkisi incelenmiş, yapılan çalışmalarda köpük ile alüminyum yüzeylerin yapıştırılmamış olduğu durumda maksimum eğme momentinde %18 artış, yapıştırılmamış alüminyum petek yapı kullanılan grupta ise %15'lik artış sağlanmıştır. Yapıştırma işlemi uygulandığında ise iyileşme oranı hasar mekanizmasının geciktirilmesi nedeniyle oldukça artmıştır. Alüminyum köpük kullanılan numunede %85 artış, petek yapıda ise %80 mertebelerindedir.

Chen, W. 'nin yapmış olduğu diğer bir çalışmada açık profiller kullanılarak oluşturulan (kaynakla) kapalı tip profillerde 0.27 gr/cm 3 yoğunluktaki alüminyum köpük dolgu malzemesi olarak kullanılmış ve yapılan deneyler sonunda özgül enerji absorbe etme miktarında %14 oranında artış tespit edilmiştir [23]. Aynı profilde orta kısmın kısmi takviye edilmesi durumunda ise artış miktarı %45 mertebelerine ulaşmıştır.

R.D. Hussein ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [24] enerji absorbe etme kabiliyetinin tüp yapının içine yerleştirilen takviyenin yoğunluğunun yanı sıra eksenel yönde uygulanan kuvvetin hızıyla da değişebileceği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada enerji sönümleme kazanımı için en verimli hızın 1,5mm/s olduğu gözlemlenmiştir.

Araçlardaki çarpışma kutularının enerji sönümlemedeki etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, genellikle malzemenin geometrik yapısının etkileri üzerinde durulmuştur. Yamashita M. ve ark. [25], Zhang X. ve Huh H. [26], Nia A.A. ve Hamedani J.H. [27], Zhang X. ve Zhang H. [28] ve Lu G. ve Yu T.'nin [29] yapmış oldukları çalışmalarda eksenel yüklenen metalik tüplerde köşe sayısının artmasıyla enerji sönümleme kabiliyetinin arttığı tespit edilmiştir.

Murat A. ve Hüseyin S. Y.'nin yapmış olduğu çalışmada [30] daire, kare, beşgen ve altıgen kesite sahip çarpışma kutularının içerisine alüminyum esaslı metalik köpük malzeme yerleştirilmiş ve sonlu elemanlar analizleri ile enerji sönümleme kapasitesindeki değişimler incelenmiştir. Çarpışma kutularına köpük malzemesi konulması enerji sönümlemesini 4 kat arttırdığı görülmüştür. Çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen köpük miktarının artması ezilme kuvveti verimini arttırmıştır. Ancak bu durum maksimum deformasyon kuvvetinin de artmasına neden olmuştur. İçi boş beşgen kesitli çarpışma kutusunun 0,45 olan ezilme kuvveti verimi içerisini alüminyum köpük malzeme ile doldurmanın sonucunda 0,68 olmuştur.

Murat Altın'ın farklı bir çalışmasında, çarpışma kutusunun üzerine açılan oyukların çarpışma performansı üzerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir [31]. Çalışmada farklı oyuk genişliklerine sahip çarpışma kutusu tasarımları gerçekleştirilmiştir. Oyukların genişlikleri 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5mm olarak belirlenmiş ve çarpışma kutularının üzerine farklı sayıda açılmıştır. Her bir çarpışma kutusunun et kalınlığı 2 mm olarak alınmıştır. Tasarımları gerçekleştirilen çarpışma kutuları Hypermesh programı ile sonlu elemanlarına ayrılmış, Ls-PrePost programı ile malzeme kartları, kontaklar ve sınır şartları gibi özelliklerin belirlenmiş ve Ls-Dyna ile dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda çarpışma kutularının üzerine oyuk açmanın çarpışma performansı üzerinde olumlu etki gösterdiği tespit edilmiştir.

Duarte I. ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada [32]; herhangi bir takviye kullanılmayan, açık gözeli köpük takviyeli, silikon katıştırılmış açık gözeli köpük

takviyeli, epoksi katıştırılmış açık gözeli köpük takviyeli alüminyum tüplere eksenel ezme deneyleri yapılarak, deformasyon davranışları, sıkışma basınçları ve enerji sönümlene kabiliyetleri yüksek çözünürlüklü video kamera ve kızıl ötesi termal kameralar kullanılarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; silikon katıştırılmış açık gözeli köpük takviyeli alüminyum tüplerin enerji sönümlene kapasitesi, spesifik enerji oranı diğer deney gruplarına göre ciddi derecede artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Sampath V. ve ark. yapmış olduğu çalışmada [33] AA7075 serisi yuvarlak kesitli alüminyum tüplerin takviyesiz ve köpük takviyeli durumlarına farklı hızlarda yanal bükme kuvveti uygulayarak köpük takviyesinin büküm kuvvetine ve enerji sönümlenmeye katkısı incelenmiştir. Yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarında maksimum enerji sönümlene kabiliyetinin deneylerdeki en yüksek hız ile yanal bükme kuvveti uygulanan köpük takviyeli tüplerde görüldüğü tespit edilmiştir.

Balaji, G., ve Annamalai, K.'nin yapmış olduğu çalışmada [34] AA 6063-T5 serisi kare kesitli alüminyum tüplere 200 kN kapasiteli deney cihazıyla 0,015 mm/dk eksenel basma hızıyla farklı takviye elemanlarıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar takviyesiz, yoğunluğu 87kg/m³ olan altıgen petek yapılı alüminyum takviye elemanı ile desteklenmiş ve petek yapılı alüminyum takviye elemanının içine farklı sayılarda karbon fiber yerleştirilerek takviye edilen deney gruplarından oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalarda maksimum enerji sönümlene kabiliyetine sahip grubun altıgen petek yapılı alüminyum takviye elemanının içine 3 adet karbon fiber yerleştirilerek oluşturulan deney grubunda meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu deney grubunun takviyesiz boş alüminyum tüplere göre enerji sönümlene kabiliyetinin %60, spesifik enerji artışının %29 artış gösterdiği tespit edilmiştir.

BÖLÜM 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

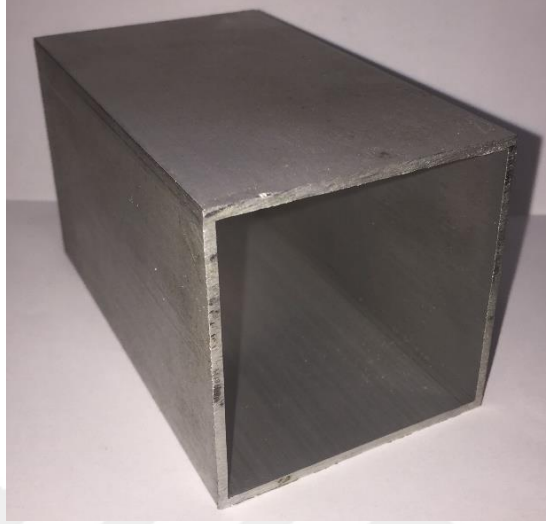
2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

2.1.1. Kare kesitli alüminyum tüplerin hazırlığı

Kalıp tasarımına uygun ölçülerde dış çapı 60x60mm ve 2mm kalınlığında 6063 alüminyum alaşımlı tüpler seçilmiştir. Ancak alüminyum tüplerin üretim şartları göz önünde bulundurulduğunda aynı tüp üzerindeki cidarlar arasında ± 0.1 mm 'ye kadar kalınlık farklılıkları gözlenebilmektedir. Bu kalınlık farklarından kaynaklı değişkenlikleri minimuma indirmek için bütün deney grupları en az 3 tekrarlı olarak yapılacaktır. Yapılan çoklu deneylerin ortalaması alınarak hata minimuma indirgenecektir. Testlerde kullanılacak tüplerin boyutları 106 mm olarak belirlenmiştir. Alüminyum alaşımları farklı termik şartlarında farklı mekanik ve metalografik özellikler gösterdiği için deneylerimizde T0 ve T6 ısıtım işlem şartlarında tüpler kullanılacaktır.

Alüminyum ekstrüzyon presinden çıkan tüpler yaklaşık sıcaklık değerleri 500°C derece civarlarındadır. Ekstrüzyon çıkışında alüminyum profil düşük sertlik değerlerine sahiptir. Bu yumuşak hali T0 kondisyonu olarak belirtilmektedir. Ekstrüzyon üretimi sonrası görmüş olduğu ısıtım işleme göre farklı mekanik özellikler sağlanmaktadır. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan termik kondisyonu T6 dır. Bu termik kondisyonu için ekstrüzyon çıkışında 185 °C sıcaklıkta 5,5 saat bekletilmesi gerekmektedir. Deneylerin %100 kontrol altında yapılması için naberhaym termik fırınlarında 106 mm boyunda kesilmiş parçalar kontrollü olarak ısıtım işleme tabi tutulmuştur. Kullanılan tüplerin görseli Şekil 2.1.'de gösterilmektedir. 6063 alaşımına uygulanan T6 ve T0 ısıtım işleminin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo

2.1. ve Tablo 2.2.'de gösterilmektedir. Alüminyum alaşımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin yer aldığı tablolar, numunelerin satın alındığı ASAŞ Alüminyumdan alınan laboratuvar verileriyle oluşturulmuştur.



Şekil 2.1. 60x60mm ölçülerinde 2mm cidar kalınlığında 6063 alüminyum alaşımlı kutu profil

Tablo 2.1. 6063-T6 Alaşımının mekanik ve fiziksel özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	AA6063- T6
Çekme Mukavemeti (MPa) (min-max)	205-245
Akma Mukavemeti (MPa) (min-max)	170-210
Uzama (%)	12
Elastisite Modülü (GPa)	70
Sertlik Değeri (HB)	75
Yoğunluk (g/cm ³)	2,70

Tablo 2.2. 6063-T0 Alaşımının mekanik ve fiziksel özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	AA6063- T0
Çekme Mukavemeti (MPa)	100
Akma Mukavemeti (MPa)	50
Uzama (%)	26
Elastisite Modülü (GPa)	70
Sertlik Değeri (HB)	25
Yoğunluk (g/cm ³)	2,70

2.1.2. Kalıp tasarımı ve malzeme seçimi

2.1.2.1. Soğuk iş takım çeliği ve ısıtma işlemi

Deneyisel çalışmalarda alüminyum tüplerin iç cidarına bölgesel iz vermek için DIN 1.2767 Soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Yüksek tokluk, aşınma direnci, mekanik özellikleri ve kolay işlenebilirliği sebebi ile tercih edilmiştir. Kullanılan soğuk iş takım çeliği kalın saçların kesme plakalarında, soğuk dövme kalıplarında, para madalyon kalıplarında, çatal, kaşık kalıplarında, kalın saçlar için giyotin ve boy kesme makas bıçaklarında ve geri dönüşüm bıçaklarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

DIN 1.2767 soğuk iş takım çeliğinin kullanım sertliği olan 54 HRC 'ye ulaşması için 850°C sıcaklıkta 2 saat bekletilmiş ve ardından yağ da soğutma prosesi uygulanmıştır. Kalıp çeliği ısıtma işlem sürecine ait görseller Şekil 2.2.'te gösterilmiştir.

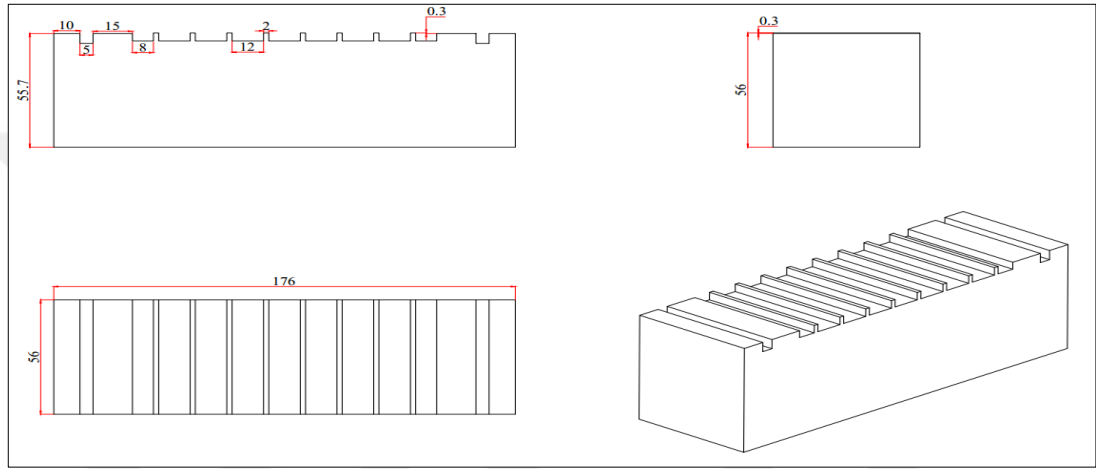


Şekil 2.2. Soğuk iş takım çeliği ısıtma işlem süreci

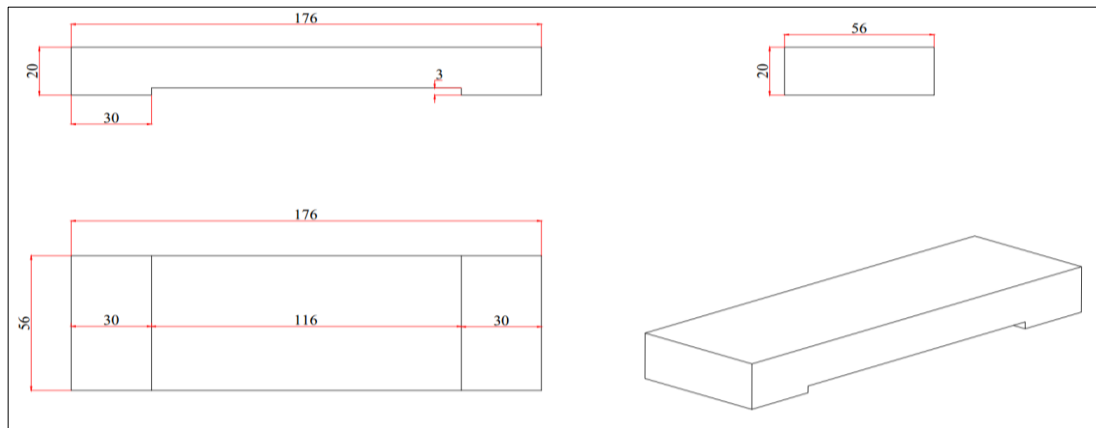
2.1.2.2. Kalıp tasarımı

Dış ölçüleri 60x60 mm, cidar kalınlığı 2 mm olan kare kesitli alüminyum tüplerin cidarlarını içeriden bölgesel olarak ezilebilmesi için kalıp tasarımı yapılmıştır. Kalıptaki ezme aralıkları, Baroutajia A. ve arkadaşlarının alüminyum enerji sönümleyicilerinin aksenal yük altındaki performanslarının teorik ve deneysel yöntemlerle incelendiği çalışma dikkate alınarak belirlenmiştir [35]. Tasarlanan kalıp alt, üst ve orta plaka olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır. Tasarımda orta parça (Şekil 2.3.) alüminyum tüpün cidarının ezilmesi, üst parça (Şekil 2.5.) ise daha düzgün

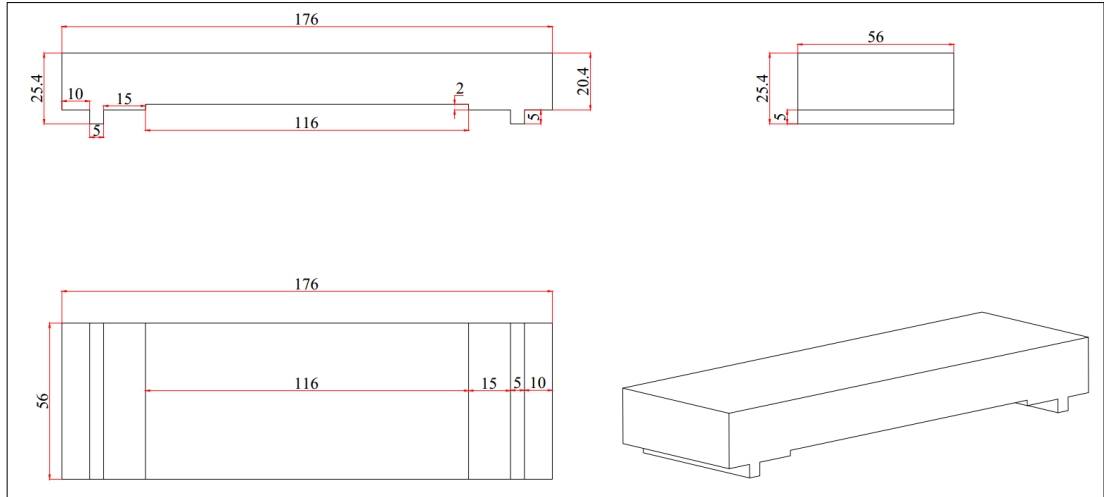
bir ezme elde etmek için kalıbın yataklanmasında kullanılacaktır. Alt parça (Şekil 2.4.) ise ezme işlemindeki yüksek kuvvetler nedeniyle kalıbın esnemesi ve ezilen tüpün ezme işlemi sırasında genişleyip formunu kaybetmemesi için kullanılması amaçlanmıştır. Bu kalıp tasarımında alüminyum tüplerin iç yüzeyi eşit miktarda ezilmesi ve rijit yapısını koruması amaçlanmıştır. Tasarlanan kalıbın 3 boyutlu görüntüsü ve alüminyum profil yerleştirildikten sonraki montaj görünümü Şekil 2.6.'da verilmiştir.



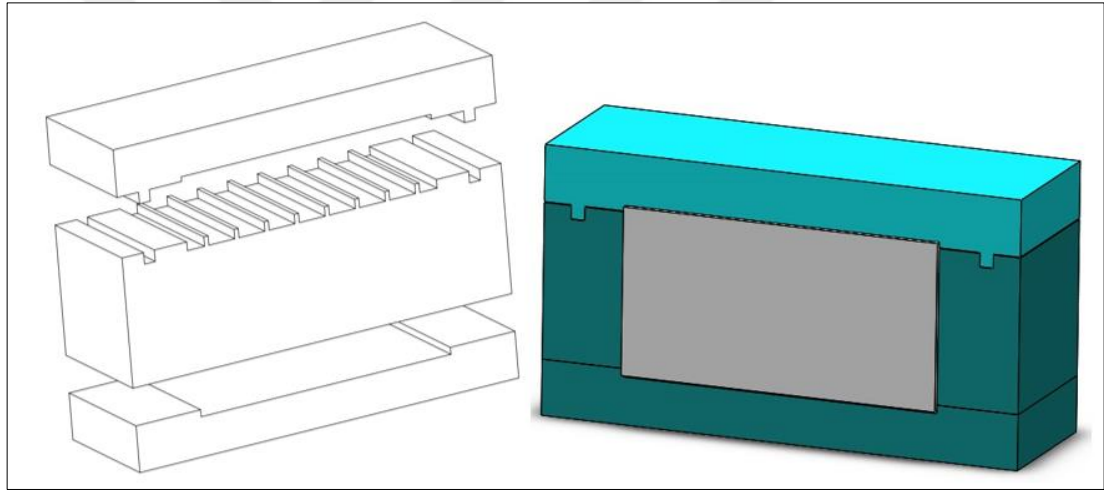
Şekil 2.3. İçeriden ezme kalıbı orta parçasının tasarımına ait 2D ve 3D görünüm



Şekil 2.4. İçeriden ezme kalıbı alt parçasının tasarımına ait 2D ve 3D görünümü



Şekil 2.5. İçeriden ezme kalıbı üst parçasının tasarımına ait 2D ve 3D görünüm

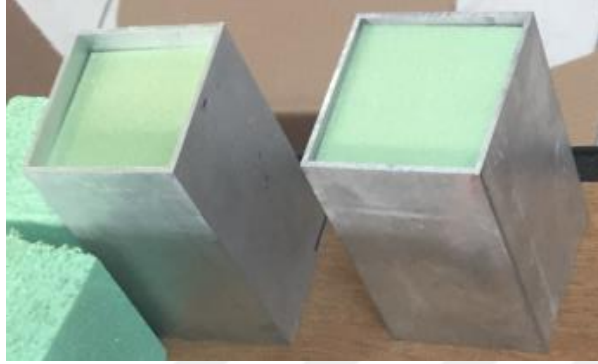


Şekil 2.6. İçeriden ezme kalıbının 3D görünümü ve alüminyum tüpün kalıba yerleştirildikten sonraki montaj görünümü

2.2. PVC Köpük

AIREX C70, mükemmel sertlik ve mukavemet ağırlık oranlarını üstün tokluk ile birleştiren, kapalı hücreli, çapraz bağlı bir polimer köpüğüdür. Bu ürün kırılabilir su emişi ve kimyasallara karşı mükemmel bir dirence sahiptir. İnce hücre yapısı mükemmel bir yapışma yüzeyi sağlar. PCV köpük üretim işlemlerine olan uyumluluğu sebebiyle statik ve dinamik yüklerin olduğu sandviç yapılarda tercih sebebidir [36]. PVC köpüğün kare kesitli alüminyum tüpün içerisine montaj yapılmış

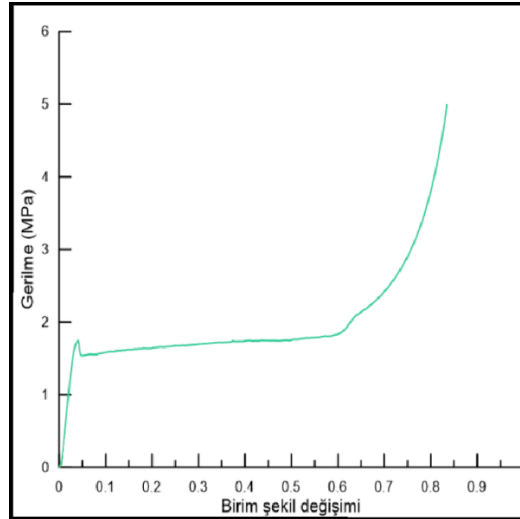
görseli Şekil 2.7.'de, 80kg/m^3 yoğunluğundaki köpüğün basma zorlanması altındaki gerilme birim şekil değişim eğrisi Şekil 2.8.'de, PVC köpüğe ait teknik özellikler Tablo 2.3.'de verilmiştir.



Şekil 2.7. PVC köpüğün alüminyum tüpe montajının görünümü

Tablo 2.3. AIREX C70.75 PVC Köpük [36]

Teknik Özellikler	Birim	Değer
Yoğunluk	kg/m^3	80
Basma Dayanımı	N/mm^2	2.0
Basma Modülü	N/mm^2	104
Çekme Dayanımı	N/mm^2	2.0
Çekme Modülü	N/mm^2	66
Kayma Dayanımı	N/mm^2	1.2
Kayma Modülü	N/mm^2	30
Çekme-Sıyırma Uzaması	%	18
Oda sıcaklığındaki Isı iletimi	W/m.K	0.033
Levha Kalınlığı	mm	50
Levha Rengi	-	Yeşil



Şekil 2.8. Deneylerde kullanılan PVC köpüğün basma zorlanması altındaki gerilme birim şekil değişim eğrisi [37]

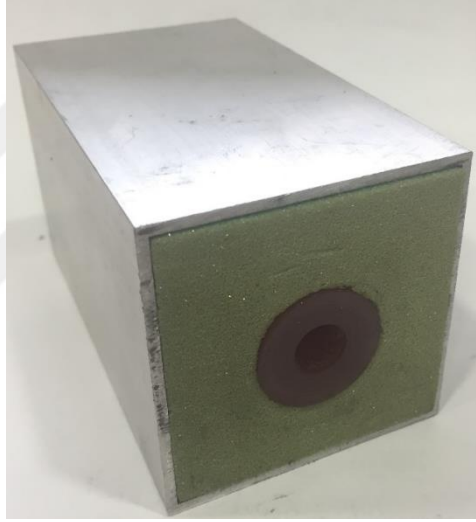
2.3. Poliüretan Kalıp Yayları (Vulkolon çubukları)

Birçok kullanım sahası için üstün kalite fiziksel ve kimyasal özelliklerinin birleşimi ile birlikte vulkolon çubukları çok çeşitli uygulamalarda kullanılır. Vulkolon'un yetenekleri, her biri düzenlenebilecek olan üç farklı şekilde üretilmesi gerçeği ile desteklenir. Bu şekilde bir Vulkolon elastomerinin özellik profili, herhangi bir uygulamanın özel gereksinimlerini karşılamak üzere alışkanlıklara göre ayarlanabilir. Kesme ve sıvama kalıplarında kullanılan 80 – 90 shore standart üretim şişirme takozu ve vibrasyon takozu konusunda aşınmaya dayanıklı, yaylanma ve titreşim özelliği yüksektir. İstenilen ebat ve sertlikte üretim yapılır [38].

Deney gruplarında 25 mm dış çapında, Ø10.5 mm deliği bulunan poliüretan kalıp yayları destekleyici malzeme olarak kullanılmıştır. 80 shore sertliğe sahip vulkolon yayları genellikle sarı renkte üretilirler, bu sertliğe sahip yayların boydaki esneme payı %30 çaptaki esneme payı ise %33 seviyelerindedir. 90 shore sertliğe sahip olan vulkolon yayları genellikle kırmızı renktedirler. Bu yayların ise boydaki esneme payları %25 çaptaki esneme payları ise %31 seviyelerindedir [38]. Farklı sertlikteki vulkolon çubukların görseli Şekil 2.9.'da verilmiştir. Deneyisel çalışmalardan kullanılacak olan kare kesitli alüminyum tüplere vulkolon yaylarının montaj görüntüsü Şekil 2.10.'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Farklı sertlikteki vulkolon çubukları



Şekil 2.10. PVC köpük ve vulkolon çubuk takviyeli kare kesitli alüminyum numuneye ait görüntü

2.4. Kullanılan Cihazlar

Çalışmalar kapsamında alüminyum ekstrüzyon profillerinin ısıtılma işlemi için ısıtılma işlem fırını, iç cidardan iz verme işlemleri sırasında 300 kN'luk hidrolik pres ve eksenel ezme deneyi sırasında enerji değişim değerlerinin okunacağı 250 kN'luk hidrolik pres kullanılacaktır.

2.4.1. Isıl işlem fırını

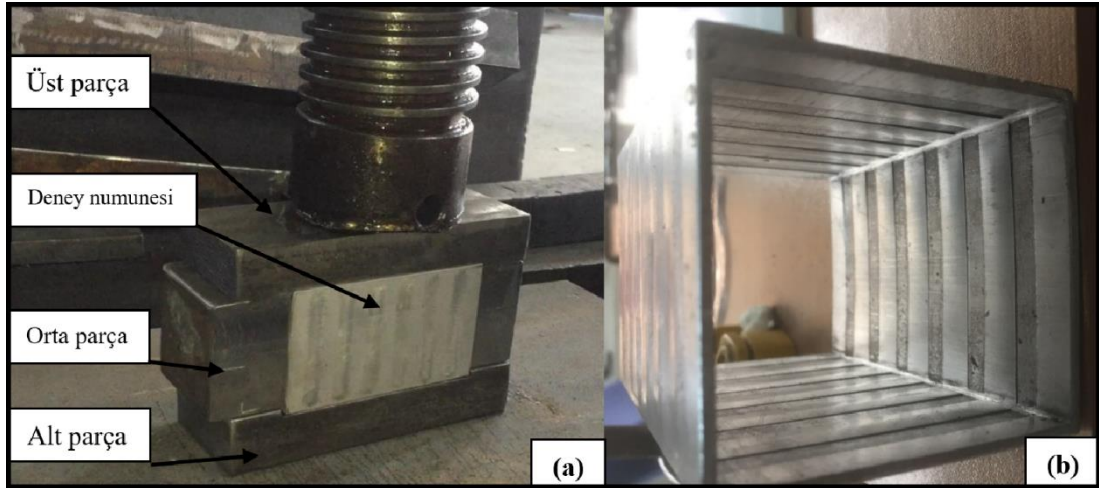
Deney planımızda istenilen mekanik özellikteki kare kesitli alüminyum tüplerin elde edilmesi için 1300 °C sıcaklığa ihtiyaç duyulacaktır. Nabetherm ısıtım fırını üç taraftan ısı verebilme özelliği ile sıcaklık artışını stabil olarak bu derecelere kadar sağlamaktadır. Kullanılacak ısıtım fırınının görseli Şekil 2.11.'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Numunelerin sertleştirilmesinde kullanılan ısıtım fırını

2.4.2. İç cidar ezme işleminde kullanılacak hidrolik pres

Profillerin her kenarının eşit olarak ezilebilmesi daha sonra uygulanacak eksenel ezme deneyinde sağlıklı sonuç alabilmemiz için hayati önem taşımaktadır. İç cidar ezme işlemi için kullanılan 300 kN'luk hidrolik pres manuel olduğundan eşit miktarda ezme gereksinimini zorlaştırıyor. Kalıp, iç cidar ezme işleminde bu durumdan kaynaklı hataların önüne geçilebilmesi için tasarlanmıştır. Şekil 2.12.'de kalıbın işlem sırasındaki montaj görünümü (a), iç cidar ezme işlemi sonucu kare kesitli alüminyumun görüntüsü (b) verilmiştir.



Şekil 2.12. Cedar ezme işlemi ve içerden cedar ezme işlemi uygulanmış tüp yapıya ait görüntüler

2.4.3. Eksenel ezme deneylerinde kullanılacak hidrolik pres

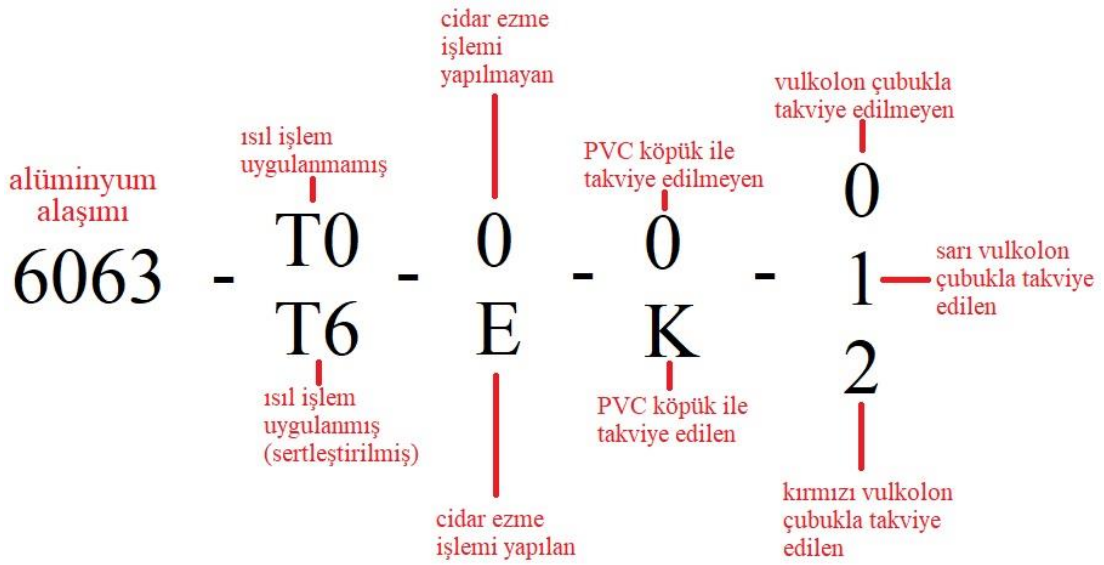
Deney planına uygun olarak hazırlanan iç cidarları ezilmiş, iç cidarları ezilmemiş, PVC takviyeli ve vulkolon çubuk takviyeli kare kesitli alüminyum tüpler Sakarya Üniversitesi makine mühendisliği bölümü labrotuarında bulunan, 250 kN eksenel basma gücüne sahip hidrolik pres ile eksenel ezme deneyleri yapılmış ve birim zamanda uygulanan kuvvet bilgisayardan veri olarak alınmıştır. Kullanılan hidrolik pres görseli Şekil 2.13.'te verilmiştir.



Şekil 2.13. Eksenel ezme deneyinde kullanılan hidrolik pres

BÖLÜM 3. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında belirlenen sistematığe uygun olarak 36 adet deney gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ısıtıl işlem uygulanmamış ve ısıtıl işlem uygulanmış kare kesitli alüminyum tüplerin PVC köpük, poliüretan kalıp yayı (vulkolon çubuk) ile takviye edilmiş ve edilmemiş durumlarına ait deney sonuçları irdelenmiştir. Deney grup isimlerinin kısaltılması ve kullanılan takviyelerin grup isimlerinden anlaşılabilmesi için belirli bir sistematik geliştirilmiştir. Bu sistematik Şekil 3.1.'de anlatılmıştır.

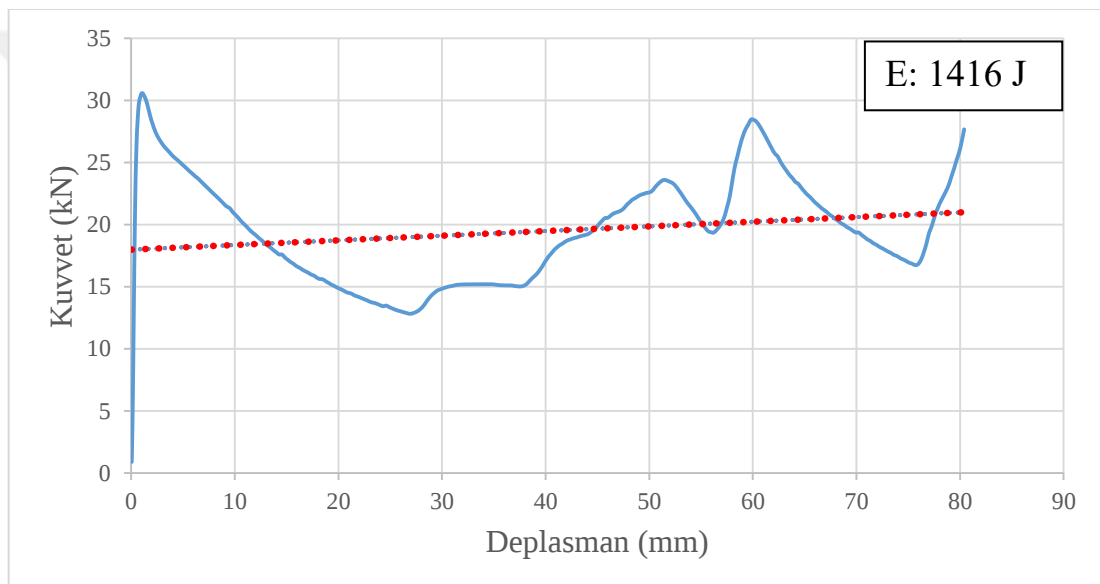


Şekil 3.1. Deney grubu isimlerinin yazım sistematığı

3.1. 6063-T0 Alüminyum Tüplerin Eksenel Ezme Deneyi Sonuçları

Isıl işlem uygulanmayan (T0) kare kesitli alüminyum tüplerden oluşturulan deneylerden ilk olarak 6063-T0-0-0-0 deney grubunun eksenel ezme deneyleri yapılmıştır. Hiçbir takviye uygulanmadan oluşturulan bu deney grubuna ait eksenel ezme deneyinin kuvvet deplasman grafiği Şekil 3.2.'de verilmiştir. Şekilde görüleceği

üzere ilk katlanmanın yaklaşık 31 kN değerinde başlayıp 12 kN mertebelerinde tamamlandığı ve katlanma mesafesinin aksenal yönde yaklaşık 28 mm olduğu görülmüştür. Bundan sonraki katlanmaların daha düşük enerji aralıklarında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Isıl işlem uygulanmamış ve hiçbir takviye kuvvet ile desteklenmeden oluşturulan deney grubunda kare kesitli alüminyum tüplerin ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü Şekil 3.3.'de verilmiştir. Şekil 3.3.'de de görüldüğü gibi deney grubu alüminyum tüplerde herhangi bir yırtılma ve çatlak gözlenmemiştir. 6063-T0-0-0-0 deney grubu kare kesitli alüminyum tüplere yapılan aksenal ezme deneylerinde sönmölenen enerjinin ortalama 1416 Joule (J) olduğu görülmüştür.

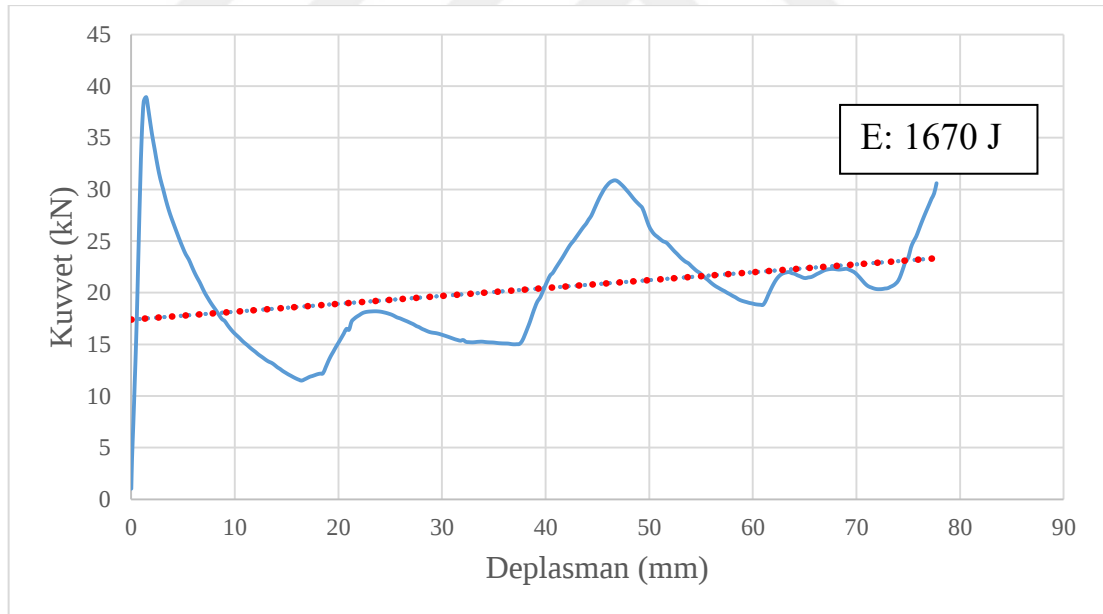


Şekil 3.2. 6063-T0-0-0-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 3.3. 6063-T0-0-0-0 tüpün aksel el ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

Bir önceki deney grubuna ait kare kesitli alüminyum tüplere iç cidardan ezme işlemi uygulanarak yeni deney grubu oluşturulmuştur. 6063-T0-E-0-0 deney grubundaki kare kesitli alüminyum tüplere ait eksenel ezme deneyinin kuvvet-deplasman grafiği Şekil 3.4.'te verilmiştir. Yapılan iç cidar ezme işlemi ile ilk katlanmanın 38 kN mertebelerinde başladığı, 6063-T0-0-0-0 deney grubu alüminyum tüplere göre ilk katlanmanın ortalama %23 lük bir artış gösterdiği, absorbe edilen toplam enerjide iç cidar ezme işlemi sonrasında ortalama %18'lik artış olduğu 3. katlanmanın 60 mm den 48 mm ye düştüğü görülmüştür. Ezme işleminin bir anlamda, kat oluşum hızını arttırdığı Şekil 3.4.'de de yorumlanabilir. Genel olarak numunelerde çatlak oluşumu ve yırtılma gözlenmemiştir. Bu deney grubuna ait numunelerin ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü Şekil 3.5.'te verilmiştir. 6063-T0-E-0-0 deney grubu kare kesitli alüminyum tüplere ait eksenel ezme deneyinde sönümlenen enerji 1670 J olduğu görülmüştür. Malzemelerin homojen deforme edilmesinin önemli bir etken olduğu yapılan pilot deneylerde anlaşılmıştır.



Şekil 3.4. 6063-T0-E-0-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği

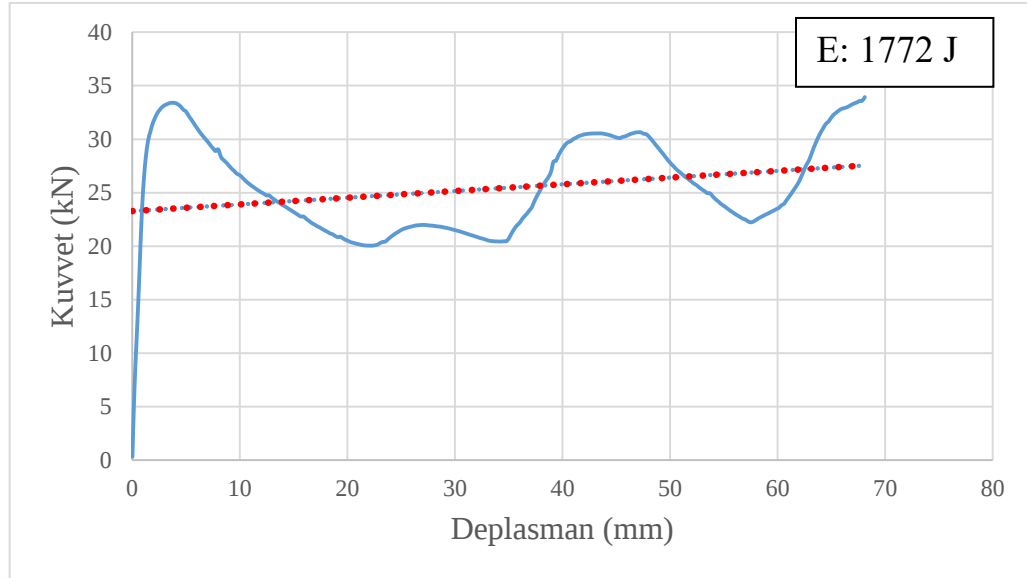


Şekil 3.5. 6063-T0-E-0-0 tüpün eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

Üçüncü olarak PVC köpük ile takviye edilen deney grubuna eksenel ezme deneyleri yapılmıştır. 6063-T0-0-K-0 olarak adlandırılan bu grubun eksenel ezme deneyine ait kuvvet-deplasman grafiği Şekil 3.6.'te verilmiştir. Yapılan PVC köpük takviyesi işlemi ile ilk katlanmanın 33 kN mertebelerinde başladığı görülmüştür. Absorbe edilen toplam enerjide PVC köpük (80kg/m^3) takviyesi ile %25'lik artış olduğu, PVC köpük takviyesinin iç cidar ezmeye nazaran daha fazla enerji absorbe ettiği gözlemlenmiştir.

Benzer sonuçlar farklı malzeme ve geometrideki numunelerde yapılan çalışmalarda da gözlemlenmiştir. H.R. Zarei ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [19] 55 mm dış ölçüye, 2,13 mm kalınlığa sahip 6060 serisi alüminyum tüplerin içi 60kg/m^3 PVC köpük ile doldurulduğunda yapılan eksenel ezme deneyi sonrası enerji sönmeme kabiliyetinin %17,31 arttığı sonucuna varmışlardır.

6063-T0-0-K-0 deney grubu kare kesitli alüminyum tüplere yapılan eksenel ezme deneyinde sönmelenen enerji ortalama 1772 J olduğu görülmüştür. Eksenel ezme deneyi sonrası 6063-T0-0-K-0 deney grubuna ait bazı numunelerin deformasyon görünümü Şekil 3.7.'de verilmiştir.



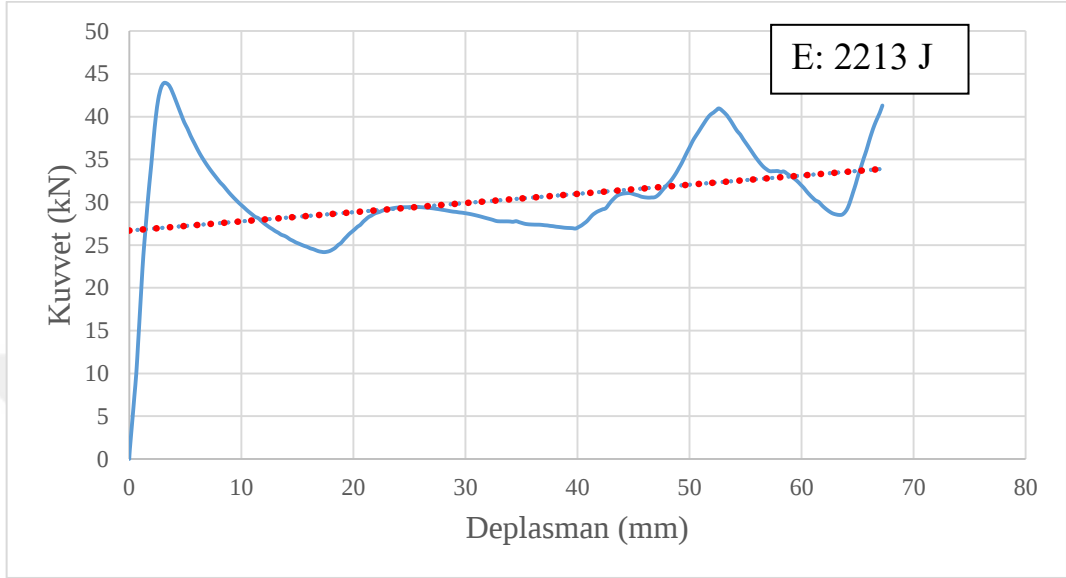
Şekil 3.6. 6063-T0-0-K-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği



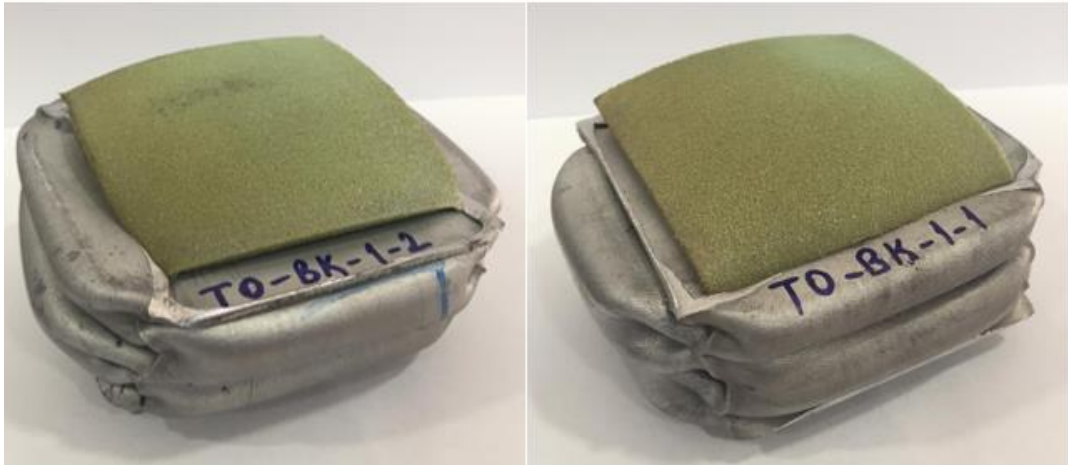
Şekil 3.7. 6063-T0-0-K-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

Isıl işlem yapılmayan kare kesitli alüminyum tüplerde son olarak 6063-T0-E-K-0 deney grubu incelenmiştir. Hem iç cidardan ezme hemde PVC köpük takviyesi kullanılan bu deney grubuna ait eksenel ezme deneyinin kuvvet-deplasman grafiği Şekil 3.8.'de verilmiştir. Bu deney grubunda ilk katlanmanın diğer deney gruplarına göre çok daha yüksek kuvvetlerde olduğu ve yaklaşık 43 kN mertebelerinde başladığı görülmüştür. 6063-T0-0-0-0 deney grubu ile karşılaştırıldığında ilk katlanma kuvvetinin %39 arttığı, 2. ve 3. katlanmaların da diğer deney gruplarına göre daha yüksek seviyelerde seyrettiği görülmüştür. Yapılan eksenel ezme deneyleri sonrasında sönmölenen ortalama enerjinin 2213 J olduğu görülmüştür.

Şekil 3.9.'da deney grubuna ait bazı numunelerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü verilmiştir. Yapılan deneyler sonrasında incelenen deney grubu numunelerinde herhangi bir yırtık veya çatlağa rastlanmamıştır.

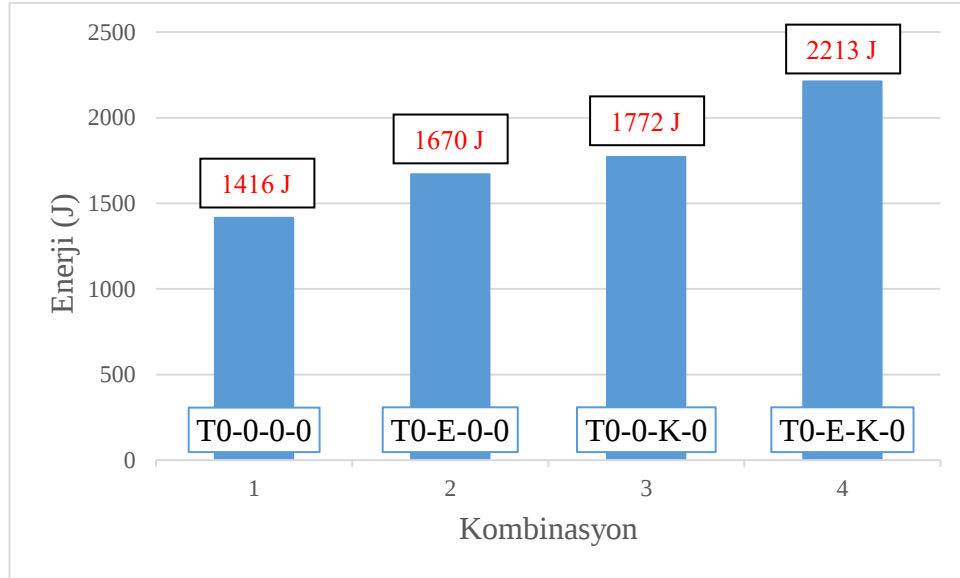


Şekil 3.8. 6063-T0-E-K-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği



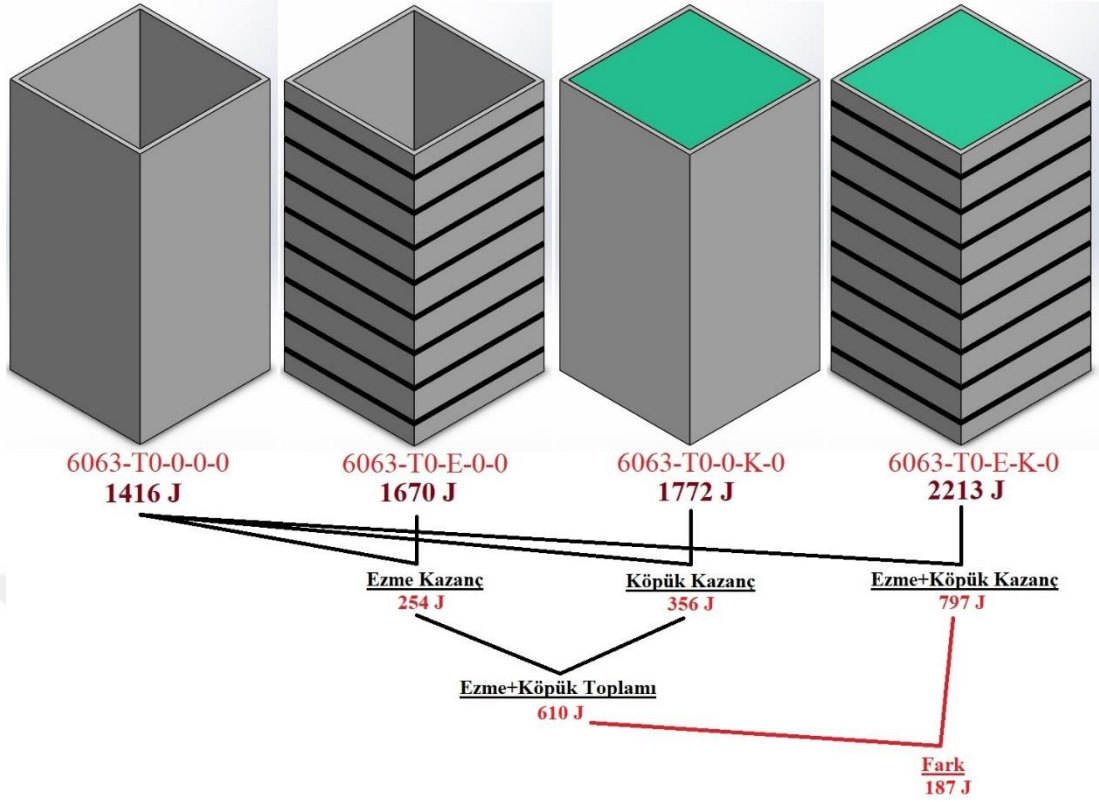
Şekil 3.9. 6063-T0-E-K-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

6063-T0 grubu kare kesitli alüminyum tüplerin iç cidardan ezme işlemi, PVC köpük takviyesi ve her iki işlemin beraber yapıldığı durumlarda sönmmlenen enerji miktarlarının karşılaştırılması Şekil 3.10.'da verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere T0 grubu tüplerde köpük takviyesinin iç cidardan ezme işlemine göre enerji sönmmlleme kabiliyeti olarak daha etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 3.10. 6063-T0 grubu alüminyum tüplerin iç cidardan ezme işlemi ve PVC köpük takviyesiyle sönümlenen enerjilerin karşılaştırılması

Şekil 3.11.'de 6063-T0 deney grubu alüminyum tüplerin belirtilen durumlardaki absorbe ettikleri enerji miktarları ve uygulanan takviye ile oluşan enerji kazançları gösterilmiştir. Şekilde'de görüldüğü üzere 6063-T0 grubu tüplerde iç cidardan ezme işleminin enerji sönümlenmesine katkısı 254 J, PVC köpük takviyesinin enerji sönümlenmesine katkısı 356 J'dür. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda matematiksel olarak iki takviyenin aynı anda yapılmasıyla enerji sönümlenmesi artışının 610 J olması beklenebilir. Fakat iki takviyenin aynı anda yapıldığı deney grubunda enerji kazancının 797 J olduğu gözlenmiştir. Bu durum 6063-T0-E-K-0 deney grubunda ezilen bölgelerle PVC köpüğün etkileşime girmesiyle, köpüğün düz yüzeye nazaran ezilen bölgelere daha fazla tutunması durumuyla açıklanabilir. Arada gözlemlenen 187 J'lük enerji farkı bu şekilde açıklanabilir.

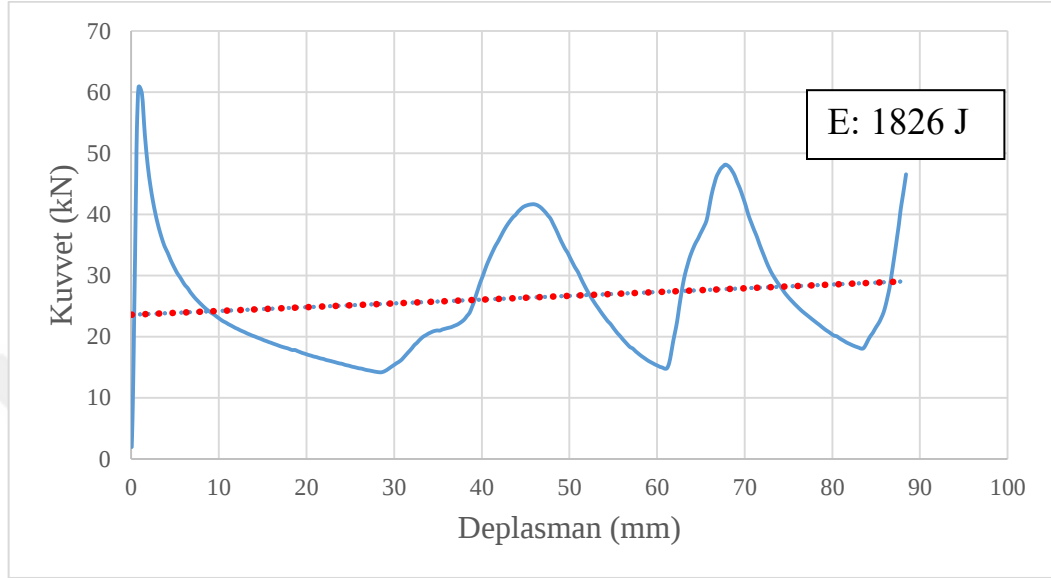


Şekil 3.11. 6063-T0 grubu tüplerde uygulanan takviyelerin enerji kazanımları

3.2. 6063-T6 Alüminyum Tüplerin Eksenel Ezme Deneyi Sonuçları

Bu deney grubu ile birlikte ısıtıl işlem uygulanarak sertleştirilmiş alüminyum tüplerin (T6) eksenel yük altında absorbe ettiği enerjiler değerlendirilmiştir. İlk deney grubu olarak hiçbir takviye kuvveti kullanılmayan 6063-T6-0-0-0 tüplerin eksenel ezme deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.12.'de 6063-T6-0-0 alüminyum tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Takviye kullanılmayan T0 grubu tüplere göre T6 grubu tüplerinde ilk katlanma noktasının yaklaşık %97 arttığı, enerji sönümleme kabiliyetinin %29 arttığı, 6063-T6-0-0 alüminyum tüplere yapılan eksenel ezme deneyinde sönümlenen enerji 1826 J olduğu görülmüştür. Sadece ısıtıl işlem yapıp başka takviyeler olmadan oluşturulan bu deney grubuna ait bazı numunelerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünüşleri Şekil 3.13.'te verilmiştir. Numunelerde herhangi bir yırtılmaya rastlanılmamıştır. Tüp malzemelerin görmüş olduğu yapay yaşlandırma işlemi, mekanik özelliklerde önemli değişikliklere sebep olduğu Tablo 2.1.'de daha önce verilmişti. Dolayısıyla tüp cidarının plastik olarak

katlanması temel olarak malzemenin akma dayanımıyla doğrudan ilişkisi olduğundan, bu grup numunelerin nispi olarak daha fazla enerji absorbe etmesi beklenen bir durumdur.



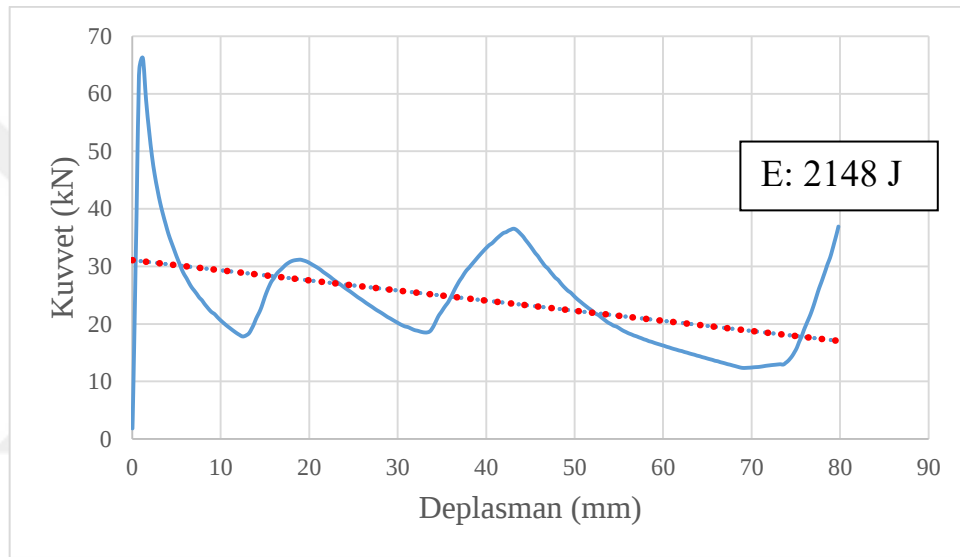
Şekil 3.12. 6063-T6-0-0-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 3.13. 6063-T6-0-0-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

Isıl işlem yapılmayan deney gruplarında olduğu gibi 6063-T6 grubu kare kesitli alüminyum tüplerde de ikinci deney grubu tüplerin iç cidarlarının ezildiği deney grubudur. 6063-T6-E-0-0 kare kesitli alüminyum tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği Şekil 3.14.'de verilmiştir. Yapılan iç cidar ezme işlemi

sonrası 3. katlanmanın 68 mm den 43 mm'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Ezme işleminin bu etkisi bir önceki deney grubunda da gözlemlenmişti. 6063-T6-0-0 alüminyum tüplere iç cidardan ezme işlemi sonrasında yapılan eksenel ezme deneyinde sönmölenen enerji 2148 J olduğu görölmüştür. 6063-T6-E-0 deney grubuna ait bazı numunelerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümleri Şekil 3.15.'de verilmiştir. Genel olarak diğör deney gruplarında da gözlemlediğimiz gibi bu deney grubunda da çatlak ve yırtılmalar gözlenmemiştir.



Şekil 3.14. 6063-T6-E-0-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiğı

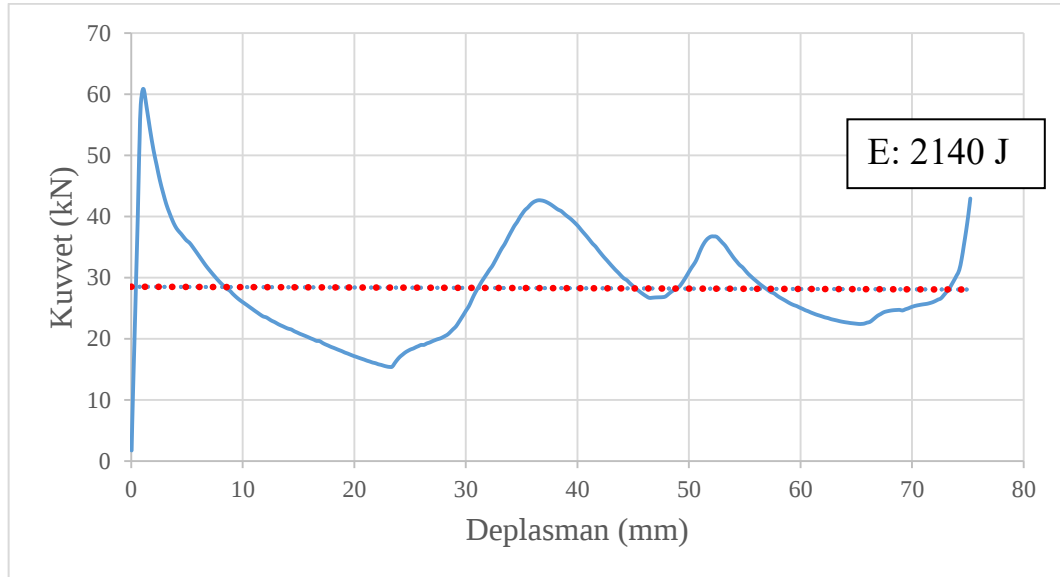


Şekil 3.15. 6063-T6-E-0-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümleri

6063-T6-0-0 alüminyum tüplere sadece PVC köpük takviye edildiğindeki oluşan yeni deney grubu; 6063-T6-0-K-0 alüminyum tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet deplasman grafiği Şekil 3.16.'da verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi PVC köpük takviyesinin ilk katlanma kuvvetine etkisi yok denecek kadar az, enerji sönümlene kabiliyetine etkisi ortalama %17'dir. Bu durumu Şekil 3.12. ve Şekil 3.16. karşılaştırıldığında katlanma mesafelerinden ve katlanma noktalarındaki kuvvet değerlerini gözlemleyerek değerlendirebiliriz. PVC köpük takviyesinin enerji artışını sağladığını gözlemlediğimiz deneylerimizde, köpük yoğunluğu artırılarak bu oran daha da artırılabilir.

A. Niknejad ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada [20] köpük yoğunluğunun artırılmasıyla sönümlenen enerji oranının önemli ölçülerde artışlara sebep olduğu gözlemlenmiştir.

PVC köpük takviyesi sonrasında yapılan eksenel ezme deneyinde sönümlenen enerjinin 2140 J olduğu görülmüştür. 6063-T6-0-K-0 grubu tüplere ait bazı numunelerin eksenel ezme sonrası deformasyon görünümü Şekil 3.17.'de verilmiştir.

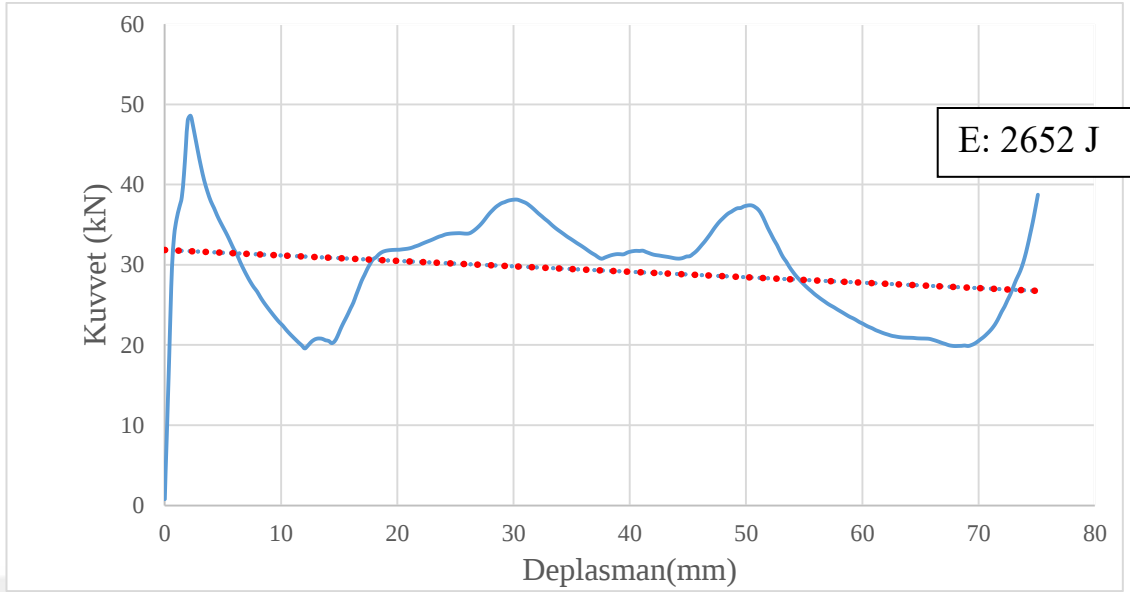


Şekil 3.16. 6063-T6-0-K-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 3.17. 6063-T6-0-K-0-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

İç cidardan ezme işlemi ve PVC köpük takviyesi ile destelenen 6063-T6-E-K-0 grubu alüminyum tüplere ait kuvvet deplasman grafiği Şekil 3.18.'de verilmiştir. Daha önceki deney gruplarında iç cidardan ezme işleminin katlanma mesafesini kısalttığını gözlemlemiştik. Aynı etki bu deney grubunda da azda olsa görülmektedir. Eksenel ezme işlemi uygulanmış, PVC köpük ile takviye edilmiş numunelerde, yükün kaldırılmasıyla köpük parçanın elastik toparlanma neticesinde bir miktar tüpün dışına yönlendiği Şekil 3.19.'da görülmüştür. Alüminyum tüpte herhangi bir çatlak oluşumuna ve yırtılmaya rastlanmamıştır. 6063-T6-E-K-0 grubu kare kesitli alüminyum tüplerde sönümlenen ortalama enerji miktarı 2652 J'dür. İç cidar ezme işlemi ve PVC köpük takviyesinin enerji sönümlemeye katkısı %45 civarında olduğu deney sonuçlarında görülmüştür.

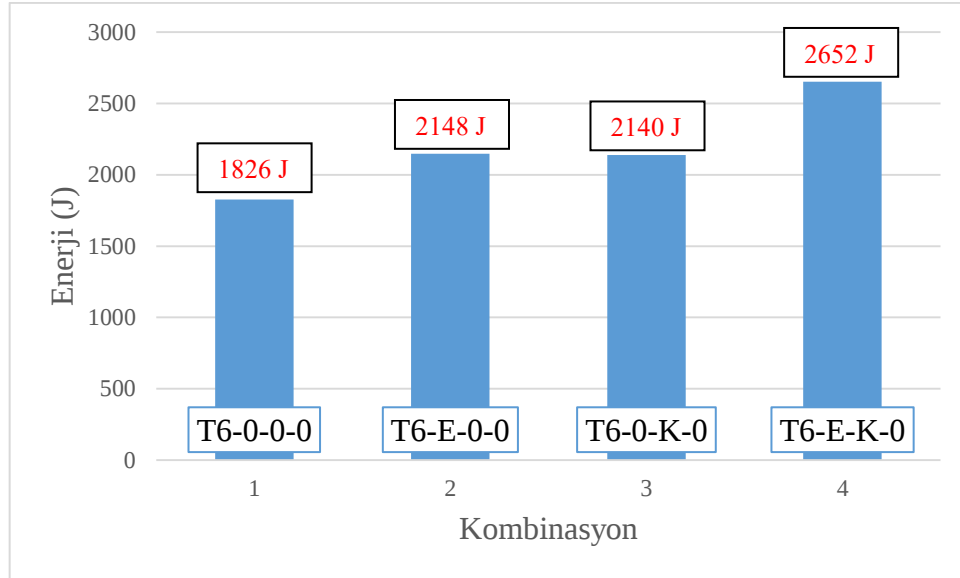


Şekil 3.18. 6063-T6-E-K-0 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği



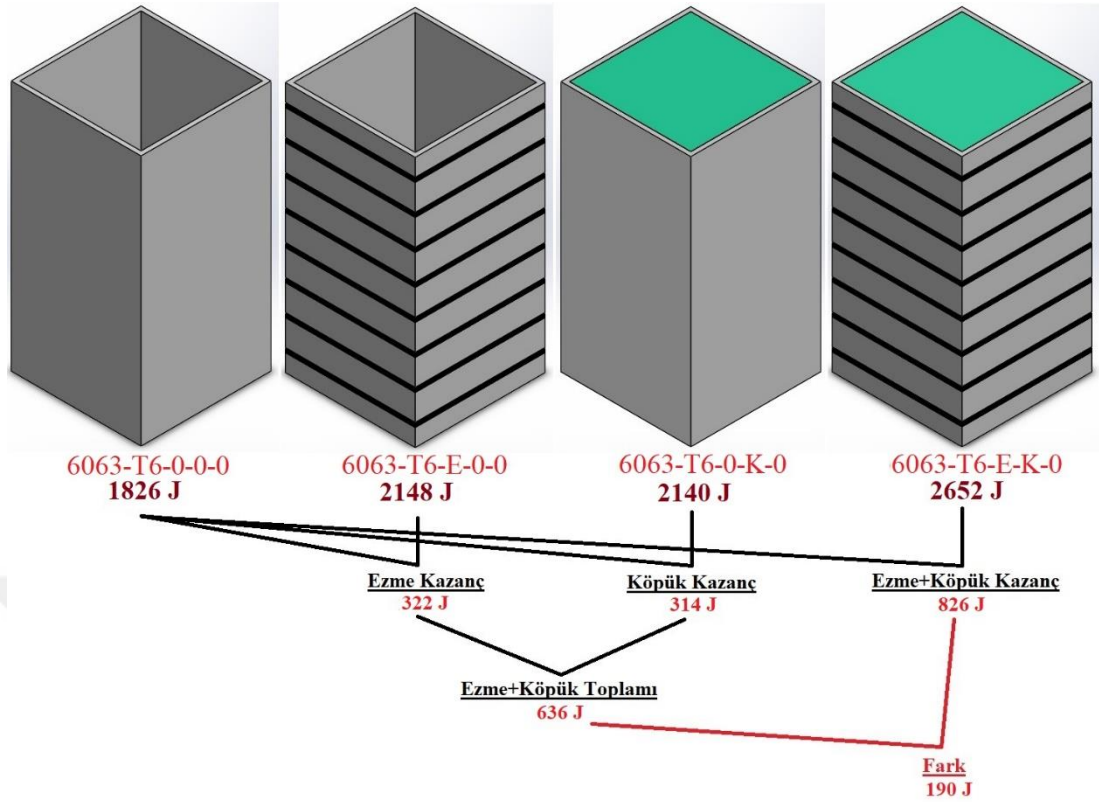
Şekil 3.19. 6063-T6-E-K-0 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

6063-T6 grubu kare kesitli alüminyum tüplerin iç cidardan ezme işlemi, PVC köpük takviyesi ve her iki işlemin beraber yapıldığı durumlarda sönmölenen enerji miktarlarının karşılaştırılması Şekil 3.20.'de verilmiştir.



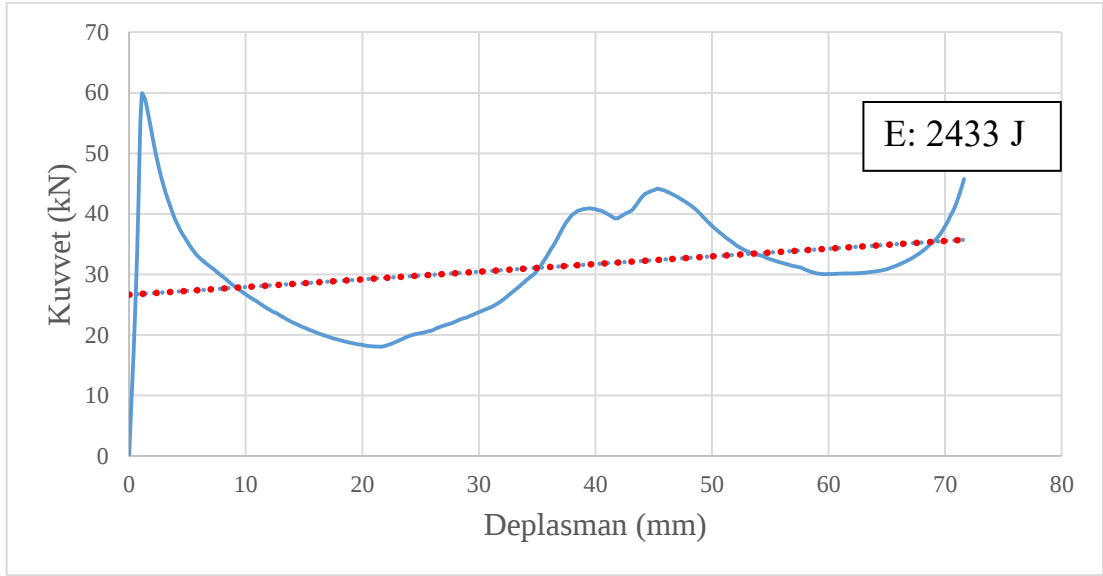
Şekil 3.20. 6063-T6 grubu alüminyum tüplerin iç cidardan ezme ve PVC köpük takviyesiyle absorbe edilen enerjilerin karşılaştırılması

6063-T6 deney grubundaki bazı takviyelerin enerji kazanımları Şekil 3.21.'de verilmiştir. Takviyelerin ayrı ayrı oluşturdukları enerji kazanımlarının matematiksel olarak oluşturduğu toplam enerji kazanımıyla deneysel olarak oluşturduğu enerji kazanımları arasındaki fark burada da görülmektedir. 6063-T6 deney gruplarındaki bu farkta köpüğün düz cidar ile bölgesel ezmeler bulunan cidar arasındaki etkileşim farkından kaynaklanmaktadır. T0 grubu tüplerde PVC köpük takviyesinin enerji sönmleme kabiliyetine etkisi %25 iken T6 grubu tüplerde %17 olduğu, iç cidar ezme işleminin iki deney grubunda da yaklaşık %18 lik bir iyileşme sağladığı görülmüştür. Deney sonuçlarında da görüldüğü üzere kare kesitli alüminyum tüplerin sertliği arttıkça PVC köpük takviyesinin enerji sönmlemedeki etkisi azalmaktadır. Aynı şey iç cidar ezme işlemi için söylenemez. İç cidar ezme işleminin etkisi numunelerin sertliği ile değişmemektedir.

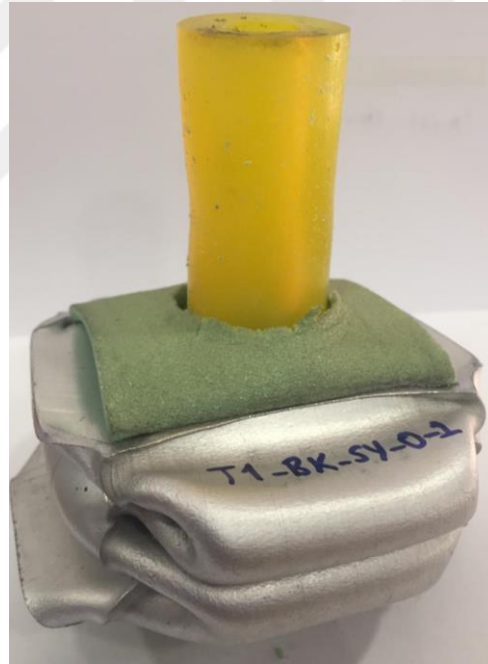


Şekil 3.21. 6063-T6 grubu tüplerde uygulanan takviyelerin enerji kazanımları

Diğer bir deney grubu 6063-T6-0-0-0 alüminyum tüplere PVC köpük ve 80 shore sertliğinde poliüretan kalıp yayı takviyesi ile oluşturulmuştur. 6063-T6-0-K-1 olarak adlandırılan bu gruba ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deformasyon grafiği Şekil 3.22.'de verilmiştir. Poliüretan kalıp yayının katlanma davranışında düzensizliğe sebep olduğu grafik noktalarındaki kuvvet pik noktalarına bakarak görülebilir. Kalıp yayı ile birlikte katlanma kuvvetlerinde çok büyük değişiklikler olmazken toplam enerji sönümleme kabiliyetinin arttığı katlanmalar arası enerji seviyesinin yüksek seviyelerde olmasıyla açıklanabilir. 6063-T6-0-K-0 deney grubuna sadece 80 shore sertliğinde poliüretan kalıp yayı eklendiğinde oluşturulan bu deney grubunda (6063-T6-0-K-1) enerji sönümleme kabiliyetinin %14 artarak 2433 J olduğu görülmüştür. 6063-T6-0-K-1 deney grubuna ait eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü Şekil 3.23.'de verilmiştir.



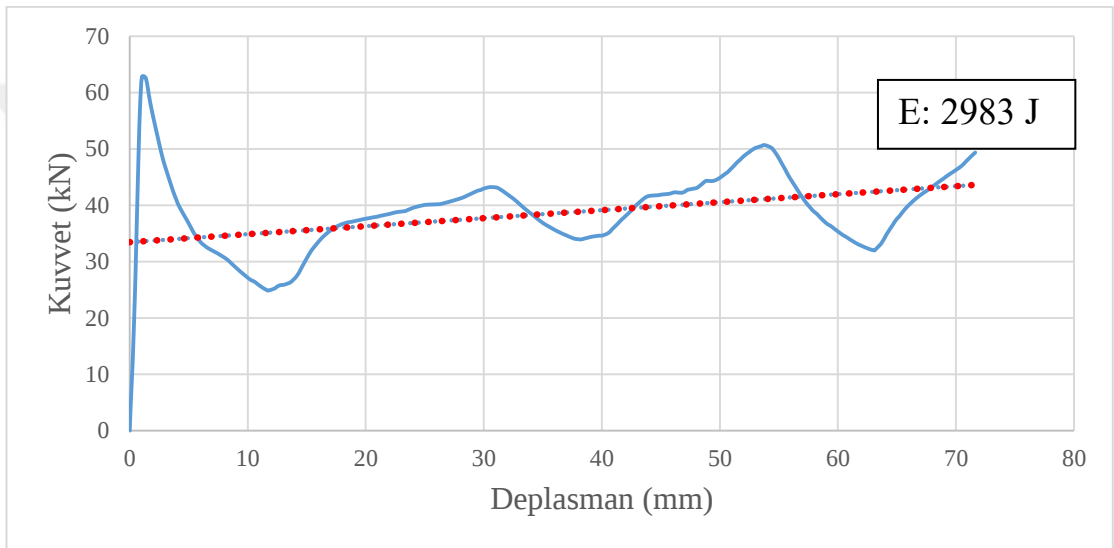
Şekil 3.22. 6063-T6-0-K-1 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 3.23. 6063-T6-0-K-1 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

6063-T6-0-K-1 deney grubuna iç cidardan ezme takviyesinde eklenmesiyle oluşturulan yeni deney grubu; 6063-T6-E-K-1'in eksenel ezme deneyi sonrası kuvvet deplasman grafiği Şekil 3.24.'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere katlanmalar arasındaki kuvvet geçişleri katlanma noktalarına yakın seviyelerdedir. Şekil 3.25.'de eksenel eğilme deneyi sonrası deformasyon görünümü verilmiştir. Şekilde görüldüğü

üzere poliüretan kalıp yayı deney sonrasında bile tekrar eski haline dönebilecek kadar elastik deformasyon noktası yüksektir. İşte bu esnek yapı sayesinde eksenel basma sırasında şişen vulkolon çubukları tüpün dış yüzeyine baskı oluşturur. Bu baskı katlanmalar arasındaki geçişin katlanma noktasındaki kuvvete yakın olmasını sağlarken toplam sönmölenen enerji miktarına katkısı yüksektir. 6063-T6-E-K-1 deney grubu tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası kuvvet-deplasman grafikleri incelendiğinde enerji sönmölene miktarının 2983 J olduğu görölmüşür. 6063-T6 takviyesiz tüplere göre enerji sönmöleme kabilliyeti yaklaşık %63 artmışır.

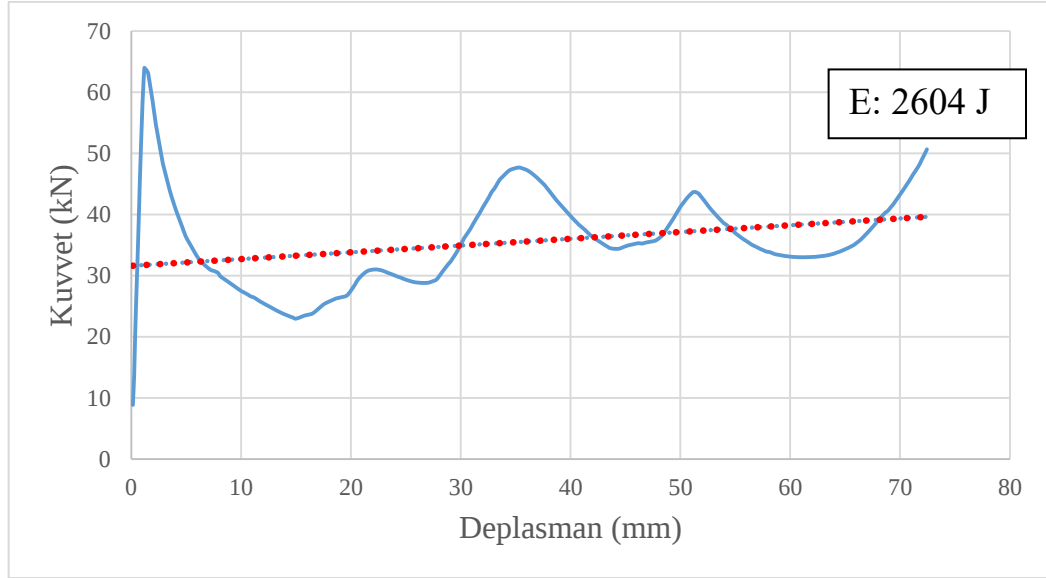


Şekil 3.24. 6063-T6-E-K-1 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiğı

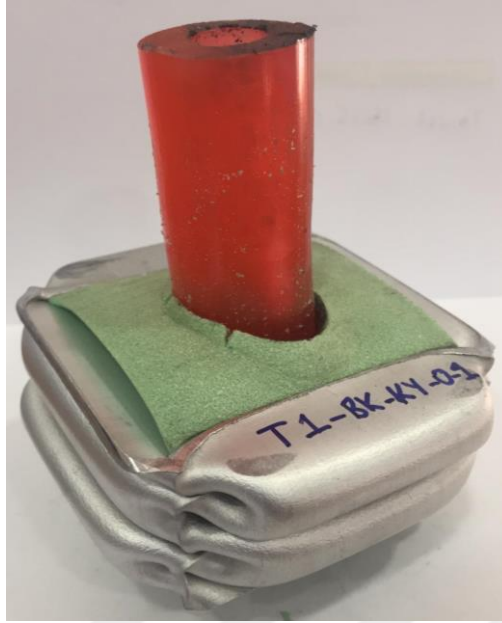


Şekil 3.25. 6063-T6-E-K-1 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünüğü

Bir önceki deney grubunda 80 shore sertliğinde vulkolon çubuğuyla gerçekleştirilen deneyler vulkolon çubukların sertliğinin enerji sönümlemedeki etkisini görmek adına 90 shore sertliğinde vulkolon çubuklarıyla da yapılmıştır. 6063-T6-0-0-0 grubu alüminyum tüplere PVC köpük ve 90 shore sertliğinde poliüretan kalıp yayı takviyesiyle oluşturulan yeni deney grubu 6063-T6-0-K-2 olarak adlandırılmıştır. 6063-T6-0-K-2 deney grubu kare kesitli alüminyum tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası kuvvet-deplasman grafiği Şekil 3.26.'da verilmiştir. Bu deney grubunda da poliüretan kalıp yayının bir etkisi olarak katlanma geçişlerindeki enerji yüksekliği gözlemlenebiliyor. 80 shore sertlikteki kalıp yayı kullanılan deney grubuna göre 90 shore sertlikteki kalıp yayının kullanıldığı bu deney grubunda ilk katlanmanın ve diğer katlanmaların biraz daha yüksek kuvvetlerde olduğu katlanma mesafeleri ve genel kuvvet grafiğinin benzerlik gösterdiği görülmektedir. 6063-T6-0-K-2 deney grubu kare kesitli alüminyum tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası enerji sönümleme miktarının 2604 J olduğu görülmüştür. Poliüretan kalıp yayındaki 10 shore'luk sertlik farkının enerji sönümleme kabiliyetine etkisi %7 olduğu görülmüştür. 6063-T6-0-K-2 numunelerinden birine ait eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü Şekil 3.27.'de verilmiştir.

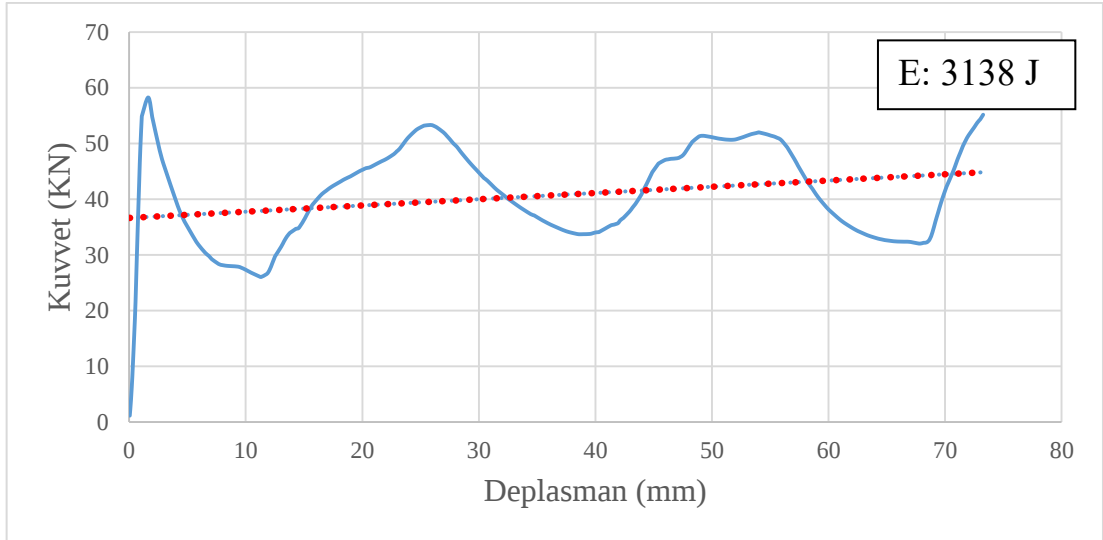


Şekil 3.26. 6063-T6-0-K-2 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği

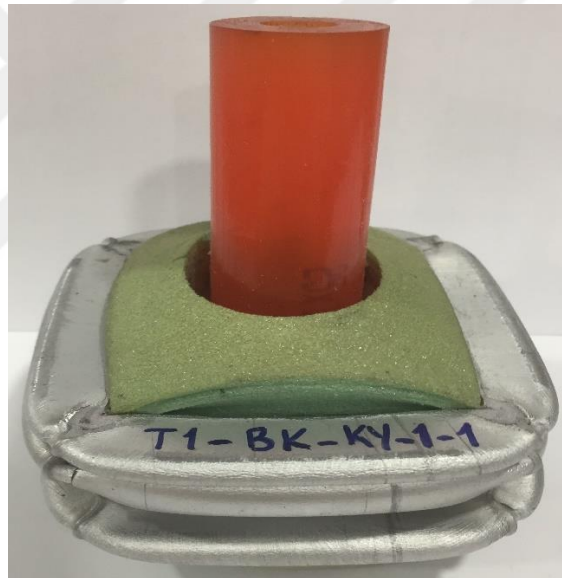


Şekil 3.27. 6063-T6-0-K-2 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

Deney gruplarının sonuncusu 6063-T6-0-0-0 grubu kare kesitli alüminyum tüplere iç cidardan ezme işlemi, PVC köpük takviyesi ve 90 shore sertliğinde poliüretan kalıp yayı takviyesi yapılarak oluşturulmuştur. 6063-T6-E-K-2 deney grubu kare kesitli alüminyum tüplere ait eksenel ezme deneyi sonrası kuvvet-deplasman grafiği Şekil 3.28.'de verilmiştir. Grafik genel olarak aynı deney grubu ve 80 shore sertlikte kalıp yayı kullanılan deney grubuyla benzerlik göstermektedir. Yalnız bu grupta kuvvet noktaları biraz daha yukarıda ve katlanma geçişlerindeki kuvvetler pik noktalarına daha yakındır. Bunun da sönümlenen enerji miktarını arttırdığı sayısal değerlerden de görülmektedir. 6063-T6-E-K-2 deney grubuna ait kuvvet-deplasman grafiği incelendiğinde enerji sönümleme miktarının 3138 J olduğu görülmektedir. Bu değer bütün takviyeler uygulandığı ve en sert poliüretan kalıp yayı kullanıldığı için şu ana kadar ulaşılan en yüksek enerji sönümleme miktarıdır. 6063-T6-E-K-2 numunesine ait eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü Şekil 3.29.'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere numune kenarlarında yırtılmalar meydana gelmiştir. Ezme homojenliğinin sağlanamadığı bazı numunelerde bu etki görülmüştür.

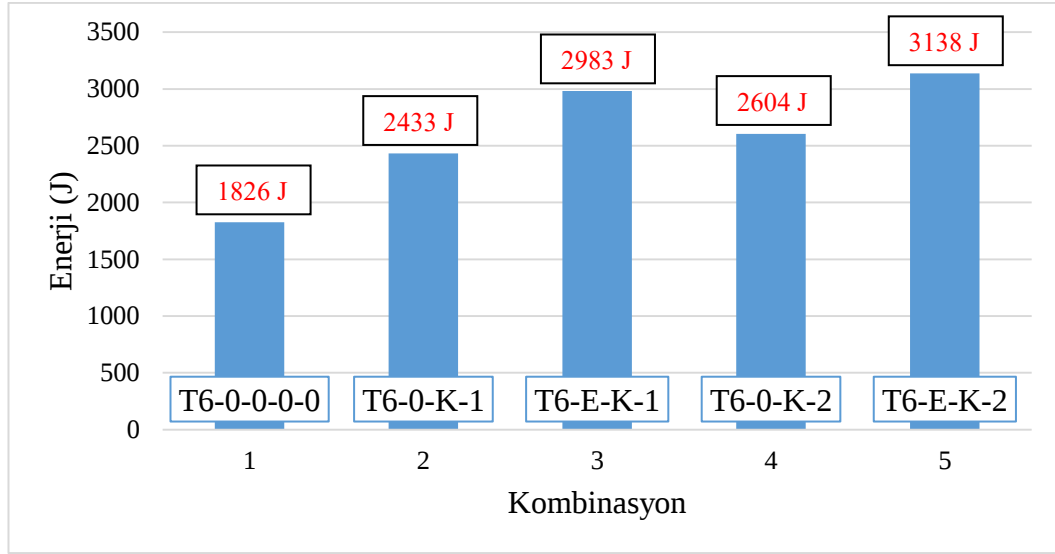


Şekil 3.28. 6063-T6-E-K-2 tüplere ait eksenel ezme deneyi kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 3.29. 6063-T6-E-K-2 tüplerin eksenel ezme deneyi sonrası deformasyon görünümü

6063-T6 grubu kare kesitli alüminyum tüplere uygulanan farklı sertlikteki vulkolon çubuk takviyesinin, iç cidar ezmeli ve ezmersiz durumlarında sönümlenen enerji miktarlarının karşılaştırılması Şekil 3.30.'da verilmiştir.



Şekil 3.30. 6063-T6 grubu alüminyum tüplerin iç cidardan ezme, 80 ve 90 shore sertliğinde kalıp yayların takviyesiyle absorbe edilen enerjilerin karşılaştırılması

6063-T0 ve 6063-T6 deney grubu kare kesitli alüminyum tüplere uygulanan cidar ezme işlemi, PVC köpük ve vulkolon çubuk takviyelerine ait şematik gösterimi, sönmölen enerji miktarları ve her bir numuneye ait özgül enerji absorbe etme kapasiteleri (spesifik enerji) Şekil 3.31.'de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi cidardan ezme işleminin etkisi T0 ve T6 grubu tüplerle neredeyse aynıdır. Ezme işleminin enerji sönmölemedeki etkisinin farklı numune dayanımlarında değişmediği ancak köpük takviyesinde dayanımın yüksek olduğu T6 numunelerinde T0 grubu numunelere göre enerji sönmöleme oranının düştüğü görölmektedir. Eksenel ezme deneyi yapılan numunelerin dayanımı arttıkça PVC köpüğün sönmölen enerjiye etkisi azalmaktadır. Bu durum cidarı ezilen tüplere (2. ve 6. grup) PVC köpük takviyesiyle elde edilen numunelerin (4. ve 8. grup) enerji değerlerinde de karşımıza çıkmaktadır. Sadece iç cidardan ezme işlemi yapılan T0 grubu tüplere (2. grup) PVC köpük takviyesi yapıldığında (4. grup) enerji sönmöleme kabiliyeti %32,5 artarken T6 grubu ezmeli tüplerinki %23,4 artmıştır (6 ve 8. grup).

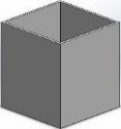
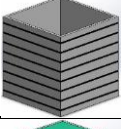
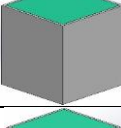
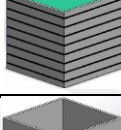
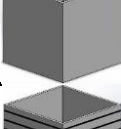
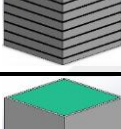
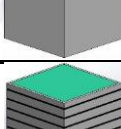
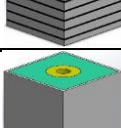
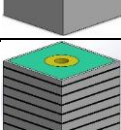
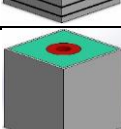
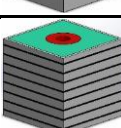
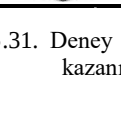
Vulkolon çubukların enerji sönmöleme kabiliyetine etkisini incelediğimizde çubuk sertliğinin enerji sönmöleme kabiliyetini doğrudan arttırdığı görölmektedir. PVC köpük ve 80 shore sertliğinde vulkolon çubuğu birlikte kullanılması durumunda (9. grup), sönmölen enerji artış değeri sadece PVC kullanılan numuneye göre (7. grup)

%13,7 iken, PVC köpük ve 90 shore sertliğinde vulkolon çubuğun birlikte kullanıldığı durumda (11. grup) ise bu değerin %21,7 lere yükseldiği görülmektedir. Hem cidar ezme işlemi hemde PVC köpük takviyesi yapılan T6 grubu tüplerin (8. grup) sönümlenen ortalama enerji değeri 2652 J iken 80 shore sertliğinde vulkolon çubuk eklediğimizde (10. grup) bu değerin 2983 J'e yükseldiği, 90 shore sertliğinde vulkolon çubuk eklediğimizde (12. grup) bu değerin yaklaşık %18'lik artışla deney grupları içerisinde maksimum değer olan 3138 J'e çıktığı gözlenmektedir. Deneylerde eksenel yükleme hızı sabit tutulmuştur. Eksenel yükleme hızı artırılarak ulaşılan maksimum değer daha da yüksek değerlere çıkartılabilir. R.D. Hussein ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada [16] köpük takviyeli kare kesitli alüminyum tüplerde, eksenel yükleme hızı arttıkça enerji absorbe etme miktarının artacağı sonucuna varılmıştır.

Spesifik enerji değerlerinin her zaman enerji artışıyla orantılı olarak artmadığı görülmektedir. Bu durum enerji artışına sebep olan takviye elemanının, tüp yapının toplam ağırlığına olan etkisiyle açıklanabilir. Örneğin; Şekil 3.31.'de 1. gruptaki numunelere köpük takviyesi yapıldığında sönümlenen enerji miktarının cidar ezme işlemine göre daha yüksek olduğu görülmüştü. Bu grupların (2 ve 3. grup) spesifik enerji değerlerini karşılaştırdığımızda daha yüksek enerji sönümleyen köpük takviyesi işleminin daha düşük spesifik enerjiye sahip olduğu görülmektedir.

H.R. Zarei ve M. Kröger'in yapmış olduğu çalışmada [19] takviye köpüğünün yoğunluğu arttırıldıkça sönümlenen enerji miktarı artarken, artan ağırlıkla beraber belli bir yoğunluktan (230 kg/m^3) sonra spesifik enerji miktarında düşüş gözlemlenmiştir.

Spesifik enerji değerlerinde en dikkat çekici artışlar cidar ezme işleminin olduğu deney numunelerinde gözlenmektedir. Cidar ezme işleminin, sönümlenen enerji miktarını ağırlığı değiştirmeden arttırdığını düşünürsek bu beklenen bir sonuçtur.

Grup	Numune	Deney Grup İsimleri	Sönümlenen Ortalama Enerji Değerleri (J)	Takviyenin Enerji Sönümlemesine Etkisi (%)	Ağırlık (gr)	Spesifik Enerji (J/gr)	Spesifik Enerji Artışı (%)
1		6063-T0-0-0-0	1416	—	132,8	10,7	—
2		6063-T0-E-0-0	1670	17,9	132,8	12,6	17,8
3		6063-T0-0-K-0	1772	25,1	159	11,1	3,7
4		6063-T0-E-K-0	2213	56,3	159	13,9	29,9
5		6063-T6-0-0-0	1826	—	132,8	13,8	—
6		6063-T6-E-0-0	2148	17,6	132,8	16,2	17,4
7		6063-T6-0-K-0	2140	17,2	159	13,5	-2,2
8		6063-T6-E-K-0	2652	45,2	159	16,7	21
9		6063-T6-0-K-1	2433	33,2	208,8	11,7	-17,9
10		6063-T6-E-K-1	2983	63,4	208,8	14,3	3,6
11		6063-T6-0-K-2	2604	42,6	208,8	12,5	-10,4
12		6063-T6-E-K-2	3138	71,8	208,8	15	8,7

Şekil 3.31. Deney numunelerinin sönümledikleri ortalama enerji miktarı, takviyesiz durumlarına göre enerji kazanımları ve spesifik enerjileri

BÖLÜM 4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında 6063 serisi alüminyum alaşımından imal edilmiş kare kesitli tüpler kullanılmıştır. Eksenel yüke maruz olan tüplerin takviyesiz ve farklı yöntemlerle takviye edilme durumları deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda; T0 ve T6 olmak üzere iki farklı ısıtılma işlemi durumundaki tüplerin içeriden takviyesinde 80 kg/m³ PVC köpük ve farklı sertlikteki vulkolon çubukları kullanılmıştır.

Eksenel ezme deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- a. 6063-T0 alüminyum tüplere cidardan bölgesel ezme işlemi uygulanması halinde enerji sönümlene kabiliyetinin yaklaşık %18, PVC köpük takviyesi uygulanması durumunda %25 mertebelerinde arttığı gözlemlenmiştir. T0 grubu kare kesitli alüminyum tüplere her iki işlemin uygulanması durumunda enerji sönümlene kabiliyetinin %56'ya ulaştığı tespit edilmiştir.
- b. T0 grubu tüplere göre dayanımı yaklaşık 3 kat daha yüksek T6 grubu numunelerde cidar ezme işleminin etkisi aynı kalırken (%18), PVC köpük takviyeli deney gruplarında elde edilen enerji artışı %17 olmuştur. Bu durum artan dayanımla birlikte PVC köpüğün sağladığı enerji artışının daha düşük değerlerde olmasına yol açmıştır. T6 grubu alüminyum tüplere ezme işlemi ve köpük takviyesi aynı anda yapıldığında ise enerji değerinin %45 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir.
- c. Ayrıca T6 grubu tüplerden cidar ezme işlemi uygulanmış, PVC köpük ve 80 shore sertliğinde vulkolon çubuk takviye edilmiş numunelerde enerji değeri takviye edilmemiş boş tüplere göre yaklaşık %64 artmıştır. Aynı deneyler 90 shore sertliğinde vulkolon çubuğu ile takviye edilen numunelerde gerçekleştirildiğinde, enerji sönümlene değeri takviye edilmemiş boş tüplere göre %72 artarak 3138 J değerine ulaşmıştır.

- d. Oluşturulan deney gruplarında en yüksek spesifik enerjiye sahip numunelerin 16,7 J/gr ile T6 grubu tüplerde cidar ezme işlemi ve köpük takviyesi aynı anda yapılan numuneler (8. grup) olduğu görülmektedir. Cidar ezme işlemi ve köpük takviyesinin spesifik enerjiye etkisi %21 iken 90 shore sertliğinde vulkolon yayı ile takviye edilen deney gruplarında bu değerin %8,7'lere düştüğü, vulkolon yaylarının ağırlığından dolayı spesifik enerjiye olumsuz etkisi tespit edilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar neticesinde aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

- a. Pekleşmeden dolayı oluşacak farklılıkları incelemek için farklı numunelerle (paslanmaz çelik gibi) çalışmalar yapılabilir.
- b. Köpük yoğunluğu arttığında enerji sönümleme kabiliyetinin artacağı düşünülmektedir.
- c. Farklı geometrik ölçülerdeki vulkolon çubuklarının enerji sönümleme kabiliyetine etkisi incelenebilir.
- d. Tek bir vulkolon çubuğu yerine daha küçük çaplarda çoklu vulkolon çubuğu kullanılarak yeni çalışmalar yapılabilir.
- e. Alüminyum tüplerin cidar kalınlığının enerji absorbe etme iyileşmesindeki etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Cobden R., Banbury A. (1994), Aluminium: physical properties, characteristics and alloys. TALAT Lecture 1501. European Aluminium Association
- [2] Totten G. E., Mackenzie S., Handbook of aluminum Vol 1: Physical metallurgy and processes, Marcel Dekker Inc., USA,2003.
- [3] Taban, E. 2004. 5XXX serisi alüminyum alaşımlarının TIG, MIG ve sürtünen eleman ile birleştirme kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi. 154963
- [4] Güngör, B. 2013. ‘‘AW5083-H11 ve AW6082-T561 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma (FSW) ve robotik CMT-MIG kaynak yöntemleri ile kaynağında mekanik ve metalürjik özelliklerinin incelenmesi’’, Yüksek lisans Tezi, 342552
- [5] TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 1976, Alüminyum Raporu.
- [6] Robert E. Sanders Jr., February 2001. Technology Innovation in Aluminum Products, 21-25.
- [7] TALSAD Yayınları, 1995, Türkiye’de ve Dünya’da Alüminyum.
- [8] Matters G., The Welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2002.
- [9] Tanrıöver, L. 2008. AA5052/2024 Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ, Türkiye 1-17
- [10] Yalçın, E.D. 2010. AA7075 ve AA5754 Alüminyum Alaşımların Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 1-31
- [11] Kaufman J. G., Introduction to aluminum alloys and tempers, ASM International, USA, 2000.

- [12] Pit, S., Werner S., Zerbe J., Gohlich, D., 2014. Robust Optimization of Vehicle Crashboxes, SAE Technical Paper No: 2014-01-0397.
- [13] Hanssen AG, Langseth M. Development in aluminium based crash absorption components. Presented to the Norwegian-French Industry Conference in Paris, Kasim 1996, The Norwegian University of Science and Technology, N-7034 Trondheim, Norway.
- [14] Hanssen, A.G., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Static crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Int J Mech Sci*, 1998.
- [15] Seitzberger M, Rammerstorfer FG, Degischer HP, Grading R. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam. *Acta Mech* 1997, 125; 93-105.
- [16] Thornton, P.H., Energy absorption by foam filled structures. SAE paper 800081, 1980.
- [17] Lampinen, B.H., Jeryan, J.A., Effectiveness of polyurethane foam in energy absorbing structures. SAE paper 820494, 1982.
- [18] Reid, S.R., Reddy, T.Y., Gray, M.D., Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes. *Int J Mech Sci* 1986, 28(5): 285-322.
- [19] Zarei, H. R., Kröger, M., Optimization of the foam-filled aluminium tubes for crush box application, *Thin-Walled Structures* 46 (2008) 214–22
- [20] A. Niknejad, M.M. Abedi, G.H. Liaghat, M.Z. Nejad, 2014, Absorbed energy by foam-filled quadrangle tubes during the crushing process by considering the interaction effects, *Arch. Civil Mech. Eng*.
- [21] Zarei, H. R., Kröger, M., Optimum honeycomb filled crash absorber design. *Mater Des* 2007, 29:193–204.
- [22] Chen, W., Wierzbicki, T., Santosa, S. 2002. Bending Collapse of Thin Walled Beams with Ultralight Filler: Numerical Simulation and Weight Optimization. *Acta Mechanica* 153: 183-206.
- [23] Chen, W. 2001. Experimental and Numerical Study on Bending Collapse of Aluminum Foam Filled Hat Profiles, *International Journal of Solid and Structures* 38(44): 7919-7944.
- [24] R.D. Hussein, D. Ruan, G. Lu, S. Guillow, S. W. Yoon, Crushing response of square aluminium tubes filled with polyurethane foam and aluminium honeycomb, *Thin-Walled Structures* 110 (2017) 140-154.

- [25] M. Yamashita, M. Gotoh, Y. Sawairi, Axial crush of hollow cylindrical structures with various polygonal cross-sections: numerical simulation and experiment, *J. Mater. Process. Technol.* 140 (2003) 59–64.
- [26] X. Zhang, H. Huh, Crushing analysis of polygonal columns and angle elements, *Int. J. Impact Eng.* 37 (2010) 441–451.
- [27] A.A. Nia, J.H. Hamedani, Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries, *Thin-Walled Struct.* 48 (2010) 946–954.
- [28] X. Zhang, H. Zhang, Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression, *Thin-Walled Struct.* 68 (2013) 156–163.
- [29] G. Lu, T. Yu, *Energy Absorption of Structures and Materials*, Woodhead, Cambridge, England, 2003.
- [30] Altın, M., Yücesu, S. H. 2019. Farklı geometrik yapılarıdaki çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen alüminyum köpük malzemenin enerji sönümleme kapasitesi üzerine etkisinin incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 22(1):141-148.
- [31] Altın, M. 2019. Çarpışma kutularının üzerine açılan oyukların çarpışma performansı üzerine etkisinin incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 22(1): 135-139.
- [32] Duarte, I., Krstulović-Opara, L., Dias-de-Oliveira, J., Vesenjak, M., Axial crush performance of polymer-aluminium alloy hybrid foam filled tubes, *Thin-Walled Structures* 138 (2019) 124-136.
- [33] Sampath, V., Rao, C. L., Reddy, S., Energy Absorption of Foam Filled Tubes under Dynamic Bending, *Procedia Manufacturing* 7 (2017) 225-233
- [34] Balaji, G., Annamalai, K., Crushing response of square aluminium column filled with carbon fibre tubes and aluminium honeycomb, *Thin-Walled Structures* 132 (2018) 667-681.
- [35] Baroutajia A., Sajjiab M., Olabic A., On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, *Thin-Walled Structures* 118 (2017) 137-163
- [36] https://www.3accorematerials.com/uploads/documents/TDS-AIREX-C70-E_1106.pdf (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [37] Dovranov, M., 2019. İçeriden PVC Köpüklü Takviye Edilmiş Alüminyum Tüp Çiftinin Katlanma Davranışının İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi
- [38] <http://dogusplastiksanayi.com/vulkolon/> (Erişim Tarihi: Temmuz 2019)

ÖZGEÇMİŞ

Ömür KAVAS, 28.09.1989'da Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2007 yılında Atatürk Süper Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2013 yılında bitirdi. Yüksek lisans eğitimine aynı yıl başladı fakat 2 yıl ABD'nin Newyork eyaletinde İngilizce dil eğitimi, ardından 1 yıl Ankara Beytepe'de yedek subay olarak askerlik yaptığından dolayı yüksek lisans eğitimine 3 yıl ara verdi. 2017 yılında maden sektörüne makine imalatı yapan bir firmada çalışmaya başladı. Halen 2017 yılında çalışmaya başladığı firmada görevini sürdürmektedir.