

## YÜKSEK BASINCA DAYANIKLI KOMPOZİT HİDROJEN TANKI İMALATININ İNCELENMESİ

M. Oktay ALNIAK<sup>1</sup>, Ahmet OĞUR<sup>2</sup>, Cetin KARAKAYA<sup>3</sup>,  
Mustafa ERTÜRK<sup>4</sup>, İbrahim GÜNEŞ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Prof. Dr. Yük. Müh., Bahçeşehir Üniv. Mühendislik Fakültesi İstanbul,  
oalniak@bahcesehir.edu.tr

<sup>2</sup>Prof. Dr. Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya, ogur@sakarya.edu.tr

<sup>3</sup>Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya, ckarakaya@sakarya.edu.tr

<sup>4</sup>Elimsan Metalurji ve Makina San. A.Ş. , Kocaeli, m.erturk@elimsangroup.com

<sup>5</sup>İstanbul Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, İstanbul , gunesi@istanbul.edu.tr

### Özet

Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve çevreye olan zararları, araştırmacıları alternatif ve temiz enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya itmiştir. Bu konuda yurtdışında birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar ticari boyut kazanarak, araçlar başta olmak üzere birçok alanda hidrojen enerjisinin kullanılmasını sağlamıştır. Güncel uygulamalar ile birlikte hidrojen birçok şekilde depolanabilmektedir. Hidrojenin depolanması çalışmaları gaz formunda, yüksek basınçlı kompozit tanklarda başlamıştır.

Yapılan araştırmalar sonucunda; hidrojen depolama tanklarının imalatı ile ilgili yurtdışında birçok çalışma yapıldığı görülmüştür. Fakat ülkemizde henüz bu tür çalışmalar ticari kimlik kazanamamış ve yapılan birçok çalışma deneysel aşamada kalmıştır. Günümüzde ticarileşebilir ar-ge çıktıları olan çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda hidrojen depolama tekniklerinin bir an evvel ülke ekonomisine katkıda bulunacak ve ülkemiz teknolojik seviyesini arttıracak şekilde uygulamaya geçmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, alüminyumdan imal edilen yüksek basınca dayanıklı hidrojen depolama tankının imalatı incelenmiştir. Bu tankların imalat yöntemleri ve kullanım alanları ile ilgili örnekler verilmiştir. Ayrıca ileriye dönük olarak yapılması gereken çalışmalar ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** kompozit hidrojen tankı, alüminyum tank, flow forming, necking-in, derin çekme, sıvama

### Abstract

Many researchers have started to delve into new alternative and clean resources due to consumed fossil fuel and the negative effect of the environmental issues. Many researches have been done in many countries. The hydrogen fuel has been using in many sector such as, automotive and so on. Therefore, this topic has considerably growing commercial side. Nowadays the hydrogen is started to stock in gas phase and high pressured tanks. Beside that at the current there are many stock method of the hydrogen stocking.

After many researches, many countries have been continue their researches in term of the manufacturing of the hydrogen containers. Nevertheless the manufacturing of the hydrogen containers is not matured as a commercial way. however there are a few studies are up front of the all that we can consider commercialized R&D studies. For our national benefits and the positive effect to our national economy we should immediately start the application of the manufacturing of the hydrogen containers in way of increase our technological level.

In this study, we have researched the manufacturing of the high pressure resistant hydrogen containers that manufactured from aluminium material. You may find some examples in the study regarding the manufacturing methods and usage zones. Furthermore the proposed actions have been given for the future studies that need to done.

**Keywords:** composite hydrogen tank, aluminium tank, flow forming, necking-in, deep drawing,

**Not: Bu çalışma, Sanayi Bakanlığı tarafından desteklenen San-Tez 123 projesinin bir ara sonucudur. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, Sanayi Ar-Ge Genel Müdürlüğü' ne teşekkür ederiz.**

## 1. GİRİŞ

Yapılan araştırmalar sonucunda; hidrojen depolama tanklarının imalatı ile ilgili yurtdışında birçok çalışma yapıldığı görülmüştür. Fakat ülkemizde henüz bu tür çalışmalar ticari kimlik kazanamamış ve yapılan birçok çalışma deneysel aşamada kalmıştır. San-Tez projesi kapsamında ülkemiz için yeni olan bu konuda çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmanın sanayide uygulanabilir olması çalışmanın önemini daha da arttırmaktadır. Günümüzde ticarileşebilir arge çıktıkları olan çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda bu çalışmanın bir an evvel ülke ekonomisine katkıda bulunacak ve ülkemiz teknolojik seviyesini arttıracak şekilde uygulamaya geçmesi gerekmektedir.

Hidrojenin depolanması ile ilgili birçok yöntem olmasına rağmen en çok kullanılan yöntem olan basınçlı kaplarda gaz formunda sıkıştırarak depolama, başlangıç için uygun görünmektedir. Bu aşama başlangıç için atılacak önemli bir adımdır. Teknolojik konuları içerisinde barındırması nedeni ile ülkemizde somut bir çalışma ortaya konulamamıştır. Bu çalışmaların başında kompozit malzeme tekniği gelmektedir. Bu çalışma kapsamında tankın imalatı ile ilgili farklı alüminyum serilerinin (6061, 6063, 6082) denenmesi, ANSYS yardımı ile elde edilen formun basınç testleri, yüksek basınca dayanıklı epoksi ile güçlendirilmiş karbon fiber kompozit sargı tekniği gelmektedir.

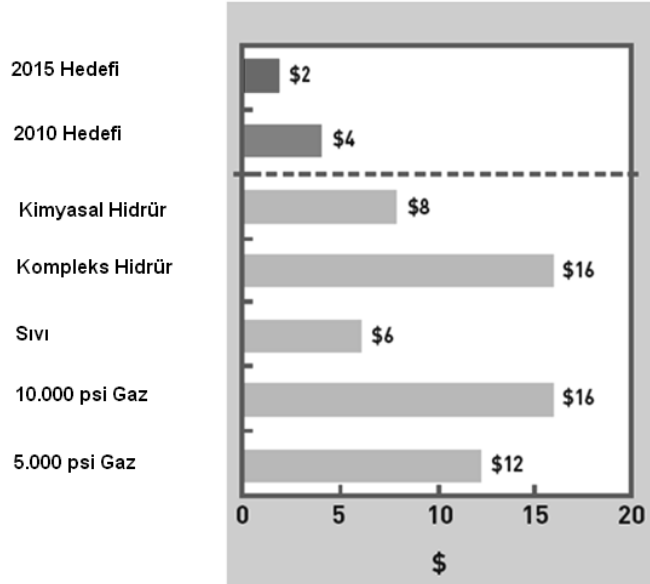
## 2. HİDROJEN DEPOLAMA TEKNİKLERİ

Günümüzde bilinen hidrojen depolama yöntemleri şunlardır;

- Yüksek basınçlı gaz tankları,
- Kriyojenik tanklarda sıvı hidrojen (21 K' de),
- Malzemelerin özel geniş alanlarına hidrojen emdirme ( 100K' den düşük sıcaklıklarda),
- Metalin atomları arasındaki boşluklara emdirme (ortam basıncı ve sıcaklığında),
- İyonik ve kovalent bileşiklerde kimyasal bağlanma (ortam basıncında),
- Su ile Li, Na, Mg, Al, Zn gibi reaktif metallerin oksidasyonudur.

Bu hidrojen depolama tekniklerinin birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıf yönleri olmasına rağmen en önemli belirleyici kriter ise hidrojen enerjinin elde edilme maliyetidir. Tablo-1 ' de de belirli yöntemler ile hidrojen depolamanın maliyetleri gösterilmektedir.

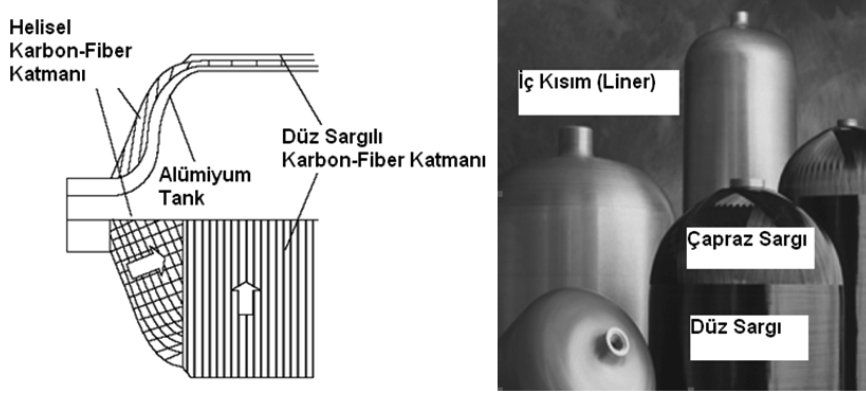
Tablo-1 Her bir kWh için maliyet (\$/kWh) [3]



## 3. YÜKSEK BASINCA DAYANIKLI KOMPOZİT HİDROJEN TANKLARI VE KULLANIM ALANLARI

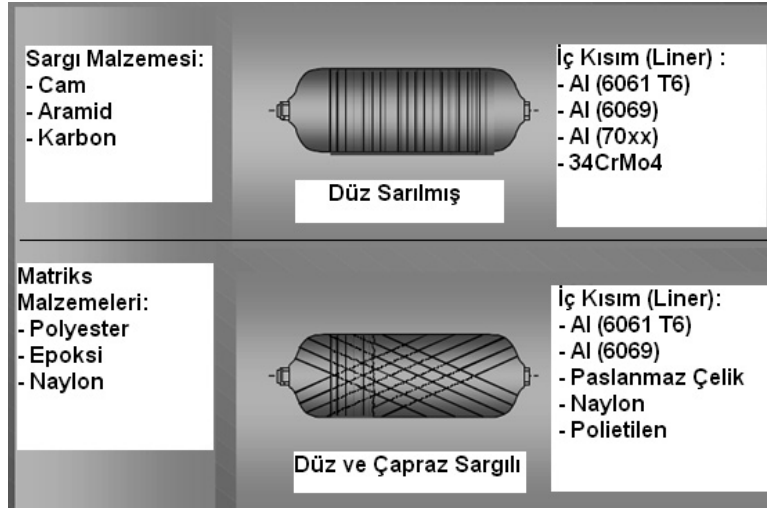
Yüksek basınca dayanıklı hidrojen tanklarının genel olarak yapıları iç bir metal malzeme ve üzerinde düz veya helisel tipte çoğunlukla karbon fiber takviye tabakalarından oluşmaktadır.

Gaz formunda yüksek basınç altında hidrojenin depolandığı tankların genel görünüşleri Şekil-1' de gösterilmiştir.



Şekil-1: Yüksek basınçta dayanıklı kompozit hidrojen tankının genel görünümü [1-6]

Kompozit hidrojen tanklarının sargı malzemeleri ve iç kısmı oluşturan metelsel kısmın malzemeleri ve tankın formu farklılıklar göstermektedir. Bu malzemeler ile ilgili bilgi Şekil-2' de gösterilmiştir.



Şekil-2: – Kompozit hidrojen tanklarında genel olarak kullanılan malzemeler [5]

Yüksek basınçlı tanklar dört kategoriye ayrılmıştır;

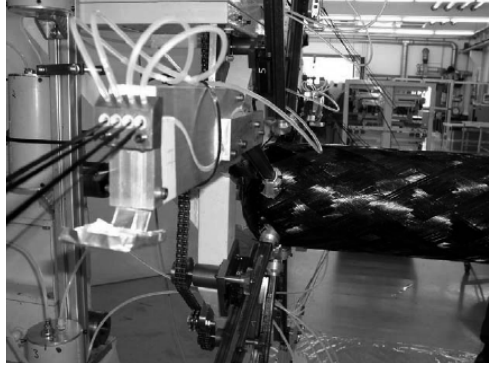
Tip 1 : Tamamen metelsel tanklar,

Tip 2 : Genellikle cam yünü sargılı metelsel tanklar,

Tip 3 : Başlangıçta cam elyaf daha sonra karbon lifinden oluşan kompozit malzemeli metelsel bir i kısma sahip tanklar,

Tip 4 : Temel olarak karbon lifli kompozit tanklardır (iç kısmı çoğunlukla termoplastik polimerlerden oluşmaktadır). [3]

Kompozit tanklarda birçok farklı yöntem ile “liner” olarak adlandırılan iç kısım elde edilmektedir. Bu i kısmın üretilmesinde derin çekme, ekstrüzyon, presleme, flow-forming yöntemleri temel olarak kullanılmaktadır. Yöntem seçimi tankın formuna bağlıdır. Tank elde edildikten sonra Şekil-3’ te görülen düzeneklerde takviye sargı katmanını elde edilmektedir.



Şekil-3: Alüminyum tank üzerine karbon lifi takviyesinin sarılması [4]

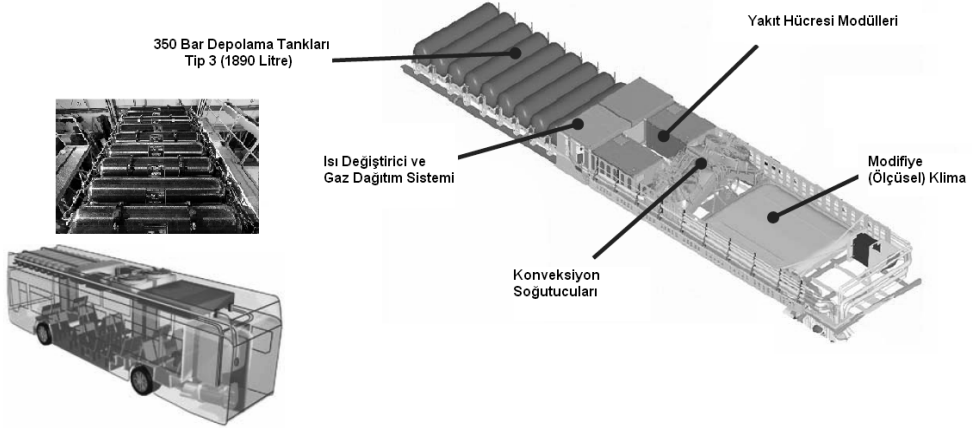
2000’ li yılların başından bu yana dünyada hızla hidrojenin araçlarda kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda birçok prototip araç yapılmış ve testleri tamamlandıktan sonra kullanıma sunulmuştur. Birçok ülkede hidrojen ikmal istasyonları da bulunmaktadır. Uygulamalar ile ilgili gösterimler Şekil-4, 5, 6’ da yapılmıştır.



Şekil-4: Bir kamyonet kasasında kompozit hidrojen tanklarının muhafaza edilmesi [2]



Şekil-5 Peugeot Partner' de yüksek basınçlı hidrojen tanklarının yerleşimi [3]



Şekil-6: Otobüslerde yüksek basınçlı kompozit hidrojen tanklarının kullanımı (Chrysler)[4]

#### 4. PROTOTİP ÇALIŞMALARI

Yüksek basınca dayanıklı hidrojen tankları seri imalatta flow-forming yöntemi ile üretilmektedir. Fakat bu çalışmada makine yatırım maliyetinin yüksek oluşundan dolayı prototip tank elde etmek için sıvama, ekstrüzyon ve kalıplar arasında pres yardımı ile uç kapama işlemlerinde oluşan imalat tekniği kullanılmıştır. Öncelikle içi dolu silindir şeklindeki malzeme tavlama fırınında bekletilerek şekillendirme sıcaklığına getirilmektedir. Daha sonra Şekil-7' de görüldüğü gibi kalıplar arasında ilk şekil verilerek içi boş bir silindir şeklinde form oluşturulmaktadır. Bu aşamada takoz diş kalıp içerisine yerleştirilmekte ve erkek kalıp strok boyunca aşağıya doğru hareket ermeye başlamaktadır.



*Şekil-7: Pres yardımıyla içi dolu silindirden içi boş kap şeklinde silindir elde edilmesi*

Dişi kalıp içerisindeki malzeme erkek kalıbın baskı kuvveti ile erkek kalıp üzerine sıvanmaktadır. İlk aşamada pres yardımı ile dolu malzemeden içi boş bir taslak silindir malzeme elde edilmektedir. Bundan sonraki aşamada Şekil-8' de görüldüğü gibi boy uzatma işlemi ile et kalınlığı azaltılarak tankın boyu uzatılacaktır.



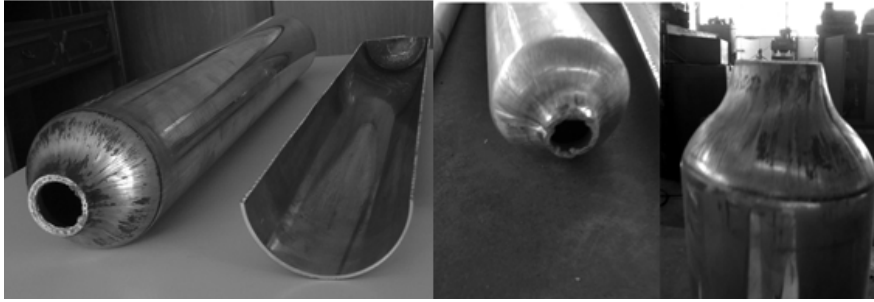
*Şekil-8: Boy uzatma işleminin görünüşü*

Bu aşamada tank dış kesitten bir miktar daha düşük ölçüdeki matrizen geçmeye zorlanmaktadır. Kuvvet etkisi ile malzeme geriye doğru akmaya (indirek flow-forming) başlamaktadır. Böylece malzeme kesiti azalmasına karşın tankın boyu uzamaktadır. Şekil-9' da da görüleceği üzere ilk şekillendirme (preste) ile ikinci şekillendirme (indirek flow-forming) işleminden sonra malzemenin et kalınlığı azalmakta fakat boyu ise yaklaşık olarak iki kat artmaktadır. Ayrıca malzemede yönlendirilmiş ve daha homojen hale gelmiş bir iç yapı elde edilmektedir.



*Şekil-9: İlk şekillendirme ile ikinci şekillendirme işleminin karşılaştırılması*

Son olarak boyu uzatılmış tankın kalıplar içerisinde pres yardımı ile kafası büzülmektedir. Bu büzme işlemi şekillendirmenin tamamlandığı ve son bitirme işlemlerinin başladığı aşamadır. Şekil-10' da görüldüğü gibi kafa büzme işlemi esnasında malzemede yığılma görülmektedir.



*Şekil-10: Alüminyum hidrojen tankın uç kısmını büzme işlemi*

Bu işlem aşamalarında bazı hatalar meydana gelmektedir. Özetle bu hatalar şu şekildedir;

- Matriste boyu uzatılmaya başlanmadan önce tank, ilk şekillendirmeden sonra kalibre edilmektedir. Buna rağmen gerek malzemedeki heterojen yapıdan (kalıntılar, boşluklar, mekaniksel özelliklerdeki değişim v.b.) kaynaklanan gerekse matris ile erkek kalıp arasındaki boşluğun düzensiz olmasından dolayı malzeme uç kısmında farklı malzeme yığılmaları görülmektedir (Şekil-11). Uç formun fiziksel görünümü bize tankın tüm kesitindeki dağılım hakkında bilgi vermektedir.



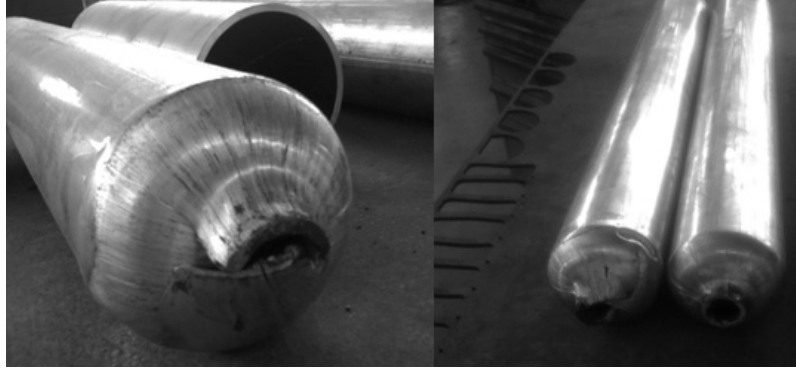
*Şekil-11: Matristen çıkan malzemenin homojen akamaması*

Malzemenin ilk şekillendirilmesi esnasında tüm iç boşluklar ve kalıntılar tankın dip kısmında toplanmaktadır. Bu boşluklar 2. şekillendirme işlemi olan boy uzatmada kendini daha belirgin olarak göstermektedir (Şekil-12). Bu hatayı önlemenin yolu ise daha saf bir hammadde ile çalışmaktır.



*Şekil-12: Çatlak-iç boşluklar*

Kalıplarda ağızları büzülen tanklarda istenilen formun yakalanması oldukça güçtür. Isıtma yetersiz ve baskı kuvveti çok olursa tankın tamamında buruşma ve katlanmalar oluşmaktadır. Uç formun yeterli konikliğe sahip olmaması ve şekillendirme parametrelerinin uygun olmaması durumunda uç kısmın yırtıldığı ve düzensiz olarak kapandığı görülmektedir (Şekil-13).



*Şekil-13: Yırtılma ve kapanma*

Prototip çalışmaları tamamlanmış Al 6061, 6063, 6082 malzemelerden oluşturulmuş prototipler farklı ısıl işlemlerden geçirilerek mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Bu prototipler hidrostatik basınç testine tabi tutulacaktır. Buradan elde edilen veriler ANSYS paket programında yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılacaktır.



*Şekil-14: Hidrostatik basınç testine tabi tutulacak numuneler*

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar sonucunda üç farklı 6000 serisi alüminyum ile farklı boyutlarda alüminyum tanklar elde edilmiştir. İmalat aşamasında yaşanan birçok zorluğa rağmen elde edilen prototipler hidrostatik basınç testine tabi tutulacaktır. Prototipler ile ilgili yapılan sonlu elemanlar analizleri ile karşılaştırmalar yapılacaktır. Yapılan sonlu elemanlar analizlerine göre prototiplerin şekillerinde değişiklikler yapılacaktır. Özellikle tek taraftan yapılan uç büzme işlemi iki taraflı yapıldığında dayanımın artacağı öngörülmektedir. Hidrostatik basınç testinden sonra elde edilen sonuçlara göre bilgisayar yardımı ile yapılan analizler arasında bir bağıntı elde edilmelidir. Yapılan bu karşılaştırma çalışmaları kompozit sargı yapıldıktan sonra tekrarlanmalıdır. Prototiplerden alınan numune ile elde edilecek çekme eğrisi sonuçları bilgisayar yardımı ile analiz edilmeli ve daha kesin sonuçlara ulaşılmalıdır. Malzeme alternatifleri ve ısıtma işlem durumları değiştirilerek deneysel çalışmalara devam edilmelidir. En ideal malzeme, ısıtma işlem durumu, tank formu, sargı şekli ve malzemesi konularında çalışmalara devam edilmelidir.

## 6. KAYNAKLAR

1. N. Takeichi, H. Senoh, N. Kuriyama "Application of hydrogen storage alloy at high pressure over 30MPa" National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda, Osaka 563-8577, Japan
2. James Francfort "Hydrogen Fuel Pilot Plant and Hydrogen ICE Vehicle Testing" National Hydrogen Association Conference March 2005
3. The Hydrogen Pathway, CLEFS CEA – No.50/51 – Winter 2004-2005
4. Dr. S. Rau, J.S. Colom" Session 2.4: Pressure Storage Systems II" 25th – 29th September 2006 Ingolstadt
5. Dr. C. Rasche "Moderne Composite Flaschen und die Anforderungen für deren sicheren Betrieb aus Sicht der Speicherhersteller" Dynetek Europe GmbH, Berlin, 18 Nov. 2003
6. Thompson, R "Storing Energy's Future" Dynetek Industries Ltd. January, 2006
7. [www.dynetek.com](http://www.dynetek.com)

