

Hidrojenin Yakıt Olarak Uçaklarda Kullanımı

Koray Şenel

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran,2007

Using Hydrogene As Fuel At Aircraft

Koray Şenel

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

June,2007

Hidrojenin Yakıt Olarak Uçaklarda Kullanımı

Koray Şenel

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç.Dr. Haydar ARAS

Haziran,2007

Koray ŞENEL'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "HİDROJENİN YAKIT OLARAK UÇAKLARDA KULLANIMI" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Doç. Dr. Haydar ARAS

Üye : Prof. Dr. Berrin ERBAY

Üye : Yrd. Doç. Dr. Necati MAHİR

Üye : Yrd. Doç. Dr. İrfan ÜREYEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ANKARA

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Dünyanın yakıt ihtiyacının çoğunu karşılayan fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz, ve kömür) hızla tükenmeye başlamıştır. Ayrıca bu yakıtların yanma ürünleri sera problemi, ozon tabakasının delinmesi, asit yağmurları ve hava kirliliği gibi çevremiz ve bunun sonucunda gezegenimizdeki hayat için büyük bir tehlike oluşturur. Birçok bilim adamı, bu küresel sorunların çözümü için mevcut fosil yakıt sisteminin yerine, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını önermektedir. Uçaklarda fosil yakıtların büyük miktarlarda kullanılmasından dolayı hidrojen kullanımı fosil yakıtların çevre üzerine olumsuz etkilerini azaltacaktır.

Bu çalışmada gelecekte uçaklarda kullanılması muhtemel olan hidrojenin, uçak yakıtı olarak kullanımını teknik yönden araştırılmış ve ülkelerin yapması gerekli olan süreçler sonuç bölümünde tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sıvı hidrojen depolanma, üretilme, uçak yakıtları

SUMMARY

Fossil fuels (i.e., petroleum, natural gas and coal), which meet most of the world's energy demand today, are being depleted fast. Also, their combustion products are causing the global problems, such as the greenhouse effect, ozone layer depletion, acid rains and pollution, which are posing great danger for our environment and eventually for the life in our planet. Many scientists suggest using renewable energy instead of fossil fuel system for solution of global problems. Hydrogen usage will decrease the effects of fossil fuels on environment because of high usage fossil fuels at aircrafts

In this study, the hydrogen which is probably considered to be used at aircrafts researched technically as an aircraft fuel and the required process that the countries was argued in conclusion.

Key Words: Liquid Hydrogen storage, manufacturing, aircraft fuels

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmalarında, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Doç.Dr. Haydar ARAS' a, bana desteğini esirgemeyen eşim Behiye ŞENEL' e ve babam Musa ŞENEL' e katkılarından dolayı teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. HİDROJEN VE ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Hidrojen Üretimi	4
2.1.1. Hidrojenin Fosil Yakıtlardan Üretimi	5
2.1.2. Hidrojenin Elektroliz Yöntemiyle Üretimi	5
2.1.3. Hidrojenin Isıl Kimyasal Yöntemiyle Üretimi	6
2.2. Hidrojen Enerjisinin Kullanımı	6
3. HİDROJENİN YAKIT OLARAK UÇAKLARDA KULLANILABİLMESİ İÇİN GEREKEN TEKNOLOJİ GELİŞİMİ	7
3.1. Sıvı Hidrojen Motoru Tasarımı Çalışmaları	8
3.2. Sıvı Hidrojen Kullanımı Başlatma Çalışmaları	9
3.3. Çalışmanın Etkileri	10
3.4. Havaalanı Gereklilikleri	12
3.4.1. Yer Destek Sistemleri ve Rampa Operasyonlarının Analizleri	12
3.4.2. Sıvı Hidrojenin (LH ₂) Güç Üretimi İçin Havaalanlarında Kullanımı	12
3.4.3. Güvenlik İçin Hangar Tasarımları	13

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.4.4. Model Hava Terminali Tasarımı	13
3.5. Çarpışma Güvenliği Ve Risk Analizleri	14
3.6. Materyal Araştırması	14
4. UÇAK VE MOTOR TEKNOLOJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ	16
4.1.Gövde Soğutmayla Laminer Akışın Kontrolü	16
4.2.Sınır Tabaka Ve Denge Analizleri	17
4.3.Rüzgar Tüneli Modelinin Tasarımı Ve Fabrikasyonu	17
4.4.Rüzgar Tüneli Testi	17
4.5. Bilgi Analizleri Ve Teorik İlişki	18
4.6.Uçak Yakıt Tankı Yalıtım Kaplamasının Geliştirilmesi	18
4.7. Tasarımın Sadeleştirilmesi	19
4.8.Element Testleri	19
4.9.Panel Testleri	20
4.10.Uçak Yakıt Tankı Fabrikasyonu Ve Testleri	20
4.11.Pompanın Geliştirilmesi	22
4.12.Yakıt Dağıtım Sisteminin Geliştirilmesi	23
4.13.Uçak Yakıt Alt Sisteminin Tasarımı Ve Test Edilmesi	24
4.14.Motor Teknolojisi Gelişimi	25
4.15.İsı Değiştiricisinin Geliştirilmesi	25
4.16.Ateşleyici Deneyleri	26
4.17. Soğutma Türbini Vanaları ve Pervaneleri	26
4.18.Motor Yakıt Kontrol Sisteminin Geliştirilmesi	27
4.19.Mevcut Uçak Motorunun Dönüşümü	27
4.20.Uçak Yakıt Sisteminin Fonksiyonel Testleri	28
4.21. Çarpma Güvenliği ve Yangın Tehlike Durumlarının Karşılaştırılması	29
4.22.Yolcu Kabinindeki Tehlikenin Değerlendirilmesi	29
4.23. Yakıt Yangınlarının Özellikleri	29

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.24. Uçakların Çarpma Testleri.....	30
5. HİDROJEN ÜRETİMİM VE YER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ	31
5.1. Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Değerlendirilmesi	31
5.2. Değişik Yakıtların Birbirleriyle Karşılaştırılması	32
5.3. Pilot Fabrikanın Geliştirilmesi	34
5.4. Sıvılaştırma Yönteminin Geliştirilmesi	34
5.5. Hava Terminali Bileşmelerinin Geliştirilmesi	35
6. HİDROJENİN UÇAK YAKITI OLARAK KULLANILMASI	37
6.1. Tarihsel ve Teknolojik Evrim	38
6.2. Hidrojenin Hidrokarbon Yakıtlarla Karşılaştırılması	45
6.3. Hidrojenin Yakıt Olarak Uçaklarda Depolanma Şekilleri	48
6.4. Yakıtların Elde Edilmesi ve Güvenliği	50
6.5. Sıvı Hidrojenin Uçaklarda Kullanıldığındaki Ekonomisi	53
7. SONUÇ	56
8. KAYNAKLAR DİZİNİ	60
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.1. Uçaklardaki Sıvı Hidrojen Yakıt Tanklarının Lokalizasyonu İçin Yapılan Çalışmalar	40
6.2. Jet Motorlarında Türbinden Çıkan Yüksek Sıcaklık Ve Basınçtaki Gazların Lülede Hızlandırılarak Tepki Üretmesi	42
6.3. Bir Tepkili Motorun Bölümleri Ve İdeal Tepkili Çevrimin T-s Diyagramı	43
6.4. Klasik Jet Motoru İle Yakıt Olarak Hidrojen Kullanan hipersonik Uçaklar	44
6.5. X43-B Uçağının Prototipi	45

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Hidrojenin Genel Özellikleri	3
5.1. Hidrojen Üretimindeki Süreçler Ve Kaynaklar	31
6.1. Hava Yakıtlarının Önemli Özellikleri	46
6.2. Sıvı Hidrojenin Ticari Yakıtlarla Kullanımlarının Karşılaştırılması	47
6.3. Hava Taşımacılığı için Farklı Özellikteki Yakıtların Güvenlik Özellikleri Arasındaki İlişki.....	52
6.4. Subsonik Uçaklarda Sinjet ve Sıvı Hidrojenin Direkt Operasyonel Maliyetlerinin (DOM) Karşılaştırılması	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
H ₂ O	Su
K	Kelvin
kW	Kilowatt
LH ₂	Sıvı hidrojen
LCH ₄	Sıvı metan
Mach	Uçağın ses hızına oranla hızı
NO	Nitrikoksit
SO ₂	Kükürt oksit

1.GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ve ekonomik gelişmeler enerji talebini hızla arttırmaktadır. Günümüzün konvansiyonel enerji kaynaklarını kömür, fosil yakıtlar ve doğal gaz, nükleer enerji ve hidrolik enerji oluşturmaktadır. Dünya üzerinde, endüstride ve konutlarda gerekli olan ısının üretimi, taşıt motorlarının ve stasyoner motorların güç üretimi, aydınlatma ve iletişim amaçları için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkelerin enerji gereksinimi ise genelde, uygarlık düzeyi ve yaşam standartları, kullanılan teknolojinin seviyesi, iklim şartları vb. ile bağlantılı olarak değişmektedir.

Artan çevre kirliliği ve sera etkisi gibi unsurlar insanlığı, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya zorlamaktadır. Hidrojen gelecek dönemlerin en etkin kullanımına sahip enerji sektörüdür. Sudan elde edilerek, kullanımı sonucu tekrar suya dönüşüm özelliği ile hidrojen, “yenilenebilir enerji” kaynağıdır.

Dünya’ da hidrojen destekli yapılan çalışmaların temel hedefi, gelecekte global kararlılığın hidrojenle ilişkili olması ve sürdürülebilir hidrojen stratejilerinin öneminin artması olarak söylenebilmektedir. O halde, hidrojen enerjisi stratejileri ve hidrojen stratejilerine stratejik yaklaşımların avantaj ve dezavantajlarıyla bir şekilde ortaya konulması zorunluluk arz etmektedir. Belirli çevreler ve bilim adamları için hidrojen enerjisi ve teknolojilerine dayalı stratejiler önemlidir. Bilindiği üzere hidrojen bir enerji kaynağı değil mükemmel bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojenin, gelecekte dikkate alınması gereken en önemli ve kayda değer bir enerji taşıyıcısı olmasının nedeni; kullanıldığı teknolojilerde verimi yükseltmesi ve düşük kirletici etkisinin olmasıdır.

Hidrojen yakıtlarının kullanımlarındaki bir diğer avantaj da, hava kirliliğine olan etkisinin çok düşük düzeyde olmasıdır. Hidrojenin hava ile yanması sonucu, hidrokarbon yakıtlarda görülen CO, CO₂, SO₂ gibi gazlar ve yanmamış hidrokarbonlar oluşmaz. Hidrojen yanması sonucu oluşan NO_x bileşenlerinin düzeyi ise, sıcaklık seviyelerindeki artış nedeniyle, öteki yakıtlara oranla daha yüksek olmaktadır. Hidrojenin üretim ve depolama maliyetlerinin günümüzde hala yüksek olması,

hidrojenin yaygın olarak kullanılamamasının nedenlerinden biridir. Ancak gelecekte hidrojenin yaygın olarak kullanımına geçilmesi ve üretim kapasitesinin artması ile birlikte maliyette doğal olarak düşecektir.

Havacılık endüstrisi, dünya enerji tüketiminde önemli bir yere sahiptir ve bu oran her geçen yıl artmaktadır. Gerek motor emisyonları, gerekse de karosen yakıtının gelecekte tükenme tehlikesi, havacılık endüstrisinde karosen yakıtlara alternatif bir yakıtın kullanımına yönelik çalışmaları zorunlu kılmaktadır.

Uçaklarda hidrojenin yakıt olarak kullanımıyla ilgili yapılan çalışmaların başlangıcı 1956 yılıdır. Amerika Birleşik Devletleri 1956 yılında, bir B57 Canberra uçağını, motorlarından birinde helyumla basınçlandırılmış hidrojen yakıtı kullanarak uçurmayı başarmıştır. Daha sonra 1970'lere gelindiğinde ortaya çıkan petrol krizi, petrole bağımlı diğer tüm sanayi dalları gibi havacılığı da alternatif bir yakıt bulma arayışı içine sokmuştur. Ancak kriz atlattıldıktan sonra bu konuyla ilgili yapılan çalışmaların çoğu rafa kaldırılmıştır. Hidrojen gazının yakıt olarak kullanılma uygulamasının günümüzde ticari hava yollarında kullanılması için ancak askeri teknolojinin gelişiminin bir sonucu olarak ya da uluslar arası yardımcı girişimlerle gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada sıvı hidrojenin uçaklarda kullanılmasıyla elde edilebilecek kazanımlar ve havacılık alanında hidrojen kullanımının aşamaları incelenmiştir.

2. HİDROJEN VE ÖZELLİKLERİ

Bilinen en hafif element olan hidrojen, renksiz, kokusuz ve normal şartlarda gaz fazdadır. Atmosfer basıncında ancak -253°C altındaki sıcaklıkta sıvı faza geçer. Çok düşük yoğunluğa sahip bir gaz olması nedeni ile geniş hacim kaplar. Hidrojenin genel özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Hidrojenin Genel Özellikleri [15]

Özellikler	Değerler	Birim
Mol kütlesi	2.016	Kg/kmol
yoğunluğu	0.0838	Kg/m ³
Üst ısı değeri(kütlesel)	141.9	MJ/kg
Üst ısı değeri(hacimsel)	11.89	MJ/m ³
Alt ısı değeri(kütlesel)	119.9	MJ/kg
Alt ısı değeri(hacimsel)	10.05	MJ/m ³
Kaynama sıcaklığı	20.3	K
Sıvı yoğunluğu	70.8	Kg/m ³
Kritik noktadaki sıcaklık	32.94	K
Kritik noktadaki basınç	12.84	bar
Kritik noktadaki yoğunluk	31.40	Kg/m ³
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	858	K
Havada tutuşma limitleri	4-75	% hacimsel
Havada stokimetric karışım	29.53	% hacimsel
Havadaki alev sıcaklığı	2318	K
Difüzyon katsayısı	0.61	cm ^{2/s}
Özgül ısı	14.89	kJ/kg.K

Hidrojen yakıt olarak ele alındığında ise, kütleli olarak ısı değeri rakipsizdir. Bu değeri benzinin yaklaşık 3 katıdır. Hidrojenin en yüksek yanma sıcaklığı olan 2318°C'ye %29 hacimsel hidrojen/hava karışım oranında ulaşılır. Şayet oksitleyici olarak hava yerine oksijen kullanılırsa bu değeri, 3000°C 'ye çıkar [13, 15]. Hidrojen-hava karışımları gaz yakıtlara göre de daha geniş tutuşma sınırlarına sahiptir. Örneğin, metan-hava karışımlarının tutuşabilmesi için hava fazlalık katsayısının 0.6–1.9 değerleri arasında bulunması gerekmektedir [8, 11, 15]. Yoğunluk, viskozite ve difüzyon katsayısı gibi özellikleri nedeniyle hidrojenin, herhangi bir delikten veya bağlantılardan sızma ihtimali doğal gazla göre 1.26–2.8 kat daha fazladır. Yüksek basınç tanklarında yer alan hidrojenin sızması halinde ise sızma hızı ses hızıyla orantılı olacaktır. Hidrojen alevinin zor görünür oluşu yangın anında fark edilmesini güçleştirmektedir. Fakat görünürlük veya parlaklık, çeşitli kimyasal katkılarla artırılabilir. Hidrokarbon yakıtlar, yanması sonucu oluşan duman ve is zehirlenme riskine sahipken, hidrojenin yanması ile (karbon içermemesi nedeniyle) bu risk ortadan kalkmaktadır [6,11]. Hidrojenin sıvı olarak kullanımı durumunda ise yakıt haznesinin özel olarak yalıtılması gerekmektedir. Çünkü sıvı fazdaki sıcaklığı -253 °C altındadır ki bu sıcaklıkta ortamdaki hazneye hızla ısı transferi gerçekleşmektedir. İdeal bir yalıtım söz konusu olamayacağı için zamanla hazneye sızan ısı, yakıtın bir kısmının gazlaşmasına ve hazne basıncının artmasına yol açabilecektir ki bu durumda gaz fazındaki hidrojenin tahliyesi gerekebilecektir [11].

2.1. Hidrojen Üretimi

Hidrojen sentetik bir yakıt olup, üretim kaynakları son derece bol ve çeşitlidir. Bunlar arasında su, hava, kömür ve doğal gaz sayılabilir. Ancak, sayılan bu kaynaklardan kömür ve doğal gaz fosil yakıt olup, sınırlı rezerve sahiptir. Ayrıca fosil yakıtların giderek tükenmekte olması, hidrojen üretiminde geniş kaynaklara sahip suyun kullanımını daha avantajlı hale getirmektedir. Birincil enerji kaynakları yardımıyla üretilen hidrojen, günümüzde suni gübreden, nebati yağlara ve roket yakıtlarına kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır ve bunun için dünyada her yıl 600 milyar metreküp hidrojen üretilmektedir. Hidrojen üretimi için çok eskiden beri bilinen bir yöntem suyun (H₂O) içindeki hidrojeni ayırmaktır. Fakat hidrojen elde etmek için başka yöntemlerde

mevcuttur. Bu yöntemler sırasıyla, fosil yakıtlar, güneş, rüzgâr, dalga enerjisi, jeotermal enerji ve biyokütle gibi birincil enerji kaynakları şeklindedir [11, 14].

2.1.1. Hidrojenin fosil yakıtlardan üretimi

Günümüzde sanayide kullanılan hidrojen büyük miktarlarda, doğal gaz, petrol ürünleri veya kömür gibi fosil yakıtlardan elde edilmektedir. En çok kullanılan yöntemler, petrolün kısmi oksidasyonu, buhar demir işlemi ve kömür gazlaştırılması şeklindedir. Sanayide ikincil ürün olarak hidrojen elde edilen yöntemler arasında, klor-alkaliden karşıt klor üretimi, ham petrolün rafineri işleminde hafif gazların üretimi, kok fırınlarında kömürden kok üretimi ve margarin sanayiinde kimyasal hidrojenerasyon işlemleri sayılabilmektedir [11].

2.1.2. Hidrojenin elektroliz yöntemiyle üretimi

Suyun doğru akım kullanılarak hidrojen ve oksijenin ayrılması işlemine elektroliz denmektedir. Hidrojen üretimi için en basit yöntem olarak bilinmektedir. İlke olarak, bir elektroliz hücresi içinde, genelde düzlem bir metal veya karbon plaklar olan, iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı, elektrolit olarak adlandırılan iletken bir sıvı bulunmaktadır. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım iletken sıvı içinde, pozitif elektrottan negatif elektroda doğru akmaktadır. Bunun sonucu olarak da, elektrolit içindeki su, katottan çıkan hidrojen ve anottan çıkan oksijene ayrılmaktadır. Burada yalnız suyun ayrışmasına karşılık, su iyi bir iletken olmadığı için elektrolit'in içine iletkenliği artırıcı olarak genelde potasyum hidro-oksit gibi maddeler eklenmektedir [2,11]. Suyun elektrolizi için, normal basınç ve sıcaklıkta, ideal olarak 1.23 Volt yeterlidir. Tepkimenin yavaş olması ve başka nedenlerle, elektroliz işleminde daha yüksek gerilimlerde kullanılmaktadır. Hidrojen üretim hızı, gerçek akım şiddeti ile orantılı olduğundan, ekonomik nedenlerle yüksek akım yoğunlukları tercih edilmektedir. Bundan dolayı pratikte suyun ayrıştırılması için hücre başına uygulanan gerilim genelde 2 Volt dolayındadır. Kuramsal olarak, her metreküp oksijen için 2.8 kW-saat elektrik enerjisi yeterli olmakla birlikte, yukarıda özetlenen nedenlerle pratikte kullanılan elektrik enerjisi miktarı bir metreküp hidrojen üretimi için 3.9–4.6 kW-saat

arasında değişmektedir. Buna göre elektroliz işleminin verimi %70 dolayında olmaktadır. Ancak, son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar ve gelişen teknoloji sayesinde %90 verim elde edilebilmektedir. Pratikte kullanılan elektroliz hücrelerinde, nikel kaplı çelik elektrotlar kullanılmaktadır [11].

2.1.3. Hidrojenin ısı kimyasal yöntemiyle üretimi

Elektrik üretimi sırasında oluşan ısı enerjisi, suyun ayrıştırılması için kullanıldığında, daha yüksek verim elde etmek olanaklıdır. Ancak, suyun ısı enerjisiyle ayrıştırılması için en az 2500°C'lik bir sıcaklık gerekmektedir. Burada, tek basamakta termo-kimyasal işlem yerine, birkaç basamaklı işlemler ön görülmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar sonucu, çok basamaklı ısı kimyasal işlemlerde gerekli sıcaklık 95°C'ye kadar indirilmiş, toplam verim ise %50 olarak bulunmuştur. Isıl-kimyasal yöntem üzerindeki çalışmalar yoğun bir şekilde sürmektedir [2,11].

2.2. Hidrojen Enerjisinin Kullanımı

Sürdürülebilir gelişme senaryosu neredeyse sürdürülebilir temiz enerji üretimiyle eş anlamlıdır. Sürdürülebilir gelişim, insanoğlunun ihtiyaçlarını doğayla uygun bir denge unsuru kurarak uzun dönemli bir bakış açısı içerisinde karşılamayı içermektedir [1]. Örneğin, hidrojen enerji sistemi, son 30 yıl içerisinde büyük bir ivme kazanmıştır. Bu dönem boyunca hidrojen enerjisi, yapılan gelişme ve araştırmalar içerisinde sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak ilk sıralarda yer almaktadır. Ayrıca bu zaman periyodu içerisinde hidrojen teknolojilerinin ticaretleştirilmesine yönelik faaliyetler ve bu enerji sistemi hakkında uygulamalar hızlanmıştır. Bu teknolojiler içerisinde birkaç senaryo kullanılabilir. Çeşitli hidrojen teknolojileri günümüzde uygulanabilir olmasına rağmen, küresel pazarlara yönelik kütleli üretim yapıldığı zamanlarda çıkan maliyetlerin hidrojen enerjisinin yararlarıyla karşılaştırılmalıdır [4].

3. HİDROJENİN YAKIT OLARAK UÇAKLARDA KULLANILABİLMESİ İÇİN GEREKEN TEKNOLOJİ GELİŞİMİ

Hidrojenin uçaklarda kullanılması için ilk adım sıvı hidrojeni elde etmektir. 1980 yılında bir araştırma ve geliştirme programı bu amacı formüle etmiştir. 21 Ağustos 1979 günü Zürih 'te yapılan "İkinci Dünya Hidrojen Enerjisi Konferansı" nda sunulan bir rapor ile uçaklarda yakıt olarak sıvı hidrojen (LH₂) kullanılması önerilmiştir. Bu öneri, hidrojen enerjisinin uçaklarda kullanılabilmesi için yapılması gereken işlemleri kapsamakta olup günümüzde de geçerliliğini korumaktadır.

Sempozyumda sunulan rapordaki önerilerin, ülkelerin desteği sayesinde tamamlanabileceği anlamı ortaya çıkmıştır. Dünya çapında hava yolu taşımacılığı endüstrisi için yeni bir yakıt türünün geliştirilmesi, hükümetlerin yeni yakıt türünün aşağıda belirtilen kıstaslar altında değerlendirilmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır.

1. Yeni yakıtın mutlaka sosyal yararlarının, maliyetleri geçmesi gerekliliği vardır. Yeni yakıttan belirlenenler ise; ticari denge, çevre, daha fazla kullanılabilir kaynak, yeni ürünler ve servisler yeni iş olankları şeklindedir.
2. Yeni yakıt türünün mutlaka geleneksel yakıt türlerinden daha fazla yararları olması gerekmektedir.
3. Endüstrilerin yeni yakıt türünü benimsemesi yeterli olmayıp bu araştırmalara finansman sağlayan hükümetin de bu konuyu anlaması gerekmektedir.

Hükümet desteği olmadan endüstriyel çevrelerce yapılan yakıt türünün hava yollarında kullanılması çabası, kullanılacak olan yakıt türünün tam anlamıyla tedarikinin kolay bir şekilde yapılması zamanına kadar ticari **Jet A** yakıtının ve bunun türlerinin kullanılmasına devam edilecektir. Bu yüzden de bu zamana kadar diğer yakıt türlerinin ve alternatif yakıt türlerinin hükümet desteğiyle hızlı bir şekilde geliştirileceği için bunların yanında hidrojen kullanımının yararları diğerlerinin yanında sönük kalabilecektir. Kullanılması düşünülen yakıtın kullanılabilmesi için ülkelerin hava alanlarına sıvı yakıt üretim merkezi ve depolama tesislerini kurması

gerekmektedir. Ancak bu şekilde yeni bir yakıtın hava taşıtlarında kullanılması söz konusu olabilecektir. Bu nedenle de kullanılacak olan sıvı hidrojenin tam anlamıyla yararlarını anlaşılabilmesi için çalışmaya katılacak ülkelerin aşağıda belirtilen 3 kriteri yerine getirmesi gerekecektir:

1. Çalışmanın tüm aşamalarında katılımın sağlanmalıdır.
2. Ülkeler mutlaka katılacağı şartlara göre derecelendirilmelidir.
3. Katılacak olan ülkelerde mevcut hava alanlarının, en az 4'ünü mutlaka sıvı hidrojen alanlarıyla donatmalıdır [3].

3.1. Sıvı Hidrojen Motoru Tasarımı Çalışmaları

Mevcut çalışmalar, turbofan motorlarında performans kaybı yaşanmadan ve uçaklarda tahmin edilen uçak ağırlığının değişmeden hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının mümkün olabileceğini ortaya koymaktadır. Sıvı hidrojenin turbofan motorlarda kullanılabilmesi için gereken kapsamlı bir tasarım çalışmasında hedefler aşağıda belirtildiği gibi olmalıdır:

Yapılacak tasarımda gürültüsüz çalışma ve motor performansı göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca uçak boyutlarının, ağırlığının, motorunun çalışma karakteristiklerinin, performansının, tahmin edilen maliyetinin, ölçeklendirilmiş ilişkilerin mutlaka korunması gerekmektedir. Ayrıca benzer teknolojilere dayanarak **Jet A** yakıtından elde edilen verilerin tasarımın sonunda da korunması gerekmektedir. Sıvı hidrojen motoru için temel parçaların, yüksek basınç pompasının, ısı değiştiricilerin, yanma sistemlerinin, motor kontrol sistemlerinin, kompresörün, fanın, türbinlerin ve soğutma sistemlerinin malzeme seçimleri ve temel tasarım gereklilikleri kurulmalıdır. Mevcut motorun hidrojenle çalışan bir motora dönüştürülebilmesi için aşağıda belirtilen 4 adım izlenmelidir.

1. Motor teknolojisi geliştirme programı için girdiler oluşturulmalıdır.
2. Mevcut bir motorun hidrojene dönüştürülebilmesi için gerçekçi bir tasarım yaklaşımı belirlenmelidir.

3. Hava taşıtlarında yakıt olarak kullanılacak sıvı hidrojenin sertifikalandırılması için özel gereklilikler belirlenmelidir.
4. İki yakıt türünün de motorlarda kullanılmasının yapılabilirliği incelenmelidir. İkili yakıt türleri sıvı hidrojen ve **Jet A** ya da **sıvı hidrojen** ve **LCH₄** olabilir. Bu çalışmalar motor üreticileri tarafından yapılmalıdır [3].

3.2. Sıvı Hidrojen Kullanımını Başlatma Çalışmaları

Bu çalışmayla sıvı hidrojen, hava taşımacılığı endüstrisi içerisinde konuşlandırılabilir. Yakıtın sıvı hidrojen olarak değişimi mutlaka aşamalı olarak gerçekleştirilmelidir. Bu da yıllar sürecektir. Sıvı hidrojen tanımlandıktan sonra, eski uçaklar **Jet A** ya da **Sinjet** gibi yakıtlar kullanmaya devam edilecektir. Bu yüzden de değişim boyunca birçok havaalanı her iki yakıtı da tedarik etmek zorunda kalacaktır. Burada sorular şunlar olmalıdır:

- Ekonomik ve operasyonel olarak cazip olan seçenek hangisidir?
- Bu değişim nasıl yapılmalıdır?
- Havaalanlarının sıvı hidrojen teminin için kabiliyetleri var mıdır?

İlk denemeler için seçilecek havaalanları için şu hususlara dikkat etmek gerekmektedir:

- Havaalanı iletişimi
- Trafik yoğunluğu
- Uçak çeşitliliğine göre havaalanlarındaki servis kapasitesi
- Sıvı hidrojeni tedarik edebilecek ülkelerle uluslar arası ilişkiler

Ancak herhangi bir uçak acil durumlarda seçilen bu havaalanları dışında herhangi bir havaalanına inerse sorun yaşanabilir. Bunun içinde sıvı hidrojen kullanan hava taşıtlarında ikili bir yakıt sistemi yapılabilir mi ya da sıvı hidrojen deniz yoluyla

güvenli bir şekilde taşınıp hava taşıtına ulaştırılabilir mi sorularının yanıtlarının bulmak gerekecektir.

Bahsedilen kısıtlar ışığında yapılacak çalışmalar şunları içermelidir:

1. Havaalanı bulunan her bir şehre sıvı hidrojen olanaklarının sağlanabilmesi için uygulanabilir bir plan yapılmalıdır.
2. Sıvı hidrojen olanakları kurulacak her bir havaalanı yakıt gereklilikleri, maliyetler ve mümkün olan metotların finansmanı bakımından incelenmelidir.
3. Sonradan çıkabilecek başlıca sorunlar hemen çözülebilmelidir [3].

3.3. Çalışmanın Etkileri

Önerilen sıvı hidrojenin birçok avantajı olmasına rağmen, birçok ticari havayolu, hidrojenin yakıt olarak kullanılması hakkında hevesli olmayacaktır, çünkü şu an kullanılan petrolden sıvı hidrojen yakıt sistemine geçişin çok zor ve maliyetli olacağı açıktır [4, 12].

Aslında havacılık alanındaki başarıların altında yatan düşünce havacılığın çok eşsiz bir taşınabilir yakıt ihtiyacına sahip olmasıdır ve ekonominin diğer sektörleri de yıllardır ertelenen bu kaçınılmaz yakıt dönüşümleri üzerinde çalışmaktadır. Maalesef petrol kullanan diğer endüstri sektörlerinin neredeyse hemen hemen hepsi de aynı düşüncededir. Diğer bazı kullanıcıların daha yüksek bir öncelik istemelerinden dolayı ya da onların daha yüksek bir gelir sağlamaları ve bu nedenle petrol ürünleri için daha yüksek bir ücret talep edebildiğinden, hava taşıma endüstrisi hassas bir pozisyonundadır. Yakıtları değiştirmek için gerekli havacılık sektörü ihtiyacının, yakında çok artacak olması açıktır.

Gelecekteki petrolun durumu belirsizdir ve havacılıkta yapılan işlerde belli bir kar marjı alternatif yakıtların kullanılabilirlikleri için önem kazanmaktadır. Hidrojen yakıtlı uçaklarının teknik olarak yapılabilme düşüncesi teorik analizler ve sınırlı

deneylerle kuvvetlendirilmesine rağmen, ekonomik, sosyal ve kurumsal süreçleri içeren dinamik dönüşümün sezgisel bir seviyede kaldığı anlaşılmaktadır [3,4,12].

Havacılık endüstrisinin, hidrojene dönüşümü gösteren gerçekçi bir senaryonun gelişimine ihtiyacı vardır. Böylece önemli kararlar bu gelişmeler üzerinden alınabilmektedir. Senaryo ekonomik durumları, kurumsal bariyerleri ve dürtüleri, sosyal dengesizlikleri ve aşağıdaki tüm temel etken sınıfları içeren projeye katılan ülkelerin uygunlukları hesaba katılmalıdır.

- Havayolu işletmeleri
- Uçak ve motor imalatçıları
- Yakıt firmaları
- İş gücü
- Havaalanı operatörleri
- Ulaşımında uçak kullananlar
- Halk
- Hükümet görevlileri

Senaryonun, tüm aktörler için avantaj ve dezavantajlarının düşünülmüş optimum bir çözüm sağlıyor olması gereklidir. Aslında havacılık sektöründeki hidrojen kullanımını öneren bir teknolojiye ihtiyaç vardır. Temel nihai çalışmanın çıktıları olan bu senaryoyla birlikte hidrojenin yakıt olarak kullanılmasına ilgi artacaktır. Projeye katılan ülkeler tarafından hidrojenin kullanımı ile ilgili mutabakatla koordinasyon sağlanmalıdır.

Elde edilen sonuçların etkisiyle projeye katılan ülkeler kar etme yaklaşımıyla birlikte basın yönlendirmesiyle konu ile ilgili gelişmeler önem kazanacaktır.

Basın bu sonuçların etkisiyle karar alıcıları yönlendirebilecek ve projeye katılan her ülke etkilenecektir. Basın kendine has yöntemlerle, hidrojenin avantaj ve dezavantajlarını havacılıkta yakıt olarak kullanılmasının mevcut katılımcı ülkeler

tarafından anlaşılıp anlaşılmadığını araştıracaktır. Bunun sonucunda, hidrojenin yararları hakkında basında yorumlar ortaya çıkacaktır.

Son olarak, silahlı kuvvetlerin elindeki teknik verilerle, katılımcı ülkelerin sahip olduğu çeşitli öngörülerle proje takımı temel bir geçiş senaryosu oluşturacak ve bu grup senaryonun katılımcı ülkelere etkilerini açık bir şekilde tanımlayacaktır. Oluşturulacak senaryo katılımcı ülkelerinde yorumlaması için gönderilmelidir ve yapılacak yorumların telefon ya da yüz yüze görüşmelerle ve basından takip edilecektir. Ancak halen hipotez aşamasından senaryoya geçiş mutlaka ulusal bir şekilde yapılmalıdır. Bunun içinde reklâmların yapılması ve tanıtıcı film gibi faaliyetlerin yapılması ulusların karar vermelerini kolaylaştıracaktır [3].

3.4. Havaalanı Gereklilikleri

Havaalanlarının tam olarak sıvı hidrojeni yakıt olarak hizmet verebilmesi için temel gerekliliklerin kurulması gerekmektedir. Yapılacak çalışma mutlaka herhangi bir soru sorulmasına imkân vermeyecek şekilde aşağıda belirtilmiş şekilde, ayrıca ve geniş kapsamlı yapılmalıdır.

3.4.1 Yer destek sistemleri ve rampa operasyonlarının analizi

Yer destek sistemleri ve rampa operasyonları konusunda detaylı bir çalışma için öncelikle uçağın prototipi oluşturulmalıdır. Bu çalışma yer destek sistemlerinin tanımını, kabin donanımları için gereklilikleri ve ilgili pozisyonlama ve operasyonel süreçleri içermelidir. Yapılacak çalışma, yakıt süreçleriyle birlikte eş zamanlı yürütülen operasyonları tanımlamalıdır. Sonuçta çalışmada yeni tasarlanacak olan hava taşıtlarının konfigürasyonlarının mevcut havaalanlarına olan etkileri değerlendirilmelidir.

3.4.2 Sıvı hidrojenin (LH₂) güç üretimi için havaalanlarında kullanımı

Yapılan çalışmalar sonucu sıvı yakıt yakan donanımlarla güç üretimi düşünüldüğü ve arzu edildiği gibi elektrikle güç üretimine göre daha kullanılabilir

olduğu ortaya çıkmıştır. Sıvı hidrojen tedarikinin optimizasyonunu yaparken tüm havaalanlarının güç üretimi için ihtiyaç duyduğu sıvı hidrojen ile hava taşıtlarının ihtiyaç duyduğu sıvı hidrojen miktarlarını birlikte içeren bir model geliştirilmelidir. Havaalanlarının sıvı hidrojen ihtiyacı bağımsız düşünülmemelidir. Ancak bu yapılacak çalışma sırasında havaalanlarının güç ihtiyacının gaz hidrojenle de sağlanabileceği göz önünde bulundurulabilir.

3.4.3 Güvenlik için hangar tasarımları

Bu konu hangar güvenlik gerekliliklerini, uçak bakım yapılarının gerekliliklerinin analizleri gibi konuları içermektedir. Yapılacak çalışma her çeşit havaalanı yapılarının yeni yakıtı göre düzenlenmesi, havaalanı etrafındaki yerleşim yerlerine olan etkilerini gösteren çok kapsamlı olmayan eski kodlarla bu etkileri tanımlayan konuları içermelidir. Yapılacak bu çalışma, sıvı hidrojen yakıtı kullanan hava taşıtlarının bakımının nasıl olacağı konusu hakkındaki çalışmaya da yardımcı olacaktır.

3.4.4 Model hava terminali tasarımı

Yeni yakıtlarla tasarlanmış bir nakliye filosunun terminal çalışmalarını optimize etmeyi amaçlayan bir veya daha fazla havaalanı prototipi geliştirmek için bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların ilkinde mevcut tekniklerle sıvı hidrojen nakliyesinin yapılabileceği anlaşılmıştır. Bu çalışma aynı zamanda tercih edilebilir süreçlerin temel bölümlerine alternatif yaklaşımları gösteren verileri de sağlamaktadır. Burada önerilenler sadece basit uyarlamaları değil esas süreçler için alternatif sistem çalışmalarına da yer vermektedir. Mevcut hava alanları demiryollarından gelişmiştir. Var olan kolay değişim eğilimlerinin kısıtlamaksızın özellikle sıvı hidrojen yakıtı kullanmak için tasarımı yapılan hava alanları ileriye yönelik veriler sağlayabilecektir [3].

3.5. Çarpışma Güvenliği Ve Risk Analizleri

Tipik bir sıvı hidrojen yakıtlı nakliye uçağı tasarımının güvenli olarak yapılması için aşağıda belirtilen iki unsurun ayrıntılı bir analizini yapmak gerekir;

1. Geliştirilecek modelin ayrıntılı tasarımı,
2. Yardımcı sistemler, uyarı sistemleri, tehlike azaltma sistemleri, tahliye sistemleri ve gaz sızma ya da dökülme olaylarında takip edilecek acil durum yolları,

Seçilmiş bir ticari nakliye uçağı için gerçekleştirilen çalışmalardan biri sıvı hidrojen yakıtlı olan diğeri de geleneksel **Jet A** yakıtlı olandır. Her iki tasarımın da muhtemel hata olasılıkları için hem uçuş sırasında hem de yerde iken analiz edilmelidir. Kaza rapor analizleri ile de uygun olan seçilmelidir. Bunun için hedefler şunlar olmalıdır;

1. Ortaya çıkabilecek çeşitli tür kazaların analizleriyle beraber, hava taşıtı yerdeyken ve havadayken yapılan çalışmalar, gidilen yolu tahmin etmede yardımcı olacaktır. Mesela, elektrostatik kaynaklarda herhangi bir potansiyel hatanın önceden tahmin edilmesi sorunun baştan çözümlenmesine yardımcı olabilecektir.
2. Hava taşıtına sertifika verecek otoritelerin bu çalışmada birleştirilmesiyle, hava taşıtının güvenliğini ve tehlikeleri ortaya koyacaktır ve sıvı hidrojen yakıtının hava taşıtlarında kullanılması sertifikasyonu döngüsü daha hızlı ve daha kolay olacaktır [3].

3.6. Materyal Araştırması

Hidrojenin malzemeye olan etkilerini bulmak için çeşitli malzemeler için servis donanımları ve uçak sisteminin temel parçalarını esas alarak çeşitli deneyler yapılmıştır. Bununla beraber yeni malzeme türü ihtiyacı ve bu ihtiyaca göre yeni malzemelerin

geliştirilmesi ve araştırılması sonucu hidrojenin malzeme üzerindeki etkilerinin mutlaka tespit edilmesi gereklidir.

Yapılan çalışmanın kabul edilebilir olabilmesi için yapılan deneyin hava taşıtlarında gereken metal ve metal olmayan donanımlar, hidrojenin yanma şartlarındaki gibi yüksek sıcaklıklarda ve ani sıcaklık değişimlerinde yapılması gereklidir. Buna ek olarak yapılacak çalışmada, hidrojen yakıtının yakılması işlemi uçakların daha yüksek sıcaklıklara çıkabilme olasılığı yüzünden gaz nitrojenin soğutucu olarak kullanılması gündemde olabileceğinden, kullanılacak olan gaz nitrojenin malzemede termal yorgunluk ve bundan başka sorunlara yol açıp açamayacağının tespiti gereklidir.

Hidrojen karakteristikleri ve ulaşabilecek sıcaklıklar esas alınarak yapılan metalürjik araştırmalar içerisindeki organizasyonel deneyler, yapılacak çalışma için mutlaka yeterli sayıda olmalıdır [3].

4. UÇAK VE MOTOR TEKNOLOJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Sıvı hidrojenin uçaklarda kullanılabilmesi için yeni uçak motor tasarımlarının yapılması şarttır. Uçak motor tasarımlarını yaparken aynı anda mutlaka yapılacak uçak motorunun test ekipmanlarının da tasarımlarının yapılmasıda gereklidir.

4.1. Gövde Soğutmayla Laminer Akışın Kontrolü

Akışın laminer şartlarda gerçekleştirilmesinin en bilinen bilinen yolu gövdenin soğutulmasıdır. Gövdeyi hızlı soğutmanın en bilinen yolu ise kanatlar yardımıyla yüzey alanının artırılmasıdır. Yüzeyin soğutulması ile Re sayısı kritik değerin altında tutulabilecektir.

Gövde soğutma laminer akışın kontrolünün sağlanması için güvenilir bir yoldur. Lees, 1974'de sınır tabakadaki akışın gövde sıcaklığından etkilendiğini tespit etmiştir. Konvansiyonel yakıtlı uçakların büyük alanlarının istenilen sıcaklıklara soğutulması düşüncesi pekte gerçekçi olmaması nedeniyle bu yöntem pek pratik değildir. Fakat bütün bunlar uzun menzil subsonik ve süpersonik uçaklarda yakıt olarak sıvı hidrojenin kullanımı umudunu arttırmıştır.

Sıvı hidrojen tarafından oluşturulan sıcak bölge laminer akış kontrolünü etkilemede gerekli etkin soğutma performansı için avantajlı imkânı sağlamaktadır. Sadece uçak gemilerindeki uçakların laminer akış kontrolünü sağlayacak aynı zamanda yakıtı eklenen ısı özellikli yakıt tüketimini de yararlı bir şekilde azaltacaktır.

Sıvı hidrojen yakıtlı uçaklarda gövde soğutma ile laminer akım kontrolünün başarılması sayesinde farkına varılabilen çekici potansiyel yararların değerlendirilmesinde takip eden program uzun menzil teknoloji gelişim programının ilk fazı olarak düşünülmektedir [3].

4.2. Sınır Tabaka Ve Denge Analizleri

Uygun bilgisayar kodları kullanarak sınır tabaka karakteristiklerini ve bunların test şartlarının uygun aralıkları için geçiş noktaları hesaplanmalıdır. Hesaplanan parametre değişimleri soğutma sıcaklık oranlarını, Reynolds sayısını, Mach (uçak hızının ses hızına oranı) sayısını ve başlangıç açısını içermelidir [3, 17].

4.3 Rüzgâr Tüneli Modelinin Tasarımı Ve Fabrikasyonu

Sıvı hidrojeni yakıt olarak kullanacak yeni uçak motoru modeli mutlaka önceden rüzgar tünelinde test edilmelidir. Bu nedenle bu motora uygun rüzgar tüneli tasarımı da yapılmalıdır. Tasarlanacak rüzgar tüneli belirli bir statik basınç altında çalışabilen ısı değişim algılayıcıları ve uygun ısılarla tamamıyla donatılmış olmalıdır. Soğutma sisteminin çalışması gösterilmelidir ve ısı değişim ayarları ile ısı algılayıcılarının kalibrasyonunda rüzgâr tüneli testinde değerlendirilmelidir [3].

4.4. Rüzgar Tüneli Testi

Rüzgar tüneli bölümünde hangi testin seçilmesi gerektiği kritik bir konu olup, düşük bir hava akımında anlamlı sonuçları almak için gereklidir. NASA-Langley 2.5 m transonik basınç tüneli bu amaç için iyi bir model oluşturur. Ele alınan modelde en az iki Mach sayısı ve her bir Mach sayısında üç başlangıç açısı araştırılmalıdır. Rüzgar tünelindeki fiziksel düzenlemelere ek olarak, yapılan testlerde 30 derecelik kaymayı sağlayan yerleşmiş modellerle çalışılmalıdır. Bu yapılan testlerin her biri için Reynolds sayısı birimi ve yeterli soğutma oranı değişimleri elde edilmelidir. Reynolds sayı dizi birimi her metre için en az 1.22×10^6 ya da 12×10^6 Reynolds sayısı olmalıdır. Değişim nokta yerine ek olarak önceki basınç dağılımı ve sonraki ölçümlerin değerlendirilmeleriyle normal güç ve çekme ölçülmelidir [3].

4.5. Bilgi Analizleri Ve Teorik İlişki

Testler aerodinamik performansı ve test edilen ürününün değişim karakteristiklerini belirlemek için yapılır. Deneysel sonuçlar teorik tahminler ve uyumsuzluklarla karşılaştırılmalıdır. Türbülânstan, test hava engeli üstünde laminer akışa değişiminde düşük derecelerde hava akımına sahip bir rüzgâr tüneli bulmak zordur. Bu yüzden de uçuş testleri yapılabilir olabilmesi için böyle bir tünel inşa edilmelidir. Bu tünelin yapılması da bu proje için gereken toplam maliyetin üç katına çıkmasına neden olacaktır [3].

4.6. Uçak Yakıt Tankı Yalıtım Kaplamasının Geliştirilmesi

Birleştirilmiş yakıt tankları kullanıldığında, tank yalıtımı dışarıdan yapılmalıdır. Bunun için de buhar bariyerlerinin köpüğün içerisine nüfuz etmiş olan havadan korumak için mutlaka poliüretan köpük kullanılmalıdır. Entegral olmayan tank tasarımı elemine edilmiştir çünkü entegral olmayan tank doğal olarak ağırdır ve hacimsel etkinliği azdır. Bu sonuçla bu tank tasarımını kullanan uçaklar için doğrudan maliyetler daha fazla olacaktır. Bir seçim yaparken gerçekçi olmayan düşünceler sonucu ortaya çıkan değerlendirmeler içerisinde mikroküre ve hücresel köpük yalıtım sisteminden herhangi birisinin seçilmesi söz konusu olacaktır. Ancak her iki tasarım üzerinde analitik ve deneysel olarak daha fazla çalışma yapmak, gerçeklere dayanan bilgiler ışığında bir seçim yapılmasını sağlayacaktır. Hücresel köpük yalıtım sisteminin seçimi için gereken bilgi ihtiyacı, yapılacak bu çalışmayla elde edilecektir.

Yapılacak programda tasarım, fabrikasyon ve genel yapısal yalıtım bileşenlerinin testlerini birleştirmek gereklidir. Yapılan çalışmanın sonucunda elde edilen bilgiler tasarım prensiplerin kurulması, özel elementlerin ve toplanmış bileşenlerin performansının daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Konuların eksik bulunduğu yerlerde yeni elementlerin önerildiği yeni tasarımlarla bu konular geliştirilebilir.

Bütün yapılan testler düz elementler ve paneller kullanarak yapısal yalıtım sistemi simule edilebilir. Yalıtım için iki adet dış koruma sistemi önerilir. Bunlar:

1. Hücresel köpük yalıtımının üzerine elastiki bir malzemenin kaplanmasıdır. Bu kaplama yüzeyi sistemin buhar bariyerlerinin bir parçası gibi yüzeyi koruyacaktır.
2. Sandviç yapıdan ayrı bir kaplama hücresel köpüğün elastik kısmının üzerine kurulmasıdır. Bu yapı buhar bariyerleri, kaplama ve hücresel köpük arasında bir ara yüzey oluşmasını sağlayacaktır.

Her iki koruma sistemi de özel tasarım çalışmaları içerisinde bulunmalıdır. Eğer yapılacak tasarımlarda elastiki malzeme kaplanmasına yer verilirse diğer konularda geçen kaplamalar için bir model olabilir. Çalışmadaki detaylı görevler şu konular içerisinde düşünülmelidir [3]:

4.7. Tasarımın Sadeleştirilmesi

Kuramsal tasarımın detayları, analitik çalışmalar boyunca ve basit, uygun testlerle geliştirilebilir. Bu çalışmalar şunları içerir:

- Kabul edilebilir kıstasların ve gerekliliklerin belirlenmesi
- Tasarımın doğruluğunun kesinleştirilmesi için analizlerin yapılması
- Mühendislik çizimleri için gerekli hazırlıkların yapılması
- Uygun malzemelerin ve süreçlerin şartnamelerinin oluşturulması
- Onay verilmiş yan sanayi verilerinin uygun bir şekilde sağlanması hakkındaki çalışmaların yapılması [3].

4.8. Element Testleri

Bu konunun görevi, yakıt tankının yapısal yalıtım sistemlerinin örnek elementlerinin dayanma karakteristiklerinin ve statik dayanım içerisindeki temel

anlayışlarının ve başlangıç veri tabanının sağlanmasını içerir. Burada bir deneysel test programı belirlenmelidir.

Geniş ve daha karmaşık test örnekleri çatlak dayanımı ve yakıt tankı malzemesinin çatlak büyüme eğiliminin tespiti için kullanılmalıdır. Ayrıca bu testler yabancı madde hasarlarının etkilerinin tespiti ve yakıt tankı yapısal yalıtım sistem tasarımının davranışlarının belirlenmesi için yapılmalıdır. Yapılacak bu çalışma için anlaşılabilir deneysel sonuçlar gerekli olduğundan bazı destek analizler yapmak gereklidir.

Bu çalışmanın tamamlanması için analitik bilgileri onaylamak, tasarım doğruluğunun garantisini sağlamak ve yapısal yalıtım sistem tasarımının daha geniş panel sistemlerine ilerlemesi için yeterli bilgi elde olmalıdır [3].

4.9. Panel Testleri

Panel testlerinin amacı, yapısal yalıtım sistem tasarımı için başlangıç temel bilgisi sağlamaktır. Bu testte statik test ve yorma testlerinin her ikisinin de sıvı hidrojen ortamında ve temsili yükleme kullanılarak yapılması önerilir [3].

4.10. Uçak Yakıt Tankı Fabrikasyonu Ve Testleri

Oldukça büyük bir model uçak yakıt tankının testi, fabrikasyonu ve tasarımında ölçüler dikkate alınmalı, yalıtım sistem ve yapısal bağlanmalarının ısı transfer özellikleri değiştirilmemelidir. Yaklaşık 3.05 m çapındaki temsili bir uçak yakıt tankı modelinin kullanılması makul program çerçevesinde önerilmektedir. Yakıt tankı, iki aday yalıtım sistemiyle (mikroküresel ve hüresel köpük sistemi) başarılı bir şekilde yalıtılmalıdır.

Böyle bir yakıt tankı aşağıdaki kullanışlı fonksiyonları sunar:

1. Tasarımlarda gözden kaçırılan ve kavramsal çalışmaların (özellikli fabrikasyon çalışmaları, bağlantıların birleştirilmesi, yapısal destek tedarikleri, denetim ve tamir tedarikleri) sonucunda belirlenen detaylı problemler üzerinde odaklanmak.
2. Uçak ihtiyaçlarını karşılamak için ayrılan oldukça büyük ağır uçak yakıt tanklarının fabrikasyonunda, tamirinde ve çalıştırılmasında deneyimler sağlamak.
3. Hidrojen buhar sızıntıları (belirlenme ve tamir edilebilme), dış sıcaklıkları (yoğunlaşma karakteristikleri) ve ısı sızıntı terimleri içerisinde iki yalıtım sistemine, etkili tank yapımına ve tasarımının belirlenmesine izin vermek. Gerçekçi yaklaşım tarzında yalıtım sistemlerinin yapısal bütünlüğünü test etmek için, deniz seviyesinden 12.200 m yüksekliğe kadar temsili değişim çeşitliliğini önlemek için tank ve yalıtım kaplamalarını belirlemek gereklidir. Aynı şekilde tanka da basınç tekneleri (yüksek irtifa odası) yerleştirilmelidir. Çünkü tank, çeşitli miktarlarda sıvı hidrojen içerdiğinden, binlerce uçuş döngüleri sırasındaki sayısız basınç değişimlerine maruz kalacaktır.
4. İzole tankın içerdiği sıvı hidrojen hacmi, yatay eğilim, geniş bir ısı nakliye mekanizmasının deneysel değeri, Nusselt sayısı, tank çeper ısısı, buhar hacim ısıları ve tanktan verilen gaz halindeki hidrojenin miktarı ve her iki yalıtım sistemi için sıcaklığı aşağıda belirtilen şartların fonksiyonları olarak çeşitli sıvı dereceleri için belirlenmelidir:
 - I. Tabakalar (sıvı ve buhar)
 - II. Hava akımı (sıvı ve/veya buhar)
 - III. Uçak hareketlerinin simulasyonu
5. Uçak yakıt tankı kullanımdan daha güvenilir bir bilgi sağlayabilmek için çeşitli miktarlardaki algılayıcı aletler test etmek. Bu testin nedeni sıvı yüzeylerin sonucunda oluşan karışıklıklarıyla uçağın uçuş özelliklerini taklit etmek için hareket halindeki tanklarla testleri yönetmektir.
6. Uçak yakıt sisteminin fonksiyonel testlerini yerine getirmek için bir temel sağlamak.

Uçak yakıt tankı fabrikasyonu ve testi, hidrojen yakıtı tasarımı, testlerdeki deneyimlerle ilişkili olarak uçak gövde imalatçısı tarafından yapılmalıdır. Motor yakıtının teslimatının geliştirilmesi ve uçak yakıt sisteminin fonksiyonel testleri çalışmalarında kullanılan tankların ihtiyaçları nedeniyle seçilen firma, uçağın ihtiyaçlarını karşılayabilmelidir. Firma birkaç bin kübik sıvı hidrojen ölçümleri yapacak nitelikteki test kabiliyetine sahip olmalıdır. Sonuç olarak yapılan testler farklı basınçlar altında tekrarlanmalıdır. [3].

4.11. Pompanın Geliştirilmesi

Uçaklar için sıvı hidrojen pompalarının tasarımı ve geliştirilmesi önemli bir ihtiyaçtır. Aşağıda belirtilen özellikler, hem destek pompası ve yüksek basınç hem de motorlu pompalarla sağlanabilmektedir.

- Uzun ömür
- Güvenilirlik
- Onarılabilme
- Akış oranları ve basınçlarının geniş çerçevedeki etkileri
- Değiştirilebilir birimler

Önerilen tasarım bu konuların başarılması için deneysel gelişimleri içermelidir.

İlk olarak, ilgili ihtiyaçları karşılamak için yeterli derinlikte pompa tasarımları olmalıdır. İlgili sistemlerin yapılabirlik testleri, tasarımları ve fabrikasyonları ihtiyaçlar karşılanarak yapılmalıdır. İlgili yapılabirlik testleri, ilişkili bir test aleti içerisinde yapılmalıdır. Farklı tasarım ihtiyaçları nedeniyle hem destek pompaları hem de yüksek basınç motor pompaları tasarlanmalı ve test edilmelidir [3].

4.12. Yakıt Dağıtım Sisteminin Geliştirilmesi

Destek pompaları, valflar ve hatları içeren bir motor için tam bir yakıt dağıtım sisteminin tasarımı, fabrikasyonu ve testleri yapılmalıdır. Yakıt dağıtım hatları için iki tip yalıtım sistemi uygulanabilmektedir. Bir tanesinde istenilen kaliteli yalıtımı sağlamak için eşmerkezli borular arasındaki boşluklarda vakum kullanılmaktadır. Diğeri de, boşluklarında tahliye edilmesine gerek olmayan hücresel köpüklere sahip eşmerkezli borular kullanılmaktadır. Bu deneysel çalışmada aşağıda belirtilen temeller üzerinde iki tip yalıtım sisteminin birbirlerine göre üstünlüklerini belirlemek gerekmektedir. Üstünlükleri belirlerken şu hususları dikkate almak gerekmektedir:

- İmal edilebilme
- Onarılabilme
- İşletim özellikleri
- Mekaniksel hasarlardan etkilenme

Her iki tasarımın besleme yakıt hatlarını benzer yapabilmek için eşit dönüş, ek yeri ve uzunluklara sahip bir motor yapmak gerekmektedir. Böylece de uçaktaki yalıtım taklit edilebilir. Her iki aday besleme yakıt hattı tasarımlarının kullanılarak yapılan tam bir motor yakıtı dağıtım sistemi için yapılan deneylerin sonucunda şu maddeler belirlenecektir:

1. İşletim özellikleri

- Maksimum ısı çerçevesindeki hatların ısısının düşme zamanları
- Sürekli akış
- Dağıtım noktalarındaki yakıtın ısısı, akış oranı
- Özelleştirilmiş çevre düzenlemelerinde donma eğilimleri
- Hat ihtiyaçları örneğin taklit eden motor kapanması sonrası zaman

2. Yalıtım aletlerinin onarılması için gereken ihtiyaçlar

3. Yapısal destek ihtiyaçları, yorulma özellikleri.
4. Destek pompası değişimlerinin yapılabirliği

Hidrojen çokluğu ve içeriğiyle ilgili deneyimli uçak imalatçıları bu görevlerin fabrikasyon ve tasarım bölümlerinde kalifiye olmalıdır. Bitmiş yakıt dağıtım sistemleri tanklar ve sonuç testleri uçak tankı fabrikasyonu ve testi için yapılan çalışmada görevlendirilen firmaya teslim edilmelidir [3].

4.13. Uçak Yakıt Alt Sisteminin Tasarımı Ve Test Edilmesi

Sıvı hidrojen yakıtlı uçaklarda gerekli olan yakıt kaçak ve kaçak önleme sistemleri aşağıdaki bazı problemlere neden olur:

- 1) Uçak yakıt tanklarında herhangi bir kaçak olduğunda ve bunun sonucunda üst limit aşıldığında yakıt tankı, gaz hidrojeni bırakmaya yani aynı zamanda basıncı düşürmeye yetenekli olmalıdır. Kaçak durduğunda kaçak valfin donmasına neden olabildiği için bu yakıt tankları soğuk nemli hava içerisinde olmalıdır. Uygulamalar bu olayların ters etkilerinden kaçınmak için planlanmalıdır.
- 2) Kaçak, gazın tutuşmasına neden olabilir. Bu yüzden uçak yapısının etrafı korunaklı olmalıdır.
- 3) Uçak yakıt tanklarına doğru giden olası kaçıktan dolayı kullanılacak olan valfler, bazı boru sistemleri içerisinde yakıtın üst tarafa yayılmasından kaynaklanan dıştan alevlenmeyi önleyici yeteneklilikte olmalıdır. Hidrokarbon yakıtlı uçaklarda kullanılan konvansiyonel alev önleyicileri, hidrojen yangınlarında etkili olmayacaktır çünkü bunların çok hızlı alev alma özellikleri ve hidrojenin kısa söndürme mesafesi ihtiyacı nedeniyle mekanik olarak kullanılamaz hale getirmektedir [3,6].
- 4) Olası kaçıktan çıkan hidrojen gazının elektostatik şarj yapılmasından ve şimşek çakmalarından parlamaması için olası kaçak hemen korunmalıdır.
- 5) Kullanılacak olan valfler, kaçıktan sistem içerisine havanın geri akışını engellemelidir ve alev tutucularla donatılmalıdır [3].

4.14. Motor Teknolojisi Gelişimi

Sıvı hidrojen motoru tasarımı çalışmasındaki sonuçlar bu görevin ilk bölümündeki esasları sağlayacaktır. Bu sıvı hidrojen yakıtlı motorların gelişmiş tasarımlarının test parçalarını, fabrikasyonlarını ve tasarımlarını içermektedir. Bu test parçaları arasında:

- Isı değiştircileri
- Yanıcı ve yakıt enjektörleri
- Soğutma türbin vanaları ve pervaneleri
- Yakıt kontrol sistemleri bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, yakıttaki mevcut avantajlardan yararlanmak için özellikleri birleştirerek sıvı hidrojen yakıtlı motor yapmak için gerekli parça teknolojisini geliştirmektir.

Bu bölüm altındaki ikinci aktivite sıvı hidrojen yakıtı kullanımı için uçak motorunun tasarımı, fabrikasyonu ve mevcut motor dönüşümünün test edilmesidir. Dönüşüm mevcut motorun modifikasyonu için ekonomik olarak uygun olduğu kabul edilen önceki çalışmalarda seçilmiş motorların yeni tasarım özellikleri birleştirilmelidir. Değişen motor iyi olduğu düşünülmeden uçuşta kullanılmamalıdır. Bu uçak sadece yerdeyken testler yapılmalıdır. Kısacası bu işin bir amacı, motor performansını ve tahmin edilen maliyetler için bir temel sağlamaktır.

Takip eden konular önerilen işlerin unsurlarını tanımlamaktadır [3].

4.15. Isı Değiştircisinin Geliştirilmesi

Isı değiştircilerinin tasarımı ve geliştirilmesi projesinde ısı yakıtları, türbin soğutması ve kabin havalandırılması için soğuk kompresör havası, soğuk motor yağı

gibi sıvı hidrojen motorunun ihtiyaçları bulunmaktadır. Deneysel testlerde aşağıdakilerin gösterilmesine ihtiyaç vardır:

- Buz önleyici
- Isı değiştiricilerin etkisizliği
- Kısa süreli yakıt akış özellikleri
- Tasarım ihtiyaçlarıyla uyumluluk [3]

4.16. Ateşleyici Deneyleri

Hidrojenin yakıt olarak kullanılması için tasarlanan uçağın gaz türbinleri üzerinde yanma olayıyla ilişkin çok az deneysel çalışma yapılmıştır. Bundan sonraki yapılacak çalışmada yapılması gereken işler enjeksiyon sistemleriyle özellikle hidrojen yakıtı için yanma şekillerinin tasarımı ve deneysel ısı profillerinin belirlenmesi, yanma etkinliği, çeşitli tasarım parametrelerinin bir fonksiyonu olarak üretilen NO_x (Nitrik oksit) konsantrasyonları hakkındaki bilgileri içermektedir. Çalışmadaki amaçlar aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Hidrojen/hava reaktörleri için ateşleyici ve enjektörlerin tasarımı ve tercih edilen geometrisi
- Yanma ısısı tasarımında NO_x üretiminin pratik limitleri
- Yanma ısısı tasarımının bir fonksiyonu olarak NO_x eşitliliği
- Isı profil karakterleri bilinen ateşleyici şekilleri için ve seçilmiş enjeksiyon tasarımı için kısma valfi kurulumu [3]

4.17. Soğutma Türbini Vanaları Ve Pervaneleri

Önceki alışmalar yüksek basınçtaki türbin etkinliğini sağlamak için türbin soğutma havasının soğutulmasının istenen bir koşul olduğunu göstermiştir. Bu yüzden de yüksek basınç türbininin yeterli derecede geliştirilmesi ve model motorda test edilmesi gerekmektedir. Yapılan deneyler şunları göstermelidir:

- Pervanenin ve çeşitli tasarımlarda ısı ve hava kalitesinin bir fonksiyonu olarak soğutma etkinliği
- Türbin etkinliği üzerinde soğuk hava akış oranının etkisi [3]

4.18. Motor Yakıt Kontrol Sisteminin Geliştirilmesi

Motor yakıt kontrol sisteminin geliştirilmesi çalışması, kısa sürede performans yeteneğini belirlemek için kontrol sistemi ve motor yakıt dağıtımının benzerini taklit etmek ve bunların analizlerini içermektedir. Bunun sonrasında temsili sistemin fabrikasyonu, takip eden operasyonların test edilmesi ve analizlerin geçerliliğinin belirlenmesi gereklidir. Bu analizlerde;

- Başlama,
- Kapatma,
- Uygun uçak tasarımları için sunulan akış çeşitliliğinin kontrolüne, bakılmalıdır.

Gelişmiş yakıt kontrol sistemlerinin tasarımında mikroelektronikler, motordaki yüksek ısı algılayıcıları ve destek pompa çıkışlarının kontrolü için çok yarar sağlayacaktır, çünkü bu sistem ile çok büyük esneklik sunulacaktır [3].

4.19. Mevcut Uçak Motorunun Dönüşümü

Uçak yakıt sisteminin fonksiyonel testlerindeki taleplerle birleştirildiğinde mevcut uygun uçak motoru, sıvı hidrojen yakıtına dönüştürülecektir. Diğer çalışmalarda tasarlanan ve imal edilen pompa, valf, hatlar vb. 'nin boyutlarına göre ölçülendirilecektir.

Sıvı hidrojeni yakıt olarak kullanan motorun testi ve fabrikasyonu aşağıdakilerin gösterimini sağlamaktadır:

- Sıvı hidrojen kullanmak için mevcut uçak motorunun adaptasyon ücretleri ve sağlanabilinen performans
- Böyle bir dönüşümdeki performans/ekonomik değişimlerinin değerlendirilmesi

Bu çalışma, herhangi bir önemli motor imalatçısı tarafından yapılabilir olmalıdır. Fakat yapan imalatçının kalifiye olması gerekmektedir [3].

4.20. Uçak Yakıt Sisteminin Fonksiyonel Testleri

Sıvı hidrojen yakıtlı uçakların uçuş testlerinin yapılmasından önce bu yakıt sisteminin bir modelinin yerdeyken testleri yapılmalıdır. Önceki yapılan tüm testlerle birlikte aşağıda belirtilen önemli testlerin birleştirilerek, uçak yakıt sistemi değerlendirilmesinin yapılması daha uygundur.

- Yakıt tutma sistemi tankının bir modeli
- Motor yakıt dağıtım sistemi
- Uçak tankı kaçak sistemi
- Yakıt kontrol sistemli motor

Yapımı biten uçak yakıt sisteminin kopyasının anlamlı testlerini yapmak için şunlar gerekmektedir:

- 1) Yakıt ikmali yapan tankla ilişkili temsili uçak tipini sağlamak için yakıt ve buhar dönüş adaptörü
- 2) Tank sızıntı bölümleri ve sızıntı önleme sistemi
- 3) Sızıntı belirleme sistemi

Yapılan uçak yakıt sisteminin başarılı olmasını sağlayan testler, aşağıda belirtilen çalışmalara önderlik edebilir:

1. Uçak tank doldurma prosedürlerini araştırmak. Tercih edilen tesisat sistemi ve özelleşmiş zaman sınırları içinde uçak tanklarının yeniden doldurulmasına izin verecek işletim prosedürlerini deneysel olarak belirlemek.
2. Uçak yakıt sisteminin bütünsel tasarımının operasyonel özelliklerini belirlemek.
3. Sıvı hidrojen sistem parçalarının tamiri ve denetimleri için prosedürleri belirlemek.
4. Yakıt dağıtım sistemi, yalıtım sistemi ve yakıt tankı yapısı üzerindeki doldurma/boşaltma döngüleri ve tekrarlayan uçuş döngülerinin etkilerini belirlemek.
5. Taklit deneylerin başarısızlıklarıyla sistemin başarısızlıklarını belirlemek
6. Uçak servisleri için uygun parçaları ve sıvı hidrojen yakıt sistemi ihtiyaçlarını belgelemek ve özellikli tasarımların yazılımı için temel sağlamak [3].

4.21. Çarpma Güvenliği Ve Yangın Tehlike Durumlarının Karşılaştırılması

Kaza testi ve tehlike analizi çalışmasının bir sonucu olarak elde edilen veriler ya da göstergeler, sıvı hidrojen yakıtlı uçakların belgelendirilmesi için temel olacaktır. Mutlaka bu göstergeler aşağıda belirtilen çalışmalar sonucunda sınırlandırılmalıdır.

4.22. Yolcu Kabinindeki Tehlikenin Değerlendirilmesi

Çalışmada, ateşlemeli ya da ateşlemesiz sıvı hidrojen ve Jet A yakıtının eşit enerji miktarları için nakliye uçağındaki yardımcı gövde bölümlerindeki fazlalıkları ortaya çıkarılmaktadır. Çalışmanın amacı, mürettebat ve yolcular için bağıl tehlikeleri karşılaştırmaktır [3].

4.23. Yakıt Yangınlarının Özellikleri

Çalışmada, dökülen yakıtı tutuşturan ve Jet A ile sıvı hidrojen yakıtının eşit enerji taşıyıcıları kırılır ya da parçalanır. Çalışmanın amacı, yakıt taşıyıcılarının kırılmasıyla ortaya çıkan yangının bağıl özelliklerini belirlemektir. Yani yangının

devam ediş süresi, yangından etkilenen alan, oluşan ateş topunun çapı ve yüksek basıncın gözlenmesidir [3].

4.24. Uçakların Çarpma Testleri

Çalışmada, tipik tank yapısındaki yakıt içeren uçaklarda ölümcül olmayan çarpmalar simüle edilir ve sıvı hidrojen ve Jet A yakıtları için tasarlanmış yakıt tanklarına sahip uçaklarda benzer testler yapılır. Her bir uçak test edilmiş yakıtlı en az bir motor çalıştırabilmelidir. Çalışmanın amacı, her bir yakıt sisteminin kullanılarak taklit edilen çarpmaların etkilerinin belirlenmesi ve çevredeki alana, mürettebata ve yolculara olan bağıl tehlikeleri karşılaştırmaktır.

Bu test serileri uygun yönetim acenteleriyle idare edilmeli ya da destekleyici olmalıdır. Benzer tip testler A.B.D 'de NASA tarafından da yönetilmektedir. Sıvı hidrojen programında finansal yardım gerekmektedir ve iştirak eden ülkeler tarafından girişim yapılarak idare edilmelidir [3,12].

5. HİDROJEN ÜRETİMİ VE YER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Sıvı hidrojenin uçaklarda kullanılabilmesi için sadece uçak motorunun sıvı hidrojene göre tasarımının ve üretiminin yapılması yeterli değildir. Dünyanın bu yakıtı kullanmadan önce sıvı hidrojen elde etme olanaklarını da baştan düşünmelidir.

5.1. Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Bir yakıt olarak hidrojen kullanımı hakkındaki çok önemli sorulardan birisi hidrojenin hem ekonomik hem de enerji temelinde rekabet edip edemeyeceğidir [3,12].

Hidrojen üretimindeki süreçler ve kaynaklar Tablo 5.1’de verilmiştir. Tabloda Θ ile gösterilen hidrojen üretimi için yöntemler ve kaynaklar, enerji etkinliğini ve ücretlerinin belirlemek için değerlendirilir. Ayrıca bu çalışmanın sonucunda tabloda potansiyel tasarruflar da belirtilmelidir. Burada daha uzun bir zaman periyodu için de tabloda gösterilen diğer seçeneklerde yapılabilir olarak değerlendirilmesi gerekir. Θ ile işaretlenen süreçler kullanıma hazır olan tüm önemli olanakları içerir. Fakat tüm ülkelerde yukarıdaki tüm olanaklara ulaşamayabilmir [3].

Tablo 5.1.: Hidrojen Üretimindeki Süreçler ve Kaynaklar [3]

Süreç			
Gasifikasyon	Elektroliz	Diğer	Kaynaklar
			Fosil
Θ			Doğal Gaz
Θ			Yağ
Θ	Θ		Kömür
Θ			Diğer(Yağ katmanlar, katran kumu)
			Nükleer

	⊖	X	Bölünme
	X	X	Birleşme
			Güneş
			Direkt
	⊖	X	Termal
	⊖		Elektrik
			İndirekt
	⊖		Su gücü
	⊖		Rüzgar
X			Biyomas
	X		OTEC
	X		Dalga
	⊖		Jeotermal

Su tüm süreçler de temel karışım maddesidir.

⊖ : Üretilenler

X: Gelecekte potansiyel olarak üretimine başlanacaklar

5.2. Değişik Yakıtların Birbirleriyle Karşılaştırılması

Anlamli olması için alternatif yakıtların karşılaştırılması gereklidir. Maliyetler ve enerji açısından yapılan değerlendirmeler sentetik yakıtların üretimi, özel uçaklarla yakıtın taşınması, depolanması ve uçuş için yeterli derecede uçaklara yüklenmesi gibi konulara ışık tutacaktır.

Alternatif yakıtların dünyanın çeşitli yerlerinde büyük miktarlarda üretiminin getireceği maliyetin bilinmesi sonucunda konvansiyonel kaynaklar ikinci plana düşecektir. Bundan dolayı tanımlanan sürecin maliyetlerinin ve enerjilerinin karşılaştırılması işlemi, yapılacak uçak tasarımı için her üç alternatif yakıt olan sıvı hidrojen, LCH₄ (sıvı metan) ve sıvı yakıtları için yapılmalıdır. Yapılan araştırmalar sonucu aşağıdaki ülkeler seçilmiştir:

- Amsterdam
- İstanbul
- Bombay
- Kopenhag
- Frankfurt
- Hong Kong
- Honolulu
- Jeddah
- London
- Los Angeles
- Montreal
- New York
- Paris
- Pittsburg
- Roma
- Sidney
- Tokyo
- Toronto
- Vankover

Bu şehirlerin her birinde mevcut koşullara bağlı olarak, alternatif yakıtların her birinin üretimi, uygulanan yöntemler karşılaştırmalı ve değerlendirmeler için seçilmelidir. Burada amaç, listelenen havaalanlarında her bir alternatif yakıt için minimum maliyet ve enerji maliyetini sağlayan optimum yöntemi bulmaktır. Örneğin; Japonya sıvı hidrojen üretilmesinde yeterli bir kaynağa sahip olmadığı için, Japonlar Çin, Avustralya ya da A.B.D 'den bir kaynak ithal etmek zorunda kalacaklar ve ithal edilen bir kaynağın ücreti (kaynaktan üretilen uçak yakıtının imalatının) her zaman kritik bir faktör olacağından dolayı seçilen uçak yakıtının ücretini de etkileyecektir.

Hidrojen üretimi sürecinin değerlendirilmesi çalışmasında olduğu gibi, meselenin ana noktalarının kuruluşu öncelikli bir ihtiyaçtır. Bölgelerdeki alternatif

yakıtların her birinin üretiminde kullanılabilen kaynakların maliyeti ve kullanılabilirliği gibi önemli bilgilerin yerel yetkililer tarafından doğruluğunun kanıtlanması gerekmektedir.

Hidrojen üretimi sürecinin değerlendirilmesi çalışması için seçilen firma alternatif yakıtların karşılaştırılması için ve takip eden pozisyonlar için uygun olmalıdır [3].

5.3. Pilot Fabrikanın Geliştirilmesi

Alternatif yakıtların karşılaştırılması çalışmasının değerlendirme sonuçlarında tercih edilen hidrojen üretim yöntemlerinin belirtilmesi gerekmektedir. Bu üretim yöntemleri bugünkü teknolojik metotlardaki ilerlemeleri içermektedir ve böylece uluslararası program, fazlaca görülebilirlik ve geniş bir ölçek içerisindeki katılım için ilk olarak pilot bölgede uygulanmalıdır. Sıvı hidrojeni yakıt olarak kullanacak uçak programına katılmayı planlayan her bir ülke, hidrojen üretimi için seçtikleri yöntemin teknik uygulanabilirliğini göstermelidir.

Seçilecek pilot fabrikanın büyüklüğü isteğe bağlıdır, fakat tasarımın uygulanabilirliğini göstermek için yeterli büyüklükte olmalıdır. İki ya da daha fazla ülke, verilen yöntemin kendi konumları için hangisinin daha uygun olduğuna karar verebilir ve aynı zamanda ortak bir sermayeyle birlikte pilot fabrika gelişimini seçebilir ve sonuçları paylaşabilir [3].

5.4. Sıvılaştırma Yönteminin Geliştirilmesi

NASA için yapılan çalışmalar hidrojenin sıvılaşması için gereken enerji ve maliyetlerin bir arada sağlanabildiği önemli çalışmalar yapmaktadır. Pilot fabrikanın geliştirilmesi çalışmasında olduğu gibi bu çalışmalar, şimdiki yeteneklerin üstündeki teknolojik gelişmeleri içermektedir. Yapılan çalışmanın gerçeğe dönüştürülmesinden önce deneysel olarak test edilmesi gerekmektedir.

Analitik değerlendirmelerinin umut verici olduğu sıvılaştırma teknolojisindeki gelişmeler şunlara dayandırılır:

- Sıkıştırma etkinliğindeki artış
- Genleşme türbini etkinliğinin gelişimi
- Kirlenmeye yol açan maddelerin azalması ve metalürji kontrolüyle dönüşümü sınırlandırılması

Çok ciddi gelişim uyarılarının bulunduğu diğer hidrojen sıvılaştırma yöntemi manyetik soğutmadır. Bu da manyetik ısı pompalanmasıyla hidrojen ısını azaltmak için gadalinyum gibi nadir bulunan dünya elementlerinin içeren bileşiklerin kullanımını içermektedir.

Nadir bulunan dünya bileşikleri manyetik alanların uzaklaştırılmasıyla etkilenmektedir. Soğutma etkisi manyetik alanın uzaklaştırılmasıyla sağlanmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda ticari sıvılaştırma yöntemlerinden %40-50 daha az enerji gerektirdiği görülmektedir. Bu çalışma, deneyimli firmalar tarafından idare edilmelidir [3].

5.5. Hava Terminali Bileşmelerinin Geliştirilmesi

Uçak yakıt tanklarında stoktan ve dağıtım anında etkili ve hızlı bir şekilde sıvı hidrojeni temin etmek için hava terminalinde gerekli olan donanımların geliştirilmesine ve gösterilmesine ihtiyaç vardır. İhtiyaç gösteren özel konular arasında;

- Pompalar
- Valflar
 - 1) Akış miktarı
 - 2) Akış kalitesi
 - 3) Sızıntı belirlenmesi
- Akış kontrol sistemi bulunmaktadır.

Dünya çapında hava terminali yapımı ve tasarımında tecrübeli şirketler ana bileşenleri en iyi şekilde düzenlemek için bu çalışmalara dahil olmalıdır [3].

6. HİDROJENİN UÇAK YAKITI OLARAK KULLANILMASI

Uzmanlara göre havacılık endüstrisi, havacılıkta ki yükselen yakıt tüketiminin bir sonucu olarak gelecek birkaç yıl içerisinde daha da gelişecektir. Örneğin; 1978'den 2000 yılına kadar km' deki yolcu sayısı 1×10^{12} iken bu sayı ikiye katlanarak 2×10^{12} yolcu sayısına ulaşmıştır ve bu sayının da 2075 yılına kadar daha da artmaya devam edeceği beklenmektedir. Bundan dolayı, havacılık sektörü dünya çapındaki enerji tüketiminin %2,5 kadarını oluşturmaktadır.

Sıvı hidrojeni havacılıkta kullanılan diğer yakıtlar yani sıvı metan ve Sinjetlerle karşılaştırıldığında, yakıt ulaşılabilirliği ve çevresel endişeler; sıvı hidrojenin, jet yakıtının yerine koyabilmek için çok uygun olduğunu göstermektedir. Havacılık endüstrisindeki hidrojenin kullanım ihtiyacı 1943 'te başlamasına rağmen; havacılıkta alternatif yakıtlar için çalışmalar 1973' teki enerji krizinden bu yana ABD' deki NASA sponsorluğu altında yürütülmeye devam edilmektedir. Bu çalışmalara örnek olarak ABD Hava Donanması' nın Ohio Üniversitesi programında havacılık yakıtı olarak hidrojen kullanılması üzerinde çalışmalar yapılmış ve yapılan bu çalışmalar üzerine de ABD Uzay Programı sıvı hidrojen ve sıvı oksijen kullanılmasına izin vermiştir.

Havacılık yakıtı olarak hidrojenin çalışılmasındaki nedenlerin başında doğal gaz ve petrol kaynaklarının giderek azalacak olmasıdır. Bu nedenle enerji talebine karşı yenilenebilir enerji ihtiyacı zamanla artacaktır. Bu nedene ek olarak özellikle kirliliğin neden olduğu asit yağmurları, küresel ısınma ve ozon tabakasının incilmesi gibi çevresel olumsuzluklardan dolayı hidrojeni ekolojik ve kabul edilebilir bir yakıt haline gelmiştir.

Sıvı hidrojenin uçaklarda kryojenik sıcaklıklarda kullanılabilmesi için, değişik alaşımlı yakıt tanklarının yapılması, güvenlik özellikleri artırılmış yakıt tankı yapılması, yeni boruların, pompaların ve güvenlik sistemlerinin yapılması gerekmektedir. Uçaklarda güç bölümleri için yeni bir yakıtın düşünülmesinde ekonomik nedenlerde önemlidir. Yeni bir yakıt, konvansiyonel yakıtlarla ekonomik açıdan da

yarışabilmelidir. Daha büyük miktarlarda sıvı hidrojen üretilmesinin ekonomik açıdan tartışması halen daha sürmeye devam etmektedir. Diğer taraftan uçak motoru üreticileri sıvı hidrojenin ücretlerinin düşmesini de beklerlerse bu büyük bir zaman kaybı olacaktır.

Sıklıkla kullanılan jet yakıtından sıvılaştırma sıcaklıklarındaki hidrojene dayalı geçişte zaman ölçeği çok önemli bir sorundur. Çünkü yakıt değişimi uçaktaki hemen hemen her şeyin değişmesi anlamına gelmektedir ayrıca bir uçak modelinin tasarımından üretimine kadar ki geçen zaman yaklaşık 30 yıl kadardır. Bu da bu alandaki çabaları ve yükselen AR-GE' nin önemini göstermektedir. Şöyle ki 25-50 yıl içerisinde yapılan bir çok şey vardır. Süpersonik ve hipersonik uçaklar kadar sıvı yakıtlı subsonik uçaklar 5 kıta arasında güvenli bir şekilde uçabilmektedir. Bugün endüstriyelmiş ülkelerin teknolojik seviyeleri yakıt olarak sıvı hidrojeni kullanan uçak sistemlerinin yapabilmek ve kullanabilmek için yeterlidir [6].

6.1. Tarihsel Ve Teknolojik Evrim

Zeplin balonları sayılmazsa, hidrojenle uçan ilk uçak bombalı B-57 Amerikan hava güçleriydi. Bunlar motorlarında sıkıştırılmış helyum ve sıkıştırılmış sıvı hidrojenin kullanıldığı uçaklardı. O zamandan beri ABD, ABD Uzay Programı ve Uzay Mekik programında CL-400 uçaklarında sıvı hidrojen den yararlandığı gibi daha bir çok projede de bunu kullanmaktadır. Örneğin bugün NASA hipersoniklerin süratlenmelerinde kullanılacak sıvı ve donmuş hidrojenin bir karışımı olan ve sıvı hidrojenden %15-20 daha yoğun olan ve bu sayede yakıt depolama hacmini daha düşük olmasını sağlayan sulu hidrojen üzerinde çalışmaktadır. Yürütülen araştırma hidrojen uçakları için gereken teknolojiyi de yükseltecektir.

Konvansiyonel uçaklar için sıvı hidrojenin potansiyel kullanımı Lockheed Şirketi ve Boeing' in çalışma alanları içerisinde ve yapılan çalışmalarla daha düşük ağırlıktaki yakıt sayesinde uçaklardaki kanatların ağırlığını düşürüleceğini, yüksek seyahat irtifası ve daha yüksek güç yüklemesi sağlayacağı düşünülmektedir. Böyle bir uçak ile daha kısa bir pist, daha düşük seviyede ses ve daha yüksek türbin giriş

sıcaklıkları da mümkün olabilecektir. Türbin ağızını soğutmak için soğuk sıvı hidrojen kullanabilen daha etkili motorlar olabilecektir. Şu da önemli bir gerçektir ki; hidrojenin düşük yoğunluğu yüzünden yakıt için daha büyük uçak gövde tasarımlarını gerektirecektir ve bu da ekonomiyi olumsuz yönde etkileyecektir.

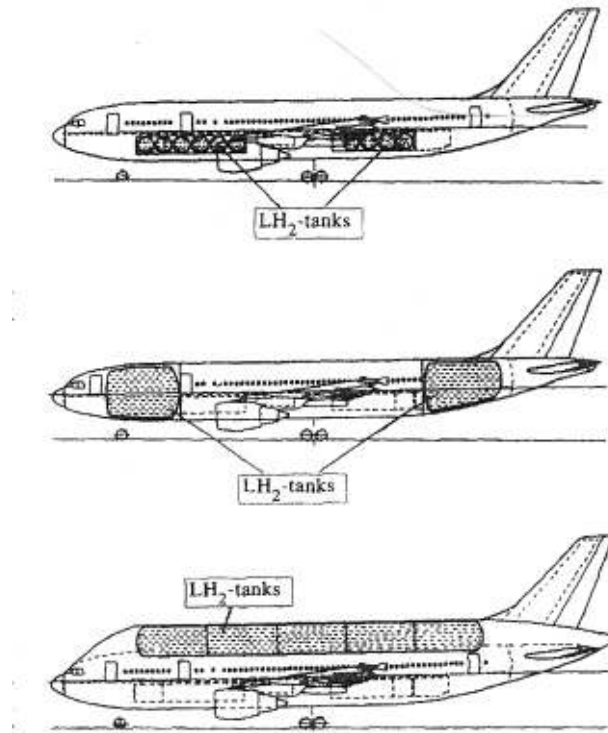
1988’de Sovyetlerin tek motorlu modifiye TU-154’le yaptıkları deneyler sadece hidrojen üzerineydi. Gelişen ve test edilen bu uçak daha sonra gelişecek motorlar, sıvılaştırma sistemleri ve geleneksel uçaklar tarafından tercih edilen benzer güvenlik standartlarıyla benzer karmaşıklığındaki operasyonların gelişmesi için bilgi sağlamıştır. Emekli Pan Hava Yolları Amerikalı pilotu Bill Conrad güç bölgesi sıvı hidrojen yakıtlı I.C motorunu geliştirmiştir ve bu uçak 1988’de Amerika Florida Ft. Lauderdale Ulusal Hava Limanı’nda hidrojen gücüyle uçan ilk uçak olmuştur.

1989 Paris Hava Gösterileri’nde de A310’ un sıvı hidrojen tanklarının kolayca yerleşmesini sağlayan büyük kargo boşluklarına sahip hidrojen yakıtlı ikizi Airbus 310 tanıtılmıştır. İki yıl sonra Hannover Hava Gösterileri’nde, Sovyet birlikleri ve Almanya Airbus 310’ a benzer, 200 yolcu kapasiteli, çift motorlu, yaklaşık 500 mil gidebilen ve hidrojenle çalışan bir uçak prototipi üzerinde çalıştıklarını açıklamışlardır[6].

Aynı zamanda Rus, Alman ve Amerika’ nın içinde bulunduğu ulusal bir takım, Samara Trud Projesi adlı bir projeyle sıvı hidrojen ya da sıvılaştırılmış doğal gaz yakıtlı Pratt ve Whitney JT9D-tip motor tarafından güçlendirilmiş ve Airbus A310 sınıfında bir uçak üzerinde çalışmaya başlamışlardır.

Subsonik hava taşıtları için son olarak iki tasarım çalışması yapılmıştır. Bu projelerden birisi Airbus 310’ un temelini oluşturan ve Rus-Alman ortaklığıyla yapılan çalışma bir diğeri NASA’ ya ait olan projedir. İlk proje sıvı hidrojen yakıt tankının uçağın üst kısmında bulunacak şekilde tasarımılandırılmıştır ve 319 yolcu kapasiteli bir uçak düşünülmüştür. NASA’ nın yaptığı projede ise hacim oranını minimize etmek için ve böylece ısı kazanımı sağlamak için uçağın başında ve sonunda olmak üzere iki adet küresel hidrojen tankı tasarlanmıştır. Bu tasarımda 400 yolcu kapasiteli bir uçak

düşünülmüştür. Bu iki projede bahsedilen hidrojen tankları konumları Şekil 6.1’ de gösterilmiştir [6].



Şekil 6.1: Uçaklardaki Sıvı Hidrojen Yakıt Tanklarının Lokalizasyonu İçin Yapılan Çalışmalar [6]

Uçaklarda sıvı hidrojen yakıt deposunun kanatlarda olacak şekilde uygulaması yapıldığında en dayanksız kısmın kanatlar olması sebebi ile herhangi bir çarpışmada patlama riski daha yüksektir. Ancak kanatlarda havanın akışı söz konusu olduğundan sıvı hidrojenin yalıtılması ise daha kolay olacaktır. Ayrıca uçak yakıt tankının kanatlarda olması uçağın daha dengeli olmasını sağlayacaktır.

Uçak yakıt tankının gövdede olacak şekilde uygulaması yapıldığında ise uçaklarda yolcu kabini küçülecek, buna bağlı olarak taşınacak yolcu sayısı düşecektir.

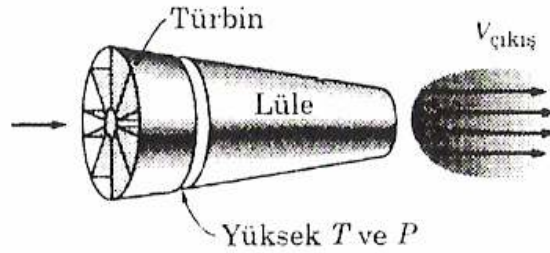
Ayrıca uçak gövdesi içerisindeki yakıt tankının yolcu kabini ile yan yana olduğundan dolayı yalıtımı daha zor olacaktır. Başka bir taraftan bakıldığında hidrojenin herhangi bir kaçak anında atmosfere tahliyesi daha zor olacak, yolcuların hayatı riske girecektir. Ancak herhangi bir çarpışma anında uçağın en dayanıklı kısmı uçak gövdesi olduğundan dolayı patlama riski daha düşüktür.

Günümüzdeki gelişmelere baktığımızda ise süpersonik/hipersonik ticari uçakların kullandığı motor teknolojisindeki sıvı hidrojenin kullanılması hakkında projeler devam etmektedir. Almanya, İngiltere ve özellikle Amerika (NASA) hipersonik uçaklar hakkında projelerine halen daha devam etmektedirler. Bu çalışmalarda, uçaklarda kullanılan motorlar içinde yanma sırasında gereksinim duydukları havayı atmosferden aldıkları için bu tür motorlar “hava soluyan motorlar” adı verilmiştir.

Hava soluyan motorlar, birçok bakımdan daha önceki yüksek hızlı uçuşlarda kullanılan roketlerden üstündür. Bu tip jet motorları, oksijeni atmosferden aldıkları için yalnızca yakıt taşımaktadırlar. Bu nedenle yakıtın yanması için fazladan ağırlık yapacak bir malzeme taşımalarına gerek bulunmamaktadır. Bu sayede daha hafif, daha küçük ve daha ucuz motorlar ve dolayısıyla taşıt araçları yapılabilmesi olanaklı hale gelmektedir. Hava soluyan motorlar, roketlere göre 7 kat daha az yakıt gereksinim duymaktadırlar. Bu tip motorlar roket itisinden çok aerodinamik kuvvetlere dayandıklarından daha güvenli, görev anlayışlarında daha hareketli, esnektir yani gereğinde normal uçaklarda olduğu gibi uçuşa son verilerek araç yere indirilebilmektedir. Görevleri de roketlere göre daha esnektir. Hava soluyan jet motorları 40 yıldır gelişmekte olan roket teknolojisine göre daha gerilerde bulunmaktadır. Ne varki son yıllarda gerek askeri gerekse sivil amaçlı gereksinimler onları ön plana çıkarmaktadır.

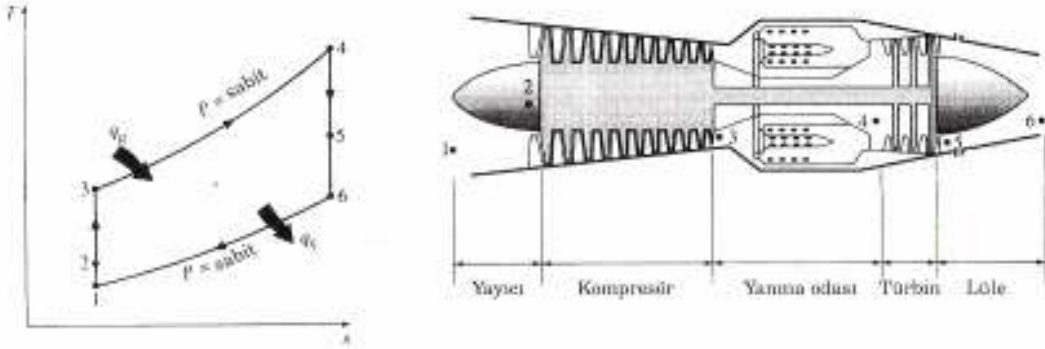
Klasik jet motorlarıyla hava soluyan uçaklarda kullanılan scramjet’in çalışma prensibi birbirinden farklıdır. Klasik jet motorlarında gaz türbinleri kullanılmaktadır. Hafif ve küçük boyutlu oldukları için gaz türbinleri uçaklarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gaz türbinlerinin güç/ağırlık oranları büyüktür. Uçaklarda kullanılan gaz türbinleri tepkili çevrim adıyla bilinen açık çevrime göre çalışırlar. İdeal tepkili çevrim, basit ideal Brayton çevrimine benzer, fakat burada gazlar türbinde çevre basıncına kadar genişlemezler. Bunun yerine türbindeki genişleme, sadece kompresörü çalıştıracak gücü sağlayacak basınca kadardır. Başka bir deyişle, tepkili çevrimin net işi sıfırdır. Türbinden çıkan yüksek basınçlı gazlar bir lülede genişleyerek hız kazanır ve uçağı itecek tepkiyi sağlar (Şekil 6.2). Uçak gaz türbinleri daha yüksek basınç oranlarında (genellikle 10-25 arasında) çalışırlar. Ayrıca kompresörde sıkıştırılmadan önce akışkan bir yayıcıdan geçirilir ve burada hızı düşürülerek basıncı artırılır[7].



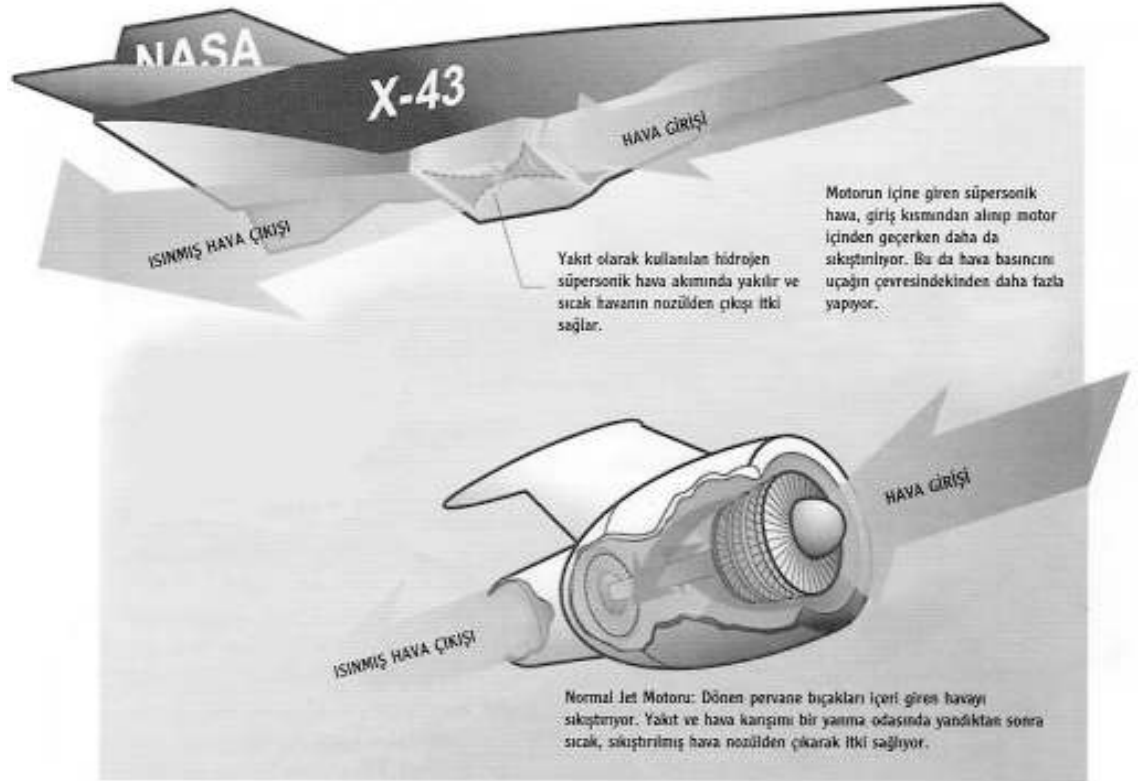
Şekil 6.2: Jet Motorlarında Türbinden Çıkan Yüksek Sıcaklık Ve Basınçtaki Gazların Lülede Hızlandırılarak Tepki Üretmesi [7]

Bir tepkili motorun genel çizimi ve tepkili çevrimin T - s diyagramı Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Hava yayıcıda yavaşlarken basıncı biraz artar. Kompresörde sıkıştırılan hava daha sonra yanma odasında yakıtla karıştırılarak sabit basınçta yakılır. Yüksek sıcaklıkta ve basınçta türbine giren yanma sonu gazları, bir ara basınca kadar genişleyip kompresörü çalıştıracak gücü sağlar. Son olarak gazlar bir lülede çevre basıncına kadar genişleyerek, motordan yüksek hızla çıkar[7].



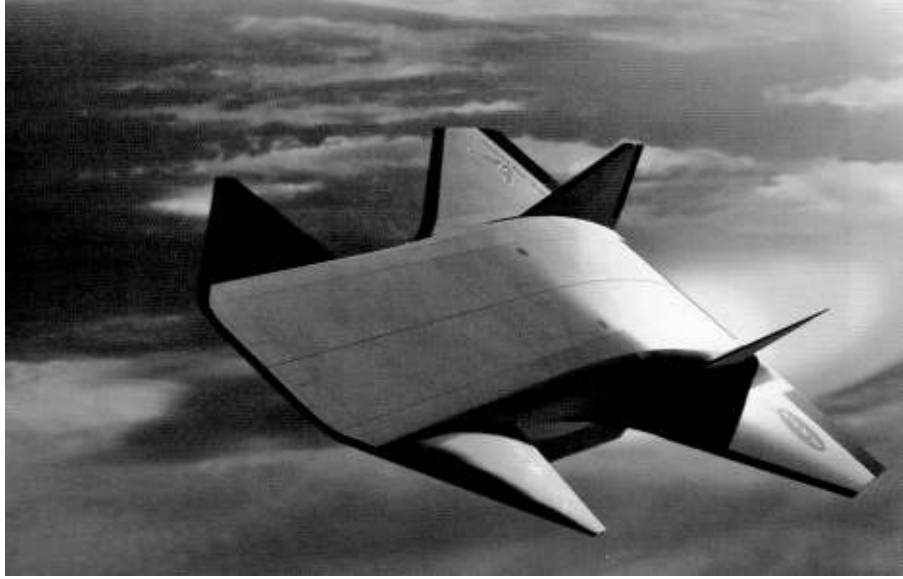
Şekil 6.3: Bir Tepkili Motorun Bölümleri Ve İdeal Tepkili Çevrimin T-s Diyagramı [7]

Kısaca klasik jet motorları çalışırken, sıkıştırılmış havayla yakıt karışımını yakmaktadır ve bu yanma sonucunda ortaya çıkan ürünleri püskürterek ileri doğru bir itki sağlamaktadır. Sivil ve askeri turbojetlerin hızı 3-4 Mach'i geçemez çünkü bu hızın ötesinde, aşırı ısınmadan dolayı uçağın türbinlerinde sorunlar yaşanmaktadır. Klasik jet motoru ile yakıt olarak hidrojen kullanan hipersonik uçaklar arasındaki fark Şekil 6.4' te gösterilmektedir [10, 19].



Şekil 6.4: Klasik Jet Motoru İle Yakıt Olarak Hidrojen Kullanan Hipersonik Uçaklar [9]

Hipersonik, hava soluyan motorlar hidrojen ve hidrokarbonlar dahil çeşitli yakıtlarla çalışabilmektedir. ABD' nin uzay mekiklerinde sıvı hidrojen kullanılmaktadır. Hidrokarbonlar 8 Mach'dan fazla bir hız sağlayamadığından tercih edilmemektedir [10]. Sıvı hidrojenin Mach 7 üstü hızlarda rakibi yoktur. Bu yüzden bütün uzay programı çalışmalarında sıvı oksijen-sıvı hidrojen karışımının kullanılması fikri üzerinde çalışmalar halen daha devam etmektedir [6]. NASA'nın en son üzerinde çalıştığı ve halen tasarım aşamasında olan ve hidrojen enerjisi kullanan X43-B uçağının prototipi aşağıdaki Şekil 6.5' te gösterilmiştir [10].



Şekil 6.5: X43-B Uçağının Prototipi [9]

Geçmişte rafa kaldırılan projelerin aksine günümüzde başarılı denemelerin yapılıyor olması herkesi umutlandırmaktadır. Hidrojen enerjisinin kullanımının bu kadar gelişmesi ile Dünya bir yerde daha da küçülecektir.

6.2. Hidrojenin Hidrokarbon Yakıtlarla Karşılaştırılması

Rakipleriyle karşılaştırıldığında sıvı hidrojenin birçok avantajı vardır. İlk olarak hidrojen istenildiği kadar üretilir. Çünkü hidrojenin kaynağı sudur ve ayrıca yanma sonucu da havaya su buharı açığa çıkarır. Hidrojen bünyesinde büyük bir enerji vardır, bu da havacılık için çok önemlidir. Ayrıca hidrojen kullanıldığında, yanma sonucu açığa çıkan azot üretiminde azalması sağlanacaktır. Hidrojen daha ufak ve daha basit uçak motorlarını gerektirirken daha büyük yakıt tanklarının kullanılması ihtiyacı önemli bir sıkıntıdır. Tablo 6.1’ de Sinjet, metan ve hidrojen yakıtlarının fizikokimyasal özellikleri gösterilmiştir [6].

Tablo 6.1: Hava Yakıtlarının Önemli Özellikleri [6]

Özellik	Sinjet	Metan	Hidrojen
Ortalama formül	$C_{125}H_{244}$	CH_4	H_2
Kaynama noktası $^{\circ}C$	167~266	-161.3	-252.7
Eriye noktası $^{\circ}C$	-50	-182.0	-259.2
Kaynama noktasındaki yoğunluk(g/cm^3)	0.8	0.423	0.071
Adiyetik düşük sıcaklık değeri (kJ/kg)	42906	48139	119970
Tutuşma sıcaklığı $^{\circ}C$	2022	1973	2158
Yanma ısısı (kJ/g)	42.8	50	120
Buharlaşma ısısı (J/g)	360	510	446
Yapının standart ısısı(kJ/mol)	~208.4	-74.8	0
Entalpi (kJ/mol)	C-C 159.0 C=C 195.6 C≡C 811.7	C-H 414.2	H-H 435.1

Sonuçta hidrojen enerjisinin hava taşıtlarında kullanılması hava taşıtlarının petrolden bağımsız olmasını sağlayacaktır ve bu sonuç da ekolojik açıdan önemlidir çünkü Hidrojenin içerisinde düşük toksik miktarı vardır ve bu yüzden sıvı halde taşındığı durumlarda çevreye döküldüğünde ya da bir yerden sızma yaptığında çevresel riski düşüktür [6].

Ancak sıvı hidrojenin kaynama noktası $-257.7^{\circ}C$ olduğundan dolayı hidrojenin sıvı halde kalabilmesi için yüksek basınçlı yakıt tanklarına ihtiyaç vardır. Yakıt tankındaki bu basınçta minimum $170000 \text{ Lb}/in^2$ olmalıdır. Bu yüzden bu basınca dayanabilecek yakıt tankında kullanılacak malzemeler Al-Li alaşımı ya da CFRP (güçlendirilmiş karbon-fiber plastiği) olmalıdır. Tablo 6.2' de hidrojenin diğer jet yakıtlarına göre avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir.

Tablo 6.2: Sıvı Hidrojenin Ticari Yakıtlarla Kullanımlarının Karşılaştırılması [6]

Konu	LH₂ avantajları	LH₂ Dezavantajları
Yanma	Ticari yakıtlara göre (4360kJ/kg) daha yüksek ve spesifik enerjiye (119190kJ/kg) ve daha yüksek yakıt etkinliğine sahiptir. Geniş tutuşma aralığı, Yüksek tutuşma hızı ve yüksek yanma sıcaklığına sahiptir	Birim hacmine göre 4 kez daha az enerjiye sahiptir.
Uçak konfigürasyonu	Fazla ağırlığı %26 ve kanat alanını %18 azaltacak, daha küçük motorların olmasına ve uçağın burun kısmının azaltılmasını sağlayacaktır. Yüksek sıcaklık düşümü kapasitesine sahiptir	Daha hacimli uçak gövdesine neden olur ve kryojenik yakıt sistemine ihtiyaç duyulur.
Hava alanı altyapı sistemi		Hava alanlarında hidrojen merkezlerinde elektroliz yapıcı, saflaştırıcı, sıvılaştırıcı, depolama ve dağıtma sistemlerinin bulunması gerekecektir.
Zararlı ve su buhar emisyonları	Turbofan motorlarından çıkan NO _x emisyonunu %33 azaltacaktır.	

Bahsedilen bu konular mutlaka hidrojenin yakıt olarak yaygın şekilde hava taşıtlarında kullanıldığı güne kadar daha da üstünde durulacak ve geliştirilecektir. Özellikle nitrojenin laminer akış kontrolündeki yapılan çalışmalarla hidrojenin özellikleri arttırılacaktır. Bu sayede hidrojen enerjisi diğer jet yakıtlarıyla eşit duruma gelebilecektir. Bu teori şimdilik düşünce aşamasındadır ve teori aşamasından uygulama aşamasına geçilebilmesi için mutlaka birçok deney yapılmalıdır [6].

6.3. Hidrojenin Yakıt Olarak Uçaklarda Depolanma Şekilleri

Geleceğin yakıtı olarak adlandırılan hidrojenin şu anki teknolojinin çözmeye uğraştığı bir diğer dezavantajlı durumu ise kendini depolamada göstermektedir. Gaz halinde son derece düşük yoğunluğa sahip olan hidrojen, temel olarak üç farklı yöntemle depolanabilmektedir. Bunlar;

- Gaz halinde depolama
 - a) Basınçlandırılarak
 - b) Metal hibrid
 - c) Karbon nanotüpler
 - d) Cam mikroküreler
- Sıvılaştırılmış (kryojenik) halde depolama
- Kimyasal bağlarla depolama [5].

Hidrojenin basınçlandırılması yöntemi diğer yöntemlerden daha basit, daha ekonomik ve daha verimli bir yöntem olmasına rağmen depo ağırlığı bu yöntemde bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır [9].

Sıvılaştırılmış halde depolanan hidrojen ise günümüzde diğer yöntemler arasında havacılığa en kolay uygulanabilecek yöntem olarak görülmektedir. Bunun sebeplerinden bir tanesi ve belkide en önemlisi uzay araçlarında kullanılıyor olmasının

getirdiği tecrübe olmasıdır. Bunun yanında gaz halindeki hidrojene oranla daha yüksek bir yoğunluğa sahip olması da diğer bir avantajı arasında yer almaktadır. Ancak hidrojenin sıvılaştırılması işlemi, hidrojenin ısıl değerinin %30-40 arasında bir enerjiye ihtiyaç duymaktadır [16]. Ayrıca sıvı yakıt pompaları, yakıt hatları, ısı değiştiriciler, filtreles, valfler gibi yakıt sistemi elemanlarına ihtiyaç duyulacaktır. Bundan başka yakıt sistemi ve tankların yalıtımı ne kadar iyi yapılmış olursa olsun bir miktar sıvı hidrojen, hem yakıt ikmali sırasında hem de yakıtın uçakta bulunma süresi boyunca buharlaşarak kaybedilecektir. Bununla birlikte basınçlandırılarak depolanan hidrojene göre, atmosfer basıncı ya da göreceli olarak alçak basınç seviyelerinde bulunması, yakıt sisteminin tasarımııı kolaylaştıracak, daha düşük basınçlarda çalışmasından dolayı sistemin ağırlığını dşrecektir [20].

Metal hibridler hidrojeni belli şartlarda emip, daha sonra tekrar serbest bırakabilen metal alaşımlardır. Hidrojenin serbest bırakılması için tek şart uygun sıcaklıktır. Metal hibridlerle depolanabilen hidrojen ağırlığı, depo ağırlığının %1-2' si arasında değişmektedir. Bununla birlikte bu yöntemin en önemli avantajı yakıtın daha düşük basınçlar ve daha normal sıcaklıklar kullanılarak depolanıp kullanılmasının mümkün oluşudur [5]. Metal hibridler üzerine yapılan çalışmalar ile ulaşılmak istenen hedef hidrojen kapasitesinin depo ağırlığının %6-6.5' ine ulaşmaktır. Ne var ki, havacılık açısından böyle bir teknolojik gelişim bile yakıt tankı olarak nitelendirilecek metal hibridin ağırlığının 100 tondan daha fazla olmasını gerektireceği için halen büyük bir dezavantaj olarak kalmaktadır [18,21].

Karbon nanotüpler ile depolama şekli metal hibridlere benzemekle beraber depolanan hidrojen miktarı çok daha fazla olabilmektedir (oda sıcaklığında %4,6 ve 400⁰C ile oda sıcaklığı arasında %14-20). Karbon nanotüp yöntemi halen geliştirilmekte olan bir teknoloji olmakla birlikte özellikle havacılık olmak üzere ulaşım alanında gelecek vaat etmektedir [8].

Geliştirilme aşamasındaki bir diğer teknoloji de cam mikrokrelerdir. Bu yöntem ile bir tuz taneinden daha küçük boyutta içi boş cam kreles, hidrojen depolanmasında kullanılabilir. Cam krelesin hidrojenle doldurulması ve

hidrojenin serbest bırakılma hızı sıcaklığa bağlıdır. Cam küreler, yüksek sıcaklık ve basınçta hidrojen gazı ile doldurulur, işlem tamamlandığında oda sıcaklığına soğutulmaktadır. Bu durumda hidrojen, küre içine hapsedilmiş olmaktadır. Hidrojen gazının kullanımı gerektiğinde ise bir miktar ısı enerjisi ile hidrojenin küreden serbest kalması sağlanmaktadır [5].

Kimyasal bağ ile depolamada, hidrokarbon yakıtlardan hidrojenin alınıp yakıt hücrelerinde kullanılması şeklinde açıklanabilir. Ancak bu yöntemde; ayrıştırma için gerekli enerji, sadece yakıt hücresinin kullanımının getirdiği yüksek verim sayesinde, toplamda bileşiğin tamamının yanmasından daha fazla enerji sağlayabilmektedir. Yöntemin bir diğer dezavantajıda ayrıştırılan bileşikte kalan CO₂ nedeniyle çevresel açıdan herhangi bir yarar sağlamayacak olmasıdır [5].

Sonuç olarak hidrojenin depolanması ile ilgili, üzerinde çalışılan birçok yöntem bulunmaktadır. Ne var ki bunlar arasında istenilen şartları yerine getirebilecek bir yöntemin geliştirilmesi henüz gerçekleşmiş değildir. Bu nedenle hangi depolama yönteminin hava taşımacılığı için en uygun olacağı hakkındaki düşünceler, gelecek teknolojik gelişmelerin sayesinde çözülecek bir problem olmaya devam etmektedir.

6.4 Yakıtların Elde Edilmesi Ve Güvenliği

Hidrojen çok büyük oranda gaza dönüşme eğilimi olduğundan çok dikkatli bir şekilde taşınmalıdır. Yinede ne kadarda dikkatli taşınırsa taşınısın güvenli değildir. Ancak hidrojeni diğer karbon bazlı yakıtlarla karşılaştırdığımızda, hidrojenin taşınması diğerlerine göre daha az tehlikelidir. Örneğin, biri hidrojen enerjisi kullanan ve diğeri karbon bazlı yakıt kullanan iki uçağı karşılaştırdığımızda; karbon bazlı yakıt kullanan uçakta, yakıt tankında çıkabilecek en ufak bir kıvılcım dahil uçakta patlamaya neden olacaktır. Ayrıca patlamadan sonra çevreye yüksek oranda toksik gazlar verecektir. Bu gazlar uzun süre o çevreden gitmeyecektir ve çevreye uzun süre zarar verecektir. Ancak sıvı hidrojeni kullanan uçak patladığında açığa çıkan gazlar yukarı doğru hareket edecektir ve hiçbir şekilde bu gazlar bulut formuna dönüşmeyecektir. Bu sayede çevreye hemen hemen hiç zarar vermeyecektir.

Karbon bazlı yakıtlara benzer dezavantajlar Sinjet yakıtı içinde geçerlidir. Ancak Sinjet patladığında karbon bazlı yakıtların aksine atmosfere difüzyon olmadan önce metan gazı şeklinde uzun süre yeryüzünde kalacaktır. Bu da yeryüzünde o bölgelerde patlamalara ve bunun sonucunda da yangınlara sebep olacaktır.

Hidrojen enerjisinin Sinjet yakıtına göre en büyük avantajı yakıt tanklarının uçakta bulunma yeriyle ilgilidir. Sinjet yakıtı ve diğer karbon bazlı yakıt kullanan uçaklarda yakıt tankı kanatlardadır, daha doğrusu kanatların altındadır. Hidrojen yakıtının bulunma yeri ise düşünülen yeri uçak gövdesidir. Bir uçağın yere çakılması sırasında en korunmasız yer kanatlardır. Bu yüzden uçağın yere çakılması sırasında kanatlara gelebilecek bir darbeye büyük patlamalara neden olacak ve bu da yolcu ve mürettebatın kurtulma şansını azaltacaktır. Ancak hidrojen yakıt tankı gövde içerisinde korunmalı bir şekilde bulunduğundan dolayı patlayarak zarar verme riski daha düşük olacaktır.

Hidrojenin geniş oranda bir yanma oranı aralığı olduğundan dolayı diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında bu dezavantaj olarak düşünülebilir. Ancak hidrojenin herhangi bir kaza sırasında ateşlenme limiti düşüktür. Herhangi bir kaza sırasında ortaya çıkan yakıt parametreleri hidrojen, metan ve düşük oranlardaki Sinjet yakıtında yaklaşık olarak aynıdır. Ancak bahsedilen bu düşük ateşleme limiti uçak havadayken herhangi bir önemi yoktur. Çünkü ancak yere çakılma sırasında, açığa çıkan yüksek enerjiyle hidrojenin ateşlenmesi söz konusudur. Havadayken bu kadar yüksek bir enerji çıkma ihtimali iki uçağın birbiriyle çarpışma ihtimali gibi düşük bir ihtimal dışında olası değildir.

Ayrıca hidrojen diğer yakıtların aksine parlak bir alevle yanmaz, bu yüzden de hidrojenin nerede yanmaya başladığını ve nerelerin tehlike arz ettiğini bilmek mümkün değildir. Hidrojen, diğer toksik olmayan gazlar gibi herhangi bir kaçak sırasında havaya giden hidrojen oksijenle seyreltilmesi sonucu yeryüzündeki hayatı destekleyecek bir faktör de olabilir.

Hidrojen aynı diğer gazlar gibi büyük oranlarda genişlediği zaman ısınır ve açığa çıkan bu sıcaklık hidrojenin herhangi bir şekilde bir yerden sızarak içinde bulunduğu basınçlı ortamdan çıkması durumunda olası bir ateşlemede patlama olabilmektedir. Ancak bunun yanında, hidrojenin tutuşabilmesi için çok yüksek sıcaklıkların olması gerektiğinde, normal şartlarda bizim bildiğimiz anlamda bir ateş, hidrojenin patlamasına neden olmayacaktır. Çünkü bu yanmanın açığa çıkardığı enerji hidrojenin tutuşması için yeterli değildir. Bu özelliklerinde dolayı da, hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında favori olmasını sağlamaktadır. Tablo 8.3' te hidrojenin ateşlenmeden veya patlamadan durduğu güvenli özellikler, Sinjet yakıtı ve metanın özellikleriyle karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir [6].

Tablo 6.3: Hava Taşımacılığı İçin Farklı Özellikteki Yakıtların Güvenlik Özellikleri Arasındaki İlişki [6]

Özellik	Sinjet	Metan	Hidrojen
Havadaki tutuşma limiti(%hacim)	0.8-6.0	5.3-15.0	4-75
Patlama (%hacim)	1.1-3.3	6.3-13.5	13-65
Havadaki minimum ateşlenme enerjisi (mJ)	0.25	0.29	0.02
Yanma hızı (ms^{-1})	43	40	265
Otomatik ateşlenme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	440	40	585
Çevreye ısı enerji yayımı(%)	33-43	23-33	17-25
Teorik patlama enerjisi (kgTNT/ m^3 gaz)	44.42	7.03	2.02
Havadaki difüzyon katsayısı (cm^2s^{-1})	0.05	0.16	0.61
Havaya karışma miktarı (m/s)	Karışma yok	0.8-6.0	1.2-9.0
Toksisitesi	500ppm üstünde toksik	Toksik değil	Toksik değil

Burada asıl sorun gelecekte olacağı gibi sıvı hidrojenin büyük oranlarda ihtiyaç duyulması sırasında açığa çıkacaktır. Çünkü Dünya' nın hidrojen üretimindeki şu anki durumu yıllık 30 milyon tondur. Bu son derece yetersiz bir rakamdır. Bu yüzden de yüzlerce hidrojen üreten yeni enerji sistemlerinin kurulması gereklidir. Bu yeni çıkacak yapıda üretilen sıvı hidrojenin üretimi, dağıtımı, ticari uçaklara ikmali yönetim risklerini, yüksek maliyeti olan yatırımları, uygun yasaların ve kuralların her ülkede çıkarılması, güvenlik tertibatlarını ve ekstra personel ihtiyacını açığa çıkarmasına neden olacaktır. Ancak bu şekilde fosil yakıt enerji kaynaklarından hidrojen enerjisine geçiş sağlanabilir.

Hidrojen enerjisini mevcut fosil yakıtlardan da elde edilebilir. Yani enerjiyi dönüştürülebilir. Ancak bu pek tavsiye edilen metot değildir. Ekolojik olarak önerilen hidrojen enerjisine değişim metodu yenilenebilir enerji kaynaklarından ya da nükleer güç santrallerinden elde etmektir. Güvenlik konusu düşünülürken hidrojenin elde edilmesinden, kullanım zincirlerinden, üretimden, depolama ve taşımacılığa kadar her türlü konu hesaba katılmalıdır [6].

6.5. Sıvı Hidrojenin Uçaklarda Kullanıldığındaki Ekonomisi

Temel olarak gelecekte sıvı hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanılması sıvı hidrojenle yolculuk etmenin toplam maliyetine bağlıdır. Bu gerçekten dolayıda, sıvı hidrojen doğrudan uçaklarda kullanılmaya başlandığı zaman, öngörülen uçak başına yolculuk maliyeti %50 artacağı öngörülmektedir.

Ancak Sinjet yakıtıyla hidrojen enerjisinin uçuş maliyetleri arasında ayrı bir karşılaştırma yapılırsa daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilecektir. Hidrojen enerjisinin Sinjet yakıtına göre uçuş maliyeti daha fazla olmasına karşın, hidrojenin küresel ısınmaya, çevre ve hava kirliliğine olumlu etkileri bunları iyileştirmek için harcanan tüm maliyetlerden daha düşüktür. Yani kısacası hidrojenin uçaklarda kullanımını birim uçak sayısına göre maliyeti arttırmasına rağmen, tüm Dünya'nın maliyetlerini düşürecektir.

Diğer bir yandan hidrojenin yüksek enerjisi de düşünülmalıdır. Ayrıca bahsedilen bu hidrojen enerjisini C ve CO_2 içeren yakıtlardan da elde etme şansı vardır. Böylece maliyetler de daha da düşebilecektir. Tablo 6.4' de Sinjet yakıtıyla hidrojen enerjisinin direkt kullanım maliyetlerini ve buna ek olarak dolaylı yünden maliyetleri de karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir.

Tablo 6.4: Subsonik Uçaklarda Sinjet ve Sıvı Hidrojenin Direkt Operasyonel Maliyetlerinin (DOM) Karşılaştırılması [6]

1995'deki Sinjet'in fiyatı	0.73\$/galon ya da 5.34\$/GJ
2000'deki Sinjet fiyatı	0.72\$/galon ya da 5.63/GJ
1995'deki LH_2 fiyatı	10.68\$/GJ
2000'deki LH_2 fiyatı	10.10\$/GJ
LH_2 'nin Sinjet'e göre 1995'deki DOM oranı	1.55
Fosil yakıtların çevresel zararı	0.03/kwh ya da 1.14\$/GJ
Hidrojenin yüksek kullanım etkinliği	1.20
LH_2 'nin Sinjet'e göre 1995'deki DOM oranının etkisi	1.43
LH_2 'nin Sinjet'e göre 2000'deki DOM oranının etkisi	1.39

Bundan başka günümüzde, hidrojenin uçaklarda kullanım maliyeti Sinjet yakıtlarından daha fazladır. Ancak bu durum günümüz için geçerlidir. Gelecekte petrol rezervlerinin Dünya' da azalması sonucu Sinjet yakıtının fiyatları büyük oranda artacaktır. Bu durumda hidrojen enerjisine geçilmesi hem uçakların geleceği için hem de maliyetleri düşürmek için şart olacaktır. Bu nedenlerden dolayı gelecekte uçakların uçabilmesi için hidrojen enerjisinin büyük oranlarda üretilebilmesi şart olacaktır.

Diğer düşünülmesi gereken konuda, bütün Dünya' nın hidrojen enerjisi kullanımına geçmesine kadarlık zamanda sıvı hidrojenin üretilmesi için kurulacak endüstriyel tesislerdir. Bu tesisler tahmini olarak 30×10^6 ton yıllık hidrojen

üretmelidir. Şikago' daki O'hare Hidrojen Üretim Tesisi, şu anda bir günde sadece 3000 ton hidrojen üretebilmektedir. Bu 3000 tonluk hidrojen miktarı sadece 20 uçağın bir günlük uçuşunda harcayacağı hidrojen miktarıdır. Bu yüzden de bu gibi tesislerin mutlaka artırılması gerekmektedir [6].

7.SONUÇ

Özellikle ticari amaçlı uçuşlarda yakıt maliyeti, uçağın çalıştırılma maliyetleri içinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle yakıt fiyatlarında meydana gelebilecek olumlu ya da olumsuz her hangi bir değişikliğin etkileri bilet fiyatlarına doğrudan yansiyacaktır. Örneğin son zamanlarda Türkiye’de havacılıkta kullanılan yakıt üzerindeki vergilerin düşürülmesi, etkisini olumlu anlamda göstermiş ve hem var olan hem de yeni kurulan şirketler vasıtasıyla havayolu taşımacılığına olan ilgiyi arttırmıştır.

Diğer yandan günümüzde enerji ihtiyacının çok yüksek bir oranının sağlandığı petrol ve petrol temelli yakıtları yakın bir gelecekte tükeneceği üzerine birçok senaryo ortaya atılmıştır. Ancak bu yakıtların tükenmesinden önce orta da olan başka bir problemde yakıt fiyatlarının sürekli ve artan bir hızla yükselecek olmasıdır. Bu olumsuz durumun havacılık sahnesindeki perspektifi ise bir önceki durumun tersi ve daha şiddetlisi olarak havayolu kullanımının düşmesi şeklinde kendisini gösterecektir.

Problemin ekonomik boyutunun yanında bir de çevresel boyutu vardır ki, çoğu zaman göz ardı edilmesinde hiçbir sakınca yoktur. Havacılık ve çevre denildiğinde akla ilk ve çoğunlukla tek gelen sadece gürültüdür. Böyle bir rahatsızlıkta sadece havaalanı çevresinde yaşayan insanların birebir maruz kaldıklarından dolayı farkına vardıkları bir problemdir. Havacılık ve çevre derken mutlaka gürültüden de ötesi düşünülmelidir.

Hidrojene geçiş planları yapılırken düşünülmesi gerekli bir diğer konu da geçişin ilk aşamalarıdır. Buna göre hidrojenle ilgili çalışmalar tamamlanıp belirli ve sağlam bir yapıya kavuştuğunda hidrojenin uçaklarla buluşması nasıl olacaktır? İlk etapta uçaklar üzerinde bir takım değişiklikler yapmak yeterli gelecek midir, yoksa yapısal olarak tamamen farklı uçaklar mı üretilecektir? Bunların havayollarınca temin edilmesi ne kadar zaman alacaktır ve bu zaman nasıl kısaltılabilecektir? Hidrojen yakıtlı uçakların kullanılmaya başlaması ve yaygınlaşması esnasında, klasik uçaklarla hidrojen yakıtlı uçaklar kullanan havayolları arasında meydana gelecek rekabet şartları nasıl düzenlenecektir? Bu soruların cevapları uçaklarda hidrojen kullanılması kararı

verilmeden önce cevaplandırılmalıdır. Bu çalışmada da bu sorulara cevap aranmıştır. Bu sorular cevaplanırken ayrıca havacılıkta hidrojen kullanımının önündeki “somut engellerin” yanında zamanla ortaya çıkacak bir takım başka engel ve engellemeler de (örneğin, insanların hidrojenle uçan uçaklara karşı psikolojik tepkimeleri....) daha baştan düşünölmeli ve bunlara karşı önlem alınmalıdır.

Kısacası ileride oluşabilecek herhangi bir gecikme veya tıkanıklığı ortadan kaldırmak için konu bütönsel olarak ele alınmalı ve yeni teknolojinin mümkün olduğunca çabuk ama en iyi şartlarda kullanıma hazır hale getirilmesi sağlanmalıdır.

Hidrojen gazının yakıt olarak kullanılma uygulamasının günümüzde ticari hava yollarında kullanılması için ancak askeri teknolojinin gelişiminin bir sonucu olarak ya da uluslar arası projelerle gerçekleştirilebilir. Ancak askeri teknolojinin gelişmesi ise uluslar arası bir projenin gerçekleştirilebilme olasılığını düşörecektir.

Her ne kadar hidrojen ısıl özellikleriyle ve çevreci bir yakıt olması özelliğiyle uçaklar için uygun bir yakıt olarak görölse de, hidrojen sentetik bir yakıttır. Hidrojenin elde edilebilmesi için doğal enerji kaynağına ihtiyaç vardır. Uçaklarda büyük oranlarda yakıt tüketimi olduğundan dolayı bu oranlarda birincil enerji kaynağına da ihtiyaç vardır. Günümüzde ise uçaklarda sadece birincil enerji kaynağından elde edilen yakıtlar kullanılmaktadır. Eğer uçak yakıtı hidrojene dönüştürölsö çevre kirliliği iki katı azalırken, masraflar ve dünya kaynaklarını kullanma ve buna bağılı olarak da doğal kaynakların tükenme hızı oranı ikiye katlanacaktır.

Dünya gelecekte uçak yakıtı olarak hidrojeni tercih ederse Dünya'nın doğal kaynaklarını azaltmamak için nükleer enerji ile hidrojen üretimine geçeceğı öngörülmektedir. Diğer taraftan hidrojenin patlama enerjisi diğer yakıtlara göre çok yüksek olduğundan dolayı uçaklarda patlama riski ve bundan dolayı insanoğıluna zarar verme riski yüksek olacaktır. Bununla beraber hidrojen yakıtı üretmek sebebiyle kurulan nükleer santrallerin sayısının çoğalmasıyla birlikte ortaya çıkacak riskin yanında, uçaklarda yakıtı kullanırken veya hidrojeni ikmal ederken patlama risklerinden dolayı Dünya çok büyük bir tehlike altına girecektir. Bu durumda herne kadar çevre

kirliliği, sera etkisi, asit yağmurları v.b. olaylar engellenecek olsa da, gelecekte insanoğlunun neslinin tüklenme tehlikesi riski ortaya çıkacaktır.

Günümüzde hidrojen üretimi için genellikle hidroelektrik santrallerde kullanılan su kullanılmaktadır. Ancak önceki bölümlerde bahsedildiği gibi 20 uçağın uçabilmesi için 3000 ton sıvı hidrojene yani yaklaşık 20000 ton suya ihtiyacı vardır. Suyu kullanma oranı çok yüksek olduğundan dolayı eğer uçak yakıtı olarak hidrojene geçilirse gelecekte Dünya' nın susuz kalma riski ortaya çıkacaktır.

Dünya'nın tüklenmekte olan doğal kaynakları düşünülürse, hidrojeni üretmek için en uygun enerjinin güneş enerjisi gerçeği ortaya çıkmaktadır. Ancak günümüz şartlarında büyük oranlarda hidrojen yakıtının güneş enerjisi panelleriyle üretilebilmesi zor olarak görülmektedir.

Gelecekte teknolojinin gelişmesiyle büyük güneş panelleriyle çevrili ve bu sayede uçaklar için gereken hidrojen yakıtını ve yakıtın bir kısmıyla kendi enerjisini üretebilen havaalanları kurulabilecektir. Ancak bu sefer de havaalanlarının güneşi sürekli gören ve güneş ışını mümkün olduğunca dik alan yerlerde kurulması söz konusu olacaktır. Yani, yılda 12 ayının 10 ayını bulutlu ve yağmurlu geçiren İngiltere, Hollanda, İsviçre gibi ülkeler havaalanlarında hidrojen üretemeyecektir. Bu durumda günümüzde petrol için yapılan savaşlar ve politikalar gelecekte güneş için yapılacaktır.

Hidrojen yakıtının uçaklarda kullanılmasına geçiş aşamasında güneş enerjisini yoğun alan belirli havaalanlarının etrafını kaplayacak şekilde kurulacak güneş panelleri tarlasıyla hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir. Ancak bu durumda, güneş enerjisinin yoğun olan yerlerde bu havaalanları kurulduğundan dolayı bu yerlerde sıcaklıklar çok yüksek olacaktır. Bu da, sıvı hidrojenin yalıtımını zorlaştıracaktır ve hidrojeni daha tehlikeli hale getirecektir. Bu durumda da, insanların hayatı riske girecektir.

Havaalanlarında kurulacak güneş panelleri güneş ışığının belli bir kısmını havaya ve uzaya yansıtacaktır. Bu yüzden de, havadan yeryüzüne bakıldığından o bölgede çok büyük bir parlaklık görülecektir. Bu parlamalardan dolayı pilotlarda göz

yanılmaları oluşacak ve pilotun pisti görememesi gibi tehlikeli durumlarla karşılaşılacaktır.

Bu şartlarda en uygun durumun belirli yerlerde güneş enerjisi panellerinin kurulması, buradan da sıvı hidrojenin havaalanlarına taşınması olarak görülmektedir. Daha önceki konuda bahsedildiği gibi bu durumda da, Dünya dengeleri bozulacak ve güneş için savaşların çıkması söz konusu olacaktır.

Gelişen teknolojiyle birlikte uzaya kurulacak güneş panelleriyle hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir veya Ay'a ya da başka bir gezegene kurulacak nükleer tesislerden üretilen hidrojen Dünya'ya taşınabilir. Bu üretimden açığa çıkan su buharı gezegenlerin gelecekte yaşanabilir yerler haline gelmesine de yardımcı olacaktır. Bütün bunların hepsi teori aşamasındadır, gerçeğe dönüşebilmesi için 2075-3000 yıllarına kadar bekleneneği öngörülmektedir.

2075-3000 yıllarından önce hidrojen yakıtını kullanan uçakların denemelerden öteye geçmeyeceği öngörülmektedir. Ancak mevcut teknolojiyle hidrojen yakıtının uçaklarda kullanılmasına geçilmesi durumunda daha önceki konuda bahsedildiği üzere Dünya ve insanoğlunun geleceği tehlike altına girecektir. Bu nedenle Dünya'da neden olacağı yıkımlar hidrojen yakıtının projesinin rafa kaldırılması sonucuna neden olacağı öngörülmektedir.

Dünya'yı bekleyen bu tehlikeler yüzünden teknolojinin Dünya'da belirli bir düzeye gelinceye kadar geçecek sürede hidrojen yakıtlı uçakların tasarımından ve denemelerin yapılmasından sakınmak veya yapanları engellemek ise günümüzde Dünya'nın ve insanoğlunun karşılaşacağı tehlikeleri önlese de Dünya'nın geleceğine büyük bir darbe vuracağı kesin olarak öngörülmektedir.

Kısacası, hidrojen yakıtlı uçakların tasarımı ve hidrojen üretimi hakkında projeler yapılmaya devam edilmeli ancak uygun gün gelene kadar bunların hayata geçirilmesi için beklenilmelidir.

8. KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Baykara, S.Z.,2005, Hydrogen As Fuel :A critical technology ?, International Journal of Hydrogen Energy, 30:545-553.
- [2] Boyle,G.,1996, Renewable Energy: Power for a sustainable future, Oxford Universty Press, United Kingdom.
- [3] Brewer,G.D.,1991, Hydrogen aircraft technology, CRC Press.
- [4] Cherry, S. R.,2004, A hydrogen utopia?, Int. J. Hydrogen Energy, 29:125-129.
- [5] Colozza,J.A.,2002, Hydrogen storage for aircraft applications overview, NASA/CR, 211867.
- [6] Contreas.A.,Yiğit,S., Özay,K., Veziroğlu,T.N.,1997, Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels , Int.J. Hydrogen Energy, 22 (10/11): 1053-1060.
- [7] ÇengeL,A.Y., Boles.A.M.,1996, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Literatür Yayıncılık,İstanbul.
- [8] Froudakis,E.G., 2002, H₂ interaction with carbon nanotubes: a review of ab initio studies, Journal of Physics, PII:S0953-8984(02)29969-5,p.453-465.
- [9] http://www.llnl.gov/str/June03/pdfs/06_03.4.pdf
- [10] <http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactsSheets/FS-040-DFRC.html>
- [11] Kahraman,N., Akansu,S.O., Albayrak,B.,2005, İçten Yanmalı Motorlarda alternatif yakıt olarak hidrojen kullanılması,Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Enerji Yönetimi Sempozyumu Bildiriler kitabı,371(E):103-112.
- [12] Maack,H.M., Skulason,J.B.,2005, Implementing the hydrogen economy, Journal of Cleaner Production, 30: 552-314565.
- [13] Midilli,A., Dinçer,İ.,2005 Hidrojen teknolojilerine stratejik yaklaşımlar ve temel faktörler, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Enerji Yönetimi Sempozyumu Bildiriler kitabı,371(E):121-133.
- [14] Ogden,J.M.,1999, Developping an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study, Int. J. Hydrogen Energy, 24:709-730.

- [15] Oral,E., Çelik,V.,2005, Hidrojen ve yakıt pillerinin taşıtlarda kullanımı Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Enerji Yönetimi Sempozyumu Bildiriler kitabı,371(E):167-178.
- [16] Petterson,J., Hjortsberg,O.,1999, Hydrogen storage alternatives- a technological and economic assessment, KFB-Meddelande, 27.
- [17] Sato,T., Tanatsugu,N., Naruo,Y., Omi,J., Tomike,J., Nishino,T.,2000, Development study on atrex engine, Acta Astronautica, 47(11):799-808.
- [18] Schlapbach,L., Zuttel,A.,2001, Hydrogen storage materials for mobile applications, Nature, vol:414.
- [19] Sugisita, H., Mori,H., Uematsu,K.,1998, A study of thermodynamic cycle and system configurations of hydrogen combustion turbines, Int.J. Hydrogen Energy, 23 (8): 705-712.
- [20] Turgut,E.T., Karakoç,T.H.,2004, Günümüzde hidrojenin havacılıktaki yeri ve gelecek için öngörüler,Havacılıkta ileri teknolojiler ve uygulamaları sempozyumu bildiriler kitabı, cilt 2:677-682.
- [21] Tzimas,E., Filiou,C., Peteves,S.D., Veyret,J.B.,2002, Hydrogen storage: state-of-the-art and future perspective, European Commision Institute for Energy.

ÖZGEÇMİŞ

04.02.1980 Eskişehir’de doğdu. İlköğrenimini Yunus Emre İlköğretim Okulu, orta öğrenimini Özel Yakınoğu Koleji’nde yaptı. 1998 yılında Gazi Lisesi’nde ortaöğrenimini tamamladı. 1998 Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2002 yılında mezun olarak Makine Mühendisi ünvanını aldı. 2004 yılında Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Enerji Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitime başladı. Yaklaşık 3 yıldır da TUSAŞ Motor Sanayii’nde çalışmaktadır.