

## OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE HİDROJEN YAKITLI SİSTEMLERE GEÇİŞ SÜRECİNDE KISITLAR TEORİSİ\*\*

**Gülşen AKMAN\***

*Yrd. Doç. Dr., Kocaeli Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli  
akmang@kocaeli.edu.tr*

**Mustafa Anıl DÖNMEZ**

*Kocaeli Üniversitesi, İktisadi ve İdari  
Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Kocaeli  
mustafaanildonmez@gmail.com*

**Zerrin ALADAĞ**

*Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli  
zaladag@kocaeli.edu.tr*

### ÖZET

Üretim ve hizmet sektörü işletmelerinde, işletmelerin amaçlarını gerçekleştirmede performanslarını etkileyen çeşitli darboğaz ve kısıtların belirlenmesi ve çözüm getirilmesinde, Kısıtlar Teorisi etkin bir yönetim felsefesidir. Sistemdeki darboğaz ve kısıtlar bir zincirdeki en zayıf halkaya benzetilebilir. Sistemin performansı, bu zayıf halkanın kaldırabileceği yüke eşdeğerdir denilebilir. Günümüzde hızla tükenmekte olan fosil yakıtlı enerji kaynaklarına alternatif olarak gelecekte kullanımı konusunda önde gelen global petrol ve otomotiv şirketleri, 21. yüzyılın hidrojen yakıtının yüzyılı olacağını öngörmektedirler. Bu çalışmada hidrojen yakıtlı araçların yaygınlaşmasını engelleyici darboğazların tespiti, yönetilmesi ve giderilmesi açısından kısıtlar teorisinin düşünce süreçlerinin kullanıldığı bir uygulama anlatılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kısıtlar teorisi, düşünce süreçleri, hidrojen yakıtlı araçlar

## Theory of Constraint at Transition Process to Hydrogen Fuel System in Automotive Sector

### ABSTRACT

Theory of constraint (TOC) is an efficient management philosophy to determine bottlenecks and constraints affecting performance of companies to achieve their goals within manufacturing and service sectors. Bottlenecks and constraints within a system can be liken to the weakest link in a chain. System performance is equivalent the load which this weak link can handle. Nowadays, prominent global oil and automotive companies foresee that 21th century will be hydrogen fuel century. This study presents an application about determining bottlenecks preventing the spread of hydrogen fuel vehicles, managing and eliminating of these bottlenecks. For this, thinking processes of TOC is used.

**Keywords :** Theory of constraints, thinking processes, hydrogen fuel vehicles

\* İletişim yazarı

\*\* Bu makale, 16-17 Ekim 2009 tarihlerinde TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından Kayseri’de düzenlenen V. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu’nda bildirisi olarak sunulmuştur.

## GİRİŞ

**D**ünyadaki enerji gereksiniminin % 80'i fosil yakıtlardan (doğal gaz, petrol, kömür) karşılanmaktadır. Ancak fosil yakıtların kullanımının neden olduğu çevre kirliliği sorunları ve özellikle petrol ve doğal gazın bilinen rezervlerinin giderek azalması yeni ve temiz enerji kaynaklarının araştırılmasına neden olmuştur [1].

Dünyada fosil esaslı yakıtların kullanımına bağlı çevre felaketleri gün geçtikçe artış göstermektedir. Bu felaketler büyük ölümlü ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Uluslararası çalışma örgütleri bu kayıplardan fosil yakıt teknolojisinin zararlarını sorumlu tutmaktadırlar. Bu zararların azaltılmasında 1997 yılında 171 ülkenin zararlı gaz salınımının kontrol altına alınarak azaltılması için imzaladıkları Kyoto Protokolüyle sağlanan uluslararası birlikteliğinin önemi büyüktür [2].

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) raporlarına göre [2];

- Uzun yıllardır kutuplardaki buzulların erimesi büyük çevre felaketlerine yol açmaktadır.
- Okyanusların ısı içeriği ve global deniz sularının seviyeleri yükseldiği görülmektedir.
- Son yüzyılda küresel sıcaklık artışı ortalama olarak 0,6 °C artış göstermektedir. Gerekli önlemler alınmaz ise, yeni yüzyılın sonunda sıcaklıkta +5°C daha artış olabileceği beklenmektedir.
- Son 125 yılda yaklaşık olarak bir trilyon varil petrol tüketilmiştir. Küresel orman varlığının 1850-1980 yılları arasında yaklaşık olarak % 15 oranında azaldığı tahmin edilmektedir.
- CO<sub>2</sub> ve diğer sera etkisi yaratan gaz emisyonlarından dolayı dünya atmosferi kalınlaşmış, dünya ortalama sıcaklığı artış göstermiştir.

Bu olumsuz etkiler çevrenin yaşanmaz hâle gelmesi ve ölümlere neden olması gibi canlı yaşamını tehdit edebilecek boyutlara erişebilecek potansiyele sahiptir. Bu durumda fosil kaynaklı enerji üretim ve tüketiminden kaynaklanan çevresel olumsuzluklar ve fosil kaynakların sınırlı olduğu ve tükeneceği gerçeği dikkate alındığında, çevreye olumsuz etkileri az olan ve kaynak kıtlığı bulunmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme gereği ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının sahip olduğu çevresel olumlu etkiler, bu kaynakların fosil yakıtlara göre çevresel olarak tercih edilmesine ve yaygınlaşmasına neden olacaktır [3].

Yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, su gücü, biyolojik yakıt enerjisi, deniz dalgalarının

gücü, geotermik enerji ve benzeri biçimlerde karşımıza çıkmaktadır. Özellikle çevre kirliliğiyle ilgili problemler arttıkça yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmış ve bunlarla ilgili projeler de destek görmeye başlamıştır. 2025 yılına kadar üretilen toplam elektrik enerjisinin yaklaşık %10-15'inin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanacağı tahmin edilmektedir [4].

Fosil yakıtların çevreye verdiği zararlara rağmen, fosil yakıt teknolojisi, dünya ticaretinin en önemli kalemini oluşturduğu için, yeni, doğaya zarar vermeyen yeni yakıt teknolojilerine geçiş için temel neden oluşturmayabilir. Bu fosil yakıtlı araçlardan mevcut birçok global firmanın ticari bir yapı olmasından dolayı kolaylıkla vazgeçemeyeceği rasyonel bir düşünce gibi görülebilir. Fakat dünya petrol üreticilerinin tahminlerine göre dünya petrol kaynaklarının bu yüzyıl içerisinde tükeneceği öngörülmektedir [1]. Hidrojenin petrole göre daha verimli bir yakıt olması (1 gr hidrojenin, 4 gr benzinden üstün oluşu), enerji elde edilirken çevreyi kirleten hiçbir zararlı çıktısının olmaması nedeniyle tüm dikkatleri üzerine çekmiştir. Ayrıca hidrojen gazının su, güneş, rüzgar ve biyokütle ile üretilebilir olması da önemli bir avantajdır. Bu özelliklerinden dolayı hidrojen enerjisi dünyada giderek önem kazanan doğal bir kaynaktır ve kullanımını giderek yaygınlaşmaktadır [5]. Bu avantajlarından dolayı alternatif enerji kaynağı olarak hidrojen esaslı yakıtların kullanılabilirliği tahmin edilmektedir.

Bu makalede Türkiye'de hidrojen yakıtlı araçlara geçiş sürecinde karşılaşılan problemlerin tespiti, yönetimi ve çözümünde bir öneri geliştirmek amacıyla kısıtlar teorisinin düşünce süreçlerinden faydalanılmıştır.

## HİDROJEN ENERJİSİ

Global ısınmayı önlemek amacıyla imzalanan Kyoto protokolüyle karbondioksit emisyonlarına getirilen sınırlamalar, hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak kullanımına büyük önem kazandırmaktadır [1].

Geleceğin enerji kaynağı olarak görülen hidrojen enerjisinin elektrik enerjisine çeviren sistemlerin geliştirilmesi için yapılan araştırmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin, ABD'de 2003 yılında hükümet tarafından ayrılan kaynak 1,7 milyar Amerikan dolarıdır. Japonya 2020 yılına kadar 4 milyar dolar bütçe ayırmıştır. 2030 yılında uluslararası yakıt hücresi pazarının yaklaşık olarak 60 milyar dolar civarında olacağı tahmin edilmektedir. Bu durum hidrojenin geleceğin enerji kaynağı olabileceğini açıkça göstermektedir [5, 6].

Hidrojen gazının enerji kaynağı olarak çok çeşitli uygulamaları vardır [7].

- 1) Hidrojen ısı kaynağı dışında motorları çalıştıran yakıt şeklinde kullanılmaktadır.

- 2) Hidrojen binalarda ısıtma ve pişirme amaçlı olarak ve ayrıca soğutma sistemlerinde kullanılabilir.
- 3) Gaz türbininde hidrojen yakıt olarak kullanılmakta ve bu yoldan elektrik elde edilmektedir.
- 4) Sanayide yaygın hidrojen uygulamaları bulunmaktadır; petrol sanayiinde, metalurjide, elektronikte, cam sanayiinde, nükleer reaktörlerde kullanılmaktadır.

Çok farklı işlemlerde (petrokimya sanayiinde, amonyak ve diğer kimyasalların üretiminde ve metalurjide) kullanılmak üzere, her yıl dünyada 500 milyar m<sup>3</sup> ten daha fazla hidrojen üretilmektedir. Bu kadar hidrojen ile yaklaşık 6,5 EJ enerji üretmek mümkündür. Bu da dünya enerji tüketiminin % 1,5'u kadardır. Üretilen bu hidrojenin yaklaşık % 99'u fosil yakıtlardan (birincil olarak doğal gazdan) kimyasal üretimle ve geri kalanı da yenilenebilir kaynaklarından elde edilmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretimi bugünkü teknolojilerle oldukça pahalıdır; ucuzlaması yeni teknolojik gelişmelere bağlıdır [1].

Hidrojenin üretiminin yanında temel konulardan biri de, uygun depolama yönteminin seçimidir. Hidrojeni bir yakıt olarak, gaz ya da sıvı fazda depolamak mümkündür. Çelik kaplar içinde hidrojen, gaz olarak ya da basınç altında sıvı olarak depolanabilmektedir. Bu açıdan hidrojen taşınabilir bir enerji kaynağıdır. Ayrıca, doğal gaz için kullanılan boru şebekeleri ile hidrojeni sevk etmek mümkündür [7]. 1 m<sup>3</sup> hidrojenin ağırlığı 0,8 kg'dır. Hâlen geliştirilmekte olan hidrojen depolama teknikleri sıkıştırılmış gaz, sıvı hidrojen, metal hidritler, karbon nanotüp, sıvı taşıyıcı hibridlerdir. Diğer taraftan, yeni gelişmekte olan bir teknoloji alanı olan yakıt pillerinin, şu anda yüksek olan maliyet engelini aştıklarında, yüksek verimleri ve düşük kirlenici emisyonları gibi avantajlarıyla yapı, sanayi ve ulaştırma sektörlerinde bugün kullanılmakta olan yakıt sistemlerinin yerini alacakları öngörülmektedir [1]. Yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen kullanımının yararları ise oldukça fazladır. Hidrojen Yakıt Pili ile çalışan yeni taşıtlar geleceğin farklı yolcu taşımacılığı hakkında köklü bir bakış sunmaktadır. Çünkü, geleceğin yakıtı yenilenebilir ve çevre kirliliğinden bağımsız olarak çalışabilen yakıtlar olacaktır. Hidrojenle çalışan taşıtlar ulaşım yakıtı olarak kullanılan petrolün alternatifidir. Bu sebeple alternatif çevre ve enerji problemlerine çözümler sunmaktadır [8]. Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen fazla miktarda üretilebilir olması ve kirliliğin çok az olması sebebiyle gelecek için desteklenebilecek bir yakıt olduğunu göstermektedir. Hidrojen; doğal gaz, petrol ve diğer enerji taşıyıcılarına oranla daha kullanışlıdır. Hidrojen; üretim, dağıtım, kullanım ve güvenlik bakımından benzine göre çeşitli avantajlara sahiptir. Öncelikle temizdir, yenilenebilir şekilde üretilebilir, sağlıklıdır [8]. Avrupa Birliği ve birçok ülke öncelikli gördüğü bu alanda yürüttükleri teknoloji

geliştirme ve iyileştirme faaliyetleriyle özellikle ulaşım araçlarında kullanılacak yakıt pillerinin geliştirilmesi yönünde çalışmaktadır [1].

Hidrojenin özellikle, otobüs, kamyon ve traktör gibi ağır taşıtlarda kullanımı gittikçe artmakta ve gelişen teknolojiyle birlikte sorunlar giderek çözülmektedir. Petrolün sınırlı ömrü ve artan çevre kirliliği, hidrojen yakıtı kullanımının yaygınlaşmasına yol açmaktadır [9]. Amerika'da BMW marka otomobilde hidrojen, yakıt olarak kullanılmaktadır. Daimler - Benz, basınçlı hidrojen depolama yöntemiyle NEBUS kent otobüsünü çalıştırmıştır. Lockheed sıvı hidrojenle çalışan uçak geliştirmiştir [7].

Türkiye'de hidrojen yakıtlı araçların geliştirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin resimde Marmara Üniversitesinde geliştirilen hidrojen yakıtlı aracın prototipi görülmektedir [10]. Sakarya Üniversitesinde hidromobil adlı bir proje yürütülmektedir.



Marmara Üniversitesinde Geliştirilen Hidrojen Yakıtlı Araç Prototipi

### KISITLAR TEORİSİ

Kısıtlar Teorisi, 20 yılı aşkın bir süredir Goldratt tarafından Avraham Y. Goldratt (AGI) Enstitüsünde geliştirilmektedir. Bu çalışmalara bağımsız çalışma grupları da dahil olmuşlardır [11]. Goldratt tarafından yayınlanan "The Goal" (Amaç) adlı yayında kısıt; işletme/üretim sisteminin daha yüksek bir performansa çıkabilmesini engelleyici kaynak eksiklikleri olarak tanımlanmaktadır [12]. Kısıtlar Teorisinin temelini oluşturan unsurlar şu şekilde özetlenebilir; i) Bütün organizasyonların arzuladıkları bir amacı ve her zaman ileriye dönük bir doğrultusu vardır. ii) Amaçlı değer ekleme gelişimi olasılığının birkaç kısıtlamayla kısıtlanması. iii) Bu kısıtlamaların tanımlanması ve iyileştirilmesi yapılandırılabilir [13]. Kısıtlar Teorisi yaklaşımı, sürekli gelişme için kısıtların yönetilmesine odaklanmış bir yönetim yaklaşımıdır [14].

Bir sistemde darboğazları oluşturacak kısıtların tespiti ve ortadan kaldırılması için kısıtlar kuramının beş odaklanma adımı ifade edilir [15].

1. Kısıtların belirlenmesi: İlk adımda sistemin en zayıf noktasındaki kısıt tespit edilir.
2. Kısıtların nasıl işletileceğine ve performansın nasıl artırılacağına karar verilmesi: Bu adımda kısıtlardan en yüksek faydayı sağlamak için alınacak önlem veya çözümler geliştirilir.
3. Diğer tüm faaliyetlerin kısıtla ilişkilendirilmesi: Kısıt tespit edildikten sonra, sistemdeki tüm faaliyetlerin kısıttan en yüksek verimi alacak şekilde ilişkilendirilmesi sağlanır.
4. Kısıtların ortadan kaldırılması: Sistem eğer ilk üç adımda kısıtı kıramamışsa, kısıtı ortadan kaldırması gerekir.
5. Herhangi önceki bir adımda kısıt kırılır veya kaldırılırsa, adım 1'e dön. Uyarı ; Bir sonraki kısıtta hareketsizliğe izin verme.

Goldratt'a göre, bir sistemin daha çok kâr elde etmesini engelleyici kısıtlar genellikle; politikalar, prosedürler ve ölçümsel hatalardan kaynaklanan kısıtlardır [12]. Goldratt genel politika kısıtlarının çözümünde düşünce süreci yaklaşımını geliştirmiştir.

**Tablo 1.** Düşünce Süreçlerinde Kullanılan Yöntemler [16,17].

Jenerik Sorular	Amacı	Yöntemler
Ne Değişecek?	Temel problemin tanımlanması	Mevcut Gerçeklik Ağacı
Neye Dönüşecek?	Basit ve pratik çözümler geliştirmek	Buharlaştan Bulut Gelecek Gerçeklik Ağacı
Dönüşüm Nasıl Gerçekleşecek?	Çözümlerin uygulanması	Ön Gereksinim Ağacı Geçiş Ağacı

Düşünce süreçlerinde sorunlara yönelik üç soru bulunmaktadır. Bunlar problem çözme tekniklerinin temelini oluşturmaktadırlar. i) Ne değişecek. ii) Neye dönüşecek. iii) Bu dönüşüm nasıl gerçekleşecek [16]. Bu sorular problem çözüm tekniklerinin de temelini oluşturur. Soruların cevaplanmasında neden-sonuç temeline dayanan araçlar kullanılır. Düşünce süreçlerindeki sorular, amaçlar ve yöntemler Tablo 1'de görülmektedir.

## UYGULAMA

Hidrojen enerjisine geçmek Türkiye'ye çeşitli faydalar sağlayacaktır. Özellikle hidrojen yakıt enerjisine geçildiği

takdirde Türkiye'de petrol, doğal gaz ve kömür için sarf edilen döviz miktarları giderek düşecek, bütün yakıt ihtiyacını kendi birincil enerji kaynaklarıyla sağlamış olacak, böylece fosil yakıt ithal etmek zorunluluğundan kurtulacaktır. Küresel ısınmanın, hava kirliliğinin ve asit yağmurlarının getirdiği zararlar ortadan kalkacak, Türkiye temiz çevreye kavuşacaktır. Türkiye KYOTO protokolü kurallarına uyumlu olacaktır [18].

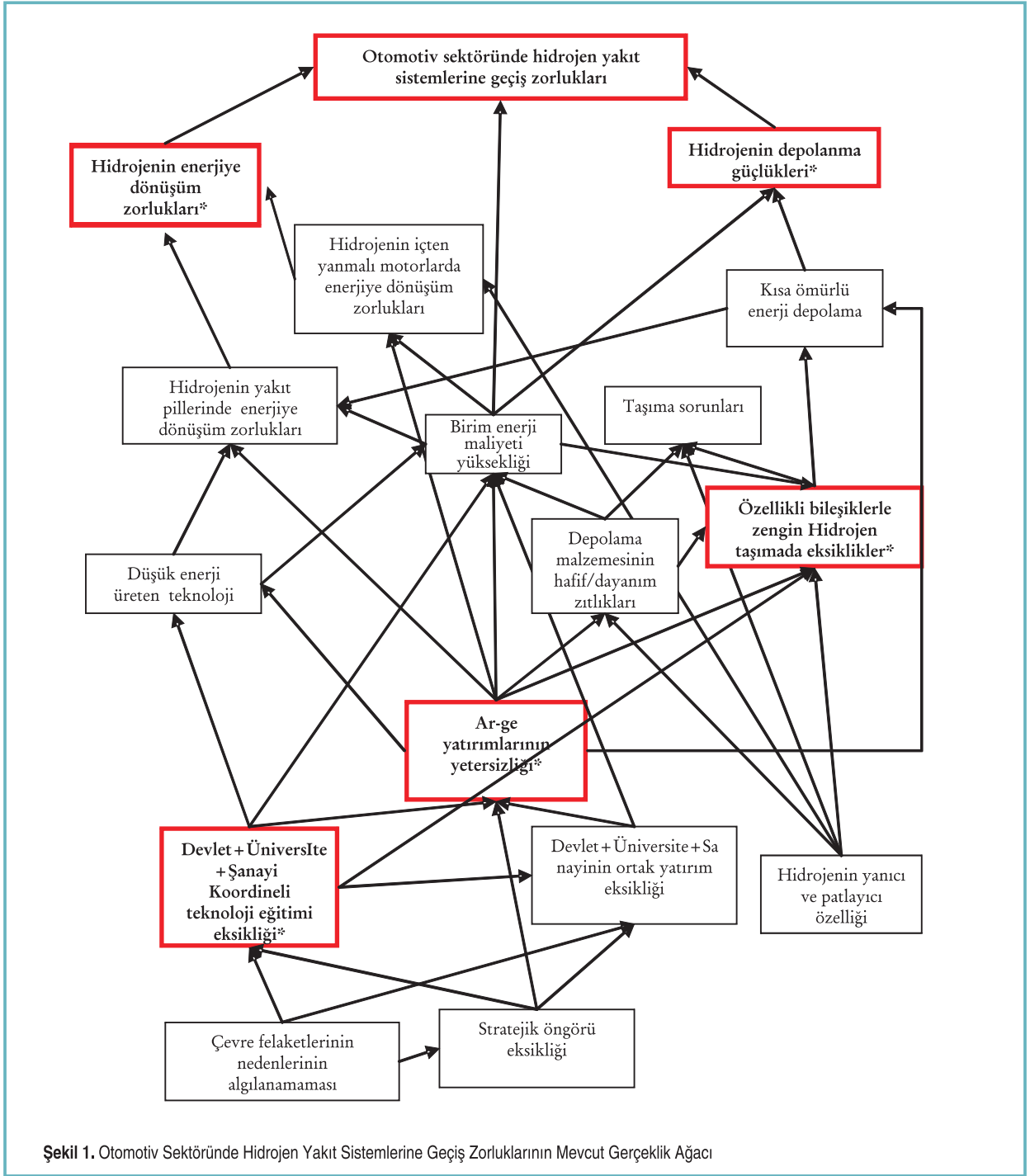
Burada Türkiye'de hidrojen yakıtlı araçların geliştirilmesini ve yaygınlaşmasını engelleyici darboğazların tespiti, bu darboğazların yönetilmesi ve ortadan kaldırılması konusunda kısıtlar teorisi yaklaşımının düşünce süreçleri kullanılmıştır.

Kısıtlar Teorisi, düşünce süreçlerinin ilk aşaması olan Mevcut Gerçeklik Ağacı (MGA) ile istenmeyen etkiler araştırmalardan elde edilen veriler altında listelenir. Bu etkiler ile sonuçları arasındaki ilişki MGA ile oluşturulur. Bu sayede kök neden(ler) tespit edilmiş olur. Kök nedenlerin ortadan kaldırılmasıyla istenmeyen etkenler de ortadan kalmış olur. Otomotiv sektöründe Hidrojen yakıtlı sistemlere geçiş sürecinde karşılaşılan ana kısıtlar şunlardır; Motor ve yakıt pillerinde enerjiye dönüşümü, depolama güçlükleri; yanıcı bir gaz olması ve depolamada kullanılacak malzemenin dayanım/ağırlık zıtlıkları, elde etme maliyeti, özellikli bileşiklerle daha yüksek hidrojen taşıma süreçlerinin zorluğu, hidrojenin yakıt hücreli pillerde yakılmasına dayalı pil ömrünün 100.000 saatlere ulaşamamış olması vs. birçok güçlükten bahsedebiliriz [19]. Şekil 1'de MGA oluşturulmuştur. Şekil 1 de \* işaretli hiyerarşik sırada; özellikli bileşiklerde zengin hidrojen taşıma, AR-GE yatırımları ve devlet+üniversite+sanayi koordineli teknoloji eksiklikleri gösterilen kök nedenlerin; yani sorunların ortaya çıkmasında temel oluşturur.

İkinci aşama olan Buharlaştan Bulut (BB) tekniği; tespit edilen kök nedenleri çıkaran problemlere çözüm geliştirilmesinde kullanılır. Nedenlerin sebepleri arasındaki zıtlıklar/çatışmaların giderilmesinde enjeksiyonlar kullanılır.

Şekil 2'de buharlaştan bulut tekniğiyle hidrojen depolanarak en yüksek düzeyde enerji/güvenlik düzeyi edinimi nedenine çözüm gösterilmiştir. Burada genel olarak ifade edilirse çatışma, hidrojenin en uygun depolanmasına yönelik sıvı veya gaz olarak taşınıp depolanması üzerinedir. 3. alternatif olarak metal hidrürler şeklinde depolama şeklidir ki, yapılan araştırmalar bu alternatifi başlangıçta ön plana çıkarmış; ancak bu şekilde dizayn edilmiş otomobillerde bir depo ile en fazla 250 km yol almasından ötürü çoğu geliştirme çalışmalarında vazgeçilmiştir [19,21]. Bu çalışmada kök nedenlerin ortadan kaldırılması için, hidrojenin NaBH<sub>4</sub> gibi Millenium Cell firmasının "Hydrogen on Demand" sisteminde ticarileşmesi öngörülen zengin bileşiği, "NaBH<sub>4</sub> + 2 H<sub>2</sub>O katalizör → 4 H<sub>2</sub> + NaBO<sub>2</sub>" gibi birçok değişik zengin bileşiklerle ve gaz halinde hidrojenin yanma ve

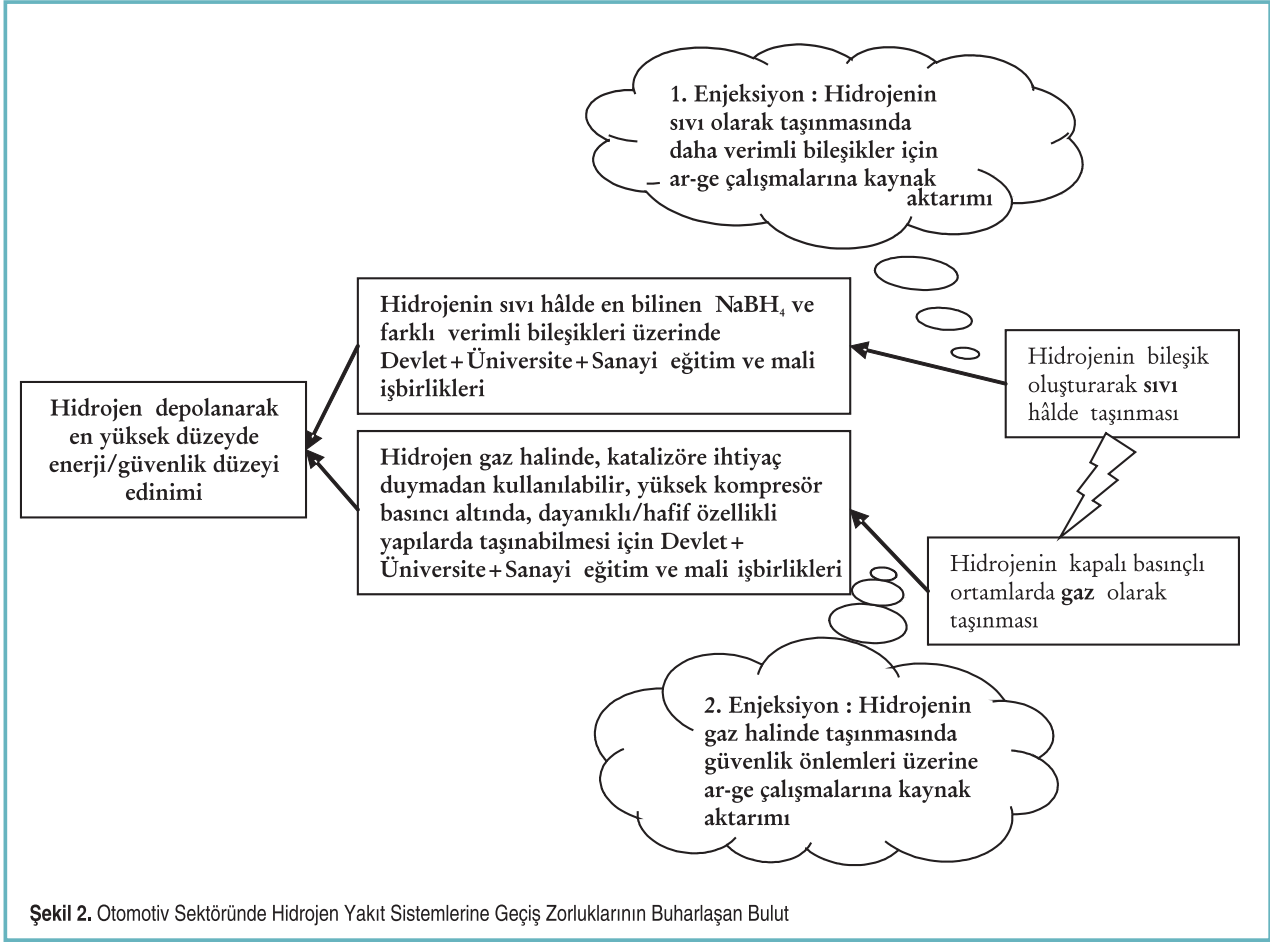




patlama tehlikesinden ötürü; yüksek mukavemetli, hafif ve düşük maliyetli yapılarda taşınarak katalizörsüz yüksek kompresör basıncıyla taşınması ile enerji elde edilmesi yönünde devlet+üniversite+sanayi eğitim ve AR-GE faaliyetlerine hız verilmesi gerektiği görülebilir [1, 13].

Buharlaştırılan Bulut (BB) tekniğiyle gerekli durumlar için iyileştirmeler sağlandığında; hidrojenin depolanmasında

yüksek düzeyde enerji/güvenlik düzeyinin sağlanmasıyla Şekil 3'te gösterilen Gelecek Gerçeklik Ağacı (GGA) oluşturulur. Hidrojenin depolanmasıyla ilgili problemlerin aşılması, hidrojenin kullanımında içten yanmalı ve yakıt pillerindeki gelişmelerle otomotiv, yakıt ve tedarikçi firmalardan oluşan sektör; yeni teknoloji pazarında kendine yeni konumlar belirleyecek, sıfır emisyonlu atıklarla doğa



kirliliğinin önüne geçilerek, dolaylı olarak uzun vadede çevre felaketlerinin engellenmesiyle doğabilecek maddi ve insani birçok alanda kazanımlar doğuracaktır. Bir başka varsayımda uzun vadede teknolojinin ucuzlamasıyla hidrojenden enerji temini dünyada insanların maddi olarak da yaşam kalitesini arttırabilecektir [19, 20].

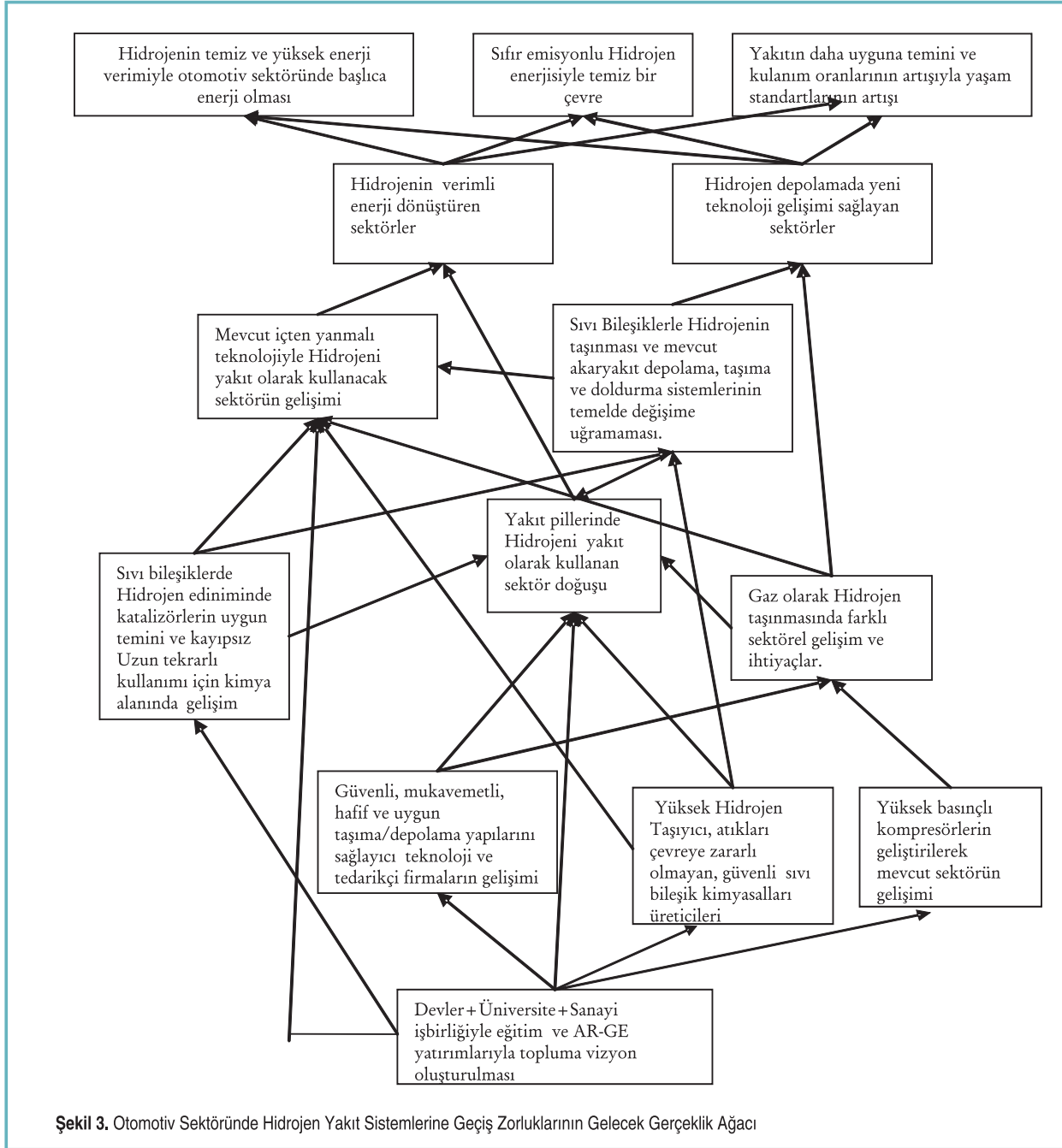
Değişimleri hayata geçirebilmek ve yeni çözümler getirebilmek için Ön Gereksinim Ağacı (ÖGA) ve Geçiş Ağacı (GA) kullanılır. Şekil 4'te Ön Gereksinim Ağacında, hidrojenli yakıt sistemine geçiş sürecinde yüksek teknolojik maliyetlerinin ve eğitim yatırımlarının sağlanabilmesi için gerekli devlet+üniversite+sanayi işbirliği gösterilmiştir.

Şekil 5 'te ifade edilen Geçiş Ağacı'nda ise belirlenen amaçlara ulaşmak ve hayata geçirmek için yapılması gereken faaliyetler genel olarak tanımlar. Bu çalışmada ilgili kurumların koordinasyonu ile ortak katılımlı AR-GE çalışmaları, prototip uygulamaları ve yeni sistemin insana ve doğaya etkileri ele alınabilir.

## SONUÇ

Otomotiv sektöründe 21. yüzyılın hidrojen yakıtlı teknolojisi

olacağı; yapılan araştırma, deneme ve makalelerden görülebilmektedir. Fakat bu tahminin yanılma payı dünyanın en büyük firmalarının bile kaldıramayacağı bir risk içerebilir. Şuan fosil temelli yakıtların bırakılması ticari olarak stratejik anlamda mümkün değildir. Ticari anlamda düşünülürse mevcut içten yanmalı motor birim gücünün maliyetine 0,01 USD/watt erişilmesi durumunda seri üretime geçiş mümkün olabilecektir. Burada temel husus dünya petrol rezervinin tükenmeden ya da çevre felaketlerinin maliyetinin kabul edilemez duruma gelmesi durumunda hidrojenli yakıt sistemlerinin seri üretilebilmesidir. Konunun dünya ticaretinin temel unsuru olması açısından kısıtlar teorisinin bakış açısı, konuyla örtüşmektedir. Çünkü kısıtlar teorisi, hidrojenli yakıt sistemlerinin dünyada seri üretime uygun olarak kullanımına geçişini engelleyici ana nedenleri ortaya koyar, gelişim sürecinin en zayıf halkasını tespit ederek, bu halkanın güçlendirilmesiyle sürecin performansını arttırmayı ön görür. Bu aşamada yaklaşım, gelişim sürecinin başlangıcında kullanıcı/çevre gereksinimlerinin doğru tanımlanamaması ve devlet+üniversite+sanayi kuruluşlarının milyar dolarlık yatırımlarda maliyet, fırsat kaybı ve zaman açısından kayıpların önüne geçecektir.

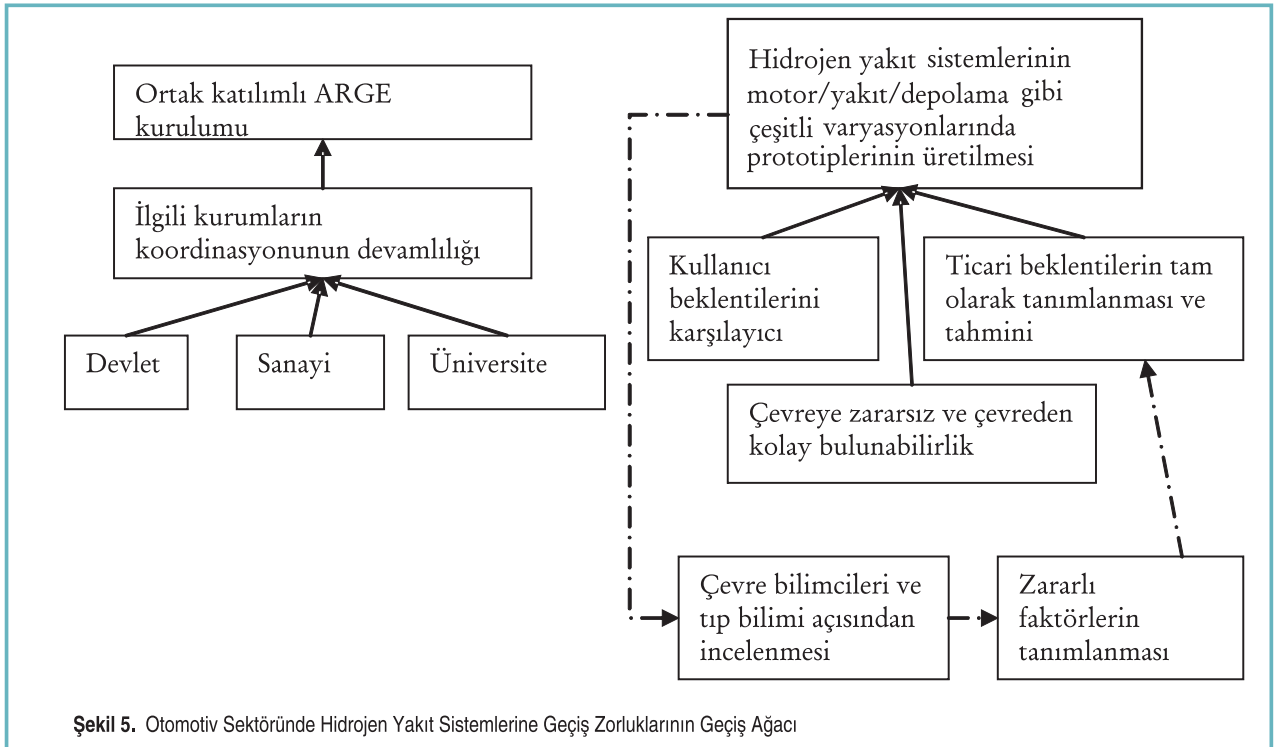
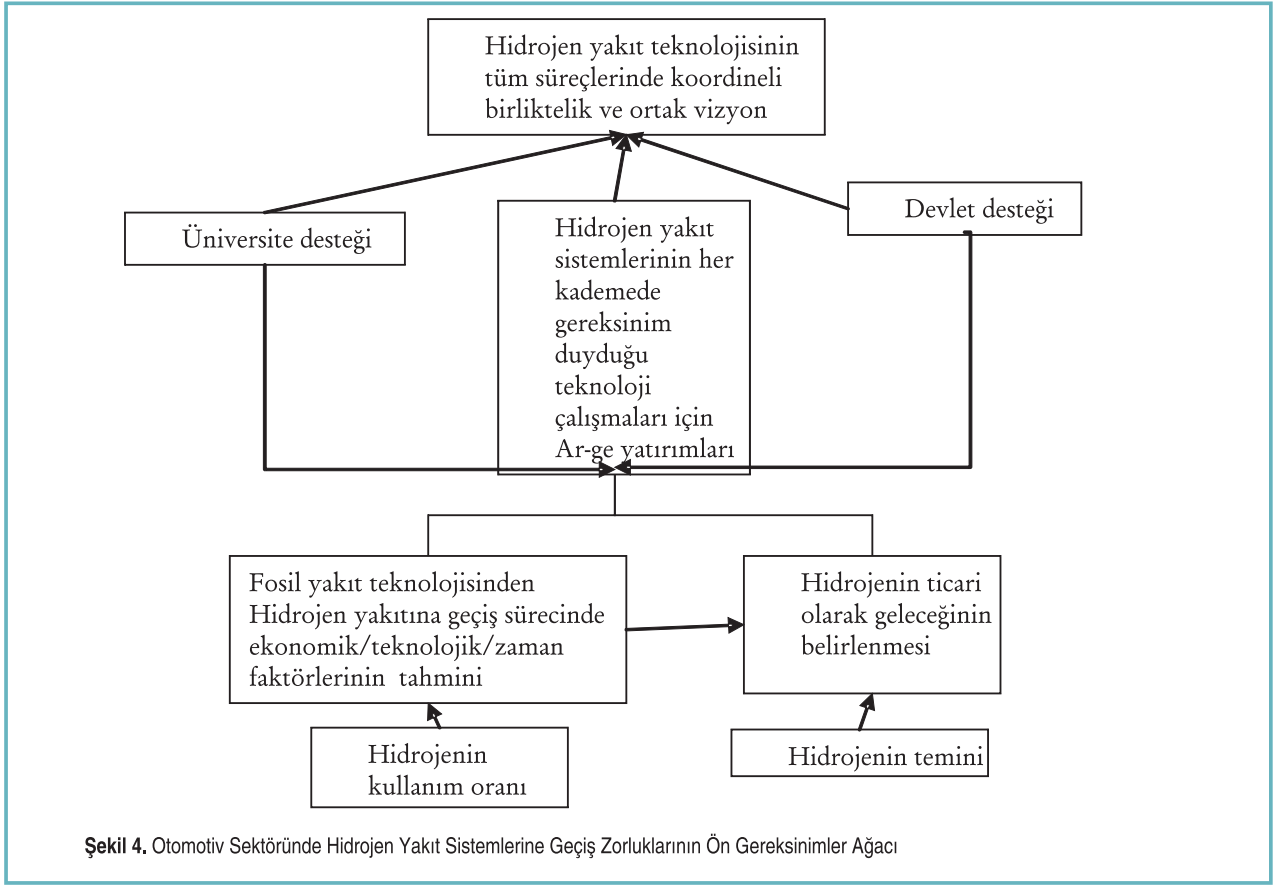


Kısıtlar teorisinin düşünce süreçlerini oluşturan beş yöntemle hidrojen yakıt teknoloji sisteminin gelişim süreci doğru tanımlanarak, etkin yönetilecek, gelecekte karşılaşılabilecek büyük maddi/insani problemlerin tespitinde büyük fayda sağlayacaktır.

Bu çalışmada, gelişimde ana faktörler; hidrojenin enerjiye dönüşüm zorlukları ve hidrojenin depolanma güçlükleri olarak MGA görülmektedir. Kök nedenleri ise hiyerarşik sırada; özellikle bileşikler de zengin hidrojen taşıma, AR-GE

yatırımları ve devlet+üniversite+sanayi koordineli teknoloji eğitimi eksiklikleridir. Bunlar sorunların ortaya çıkmasında temel oluşturmaktadır.

Bunların giderilmesinde BB tekniğinde, hidrojen depolanarak en yüksek düzeyde enerji/güvenlik düzeyi sağlanması faktörü, en önemli kısıtlardan biri olması bakımından gösterilmiştir. Hidrojenin bileşik oluşturularak sıvı hâlde taşınması ve hidrojenin kapalı basınçlı ortamlarda gaz olarak taşınması en önemli dar boğazı oluşturabilmektedir. Bu kısıt, hidrojenin





sıvı olarak taşınmasında daha verimli bileşikler için AR-GE çalışmalarına ve hidrojenin gaz halinde taşınmasında güvenlik önlemleri üzerine AR-GE çalışmalarına kaynak aktarımı şeklinde enjeksiyonlarla kırılıp, hidrojenin sıvı hâlde en bilinen  $\text{NaBH}_4$  ve farklı verimli bileşikleri üzerinde devlet+üniversite+sanayi eğitim ve mali işbirlikleriyle hidrojen gaz halinde, katalizöre ihtiyaç duymadan kullanılabilir; yüksek kompresör basıncı altında, dayanıklı/hafif özellikli yapılarda taşınabilmesi için devlet+üniversite+sanayi eğitim ve mali işbirlikleri süreçlerinde etkin yönetimle geliştirilebilir.

Bu sayede GGA tekniğiyle, hidrojenin temiz ve yüksek enerji verimiyle otomotiv sektöründe başlıca enerji olması, sıfır emisyonlu hidrojen enerjisiyle temiz bir çevre ve yakıtın daha uyguna temini ve kullanım oranlarının artışıyla yaşam standartlarının artışı şeklinde ana amaçlarını gerçekleyici bir performans sunabilecektir. Sürecin ana amaçlarına ulaşmasını engelleyici kısıtların giderilmesi için öneriler ÖGA ve GA'larında gösterilmektedir. Genel ifadelerle kullanıcı ve ticari beklentilerin tanımlanması sürecinde devlet+üniversite+sanayi koordinasyonu ve ortak vizyonunun oluşturulması ve maddi/eğitimsel alt yapının sağlanmış olması gerekliliğidir. Geçiş sürecinde ise, devlet+üniversite+sanayi ortaklı AR-GE çalışmalarının yapılarak, kullanıcı/çevreci /ticari beklentileri karşılayıcı en uygun prototip varyasyonlarının hidrojenli yakıt sistemlerinin tüm kademelerinde üretilmesidir.

Yukarıda ifade edilen kısıtların politik ve teknik faktörleri kapsadığı görülebilir. Kurumlar arası koordinasyon, ortak yatırım kararları, eğitim ve vizyon eksikliği politik kısıtları, yeni hidrojenli yakıt teknolojisi sistemlerindeki zengin bileşikler, gazlar, depolama/taşıma yapıları, içten yanmalı motor ve yakıt pillerindeki kısıtlı teknolojiler de teknik kısıtları ifade etmektedir. Bununla birlikte seri üretime geçişte kısıtlar teorisi, düşünce süreçleri teknikleri teknoloji haritasının oluşturulmasına katkı sağlayabilir. Bu katkı iki yöntemin birleşmesiyle optimum tahminlerin çizelgenmesini sağlayabilir ve kurumlara geleceği şimdiden yönetebilir kılarak, maddi ve stratejik olarak üstünlük sağlayabileceği ön görülebilir.

### KAYNAKÇA

1. TÜBİTAK Enerji ve Çevre Teknolojileri Strateji Grubu. 2004. Enerji ve Çevre Teknolojileri Stratejisi Raporu, Ankara.
2. Ersöz, A. 2006. "Alternatif Enerji Teknolojileri Araştırmaları ve Çevre İlişkisi," Su ve Çevre Teknolojileri Dergisi, İstanbul.
3. Varınca, K.B., Gönüllü, M.T. 2006. "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımının Çevresel Olumlu Etkileri," VI. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu - UTES'2006, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
4. Altaş, İ.H. 1998. "Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Türkiye'deki Potansiyel," Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, 45(Şubat), s. 58-63, Bileşim Yayıncılık, İstanbul
5. Corbett, T. 2000. "Throughput Accounting and Activity Based Costing: The Driving Factors Behind Each Methodology," Journal of Cost Management, (Jan Feb), p. 37-45.
6. Şahin, S., Ölmez, M. 2010. "Elektrik Enerjisi Üretimi ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi," 3e Electrotech, 189, s. 110-114, March 2010, <http://sorubank.ege.edu.tr/~ssahin/publications/Elektrik%20Enerjisi.pdf>, son erişim tarihi: 21.10.2010
7. Devriş, N. 2006. "Hidrojen Enerjisi," TMMOB Mühendis ve Makina Dergisi, 46 (551), s. 38-40.
8. Otomobilnet. 2008. Alternatif Yakıt Sistemleri, <http://www.otomobilnet.com/teknik-sorular/2833-alternatif-yakit-olarak-hidrojen.html>, son erişim tarihi: 21.12.2010
9. <http://www.bilgiustam.com/hidrojen-ullanma-yontemleri-ve-icten-yanmalı-motorlarda-hidrojen-kullanimi/#ixzz1CNDmeQiK>, son erişim tarihi: 21.12.2010.
10. Ege, M., Turpçu, M., Çeber, A., Akkuş, N., Genç, G., Toptaş, E. 2009. "Hidrojen Enerjisiyle Çalışan Aracın Tasarımı ve İmalatı," IV. Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, s.123-129
11. Apics CM SIG. <http://www.apics.org>, son erişim tarihi: 12.03.2008
12. Goldratt, E.M., Cox, J. 2002. The Goal Amaç, (Çev., A.B.Dicleli), Profilo Yayınları, İstanbul.
13. Stratton, R., Mann, B.D. 2003. "Systematic Innovation and the Underlying Principles Behind TRIZ and TOC," Journal of Materials Processing Technology 139, s. 120-126
14. Atwater, B., Gagne, M.L. 1997. "The Theory of Constraints versus Contribution Analysis for Product Mix Desicions," Journal of Cost Management, 11 (1), January/February.
15. Corbett, T. 2000. "Throughput Accounting and Activity Based Costing: The Driving Factors Behind Each Methodology," Journal of Cost Management, (Jan Feb), p. 37-45.
16. Rahman, S. 1998. "Theory of Constraints : A Review of The Philosophy and Its Applications," International Journal of Operations&Production Management, 18 (3), 173-187.
17. Akman, G., Karakoç, Ç. 2005. "Yazılım Geliştirme Prosesinde Kısıtlar Teorisinin Düşünce Süreçlerinin Kullanılması," İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(7), s. 103-121.
18. Başak, E. 2010. Geleceğin Yakıtı Hidrojen [http://w3.balikesir.edu.tr/~hnamli/calisma/p2008-2009/Esa\\_BASAK\\_HIDROJEN\\_YAKIT.pdf](http://w3.balikesir.edu.tr/~hnamli/calisma/p2008-2009/Esa_BASAK_HIDROJEN_YAKIT.pdf).
19. Dellaloğlu, A. 2008. Hidrojen Devrimi, Referans Gazetesi [www.yapiteklif.com](http://www.yapiteklif.com), son erişim tarihi: 11.12.2008.
20. Fıçıcılar, B. 2007. Yakıt Pilleri, [www.gençbilim.com](http://www.gençbilim.com), son erişim tarihi: 15.12.2008.
21. Yıldırım, M. 2005. Hidrojen ve Yakıt Hücrelerinin Otomotiv Uygulamaları, [www.modifyem.com](http://www.modifyem.com), son erişim tarihi: 15.12.2008.