

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ**

**MİNE SERTSÖZ**

**KOCAELİ 2012**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

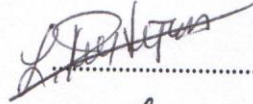
**RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ**

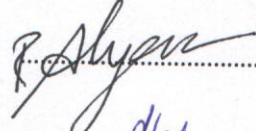
**Mine SERTSÖZ**

**Yrd.Doç.Dr. Şule KUŞDOĞAN**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

**Doç.Dr. Bora ALBOYACI**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

**Yrd.Doç.Dr. İlkay ORHAN**  
Jüri Üyesi, Anadolu Üniv.

  
.....

  
.....

  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 06.12.2012

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER**

Dünyada enerjinin öneminin artmasıyla enerji verimliliği son yıllarda en önemli konulardan biri haline gelmiştir. Bu süreç Türkiye’de de önemli bir konu olup bu alanda yapılan çalışmalar son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Bu çalışmada, raylı sistemlerdeki enerji verimliliği incelenmiştir. Verimlilik için alınabilecek önlemler ve enerjinin daha verimli kullanımı için çözüm yolları araştırılmıştır.

Çalışmam boyunca bana destek olan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Şule Kuşdoğan’a, Dr. Süleyman Açıkbaş’a, Doç. Dr. M. Turan Söylemez’e ve RailSis Mühendislik&Danışmanlık’a, teşekkür ederim. Eskişehir’de çalıştığım bir yıl boyunca İzmit’e gidebilmem için her hafta sabah 5’te otobüse bindirip akşam 11’de trenden alan ve hiçbir zaman en ufak bir şikâyette bulunmayan sevgili kayınpederim Zafer Sertsöz’e, bana olan inancıyla her zaman beni yapabileceğime inandıran biricik annem Şükriye Bayrakçı’ya, bana yol gösteren sevgili ablam ve eniştem Gonca ve Fatih Dut’a, her başım sıkıştığında imdadıma yetişen sevgili eşim Yekta Sertsöz’e çok teşekkür ederim, sizin varlığınız bu süreçte bana güç kattı.

Son olarak da Şubat 2012’de dünyaya gelişiyle bana hayata başka pencereden baktıran biricik oğlum Yuşa Zafer’e ve benim hep mühendis olmamı isteyen fakat bunu görmeye ömrü vefa etmeyen babam Ömer Bayrakçı’ya, ruhun şad olsun babacım...

Aralık - 2012

Mine SERTSÖZ

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELEr DİZİNİ VE KISALTMALAR .....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
GİRİŞ .....	1
1. ENERJİ VERİMLİLİĞİ .....	3
1.1. Türkiye'nin Genel Enerji Durumu .....	6
1.2. Ulaşım Tiplerine Göre Enerji Tüketimleri .....	7
1.3. Türkiye'nin Ulaşım Sektöründeki Enerji Verimliliğine Bakışı.....	7
2. ŞEHİRİÇİ RAYLI SİSTEMLER.....	9
2.1. Raylı Sistem Altyapısı.....	9
2.1.1. Cer Gücü Beslemesi.....	11
2.2. Araçlar .....	11
2.3. İşletme .....	13
2.3.1. Besleme gerilim seviyesi olarak 1500 V DC seçilmesi.....	13
2.3.2. Katener sistemlerinin paralellenmesi .....	13
2.3.3. Cer tüketimleri.....	14
2.3.4. Regeneratif frenleme enerjisinden faydalanma oranını artırma .....	15
2.3.5. Enerji depolama sistemleri .....	17
2.3.5.1. Bataryalar (Akümülatörler) .....	17
2.3.5.2. Çift katmanlı kapasitörler (Ultrakapasitörler) .....	18
2.3.5.3. Flywheel (Volan).....	19
2.3.6. Araç üstü enerji depolamanın avantajları .....	20
2.3.7. İstasyon tipi enerji depolama.....	22
2.3.8. Araç Üstü Enerji Depolama Sistemi ile İstasyon Tipi Enerji Depolama Sisteminin Karşılaştırılması.....	23
2.3.9. Sabit tesis tüketimleri.....	23
2.3.10. Enerji verimli sürüş yöntemleri .....	24
3. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELEDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ .....	27
3.1. İnsan Kaynaklı İklim Değişikliği .....	27
3.2. Karbondioksit (CO <sub>2</sub> )Salınım Miktarı .....	28
3.2.1. Enerji sektörü ve iklim değişikliği .....	29
3.2.2. Raylı sistem ile otobüs taşımacılığının karbondioksit salınımı açısından Karşılaştırılması.....	30
4. RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ TÜKETİMENE ETKİ EDEN BAZI PARAMETRELERİN SİMÜLASYON YOLU İLE İNCELENMESİ .....	32
4.1. Raylı Sistem Simülasyon Programı SimuX .....	32

4.2. Sistem parametreleri .....	33
4.3. Eğim, Yolcu Sayısı, Rejeneratif Frenleme Enerjisi ve Katener Sisteminin Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkilerinin SimuX ile İncelenmesi .....	38
4.3.1. Eğim, Yolcu Sayısı, Rejeneratif Frenleme Enerjisi ve Katener İncelenmesi .....	40
4.3.2. Rejeneratif Frenleme Enerjisinin Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin SimuX ile İncelenmesi .....	41
4.3.3. Katener Sistemin Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin SimuX ile İncelenmesi .....	42
4.3.4. Kişi Sayısının (Ağırlığın) Üzerindeki Etkisinin SimuX ile İncelenmesi .....	43
4.4. Tramvay ve Şehir içi Otobüs Yolcu Taşıma Şekillerinin Enerji Verimliliği Açısından Kıyaslanması .....	45
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	47
KAYNAKLAR .....	49
KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER .....	54
ÖZGEÇMİŞ .....	55

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kaynaklara Göre Elektrik Enerjisi Üretim .....	3
Şekil 1.2. Yakıt Türlerine Göre Birincil Enerji Arzı.....	6
Şekil 1.3. Sektörlere Göre Nihai Enerji Tüketim Dağılımı .....	7
Şekil 2.1. Frenleme Enerjisinin Kullanımı ve Diğer Enerji Tüketimleri .....	16
Şekil 2.2. Farklı Enerji Depolama Ortamları .....	18
Şekil 2.3. Bir volan kesiti .....	19
Şekil 2.4. Bombardier Ulaşım Tarafından Yapılan Manheim'deki Prototip Araç ...	21
Şekil 2.5. Enerji Verimli Sürüş Stratejileri .....	26
Şekil 4.1. SimuX Ortamında Gidiş ve Dönüşlü Bir Sistemin Temsili.....	34
Şekil 4.2. SimuX Ortamında Tek Gidişli Bir Sistemin Temsili .....	34
Şekil 4.3. SimuX Ara yüzüne Bir Örnek .....	34
Şekil 4.4. ABB Tramvay Aracının Teknik Bilgileri .....	38
Şekil 4.5. Simülasyonda Kullanılan Hat Bilgileri .....	40
Şekil 4.6. Bir Normal Katener Sisteminin Genel Görünüşü .....	43
Şekil 4.7. Farklı Eğim Değerleri ve Kişi Sayıları İçin Enerji Tüketim Miktarları ....	45

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Yolcu Ulaştırma Modlarına Göre Türkiye’de Yurtiçi Taşımacılık .....	7
Tablo 2.1. Metro, Hafif Metro ve Tramvay Hatlarının Yıllık Enerji Tüketimlerinin Karşılaştırılması .....	10
Tablo 2.2. Trenler Arası Süre(TAS) = 300 s. için Enerji Tüketim Değerleri .....	14
Tablo 3.1. Sera Gazları İle İlgili Teknik Veriler .....	28
Tablo 3.2. Seçilmiş OECD Ülkelerinde CO2 Emisyonlarına İlişkin Değerler (2002).....	29
Tablo 3.3. Elektrik Üretim Şekillerine Göre kg/MWh Cinsinden CO <sub>2</sub> Salınım Miktarları .....	30
Tablo 3.4. Ulaşım Şekilleri ve Yakıt Türleri Değiştirilerek Yapılan Hesapta Kişi Başına Düşen CO <sub>2</sub> miktarı .....	30
Tablo 4.1. Çeşitli Eğim Değerlerinde Gidiş Hattı İçin Enerji Tüketim Değerleri .....	40
Tablo 4.2. İki Farklı Eğim Değerinde Gidiş-Dönüş Hattı İçin Enerji Tüketim Değerleri .....	41
Tablo 4.3. Trafo Merkezi Uzaklıkları ve Katener Sistemi Değiştirilerek Trafo Merkezinde Katener Sisteminde Harcanan Enerji .....	42
Tablo 4.4. Trafo Merkezi Çift Beslemeli Olduğunda ve Katener Sistemi Değiştirilerek Trafo Merkezinde Katener Sisteminde Harcanan Enerji ..	42
Tablo 4.5. Eğimin %0 Olması Durumunda Yolcu Sayısının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisi .....	43
Tablo 4.6. Eğimin %3 Olması Durumunda Yolcu Sayısının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisi.....	44
Tablo 4.7. Eğimin %-3 Olması Durumunda Yolcu Sayısının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisi.....	44

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

CH <sub>4</sub>	: Metan
DC	: Direct Amper (Doğru Akım)
HFCS	: Hidroflorokarbonlar
kWh	: Kilo Watt Saat
MVA	: Mega Volt Amper
MW	: Mega Watt
N <sub>2</sub> O	: Nitroz Oksit
PFCS	: Perflorokarbonlar
SF <sub>6</sub>	: Kükürt Hekzaflorid
V	: Volt

### Kısaltmalar

BM	: Birleşmiş Milletler
BMİDÇS	: BM İklim Değişikliği Sözleşmesi
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
EU	: Europe Union (Avrupa Birliği)
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli
İETT	: İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri
LRT	: Light Railway Train (Hafif Demiryolu Treni)
OECD	: Organization for Economic Co-operation and Development (Ekonomik Dayanışma ve Gelişim Organizasyonu)
ppm	: parts per million (milyon başına başına parçacık sayısı)
TAS	: Trenler Arası Süre
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
TM	: Trafo Merkezleri
UIC	: International Union of Railways (Uluslar arası Demiryolu Birliği)
UNCBD	: Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmesi
UNCCD	: Çölleşmeyle Mücadele Sözleşmesi
UNFCCC	: İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
UNIFE	: The European Rail Industry (Avrupa Ray Endüstrisi)



## RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

### ÖZET

Enerji verimliliği kısa bir tanımla üretimdeki verimi ve niceliği düşürmeden kullanılan enerji miktarının en aza indirgenmesidir. Enerji verimliliğini, çevre kirliliği son yıllarda büyük alarmlar verirken sadece ekonomik boyutta düşürmek yanlış olur. Çünkü kullanılan enerjinin azalması demek temiz çevreye bir adım daha yaklaşmak demektir.

Ulaşımında ve özellikle temiz enerji olarak sınıflandırdığımız raylı tip ulaşımında enerjinin verimli kullanılmasına dair araştırmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Bununla ilgili birçok araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Böylelikle, hem ülke için daha az enerji kullanımı dolayısıyla daha güçlü bir ekonomi, hem de çevreye verilen zarar minimuma indirgenerek geleceğe en büyük yatırım yapılmış olacaktır.

Bu kapsamda tezde raylı sistemler işletme, araçlar ve altyapı olarak incelenmiş ve çeşitli tasarruf imkânlarına değinilmiştir. Sanılanın aksine raylı tip araçlarda enerji tüketimini etkileyen birçok faktör vardır. Aynı anda birçok girdinin varlığının enerji tüketimine ve tasarrufuna katkıları da bulunmaktadır.

Bu çalışmada, raylı sistemlerin enerji verimliliği; İstanbul'daki kent içi ulaşımında raylı sistem ile otobüs taşımacılığının karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımı açısından karşılaştırılmıştır. Raylı sistemi temiz bir çevre için tercih etmemiz gerektiği bulunan sayısal sonuçlar referans gösterilerek belirtilecektir.

Daha sonra yapılan yolcu sayısı, eğim oranı, katener sistemi ve rejeneratif frenlemenin enerji tüketimleri SimuX simülasyon programı kullanılarak kıyaslanacaktır.

Son olarak da belli kuruluşlardan alınan sayısal verilerle yapılan hesaplamalarla tramvayın ve şehir içi otobüs taşımacılığının enerji sarfiyat kıyaslamaları ve maliyet analizleri yapılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji Verimliliği, Raylı Sistemler, SimuX, Ulaşım.

## **ENERGY EFFICIENCY OF RAIL SYSTEMS**

### **ABSTRACT**

Energy efficiency in a short definition is minimizing the energy used without reducing efficiency and amount in generation. To think energy efficiency only in economical dimension would be wrong while environmental pollution gives big alarms in recent years. Because reduction of energy used means to be one step closer to a clean environment.

Researches concerned with use of energy efficiently in transportation and especially rail transportation we classify as clean energy have gained momentum in recent years. A lot of researches have been done and continue to be done about it. Thus, less energy use thereby stronger economy for the country and largest investment to the future by reducing damage to environment to the minimum will be accomplished.

In this context, rail systems were examined in terms of management, vehicles and infrastructure, and various savings opportunities possibilities discussed. Contrary to popular belief, there are many factors that affect energy consumption in rail-type vehicles. Availability of many inputs at the same time contributes to energy consumption and savings.

In this study, energy efficiency of rail systems; were compared in terms of (CO<sub>2</sub>) emissions of rail system and bus transportation in urban transportation in Istanbul. Why we should prefer rail system for a cleaner environment will be specified by reference to numerical results.

Then an example Metro Line will be compared in terms of number of passengers, gradient rate, centenary system and regenerative braking energy consumptions by using SimuX simulation program.

Finally, tram and city bus's energy consumptions and cost analysis were evaluated by calculations on the basis of numerical data received from certain organizations.

**Key Words:** Energy Efficiency, Rail Systems, SimuX, Transportation.

## GİRİŞ

Enerji tasarrufu, dünyada Kyoto protokolü başta olmak üzere birçok yazılı metinle belirtilmiş ve ülkelere arasında bazı anlaşmalara tabi tutulmuştur. Bunun en büyük sebebi küresel ısınmanın aldığı vahim boyutlardır.

Atmosferdeki kirlilik sonucunda, 20.yy. başlarında atmosferde 290 ppm olan CO<sub>2</sub> oranı, 1987 yılında 345 ppm seviyelerine çıkmıştır.[1] 2006 yılında bu değer 381 ppm seviyelerine ulaşmış ve her yılda 2,3 ppm artmaktadır.[2] Bilim adamları bu rakamın dünya tarihindeki en yüksek CO<sub>2</sub> seviyesi olduğu konusunda hemfikirler. CO<sub>2</sub> seviyesinin bu değerlere çıkması doğaya büyük zararlar vermekte bu konuda en büyük zararı da insanların içme suyu kaynağı olan buzullar görmektedir. Bunun dışında Kuzey Kutbunda bulunan hayvanlar da bu etkiden büyük zarar görmektedirler.

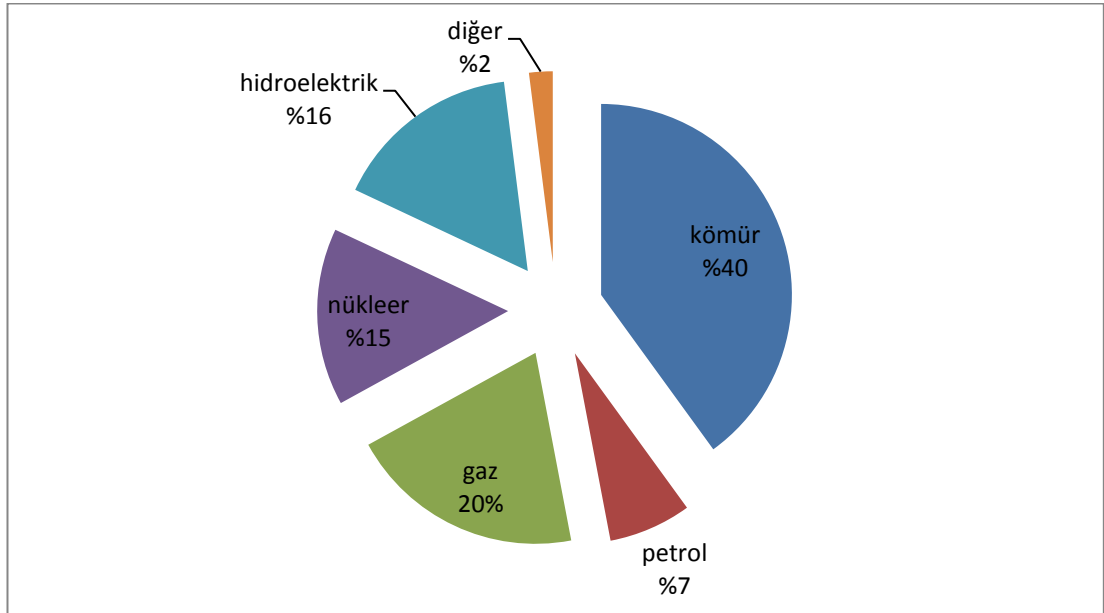
Türkiye’de konuyla ilgili olarak bazı çalışmalar yürütmektedir. EİE 18/4/2004 tarihinde enerji verimliliği kanunu yayımlamıştır. Bu kanunda ulaşımda enerji verimliliğinin artırılması ile ilgili olarak yurt içinde üretilen araçların birim yakıt tüketimlerinin düşürülmesine, araçlarda verimlilik standartlarının yükseltilmesine, toplu taşımacılığın yaygınlaştırılmasına, gelişmiş trafik sinyalizasyon sistemlerine ilişkin usul ve esaslar, Sanayi ve Ticaret Bakanlığı ile müştereken hazırlanarak Ulaştırma Bakanlığı tarafından yürürlüğe konulacak yönetmelikle düzenlenir.[3]

Raylı sistemle alakalı olarak Türkiye’de henüz spesifik bir şeyler yapılmış olmasa da; Avrupa’da bu konuyla ilgili olarak Demiryolu Taşıtları İçin Enerji Tüketimi Tanımı ve Kontrolünü açıklayan bir teknik tavsiye olan TecRec yayımlanmıştır. Dokümanın içeriği EU’nun oluşturduğu RAILENERGY projesi çıktılarının bir sonucu olarak hazırlanmıştır. Bu teknik tavsiye UNIFE (The European Rail Industry)ve UIC (International Union of Railways) tarafından 11 Mart 2010 tarihinde imzalanmış olup; Avrupa Demiryolu Taşıtları içerisinde ve diğer alakalı yan sistemler ilk uygulama alanı olacak ve her iki partnere de belli çözümler sunacaktır. Bu teknik tavsiyenin genel amacı genel bir temelde trenler ve lokomotifler için

karşılaştırılabilir enerji performans değerleri oluşturmaya olanak sağlayacak bir çalışma çerçevesi sağlamaktır ve böylelikle raylı araçların enerji etkinliğinin karşılaştırmalı değerlendirmesi ve gelişmesi sağlanacaktır [4].

## 1. ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Enerji, ülkelerin kalkınmasında vazgeçilmez girdilerin en önemlileri arasındadır. Uzun yıllar kişi başına enerji tüketimi kalkınmışlığın ölçütü olarak kullanılmış olup önemini devam ettirmektedir. Ancak içinde bulunduğumuz 21. Yüzyılda enerji verimliliği ve daha az enerji tüketimi ile daha çok iş üretimi (enerji yoğunluğunun azaltılması) kavramları da yeni göstergeler olarak gündeme gelmektedir.



Şekil 1.1. Kaynaklara Göre Elektrik Enerjisi Üretim Payları (2005)[5]

Dünyanın bugünkü enerji tüketiminde petrol %35'lik pay ile ilk sırayı alırken, bunu %25,3 ile kömür ve %20,7'lik pay ile doğalgaz izlemektedir.

Elektrik enerjisi üretiminde ilk üç sırada %66,6 ile fosil kaynaklar, dördüncü sırada %16 ile hidroelektrik ve beşinci sırada %15,2 ile nükleer enerji yer almaktadır. Güneş, jeotermal, rüzgâr, yanabilir yenilenebilir ve atıklardan elektrik üretimi oranı ise %2,2'dir.

Günümüzde petrol ve doğalgazın teminine yönelik stratejiler, bu kaynakların enerji kaynağı olarak dünya politikasında giderek artan stratejik rolleri nedeni ile ülkelerin

gelişimlerinin olduğu kadar dış politikalarının da önemli köşe taşlarını oluşturmaktadır.

Alternatif enerji kaynaklarının aranması ve teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik tüm çabalara karşın, bilimsel tahminlere göre önümüzdeki dönemlerde de enerji talebinde görülecek artışların büyük bir bölümünün petrol ve doğalgaz ile karşılanması beklenmektedir.

2003 yılı itibariyle dünyadaki bilinen petrol rezervleri 156,7 milyar ton, doğalgaz rezervleri ise 175,8 trilyon m<sup>3</sup>'tür. Yıllık üretim miktarları dikkate alındığında petrol rezervlerinin yaklaşık 41, doğalgaz rezervlerinin ise 67 yıllık ihtiyacı karşılayacak düzeyde olduğu görülmektedir. Yani bugüne bakıldığında petrol 32, doğalgaz ise 56 yıl daha ihtiyaca cevap verecektir.

Dünya ekonomisinin yılda %3 büyüdüğü ve birim hâsıla başına düşen tüketilen enerji miktarını ifade enerji yoğunluğunun, enerji verimliliği ile yılda ortalama %1 azaldığı varsayımıyla; dünya enerji tüketiminin yılda ortalama %2 artarak 2015'te 12,3 milyar TEP'e, 2025'te de 15,1 milyar TEP'e ulaşması beklenmektedir.

Dünya petrol talebinin ise önümüzdeki 30 yıllık dönemde yıllık ortalama %1,6 oranında artması beklenmekte ve bu artışının en önemli etkeninin, ulaşım sektöründeki talep artışı olacağı tahmin edilmektedir. Şu anda toplam petrol tüketiminin %47'si ulaşım sektöründen kaynaklanırken bu oranın 2030 yılında %55'e ulaşması beklenmektedir. Toplam petrol talebindeki artışın yaklaşık 2/3'ünün OECD dışı ülkelerden kaynaklanacağı düşünülmektedir.

Dünyadaki enerji kaynakları, enerji talebindeki artışı karşılayabilecek durumdadır. Ancak 2030 yılına kadar artacak petrol talebini karşılayabilmek için daha çok rezervin belirlenmesi ve trilyonlarca dolar yatırım yapılarak kullanıma hazır hale getirilmesi gerekmektedir.

2001 yılında 72 milyon varil/gün olan dünya konvansiyonel petrol üretiminin 2030 yılında 120 milyon varil/gün olacağı tahmin edilmektedir. Dünya doğalgaz toplamına bakıldığında, 2000 yılında 2,5 trilyon m<sup>3</sup> olan doğalgaz talebinin, 2030 yılında 2 Alternatif enerji kaynaklarının aranması ve teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik

tüm çabalara karşın, bilimsel tahminlere göre önümüzdeki dönemlerde de enerji talebinde görülecek artışların büyük bir bölümünün petrol ve doğalgaz ile karşılanması beklenmektedir.

2003 yılı itibariyle dünyadaki bilinen petrol rezervleri 156,7 milyar ton, doğalgaz rezervleri ise 175,8 trilyon m<sup>3</sup>'tür. Yıllık üretim miktarları dikkate alındığında petrol rezervlerinin yaklaşık 41, doğalgaz rezervlerinin ise 67 yıllık ihtiyacı karşılayacak düzeyde olduğu görülmektedir. Yani bugüne bakıldığında petrol 32, doğalgaz ise 56 yıl daha ihtiyaca cevap verecektir.

Dünya ekonomisinin yılda %3 büyüdüğü ve birim hâsıla başına düşen tüketilen enerji miktarını ifade enerji yoğunluğunun, enerji verimliliği ile yılda ortalama %1 azaldığı varsayımıyla; dünya enerji tüketiminin yılda ortalama %2 artarak 2015'te 12,3 milyar TEP'e, 2025'te de 15,1 milyar TEP'e ulaşması beklenmektedir.

Dünya petrol talebinin ise önümüzdeki 30 yıllık dönemde yıllık ortalama %1,6 oranında artması beklenmekte ve bu artışının en önemli etkeninin, ulaşım sektöründeki talep artışı olacağı tahmin edilmektedir. Şu anda toplam petrol tüketiminin %47'si ulaşım sektöründen kaynaklanırken bu oranın 2030 yılında %55'e ulaşması beklenmektedir. Toplam petrol talebindeki artışın yaklaşık 2/3'ünün OECD dışı ülkelerden kaynaklanacağı düşünülmektedir.

Dünyadaki enerji kaynakları, enerji talebindeki artışı karşılayabilecek durumdadır. Ancak 2030 yılına kadar artacak petrol talebini karşılayabilmek için daha çok rezervin belirlenmesi ve trilyonlarca dolar yatırım yapılarak kullanıma hazır hale getirilmesi gerekmektedir.

2001 yılında 72 milyon varil/gün olan dünya konvansiyonel petrol üretiminin 2030 yılında 120 milyon varil/gün olacağı tahmin edilmektedir. Dünya doğalgaz toplamına bakıldığında, 2000 yılında 2,5 trilyon m<sup>3</sup> olan doğalgaz talebinin, 2030 yılında

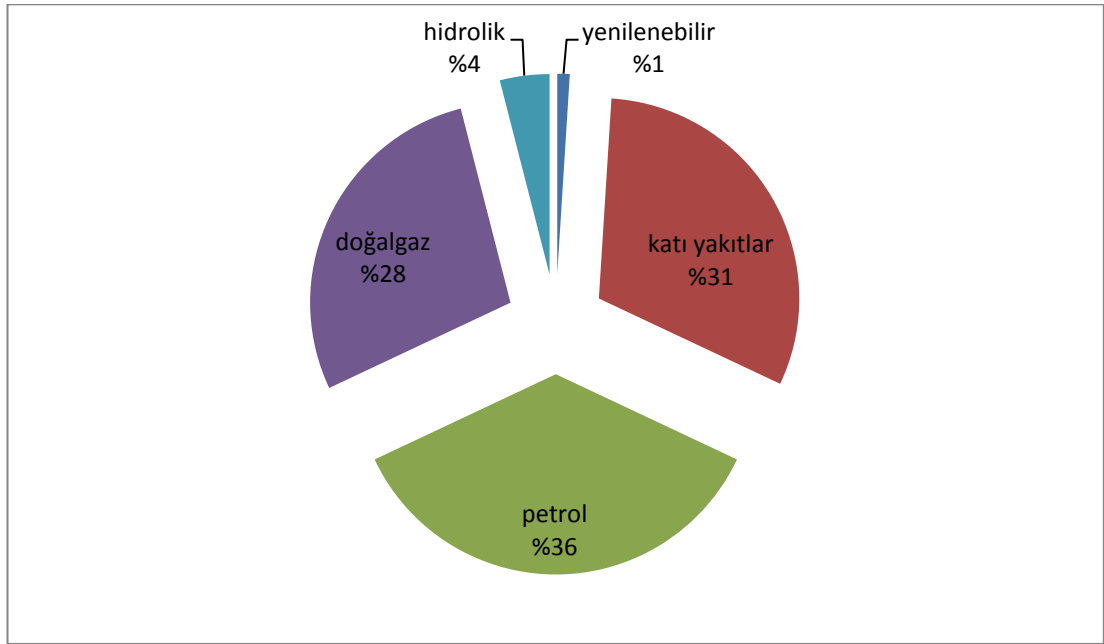
katına çıkarak 5 trilyon m<sup>3</sup> 'e ulaşması beklenilmektedir. Ortalama yıllık talep artışı ise %2,4 olacaktır. Uluslar arası petrol ve gaz ticaretinde en önemli petrol ihtiyatçısı, yaklaşık yıllık 910 milyon ton petrol ihtiyacı ile Orta Doğu Bölgesidir. Onu Yaklaşık yıllık 224 milyon ton ile Birleşik Arap Emirlikleri izlemektedir [6].

### 1.1. Türkiye'nin Genel Enerji Durumu

Ülkemizde 2006 yılı itibariyle birincil enerji arzı 99,840 milyon TEP ile birincil enerji kaynakları üretimi ise 26,779 milyon TEP olarak gerçekleşmiştir. Bu rakamlar enerji ihtiyacımızın %73 oranında ithal enerji ile karşılandığını göstermektedir. Aynı yıl dünya toplam enerji tüketimi 11,4 milyar TEP olarak gerçekleşmiş olup Türkiye'nin bu tüketimde payı %0,8'dir.

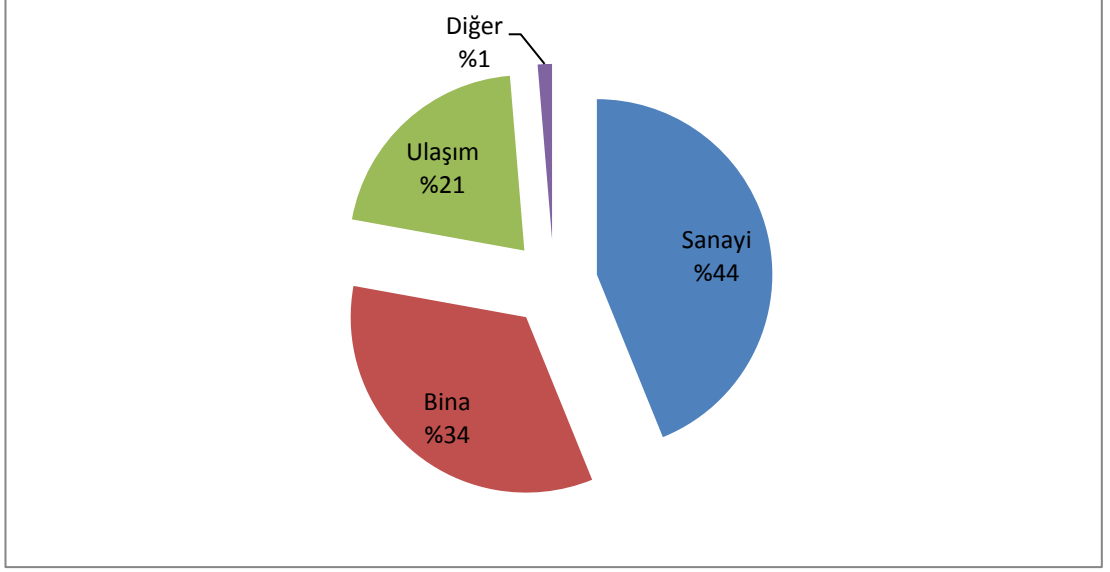
Mevcut durumda ham petrol talebinin %93'ü, doğalgaz talebinin %97'si ithalat ile karşılanırken, gerekli önlemlerin alınmaması durumunda bu oranların 2020 yılında sırasıyla %99 ve %100 olması beklenmektedir.

Birincil enerji arzında; petrol %36, kömür ve odun gibi katı yakıtlar %31 ve doğalgaz %28 paya sahiptir [6].



Şekil 1.2. Yakıt Türlerine Göre Birincil Enerji Arzı (2006)[7]





Şekil 1.3. Sektörlere Göre Nihai Enerji Tüketim Dağılımı (2006)[7]

Elektrik enerjisi tüketimi bakımında ise bina sektörü %34, sanayi %45 ve ulaşım sektörünün payı da %21 olarak verilmektedir.

Toplam elektrik üretiminin ise %16'sı yerli, %84'ü ise ithal kaynaklar ile karşılanmaktadır [6].

## 1.2 Ulaşım Tiplerine Göre Enerji Tüketimleri

Tablo 1.1. Yolcu Ulaştırma Modlarına Göre Türkiye'de Yurtiçi Taşımacılık[8]

Karayolu	Demiryolu	Havayolu
%95	%2,80	%1,70

AB'de bu durum karayolu taşımacılığı %44,5 demiryolu %9,6 ve havayolu ise 6,6'dır [9]. Taşımacılık oranlarına bakıldığında AB'de Türkiye'deki yolcu taşımacılık çeşitlerine göre daha dengeli bir durum mevcuttur.

## 1.3. Türkiye'nin Ulaşım Sektöründeki Enerji Verimliliğine Bakışı

Ulaştırma Bakanlığı tarafından 2008 yılında Resmi Gazetede yayımlanan "Ulaşımında Enerji Verimliliğinin Arttırılmasına İlişkin Usul ve Esaslar" adlı bir yönetmelik yayımlanmıştır.

Bu yönetmeliğin amacı motorlu araçların birim yakıt tüketimlerinin düşürülmesine, araçlarda verimlilik standartlarının yükseltilmesine, toplu taşımacılığın yaygınlaştırılmasına, trafik akımının arttırılmasına yönelik sistemlerin kurulmasına ilişkin usul ve esaslardan bahsederek ulaşımda enerji verimliliğini arttırmaktır.

Bu yönetmelik ulaşımın her türlü ayağıyla ilgilenir. Nüfus yoğunluğuna göre bazı ulaşım şartlarından bahseder. Ulaşımda toplu taşımanın kullanılması için belediyelere belli görevler addeder.

Bu yönetmelikte:

Madde 6- (1) Raylı Ulaşımda enerji tüketimini asgari seviyeye düşürmek için elektrikli işletmeciliğe öncelik verilir.

Maddesi raylı sistemlerden bahseder ve elektriğin de verimli kullanılmasına atıfta bulunur.

Bu yönetmeliğe rağmen ulaştırma alt birimlerinin farklı bakanlıklara bağlı olması sebebiyle alt sistemlerin birbirleriyle koordinasyonları zayıftır. Bu da ulaşım ile ilgili kararların geç hayata geçirilmesine sebebiyet vermektedir. Burada çözüm bu alt birimler için koordinasyonu sağlayacak bir merkez oluşturulması veya hepsinin bir bakanlığa bağlanmasıdır. Bu şekilde ilerleme daha hızlı olacaktır.

Son yıllarda enerji verimliliği ve çevre kirliliğine verilen önemin artmasıyla ülkeler temiz enerji arayışına girmişlerdir. Bu da ulaşım sektörüne raylı sistem taşımacılığının arttırılması için çalışmalar ve raylı sistemlerde de enerjinin verimli kullanılmasına ilişkin arayışlara girilmesine sebep olmuştur.

Türkiye bu konuda şehirlerarası ve şehir içi ulaşımında raylı sistemin kullanılmasında önemli projelerle büyük bir ilerleme kaydetmiştir. Bunlara örnek olarak Ankara-Eskişehir, Ankara-Konya Hızlı Treni, Marmaray Projesi, Bursa Tramvay Hattı, Eskişehir Tramvay Hattı ve İstanbul'daki Kartal- Kadıköy Metro hattı verilebilir. Bunlardan kimi tamamlanmış kimi de kısmen bitmiş projelerdir.

## **2. ŐEHİRİŐİ RAYLI SİSTEMLER**

Raylı sistemlerde enerji verimliliği günümüz dünyasında diğer taşımacılık sektörlerine kıyasla oldukça yüksektir ve bu sebeple bu alanda yapılabilecek Şeyler kısıtlıdır. Fakat bununla beraber muazzam bir Şekilde enerji verimliliğini arttırma Şekilleri de mevcuttur [10]. Mesela Almanya raylı taşımacılık sektöründe, yolcu taşımacılığındaki enerji tüketimini 1990-2000 yılları arasında %15 düşürmeyi başarmıştır [11].

Kent iÇi elektrikli raylı elektrifikasyon sistemi orta gerilim seviyesinden alınan enerjii trafo merkezlerinde indirir ve doğrultuktan sonra, 750 V DC seviyesinde katener veya 3. ray vasıtası ile hareket halindeki trene ulaştırır.

Elektrifikasyon sistemi cer gücünü tedarik eden trafo merkezleri, katener sistemleri ve araŐlardan oluşmuştur. Trafo merkezi gŐ talebi tren anma gücüne, yüküne, tren sefer sıklığına, bu merkezden beslenen ray sayısına vs. gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Raylı sistem domeni; altyapı, araÇlar ve işletme olmak üzere Ő temel alandan oluşmuştur. Enerji verimlilik yönetimi aÇısından bu Ő kısım ve bunların alt domenlerdeki potansiyeller araştırılacaktır [12].

### **2.1. Raylı Sistem Altyapısı**

Raylı sistemi besleyen elektrik gŐ sistemleri, trafo gŐleri, iletken akımları ve tren setleri gerilimlerini kabul edilebilir sınırlar iÇinde kalacak Şekilde tasarlanırlar. Planlama safhasında raylı sistem gŐ dağıtımının aşırı boyutlandırılması yük akış analizleri yapılarak nlenebilir. Yük akış analizleri yapılarak trafo ve fiderlerin uygun anma değerlerinde seÇilmesi ile işletme verimi arttırılır [13].

Metro sistemlerinin yeraltı ve/veya yer üstü yapılar olması ve işletme kapasitelerine göre altyapı tesis ihtiyaŐları farklılık göstermektedir. İstanbul Metrosu Kurulu gücü 92,8 MVA, Aksaray-Havalimanı Hafif Metro hattı (kısmen yer altı, kısmen yerüstü tesislere sahip) 48,8 MVA ve tramvay hattı ise 25,35 MVA'dır. Burada birim

uzunluk başına en fazla kurulu gücün metro sisteminde olduğu görülmektedir. Metro sistemi, hafif metro sisteminden yaklaşık iki kat daha fazla kurulu güce ihtiyaç göstermektedir. En az kurulu güç ihtiyacı ise tamamen yerüstünde faaliyet gösteren cadde tramvayıdır. Bu üç farklı hattın enerji tüketimleri Tablo 2.1’de görülmektedir. Tamamen yeraltında çalışan metro hatlarının istasyon tüketimleri cer tüketimlerinin çok üstünde gerçekleşmiştir.

Tablo 2.1. Metro, Hafif Metro ve Tramvay Hatlarının Yıllık Enerji Tüketimlerinin Karşılaştırılması

Hat	İstasyon Tüketimleri	Cer Enerji Tüketimleri	2009 Enerji Tüketimleri
İstanbul Metro	%60,1	%39,9	2.275.236 kWh
Aks-Hafif Metro	%20	%80	2.463.300 kWh
Metro	%4	%96	1.490.121 kWh

Raylı sistem altyapısını oluşturan ray ağının uzunluğu, ağdaki gradyen ve kurplar, istasyon sayıları, istasyonlar arası mesafe ve hemzemin geçitler gibi kriterlerde enerji tüketimleri üzerinde çeşitli düzeylerde etkindirler. Trafo merkezlerinden araçlara enerjinin iletildiği katener sistemleri ve dönüş iletkenlerindeki kayıplar ise ortalama olarak %4 civarındadır [14].

Türkiye’nin en büyük kent içi raylı sistem işletmecisi olan İstanbul Ulaşım A.Ş. toplam uzunluğu 74 km’yi bulan metro, hafif metro, tramvay, fönüküler, teleferik gibi hatlarında mevcut durumda trafo merkezleri toplam kurulu gücü 182,6 MW’tır. İşletme gerilimi 750 V DC’dir. Trafo merkezlerinde trenlerin işletimini sağlayan cer trafoları sıcak yedekli olarak çalıştırılmaktadır. Güvenlik ve hizmetin sürekliliği bakımından tercih edilen bu durum, Hindistan Demiryollarındaki ölçümlerde trafonun sıcak çalıştırılmasının, trafonun toplam kaybının %33’ne denk geldiği tespit edilmiştir [15]. Sıcak yedekli olarak çalıştırılan cer trafolarının soğuk yedekli

kullanılması için fizibilite çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Ayrıca geleneksel trafo yerine süper iletken trafolar kullanıldığında enerji tüketimini trafo için %90, trenin toplam enerji tüketimi için %30 azalmaktadır [16]. Cer için harcanan enerjinin yaklaşık %3'ü trafo merkezlerinde dönüşüm ve transmisyon sırasında kaybedilir [14]. Bu rakam her işletmenin kendine özgü elektrifikasyon altyapı değerlerine göre değişebilmektedir.

### **2.1.1. Cer Gücü Beslemesi:**

Cer enerji tüketimini belirleyen başlıca faktörler şunlardır:

Hattın geometrisi; eğimler, istasyonların sıklığı ve yerleri, kurplar, hız sınırlamaları vb. güzergâha bağlı kriterler.

Araç özellikleri; kontrol lojisi, ağırlığı, yapısı, motor sistemi, araç içi yardımcı güç sistemleri vb. kriterler.

Cer gücü besleme ve dağıtım sistemi; Trafo merkezleri (TM) sayısı ve yerleri, katener (standart veya rijit), 3. ray özellikleri, besleme düzeni, TM ekipman tipi vb. kriterler.

İşletme mantığı; Trenler arası süre (TAS), tren kompozisyonu, istasyon bekleme süreleri vb. kriterler.

### **2.2. Araçlar**

Katener sistemleri vasıtası ile araçlara ulaştırılan enerji, servis sırasında aşağıdaki süreçlerde tüketilmektedir:

Aracın işletme hızına ulaşmaya kadar ivmelenmesi: Newton'un kinetik enerji eşitliğine göre; aracın kütlesi ve hızı enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. Kinetik enerjiyi üretmek için ivmelenme gereklidir ancak çok hızlı ivmelenmek gereğinden fazla enerji tüketimine sebep olur. Çünkü kinetik enerji, hızın karesi ile artmaktadır. Bunun yanında tren kütlesindeki %10 oranında bir artış, araç enerji tüketimini %6-8 oranında arttırmaktadır [17]. Ağırlığı azaltarak enerji tasarrufu yapabilmek için alüminyum-paslanmaz çelik teknolojilerinden, çelik çerçeve konstrüksiyonundan ve sandviç konstrüksiyonundan faydalanılabilir. Trenlerin

hareketi çeşitli sürtünmeler ile engellenir (yüzey sürtünme ve aerodinamik sürtünme). Yüzey sürtünme ağırlık ve yapışma ile karakterize edilir. Aerodinamik sürtünme gibi viskoz karakterde sayılır fakat hızın küpü ile doğru orantılıdır [18].

Fakat kent içinde kullanılan raylı sistem taşımacılığında aerodinamik sürtünmenin etkisi yok denecek kadar azdır.

Konfor fonksiyonları (aydınlatma, ısıtma, soğutma ve havalandırma): Konfor fonksiyonlarının enerji tüketimi yolcu trenlerinin enerji tüketimlerinin önemli bir kısmıdır. Bu sistemlerin optimizasyonunun şu andaki durumu, teorik tasarruf potansiyeli oldukça yüksek olmasına rağmen, cer bileşenlerine göre geri durumdadır. Bu alanda cer bileşenlerinin ürettiği atık ısının kullanılması, akıllı hava koşullandırma ve sıcaklık hedef değerlerinin dış ortam şartlarına göre güncellenmesi umut vadeden tedbirler olarak karşımıza çıkmaktadır [19]. Park halindeki trenlerin akıllı kontrolü ile hazırda bekleme modunda enerji tüketimleri önemli oranda azaltılabilir. Araçların seyir sırasında tükettikleri enerji; aracın spesifik konstrüksiyonuna, sürüş performansına, durma sıklığına, yolcu sayısına bağlı olarak önemli farklar göstermektedir. Araçların spesifik enerji tüketimlerinin belirlenebilmesi için sekonder düzeyde (katener seviyesinden) ölçümler yapılmalıdır. Cer ve yardımcı konverterin soğutulması için merkezileştirilmiş soğutma sistemlerinin kullanımının hem araç kütlesini azaltacağı hem de sistem verimini arttıracığı öngörülmektedir [20].

Hannover'da bulunan ulaşım uzmanı ÜSTRA düzenlemelerle enerji tüketimini düşürmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Düşük sıcaklıklarda tüm gece araçlar stand by modunda bırakılmıştır. Sonuçta araçlarda bulunan ısıtıcı sitemler tüm gece boyunca açık kalmıştır. Yüksek sıcaklıklarda ise araçlar tamamen kapatılmıştır. Araçların stand by konumunda kalmalarıyla her yıl 1,3 GWh enerjinin kurtarıldığı gözlemlenmiştir. Bu da ÜSTRA'da bulunan 300 aracın ek maliyete gerek duyulmadan yaptığı bir enerji tasarrufudur [10].

## 2.3. İşletme

### 2.3.1. Besleme gerilim seviyesi olarak 1500V DC seçilmesi

Kayıpları daha fazla azaltmak için Hong Kong gibi bazı metrolarda 1500 V kullanılmaktadır. Tasarım kriterlerine göre trafo ile araç arasındaki gerilim düşümü en fazla %30 olmalıdır. Teorik olarak 750 V yerine 1500 V kullanılırsa gerilim düşümü yarı yarıya azalmakta ve trafolar arası mesafe 4 katına çıkabilmektedir. 750 V için tipik trafolar arası mesafe 1,5 km iken 1500 V için bu değer 6 km. olabilmektedir [20].

İstanbul'un Anadolu yakasında yapılması planlanan Üsküdar - Ümraniye metro hattının cer gücü besleme sisteminin ön boyutlandırılması gerçekleştirilmiş ve bu hatta ilişkin veriler ile yapılan çalışmada [21], besleme sisteminin 750 V DC yerine 1500 V DC seçilmesi durumunda elde edilecek tasarrufun %10 mertebelerinde olacağı belirlenmiştir.

Benzer şekilde, Kadıköy – Kartal metro hattına ilişkin veriler ile yapılan çalışmada da 2025 yılı işletme şartlarında yıllık tasarrufun 12,5 Milyon kWh olarak gerçekleşeceği bulunmuştur. Bu değer bugünkü elektrik ücret tarifesiyle [22] fiyatlandırıldığında yıllık maddi tasarruf 2,4 Milyon Türk Lirası olacaktır.

Yukarıda bahsi geçen çalışmalar neticesinde İBB yeni metro hatlarında 1500 V DC besleme seviyesinin kullanılmasını kararlaştırmış ve Kadıköy-Kartal, Kirazlı-Başakşehir-Olimpiyat, Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy hatlarında 1500 V DC sisteminin kurulmasını istemiştir.

### 2.3.2. Katener sistemlerinin paralellenmesi

DC gerilim ile beslenen çift hatlı sistemlerde her iki yola ait katener sistemleri yalıtkan kablolar ile paralellenebilmektedir. Bu özellikle, tramvay hattı gibi ağır katener sistemlerinin kullanılmasının çevresel dokuya uygun olmadığı durumlarda uygulanmaktadır. Görüntüsel avantajının yanı sıra paralelleme aynı zamanda enerji tasarrufu da sağlamaktadır. Parallelleme kablolarının sıklığının enerji tüketimi üzerine etkisi araştırılmış ve sonuçları [23] sunulmuştur. Çalışmada, TM'ler arasında yapılacak 1 veya 2 adet paralelleme ile %2,5 civarında, paralelleme noktalarının

arttırılması ile %5'e kadar enerji tasarrufu sağlanabileceği gösterilmiştir. Parallelemenin başlıca avantajları:

- Enerji kayıplarını azaltır.
- Akım bölüşümünü arttırarak sistemin rahatlamasını sağlar.

Yapılmış olan çalışmadan [24] alınmış özet değerleri veren Tablo 2.2'den de görülmektedir ki sadece trafo merkezleri arasında, hat başında ve hat sonunda jumper yapılması (2000 m testi) durumunda dahi, toplam enerji tüketimi % 2,5 civarında azalmaktadır. Yoğun tren işletmeciliğinin yapıldığı sistemlerde yapılacak sık paralelleme ile enerji tüketimi %5 seviyelerinde azaltılabilmektedir.

Tablo 2.2. Trenler Arası Süre (TAS) = 300 s. için Enerji Tüketim Değerleri.

AÇIKLAMA	Jumperlar arası mesafe (m)					
	Normal	2000	1000	500	250	100
Toplam tüketilen enerji(kWh)	1916,7	1864,1	1862,8	1846,5	1838,8	1833,0
Jumpersız duruma göre tasarruf (%)		2,74	2,81	3,66	4,06	4,37
Araç km başına enerji tüketimi (kWh)	3,46	3,37	3,37	3,34	3,32	3,31
Jumpersız duruma göre azalma (%)		2,6	2,6	3,47	4,05	4,34

### 2.3.3. Cer tüketimleri

Raylı sistem araçları frenleme sırasında cer motorlarını jeneratör olarak kullanarak enerji üretebilmektedirler. DC sistemlerde frenleme sırasında enerji geri kazanımı ancak uygun şartların oluşmasına bağlıdır. Dinamik frenleme sırasında geri kazanılan enerji aşağıdaki durumlarda kullanılabilir:



- Araç üstünde depolanarak ivmelenme sırasında kullanılması, yardımcı güç sistemleri veya konfor fonksiyonları için kullanılması ki, bu sistemlerin gücü talep frenleme faydalı enerjisinden geri kazanılabilecek enerji miktardan azdır.
- Ortaya çıkan enerji yeterince yakın mesafede ivmelenen başka bir aracın kullanması için katener sistemine geri verilir.
- Trafo merkezleri tersinir yapıda ise, enerji şebekeye geri verilebilir [12, 23].

Araçlar tükettiği enerjinin yaklaşık %40'nı frenleme sırasında üretebilmektedir. Fakat bu %40'lık frenleme enerjisi ancak bir tren frenleme yaparken ve diğer trende ivmelenme yapması ve aynı zamanda bu iki trenin 1 km'lik bir alanda bulunması ile mümkündür [10]. Frenleme sırasında geri kazanılacak enerji her raylı sistemi kendine özgü şartlarına ve elektrifikasyon altyapısına bağlı olmakla birlikte, uygulamada %10 oranları seviyesinde veya daha düşük değerlerde kalmaktadır [22, 25]. Rejeneratif frenleme sistemi ile geri kazanılan faydalı enerji, kalkmak üzere olan başka bir aracın kullanması için enerjiyi hatta geri verir. Elektrik güç kaynağı tersinir kapasitede tasarlanmamışsa, frenlemeden dolayı katenerde yükselen gerilim, araç çatısına yerleştirilmiş rezistanslarda harcanır [26].

Enerji etkin sürüş, raylı sistem işletmeciliğinde enerji tasarrufu için en umut vadeden stratejidir. Bunun için treni kullanan kişilere verimli sürüş eğitimleri verilmeli ve DAS hayata geçirilmelidir.

DAS (elektronik sürücü uyarı sistemleri) bu alanda kullanılabilir [12]. Sürücüler süzülme uygulaması konusunda eğitilmelidir. Araçların spesifik tüketimi azaltılabilir. Araç enerji tüketimi aracın hızı, duruş sayısı ve sürülüş tarzına göre büyük farklılık gösterir. Aşağıdaki hususlarda enerji tasarrufu bakımından önemli başarılar elde edilebilir. Bu hususlar:

-İvmeleme dengelemesi / Maksimum hız / Frenleme / Durma süresi/ Süzülme fazıdır.

Enerji etkin sürüş ile ilgili dünyada yapılan çalışmalarda tüm trafik tipleri için %10 tasarruf potansiyeli öngörülmüştür [17]. Enerji ölçerler, simülasyon ile üretilen tüketim verilerinden çok daha güvenilir enerji tüketim verisi sağlarlar, bu yüzden enerji tasarruf tedbirlerini ortaya çıkarmak için de iyi bir vasıtadırlar.

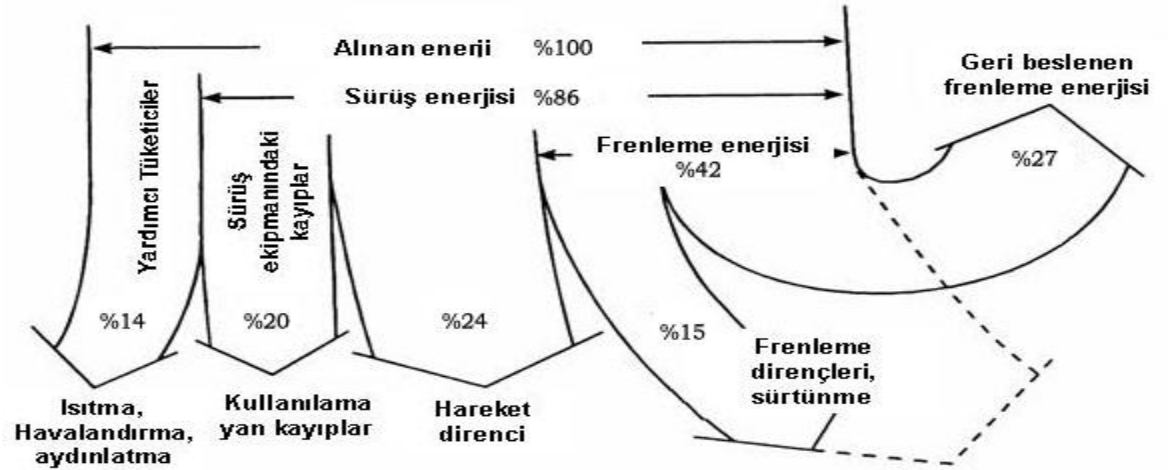
#### **2.3.4. Rejeneratif frenleme enerjisinden faydalanma oranını arttırma**

Kırmızı sinyal lambalarının büyük frenleme enerjisi kayıplarına yol açtığı yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir. Bu çalışmada [27], 300 metre uzunluğundaki bir trenin hızı 50 km/sa 'den 110 km/sa 'e çıktığında 100 km yolda 100 MJ daha fazla enerji harcamaktadır.

Regeneratif frenleme enerjisinden faydalanma oranını arttırmanın bir faydası da zaman çizelgesine bazı gecikmelerden dolayı uyulamayan zamanlarda bir trenin frenleme enerjisini diğer trene vererek bu gecikmeyi tolere etmektir [10].

Trafo merkezlerindeki ekipmanlar genel olarak kontrolsüz doğrultucu olup tek yönlü iletme izin verirler. Bunun anlamı, trenlerin frenleme anında elektrik enerjisine dönüşen kinetik enerjilerinin ana şebekeye geri verilememesi demektir.

Bu açığa çıkan frenleme enerjisi hatta bulunan diğer trenler tarafından kullanılabilir veya frenleme dirençlerinde yakılarak harcanır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, teorik olarak, hatta kullanılan toplam enerjinin tren işletme sıklığına bağlı olarak yaklaşık %40'ı frenleme enerjisinin geri kazanımından sağlanabilir. Trenlerin 3 dakika ve altında işletildiği hatlarda, frenleme esnasında üretilen enerjinin büyük kısmının diğer trenler tarafından kullanılmakta olduğu bildirilmektedir [28]. Sık tren işletilmeyen hatlarda, enerjinin büyük kısmı dirençlerde yakılmaktadır. Bu bağlamda enerji depolama teknolojileri aracılığı ile işletme maliyetlerine ilişkin önemli ölçüde enerji tasarrufu gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir [29]. Birkaç enerji depolama sisteminin yerleştirilmesi ile bir depolama sisteminin senede 340.000 kWh enerji tasarrufu yaptığı gözlemlenmiştir [30]. Şekil 2.3'de bir tren için enerji dağılım diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.1. Frenleme Enerjisinin Kullanımı ve Diğer Enerji Tüketimleri [31].

Enerji depolamaya ilişkin ilk uygulama Londra Metrosu'nda gerçekleştirilmiştir ve günümüzde de New York Far Rockaway hattında kinetik enerji depolama teknolojisi kullanılmaktadır. Tamamen statik süperkapasitör tabanlı enerji depolama sistemi olarak ise Almanya, Köln şehrinde bu teknoloji uygulanmıştır [32].

### 2.3.5. Enerji depolama sistemleri

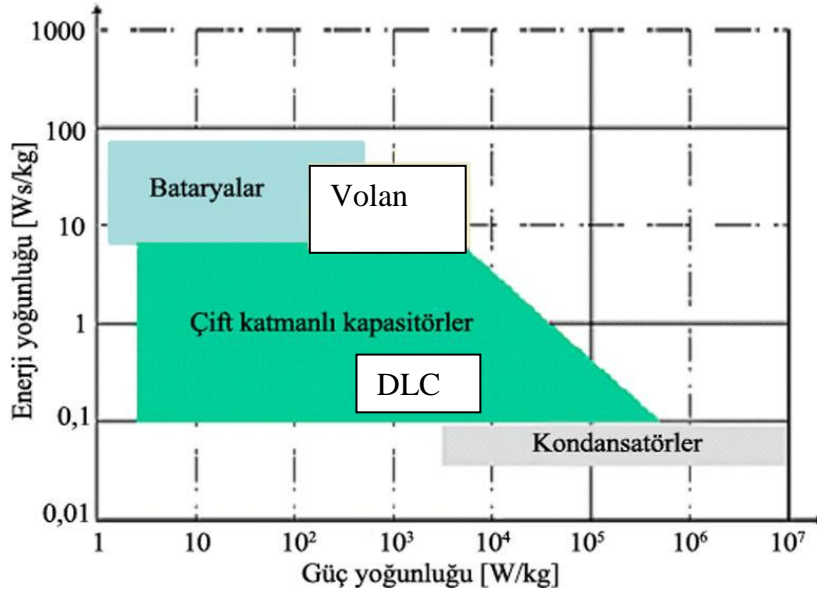
Enerji depolama sistemleri, güç talebi düşükken depolama ile güç talebi fazla iken de deşarj olma yolu ile kullanıcıya bir esneklik sağlamaktadır. Enerji depolama elemanları araç üstü veya hat boyunda istasyon olarak uygun bir yere monte edilebilir. Bununla birlikte hat iletkenlerindeki kayıplar eğer düşük katener voltajlı sistemlerde ise (600 V veya 750 V) enerji depolama sistemleri daha verimli olacaktır [12]. Sistem eğer araçların direk birbirleri arasındaki enerji alışverişlerini sağlayacaksa depolama sisteminin boyutu küçülmektedir [10].

Enerji depolama sistemleri enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve enerji verimliliği açısından sınıflandırılabilir. Ayrıca, diğer bazı faktörlerde bunların kullanışlı olup olmamasını etkiler. Bu faktörler; çalışma dayanımı, maliyet, inşa boyutu, ağırlık, yük çevrimi kapasitesi ve güvenlidir [33]. Öne çıkan enerji depolama sistemleri aşağıda verilmiştir.

#### 2.3.5.1. Bataryalar (Akümülatörler)

Şekil 2.2' den de görülebileceği gibi bataryalar diğer enerji depolama sistemlerine göre çok yüksek bir enerji yoğunluğuna sahiptirler. Ancak, düşük güç

yoğunluğundan dolayı şarj olma süreleri yüksektir. Demiryolu taşımacılığı uygulamalarını göz önünde bulundurduğumuzda günümüz bataryaları, volan ve süperkapasitörlerin gerisinde kalmıştır. Demiryolu uygulamaları için ise gerekli olan kapasite araca çok fazla yük getirmekte ve çok fazla yere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bakımdan demiryolu ulaşımında batarya bazlı enerji depolama, maliyet-verim ilişkisi bakımından uygun değildir [34].



Şekil 2.2. Farklı enerji depolama ortamları [34]

### 2.3.5.2. Çift katmanlı kapasitörler (Ultrakapasitörler)

Ultrakapasitörler enerjiyi, elektrokimyasal bir çift katmanın elektrik alanında depolarlar. Frenleme enerjisinin geri kazanılmasında olduğu gibi, trenlerin ivmelenme anında ve eğim çıkışlarında da güç desteği sağlamak için birincil enerji kaynağı olarak geliştirilmektedirler.

Çift katmanlı kapasitörler diğer kapasitörlere nazaran çok yüksek bir enerji yoğunluğu için geliştirilmişlerdir. Ultrakapasitörler enerji depolama boyutları bakımından oldukça esnektirler ve değişik gerilim, güç aralığı ve yüklenen enerji içeriği değerlerine seri ve paralel bağlama yapılarak basit bir adaptasyon imkânı sağlarlar [33]. Çift katmanlı kapasitörler DC trafoya step –up/step- down konvertörle bağlıdır. Bu konvertör aynı zamanda gerilim sabitleyici rol oynar [10]. Süperkapasitörler kontrol amaçlı bir ek donanıma ihtiyaç duyarlar. Bu kontrol

ünitesi pik güç noktalarını tespit ederek daha fazla gücü trene verir, gerilimi sabit tutar ve ne zaman şarj ve deşarj olacağını süperkapasitöre bildirir.

Düşük yük zamanlarında iki tren arasında depolama sistemi düşük akımda şarj olur. Yüksek yükte ise kontrol ünitesi kullanılan gerilim seviyesine göre eşik seviyeyi fark eder. Bu eşik seviyesinin altında deşarj olarak sistemin geriliminin sabit kalmasını sağlar.

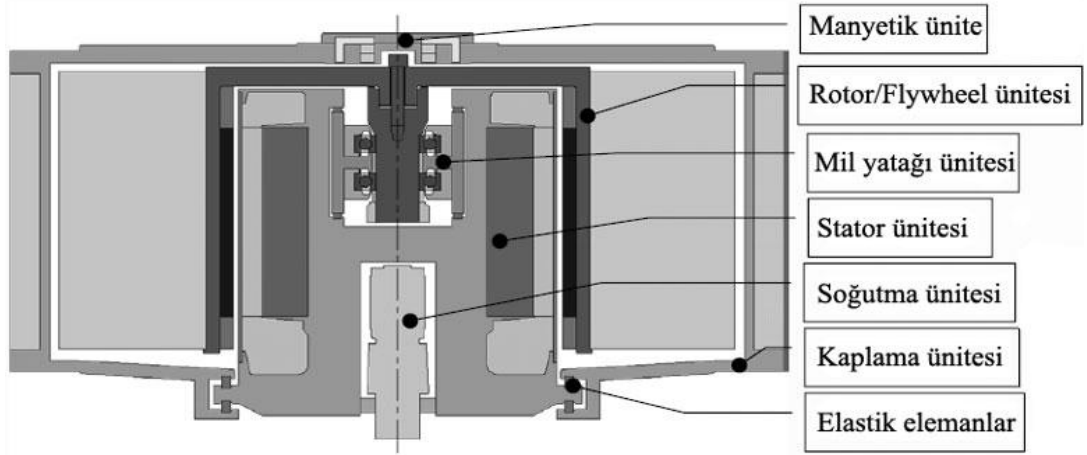
Süperkapasitörlerin yükü arttırdığı bir gerçektir fakat yapılan bir çalışmada yükü arttırmasına rağmen yine de enerji tasarrufu sağladığı görülmüştür. Bu değer kullanılan ultrakapasitör çeşidine ve kişi sayısına bağlı olarak %23 ila %26 değerleri arasında değişmektedir [35].

Kullanım alanlarına göre depolanmak istenen enerji başta olmak üzere birçok faktörün etkilediği dört çeşit süper kapasitör mevcuttur. Bunlar EoL, 0.91 kWh, 1.23 kWh, ve 1.56 kWh'dir. Bunlardan seçilecek olan ultrakapasitöre bazı simülasyon çalışmaları yapıldıktan sonra karar verilir [36].

### **2.3.5.3. (Volan)**

Flywheel, dönen kütle üzerine temellenen bir elektromekanik enerji depolama sistemidir (Şekil 2.3). Flywheel sistemleri yüksek enerji ve yüksek güç yoğunluğuna sahip karakteristiktirler ve bu durum bunları demiryolu araçları için frenleme enerjisinin depolanmasında çekici bir teknoloji haline getirmiştir.

Ultrakapasitörlerle kıyaslandığında da onlara göre daha uzun bir çevrim ve kullanım ömrüne sahiptirler. Şarj ve deşarj olma süresi bakımından Ultrakapasitörler ile Bataryalar arasında bir yeredir. %90'dan fazla verimliliği vardır. Piyasada var olan volanların yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Bir araştırmaya göre bunların amortisman süreleri 17-30 yıl olarak hesaplanmıştır [34, 37].



Şekil 2.3. Bir volan kesiti [38]

### 2.3.6. Araç üstü enerji depolamanın avantajları

Enerji depolama sistemleri enerji tasarrufunu büyük ölçüde arttırılabilecektir. Frenleme fazında aracın kinetik enerjisi başka bir enerji çeşidine (kapasitörler için elektrostatik enerjiye) dönüştürülür ve depolama elemanında depo edilir. Araç hareketsiz konumda iken de bu elemanlar bir sonraki ivmelenme esnasında bu enerjiyi sağlayabilmek için tam şarj edilmiş olmalıdırlar. Enerji depolama sistemi böyle bir yolla sağlanmalıdır ki bir sonraki ivmelenme esnasında araç gerekli olan enerjiyi dış enerji beslemesinden tamamıyla karşılama ihtiyacı duymasın [29, 34].

Tren üstü enerji depolama sistemi uygulamalarında sadece elektrokimyasal piller ve süper kapasitörler pratik bir uygulama alanına sahiptir. Elektrokimyasal piller ve süper kapasitörlerin birbirlerine göre artıları eksileri de olsa süper kapasitörler gücün pik yaptığı noktalarını karşılamada daha elverişlidir. Ayrıca süper kapasitörler çevrim ömürleri milyonlar mertebesindedir. Bunun sebebi enerji depolama prensibinin elektrostatik prensipte olmasıdır. Bu yüzden en elverişli araç üstü enerji depolama sistemi ultrakapasitörlerdir [39].

Depolama için ilk çözüm Bombardier Ulaşım tarafından Manheim’de bir prototip araçta yapılmıştır [40]. Prototip modern bir hafif raylı araçtır ve depolama cihazı enerji içeriği 1kWh ve ağırlığı 450 kg olan süperkapasitörler kümesidir. Önemli dezavantajları trenin ağırlığını yaklaşık %2 yükseltmesi, ek yere ve çift yönlü yükselticiye konvertör ve yüksek maliyete ihtiyaç duymasındır. Bu sisteme Bombardier firması tarafından MİTRAC ismi verilmiştir. Bu sistemin enerji

depolaması dışında da birçok avantajı da mevcuttur. (enerji verimliliği, ivmeleme sırasında pik güç ihtiyacını karşılama, altyapı kayıplarını düşürme ve gerilim stabilizasyonu)



Sekil 2.4. Bombardier Ulaşım Tarafından Yapılan Manheim'deki Prototip Araç [41]

- Gerilim düşümünün azaltılması

Cer gücü sistemindeki arızalar haricinde gerilim düşümü iki prensip doğrultusunda oluşur: Trafo merkezlerindeki gerilim düşümü ve trenler ile besleme istasyonları

arasındaki besleme iletkenleri ve raylar boyunca olan güç kayıpları. Araç üstü enerji depolama sistemlerinin kullanılması ile araçların akım alış noktaları olan pantograflarda oluşacak gerilim düşüm değeri minimize edilecek (hat akımını %50'den daha fazla, bazen %80 düşürerek gerilim düşümlerinin önüne geçilmektedir [39]) ve dolayısı ile araçların performanslarında oluşacak bir düşüşün önüne geçilecektir [42].

- Trafo merkezlerinden talep edilen tepe güç değerinin düşürülmesi

Gereken gücün bir kısmının enerji depolamadan gelmesiyle hattın çekilen tepe güç talebi önemli derecede azalabilecektir. Bunun direkt olarak faydaları;

- ✓ Azaltılmış enerji maliyeti,
- ✓ Azaltılmış tepe güç için cer gücü sistemi dizaynı;
  - Yeni hatlar için daha az besleme istasyonu
  - Kablolamada daha küçük kesitler
- ✓ Var olan altyapı sistemi için daha fazla araç veya daha güçlü araç,
- ✓ Daha zayıf hatlarda ivmelenme limitlerinde iyileştirme [29, 34].

- Katenersiz çalışma olanağının elde edilmesi

Enerji depolama sistemini araç üstüne monte etmek belli kısımlarda katenersiz işletme yapmayı mümkün kılabilir. Şarj olmuş enerji depolama sistemi, kısa süreler için altyapının neden olabileceği enerji kesintilerinde aracın çalışmasını temin eder. Örneğin, 1 km'lik mesafeler, enerji kesintisiz olduğu durumlarda veya katenersiz bölgelerde (tarihi yerler vb.) enerji depolama sistemi tarafından sağlanan enerji ile kat edilebilir. Katenersiz çalışma bölgesinin kesin uzunluğu birçok faktöre bağlıdır. En önemlileri; depolama sisteminde depo edilmiş enerji, aracın maksimum hızı, hattın eğimi, en düşük yardımcı güç ihtiyacıdır.

### **2.3.7. İstasyon tipi enerji depolama**

İstasyon tipi enerji depolanma sistemlerinin kurulumları hat boyunca gerilim düşümlerinin fazla olduğu ve çekilen net gücün fazla olduğu yerlerde olmalıdır.

Depolanan enerji aynı veya farklı trenlerde kullanılabilir. Enerji tasarrufundan başka istasyon tipi depolama, zamanla güç talebini yumuşak bir şekilde sokar ve katener



geriliminde sabitleyici bir etki yapar. Bununla birlikte yatırım maliyetleri de yüksektir. Bu yüzden ölçü olarak sistemdeki önemli noktalar belirlenerek kullanımı buralarla sınırlandırılabilir [29, 34].

### **2.3.8. Araç Üstü Enerji Depolama Sistemi ile İstasyon Tipi Enerji Depolama Sisteminin Karşılaştırılması**

İstasyon Tipi Enerji Depolama sistemlerin güç akış kontrolleri tren üstü enerji depolama sistemlerine göre daha karmaşıktır. Çünkü araç üstü sistemlerde girilen referans değeri aracın kinetik enerjisi baz alınarak hesaplanır; istasyon tipi enerji depolamada ise hattın gerilimi ve o hattın şarj durumu esas alınarak hesaplanır [43]. Ayrıca araç üstü enerji depolama sistemlerinin boyutlandırılmada maksimum kinetik enerjiyi (dolayısıyla potansiyel enerjiyi) bilmek yeterliyken istasyon tipinde aracın rejeneratif frenleme oranını ve voltaj limitlerinden dolayı enerji transfer limitini de bilmek gerekir [44].

İstasyon tipi enerji depolama sistemlerinden alınan verimin yüksek olması için trafik yoğunluğunun az olduğu yerlerde kullanılması gerekir. Dolduğu zaman hemen deşarj olması gerekmektedir. Bu da ivmelenen araçlara zorluk yaşatmaktadır. Küçük olan tiplerde uzaktaki bir araç ivmeleme yaptığı zaman gerilim düşümlerine sebep olabilir. Enerji verimliliği açısından bir iyileştirme yapılmak istendiğinde hat geriliminde belirgin bir değişme olmaz iken, araç üstü enerji depolama da hat kayıpları düşer ve gerilim stabilizasyonu sağlanır [44].

Ayrıca İstasyon tipi enerji depolama sistemlerinin maliyeti, diğer sisteme göre oldukça yüksektir.

### **2.3.9. Sabit tesis tüketimleri**

Raylı sistemlerde taşımacılık prosesinin girdisi olan yolcuları araçlara ulaştıran istasyonlar yeraltı ve yerüstünde bulunmalarına göre enerji tüketimi bakımından önemli farklılık gösterirler. Yeraltı istasyonlarında aydınlatma, havalandırma sistemleri, yürüyen merdivenler vs uzun işletme saatleri boyunca çalışmak zorunda olduğundan tüketimlerdeki payları oldukça fazladır. Raylı sistemlerde enerji performans göstergeleri araçlar ve altyapı sistemleri için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- Yolcu km başına final enerji tüketimi (kWh/yolcu. km)
- Ton km başına final enerji tüketimi (kWh / ton. km)
- Park halindeki trenlerin tüketimlerinin toplam tüketim içindeki oranı (%)
- Raylı sistem güç dağıtım sistemi verimi (%)
- Rejenaratif enerjinin kullanım oranı (%)

Bir raylı sistem güç ağının verimi aşağıda Denklem (4.1)'de verildiği gibi ifade edilir [45].

$$\eta = [(W_a + W_p - W_r) / W_s] \times \% 100 \quad (2.1)$$

Burada;

W<sub>a</sub>: Aracın ivmelenme sırasında tükettiği enerji

W<sub>p</sub>: Hattın yolcu istasyonlarında tüketilen enerji

W<sub>r</sub>: Aracın frenleme sırasında ürettiği enerji

W<sub>s</sub>: Raylı sistem ağına trafo merkezinden giriş yapan enerji olarak tanımlanmaktadır.

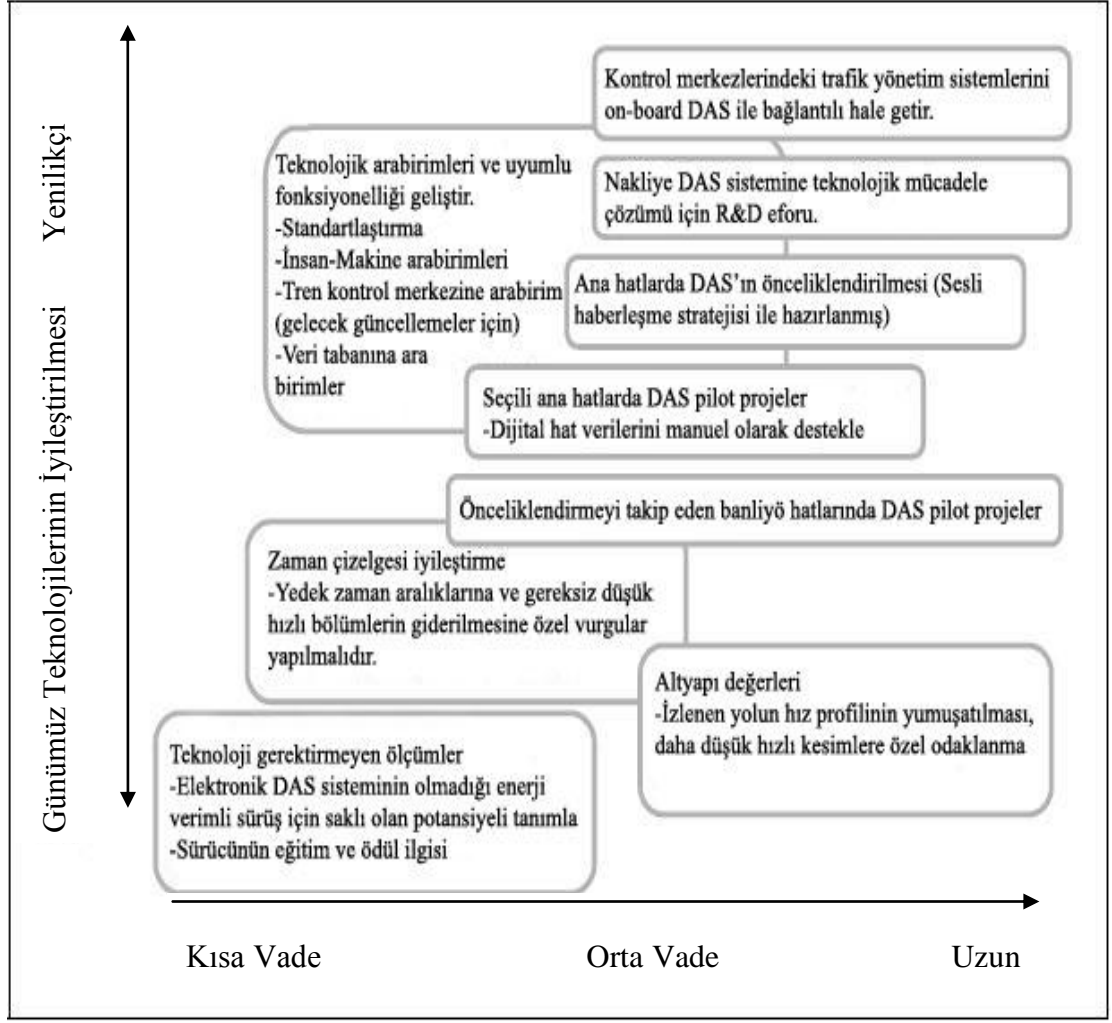
Bu amaçla araç-üstü enerji ölçerlerin trenlere monte edilerek, aracın tükettiği ve hatta geri verdiği enerjinin ölçülmesi (tüketilen enerjinin faturalandırılması) için EN50463 standardı yayınlanmıştır [46].

### **2.3.10. Enerji verimli sürüş yöntemleri**

Son 15–20 yılda yazılmış ve yayınlanmış birçok makalede bu konu farklı yollardan incelenmektedir. Coasting (ivmesiz, boşta gitme) kontrolünden başlayan yöntemler, otomatik tren işletimi olan sistemlerde senkronize tren işletimine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Belirli bir donanım ve sefer güzergâhına sahip bir tren için enerji tüketim miktarı oldukça değişken değerler gösterebilmektedir. Aracın duruş sayısı ve bunu takip eden ivmelenme hareketleri ve bunlarla birlikte aracın maksimum hızı trenin enerji talebinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Teorik bir bakış noktası ile enerji tüketimi açısından en verimli seyir; düşük hızda ve aradaki

duruşların olmadığı bir seyirdir. Verimli bir sürüş yöntemiyle enerji tüketiminin ortalama bir sürüşe göre %12 düşebileceği yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir [4]. Hızlanmak için gerekli kuvvetlerin yenilmesi gerektiği enerji, trenin hızlanıp yavaşlamasından doğan enerjiden oldukça düşüktür. Böyle durumlarda eğer frenleme enerjisi faydalı enerji olarak kullanılamıyorsa süzülme denilen yöntem en verimli yöntemdir [10]. Basit elektrikli cihazlarla da sürücüye nasıl bir sürüş izlemesi gerektiği ve vaktinde nasıl varacağı hakkında tavsiye vererek enerji verimliliğini arttırmaktadır. Hesaplanmış bir hız profili ile bir sonraki istasyona %10'luk küçük bir zaman uzamasıyla bile %25'lik bir enerji kazancı olabilmektedir. Yokuş aşağı olan yerlerde %45-50'lik bir enerji tasarrufu mümkündür. Zaman çizelgeleri genellikle hesaplanmış en düşük sefer süresine eklenmiş olan, tahmin edilemeyen gecikmelerin kapatılmasına imkân tanımak için belirli bir miktar “yedek zaman aralığını” kapsar. Yedek zaman aralıkları dakiklik bakımından da bir anahtar etkendir ve araştırmalar yolcuların çok büyük bir oranının dakikliğe seyahat süresi içindeki ufak bir indirgmeden daha fazla önem verdiğini göstermektedir.

Günümüzde, herhangi bir sürücünün yapabileceğinden daha fazla kesinlikte en iyi sürüş stratejisini hesaplayan ve sürekli olarak güncelleyen sürüş öneri sistemleri vardır. Güçlü benzetim programlarının gelişimi ile mobil haberleşme ağları ve ileri telematik çözümler, tren işletmesi ve tren kontrolünün bütün sistemi etkileyen iyileştirmeleri için çok büyük bir çözüm potansiyeli sunmaktadır. Şekil 2.5' de özet stratejiler uygulama süresine bağlı olarak gösterilmiştir [47].



Şekil 2.5. Enerji Verimli Sürüş Stratejileri [36]

Bu yöntemlerde, zaman öncelikli sürüş yerine enerji tüketimini minimize edecek şekilde sürüş/kontrol teknikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. En basit şekli ile tren maksimum hızda belli bir sürede gittikten sonra boşa çalışma rejimine alınmakta ve araç karşı kuvvetlerin etkisinde yavaşlamaya bırakılmaktadır. Maksimum hız limitlerinin, inşaat limitlerinin altına çekilmesi de önerilen yöntemlerden biridir. Bu yöntemlerle elde edilecek enerji tasarrufunun en fazla %15 civarında olacağı belirtilmektedir.

### 3. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELEDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

#### 3.1. İnsan Kaynaklı İklim Değişikliği

Çevre alanında sorunların ve çözüm yollarının yerel ve ulusal sınırları aşan niteliği, 1972 yılında Stockholm’de gerçekleştirilen ve 5 Haziran Dünya Çevre Günü’nün de çıkış noktası olan Birleşmiş Milletler İnsan ve Çevre Konferansı ile uluslar arası toplumun gündemine taşınmıştır. Stockholm Konferansı’ndan 20 yıl sonra Rio’da düzenlenen BM Çevre ve Kalkınma Konferansı sırasında imzaya açılan Çölleşmeyle Mücadele Sözleşmesi (UNCCD), Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmesi (UNCBD) ve İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), "Rio Üçlüsü" olarak adlandırılarak "sürdürülebilir kalkınma" kavramının en önemli yasal dayanaklarını oluşturmaktadır. "Atmosferdeki sera gazı birikimlerini, iklim sistemi üzerindeki tehlikeli insan kaynaklı etkiyi önleyecek bir düzeyde durdurmayı başarmayı" hedefleyen BM İklim Değişikliği Sözleşmesi (BMİDÇS) ise 1994 yılında yürürlüğe girmiştir.

Atmosferdeki "doğal sera etkisini", gezegenimizin milyonlarca yıllık evrimi sonucunda oluşan ve normal koşullarda dünyadaki canlı yaşamının devamlılığını sağlayan en önemli etkenlerinden birisidir. Sözleşme’de belirtilen "insan kaynaklı iklim değişikliği", esas olarak fosil kaynakların (kömür, petrol, doğalgaz) aşırı tüketilmesi ve orman alanlarının hızla yok olması sonucunda başta CO<sub>2</sub> olmak üzere atmosferdeki sera etkisini arttıran aşırı ve çok hızlı bir şekilde salınmasını tanımlamaktadır. Sera gazları ile ilgili teknik veriler Tablo 3.1’de sunulmaktadır.

İnsan kaynaklı iklim değişikliğini oluşturan sera gazlarının enerji, sanayi, ulaştırma, tarım, atık, ormancılık ve arazi kullanımı alanlarında ortaya çıkması ve buna karşı çözümlerin de yine bu alanlarda geliştirilecek radikal dönüşümlere bağlı olması nedeniyle, BMİDÇS diğerleri ile karşılaştırıldığında adından en çok söz ettiren uluslar arası çevre sözleşmesi olarak ortaya çıkmıştır. İklim değişikliği ile mücadele konusunda atılacak adımların etkinleştirilmesini hedefleyen ve 1997 yılında kabul edilerek 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü ise güçlü, yenilikçi

düzenlemeleri ve bağlayıcı yaptırımlarıyla çevre kaygılarının insan hayatının her alanına müdahale etmesini ve yön vermesini sağlamaktadır [6].

Tablo 3.1. Sera Gazları İle İlgili Teknik Veriler [6]

Kyoto Protokolü Kapsamındaki Sera Gazları	Küresel Isınma Potansiyeli	Atmosferde Kalma Süresi (yıl)	Tarihsel Dönem	Ortalama Yıllık Artış	En Güncel Oran
CO <sub>2</sub>	1	5-200	1000-1750	%0	280 ppm
			1750-2000	%31	368 ppm
CH <sub>4</sub>	21	12	1000-1750	%0	700 ppm
			1750-2000	%151	1750 ppm
N <sub>2</sub> O	310	114	1000-1750	%0	270 ppm
			1750-2000	%17	316 ppm
HFCs	140-12.000	2-> 50.000	Son 50 yılda tüm dünyada arttı.		
PFCs					
SF <sub>6</sub>	23.900	3.200			

### 3.2. Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) Salınım Miktarı

Sera gazı salınımı konusunu enerji alanını ve iklim değişikliği konusuyla ayrı düşünmek son yüzyılda neredeyse imkânsız hale gelmiştir. Yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği başlıkları enerji güvenliğinin olduğu gibi iklim değişikliği konulu değerlendirilmelerin de en önemli unsurları olarak algılanır olmuştur. Enerji güvenliği konusu ülkeler arası ilişkilerde önemli ve belirleyici olan bir faktör olarak ağırlığını hissettirmeye devam etmektedir. İklim değişikliği konusunun da ağırlığını giderek daha da arttıracak ve gündemlerin hep ön sıralarda yer alacak olduğunu söylemek kehanet olmayacaktır. Gelişmeler iklim değişikliği etkileri konusunda alınacak tedbirlerle ilgili olarak ülkelerin kendi hallerine bırakılmayacağı günlere doğru gitmekte olduğumuz izlenimini vermektedir. Çeşitli faktörleri dikkate alan ve belli varsayımlara dayalı olarak geliştirilen senaryolar sera gazı indirimi konusunda 2035 ve 2050 yılları için hedefler telaffuz ediliyor [48].

Küresel ısınmada en büyük problem de artan CO<sub>2</sub> miktarıdır. Bu seviye acilen olması gereken sınırın altına çekilmelidir. Buzulların erimesi ilerde insanlara içme suyu temini sağlayacak bu buzulların kalmamasıdır. Aşağıdaki tabloda bazı ülkelerin Kişi Başına CO<sub>2</sub> Üretim Miktarları verilmiştir.

Tablo 3.2. Seçilmiş OECD Ülkelerinde CO<sub>2</sub> Emisyonlarına İlişkin Değerler (2002) [49]

Ülkeler	Kişi Başına CO <sub>2</sub> Üretim Miktarı
ABD	19,7 ton
İngiltere	8,94 ton
Almanya	10,15 ton
Fransa	6,16 ton
İtalya	7,47 ton
Türkiye	2,77 ton

### 3.2.1. Enerji sektörü ve iklim değişikliği

Isı, ısınma, ulaştırma ve elektrik tüketiminden kaynaklanan salınımların yer aldığı enerji sektörünün toplam salınımlar içindeki payı artmaktadır.

Ulaşım sisteminin verimli kullanımı ve daha iyi sunumu için bilgi ve iletişim teknolojilerinden faydalanarak geliştirilen akıllı ulaşım sistemleri de enerji verimliliği ile birlikte çevre ve hava kalitesinin iyileşmesine katkıda bulunmak amacıyla kullanılabilir [50].

Ulaşım sektöründen kaynaklanan sera gazları salınımlarındaki artış, enerji sektöründeki artışın ana kaynağıdır. Bu sektör gerçekte artış gözlenen tek sektördür. Diğer sektörlerle kıyaslandığında ulaşımın CO<sub>2</sub> salım miktarı %17'dir [43]. Bu hiç de küçümsenemeyecek bir rakamdır. Bu kapsamda aşağıdaki çalışma; ulaşımın payını küçültmek ve dolayısıyla toplam CO<sub>2</sub> salım miktarını düşürmek amaçlı yapılmıştır.

### 3.2.2. Raylı sistem ile otobüs taşımacılığının karbondioksit salınımı açısından karşılaştırılması

2009 yılındaki verileri karşılaştırdığımızda raylı sistemi yıllık olarak kullanan kişi sayısı 466.178.000 [51] iken İETT'yi yıllık olarak kullanan kişi sayısı 1.013.824.000 'dır [52]. Ayrıca raylı sistemlerin yıllık harcadığı toplam enerji 6.228.757 kWh [51] ve İETT'nin kullandığı yıllık motorin miktarı 98.550.000 lt'dir [52]. Motorinin litre başına ürettiği CO<sub>2</sub> miktarı 2,65 kg/lt'dir.

Tablo 3.3. Elektrik Üretim Şekillerine Göre kg/MWh Cinsinden CO<sub>2</sub> Salınım Miktarları

	<b>Kömür</b>	<b>Gaz</b>	<b>Solar PV</b>	<b>Nükleer</b>	<b>Rüzgar</b>	<b>Hidroelektrik</b>
<b>CRIEPI, Japon[53]</b>	990	653	59	21	37	18
<b>Paul Scherr Inst.[54]</b>	949	485	79	8	14	3
<b>IAEA[55]</b>	968	440	100	9 - 21	9 - 36	4 - 23
<b>Vattenfall AB[56]</b>	980	450	50	6	6	3
<b>Ortalama</b>	<b>971</b>	<b>507</b>	<b>72</b>	<b>12,5</b>	<b>20</b>	<b>10</b>

Tablo 3.3. ve bu sayısal veriler kullanılarak yapılan hesaplamada İETT CO<sub>2</sub> miktarı ve değişik elektrik üretim şekilleri için İETT ile tüm gidilen yerlere SADECE raylı sistemle gidilebildiğini varsayarak kişi başına düşen CO<sub>2</sub> miktarı hesaplanmış ve aşağıdaki tablo oluşturulmuştur.

Tablo 3.4. Ulaşım Şekilleri ve Yakıt Türleri Değiştirilerek Yapılan Hesapta Kişi Başına Düşen CO<sub>2</sub> miktarı

İETT Kullanılarak Yapılan Ulaşımında Kişi Başına Düşen CO <sub>2</sub> Miktarı	257,5 gr
Raylı Sistem Kullanılarak Yapılan Ulaşımında Kişi Başına Düşen CO <sub>2</sub> Miktarı (Yakıt: Elektrik, Kaynak: Kömür)	12,9 gr
Raylı Sistem Kullanılarak Yapılan Ulaşımında Kişi Başına Düşen CO <sub>2</sub> Miktarı (Yakıt: Elektrik, Kaynak: Gaz)	0,9 gr
Raylı Sistem Kullanılarak Yapılan Ulaşımında Kişi Başına Düşen CO <sub>2</sub> Miktarı (Yakıt: Elektrik, Kaynak: Nükleer)	0,08 gr
Raylı Sistem Kullanılarak Yapılan Ulaşımında Kişi Başına Düşen CO <sub>2</sub> Miktarı (Yakıt: Elektrik, Kaynak: Rüzgâr)	0,2 gr
Raylı Sistem Kullanılarak Yapılan Ulaşımında Kişi Başına Düşen CO <sub>2</sub> Miktarı (Yakıt: Elektrik, Kaynak: Hidroelektrik)	0,04 gr



Sonuçtan da anlaşıldığı üzere raylı sistem kullanımı her durumda CO<sub>2</sub> salımı açısından oldukça düşük değerdedir. Çünkü tercih edilen yakıt tipi kömür dahi olsa kişi başına düşen CO<sub>2</sub> miktarı 244,6 gr azalmaktadır. Çıkan değerlere bakılınca ülkede otobüs taşımacılığı yerine raylı sistem taşımacılığına ağırlık verilmesi gerektiği görülmektedir. Bunun için hükümet gerek kendi gerekse özel sektöre teşvik vererek raylı sistem taşımacılığını arttırması gerekmektedir. Enerjiyi verimli kullanmak çevre kirliliği açısından oldukça mantıklı gözükmektedir [57].

#### **4. RAYLI SİSTEMLERDE ÇEŞİTLİ PARAMETRELERİN ENERJİ VERİMLİLİĞİNE ETKİLERİNİN SİMULASYON YOLU İLE İNCELENMESİ**

Bu çalışmada tramvay sistemi enerji tüketimi ve ardından verimliliği üzerindeki etkileri bir tramvay hattı göz önünde bulundurularak araştırılmıştır. Testlerde kullanılan SimuX simülasyon programı ve kullanılan test sistemi tanıtılmış, ardından da bu parametrelerin enerji tüketimi üzerine etkileri verilmiştir. Son olarak da tramvay ve şehir içi otobüsün maliyet analizleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar en son bölümde özetlenmiştir.

##### **4.1. Raylı Sistem Simülasyon Programı SimuX [58]**

Çok hatlı, çok trenli gerçek sistem modellemeleri oldukça karmaşık olduğu için elle çözümü neredeyse imkânsız kılmaktadır. Günümüzde, doğru analizler ve işletme prosesleri ve bunları etkileyen değişik faktörlerin denemeleri simülasyon programları ile gerçekleştirilebilmektedir. Bunlarla birlikte tren işletmesinin bütün bir hat için bağıl analizleri yapılabilmektedir.

Raylı ulaşım sistemlerinin tasarım ve analizinde simülasyon büyük bir önem taşımaktadır. Simülasyon yardımı ile güç sistemi boyutlandırılabilen, istenilen optimizasyon çalışmaları yapılabilmekte, olası problemler daha sistem inşa edilmeden görülerek çözülmekte ve sonuç olarak maliyette önemli azalmalar sağlanabilmektedir.

Simülasyon çalışmaları planlamanın doğru yapılıp yapılmadığının test edilmesinde ve tasarlanan sistemin optimize edilmesinde önemli bir yer tutar. Bunun dışında hazırdaki bir sistem üzerinde kullanılan araçların değiştirilmesi veya headway (trenler arası süre) zamanın kısaltılması gibi büyük modifikasyonlar yapılacağı zaman da simülasyon yapılmalıdır. Genel olarak bakıldığında simülasyon programlarının şu amaçlarla kullanılabileceği görülür:

- İşletme şartlarında tren performansının belirlenmesi

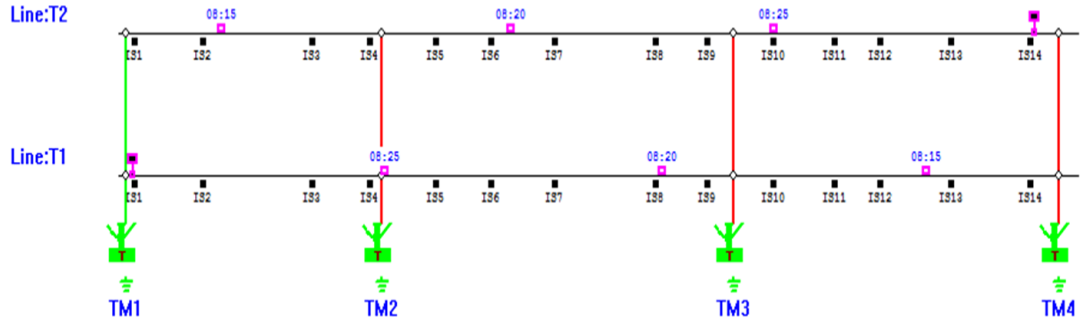
- Transformatör merkezlerinin ve kesicilerin boyutlandırılması
- Katener sisteminin yeterliliğinin saptanması
- Bir trenin pantografındaki maksimum, minimum ve ortalama gerilim değerlerinin bulunması
- Enerji tüketiminin ve kayıplarının saptanması [21, 23]
- Enerji tasarruf programlarının uygulamadan önce test edilmesi [59]
- Ray Gerilimi ve Kaçak akım analizi [60]
- Farklı besleme şekillerinin test edilmesi [21]
- Regeneratif frenlemenin etkisi ve hattın üretilen bu frenleme enerjisini kabul oranının (receptivity rate) belirlenmesi
- Kısa devre akım ve gerilimlerinin analizi
- Araç zaman çizelgelerinin iyileştirilmesi

Yukarıda verilen maddelerden herhangi birinde yapılacak ufak iyileştirmeler dahi çoğu durumda yüz binlerce dolarla ifade edilebilecek maliyet düşümlerine sebep olabilmektedir. Bazı durumlarda ise (ray gerilimi ve kısa devre analizi gibi) hesaplamaların doğru yapılması hayati önem taşımaktadır.

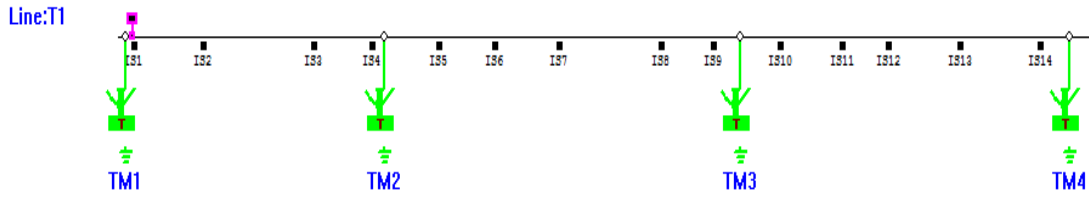
Dünyanın çeşitli ülkelerinde bu konuda simülasyon çalışmaları uzun süredir yapılmakta olup [61, 62] ülkemizde daha önce yapılmış olan çalışmalar [63, 64] daha çok tek aracın (yada dizinin) hareket mekanizmasının simülasyonu ile sınırlı olup tüm sistemi (birden fazla dizi birden fazla yol) ele almamaktadır.

#### **4.2. Sistem Parametreleri**

Bir raylı ulaşım sisteminde birçok bileşen bulunduğu için sisteme ilişkin parametrelerin uygun bir kullanıcı ara yüzü ile alınması olası hataların en aza indirilmesi açısından büyük önem taşır [65]. Geliştirilen SimuX [66] programında tüm sistem parametreleri Visual C++ ortamında geliştirilen ve görselliği üst seviyede olan bir kullanıcı ara yüzü ile sisteme dâhil edilmekte ve mümkün olduğunca, hattın ölçekli şeması üzerinde fare ile etkileşebilecek şekilde temsil edilmektedirler (Şekil 4.1 ve 4.2).



Şekil 4.1. SimuX Ortamında Gidiş ve Dönüşlü Bir Sistemin Temsili



Şekil 4.2. SimuX Ortamında Tek Gidişli Bir Sistemin Temsili

Lines	2	Min. train Voltage [V]	758.30		
Transformers	4	Max. rail Voltage [V]	13.81		
Depots	2	Total vehicle kms	52.29		
Trains	6	Max. Power [kW]	2703.66	Max. RMS Power [kW]:	671.14
Jumpers	0	Energy Withdrawn [kWh]	198.57	Energy per vhc/km :	3.80

SS Feeders:	Iw2 (max):	Ie2 (max):	Ir2 (max):	Iw1 (max):	Ie1 (max):	Ir1 (max):	(+) (max):	(-) (max):
TM1	0.00	443.07	418.01	0.00	539.34	496.84	605.45	605.45
TM2	507.44	641.74	653.06	495.85	579.86	591.52	1018.65	1018.65
TM3	541.24	539.73	674.82	481.38	551.43	571.14	1216.90	1216.90
TM4	535.26	0.00	522.46	574.80	0.00	566.52	708.15	708.15

Transformers	Max Power	L [%]	RMS (1 min)	L [%]	RMS (1 hr)	L [%]	Energy	RMS (user defined)	L [%]
TM1	487.73	65	222.84	30	88.09	12	37.23		140.64
TM2	810.08	108	310.85	41	130.50	17	57.62		210.29
TM3	962.63	128	296.82	40	135.03	18	60.87		218.42
TM4	569.02	76	270.86	36	102.50	14	42.85		165.32

Şekil 4.3. SimuX Ara yüzüne Bir Örnek

Şekil 4.3'teki bazı parametrelerin açıklaması şu şekildedir:

Lines: hat sayısı

Transformers: Transformatör sayısı

Depots: Gar sayısı

Trains: Vagon sayısı

Jumpers: Hattaki paralalleme sayısı

Min. Train Voltage: Minimum tren gerilimi

Min. Rail Voltage: Minimum demiryolu gerilimi

Total vehicle kms: Saatte km başına düşen araç sayısı

Max. Power: Maksimum güç

Energy Withdrawn: Kullanılan enerji

Max RMS Power: Maksimum elde edilebilen ortalama güç

Energy per vhc/km: Kilometre başına her bir aracın enerji tüketimi

TM: Trafo Merkezi

Iw1: 1. Katener Batıdan gelen akım değeri

Iw2: 2. Katener Batıdan gelen akım değeri

Ie1: 1. Katener Doğudan gelen akım değeri

Ie2: 2. Katener Doğudan gelen akım değeri

Ir1: 1. Raydaki akım değeri

Ir2: 2. Raydaki akım değeri

(+): Doğrultucudan gelen akım değeri

(-): Doğrultucuya dönen akım değeri

Max. Power: Maksimum güç

L: Yüklenme

RMS (1 min): Bir dakikadaki ortalama

RMS (1 hr): Bir saatteki ortalama

RMS (user defined): Kullanıcı tarafından tanımlanan ortalama değer

Simülasyon için gerekli olan parametrelerden bazıları üç ana bölüm altında aşağıda listelenmiştir:

Hatlar:

- Hat sayısı, isimlendirmeleri ve metraжі
- Yolcu istasyonları ve bekleme süresi (minimum, maksimum yada ortalama)
- Kurplar (dönüşler)
- Eğimler
- Hız sınırlamaları ve maksimum işletme hızı (gidiş ve geliş yönlerinde farklı olabilir)
- Trenleri hatlara verilip alındığı depolara ilişkin veriler
- Hat üzerinde işleyen dizilere ilişkin veriler (kaçlı dizi, başlangıç ve hedef noktaları, uğranılan istasyon isimleri, TAS gibi)
- Trafik ışıkları ve bunlara bağlı ekipmanlara (örneğin, halkalar) ilişkin veriler Cer Gücü ve Katener Sistemi
- Trafo merkezi sayısı, yerleri ve isimlendirmeleri
- Trafo merkezi iç ekipman değerleri
- (+) ve (-) fider kablolarının ve kesicilerinin özellikleri (kesime gitme akımları, bunların RMS değerleri, her bir kablo için ayrı ayrı bağlantı noktası)
- Trafolar arası izole bölgeler
- Katener sistemi verileri
- Jumper (eş-potansiyel bağlantı) noktaları (Katener sistemi üzerinde ya da raylar üzerinde)

- Ray verileri (her bölge için rayların elektriksel özellikleri, ray toprak arası geçirgenlik dirençleri vb.)
- Topraklama sistemine ilişkin veriler (Topraklama noktaları, bu noktalarda (varsa) kullanılan elektronik ekipmanlara (Rail Potential Control Device – RPCD) ilişkin veriler)

Araçlar:

i. Mekanik veriler

- Araç boyutuna ilişkin veriler
- Araç maksimum hızı
- Araç boş/dolu ağırlık bilgileri
- Maksimum hızlanma ve frenleme ivme değerleri
- Cer kuvveti – Hız diyagramı
- Frenleme kuvveti – Hız diyagramı

ii. Elektriksel veriler

- Nominal, minimum ve maksimum gerilim değerleri
- Yardımcı güç sistemine ait değerler
- Kontrol sistemi verileri
- Hat gerilimi – Cer kuvveti diyagramı

### 4.3 Eğim, Yolcu Sayısı, Rejeneratif Frenleme Enerjisi ve Katener Sisteminin Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkilerinin SimuX ile İncelenmesi

Bu bölümde yapılan simülasyon çalışmalarının tümü İstanbul Hafif Metrosunda kullanılan ABB 'nin ürettiği teknik bilgileri aşağıda verilen bir araçtır.

Manufacturer:	ABB	Type Name:	IST. LRT
<b>Mechanical Properties</b>			
Maximum Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]:	0.7	Maximum Velocity [km/h]:	80
Maximum Deceleration [m/s <sup>2</sup> ]:	1.1	Empty Weight [kg]:	29000
Emergency Brake Deceleration [m/s <sup>2</sup> ]:	1.3	Loaded Weight [kg]:	50200
Front Area [m <sup>2</sup> ]:	8	Rotational Mass Factor [%]:	10
Number of Axles:	6	Number of Seated:	250
Safety Distance [m]:	55	Standing Area [m <sup>2</sup> ]:	0
Length [m]:	23	Comfort Rate [m/s <sup>3</sup> ]:	1
<b>Electrical Properties</b>			
Auxiliary Power [kW]:	27	Minimum Operating Voltage [V]:	525
Allowed Maximum Voltage in Braking [V]:	900	Maximum Operating Voltage [V]:	900
		Nominal Operating Voltage [V]:	750

Şekil 4.4. ABB Tramvay Aracının Teknik Bilgileri

Şekil 4.4'te verilen bilgilerin açıklamaları aşağıda verilmiştir:

Maximum Acceleration: Maksimum hızlanma ivmesi

Maximum Deceleration: Maksimum yavaşlama ivmesi

Emergency Brake Deceleration: Acil durumda frenleme ivmesi

Front Area: Ön kısım yüzölçümü

Number of Axles: Dingil sayısı

Safety Distance: Güvenlik mesafesi

Length: Uzunluk



Maximum Velocity: Maksimum hız

Empty Weight: Aracın boş ağırlığı

Loaded Weight: Aracın dolu ağırlığı

Rotational Mass Factor: Döner kütle oranı

Number of seated: Koltuk sayısı

Standing Area: Ayakta yolcu alanı

Comfort Rate: İvmenin değişimi (jerk rate)

Auxiliary Power: Aracın tahrik edilmesi dışındaki tüm yardımcı güçleri

Allowed Maximum Voltage in Braking: Frenleme esnasında müsaade edilen maksimum gerilim

Minumum Operating Voltage: Minumum işletme gerilimi

Minumum Operating Voltage: Minumum işletme gerilimi

Nominal Operating Voltage: Nominal işletme gerilimi

Burada aracın gidebileceği hız 80km/sa. olmasına rağmen bu hat tramvay hattı olduğu için seçilen maksimum işletme hızı 50km/sa.'dır. Ayrıca boş ağırlık 29000 kg olmasına rağmen yapılan simülasyonlarda döner kütle oranı olan %10, 29000 kg'a ilave edilerek boş değer olarak alınır. Yapılan tüm simülasyon çalışmalarında aracın yardımcı güç tüketmediği varsayılmıştır. Hattın katener sistemi direnci  $6.02e-5$  ohm/m, taşıyıcı ray sistemi direnci ise  $2.06e-5$  ohm/m'dir. Hattın uzunluğu 5570 m. olup durak sayısı ve mesafeleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

Station	
1	: 102 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
2	: 514 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
3	: 1181 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
4	: 1535 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
5	: 1939 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
6	: 2278 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
7	: 2666 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
8	: 3279 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
9	: 3600 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
10	: 4003 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
11	: 4375 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
12	: 4650 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
13	: 5086 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)
14	: 5570 m (line: 1) (L: 23 m, W: 20 - 20 sec)

Şekil 4.5. Simülasyonda kullanılan Hat Bilgileri

Bu hat aktif olarak kullanılacak bir hat olmasına rağmen henüz inşa safhasında olduğundan hattın ismi verilememektedir.

#### 4.3.1 Eğimin Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin SimuX ile İncelenmesi

Bu çalışmada araç tam yüklü olarak (280 yolcu sayısı = 50200 kg.) simülasyon yapılmıştır. Aşağıda belli eğim değerleri için grafikler halinde verilen enerji tüketimleri elde edilmiştir. (Burada araçlar 300 s. aralıklar ile istasyondan çıkış yapmışlardır ve değerler bu tüm araçların tüketiminin ortalamasıdır.) Hat tek gidişlidir.

Tablo 4.1. Çeşitli Eğim Değerlerinde Gidiş Hattı İçin Enerji Tüketim Değerleri

Eğim	Enerji Tüketimi
-%5	0,62 kWh/km
-%4	1,03 kWh/km
-%3	1,66 kWh/km
-%2	2,41 kWh/km
-%1	3,35 kWh/km
%0	4,46 kWh/km
%1	5,78 kWh/km
%2	7,16 kWh/km
%3	8,61 kWh/km
%4	10,04 kWh/km
%5	11,55 kWh/km

Buradan da açıkça görülmektedir ki eğim değeri arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Eğim değerinin -%5'den %5'e çıkması durumunda yani eğimdeki 10 birimlik artışta enerji tüketimi değeri 18,62 kat artmaktadır. Bu da bize eğimin enerji tüketiminde en önemli kıstas olduğunu göstermektedir.

#### 4.3.2 Rejeneratif Frenleme Enerjisinin Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin SimuX ile İncelenmesi

Burada Tablo 4.1'de verilen değerlere ek olarak hat bazı eğim değerleri için gidiş-dönüş yapılarak rejeneratif frenleme enerjisinin, enerji tüketimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Tablo 4.2. İki Farklı Eğim Değerinde Gidiş-Dönüş Hattı İçin Enerji Tüketim Değerleri

Eğim	Enerji Tüketimi
-%2	4,19 kWh/km
%0	3,8 kWh/km
%2	3,96 kWh/km

Tablo 4.1'de -%2 eğimdeki enerji tüketimi 2,41 kWh/km ve %2 eğimdeki enerji tüketimi 7,16 kWh/km'dir. Bunların ortalama değeri 4,785 kWh/km'dir. Tablo 4.2'de bu eğim değerleri için verilen enerji tüketimleri 4,785 kWh/km'den azdır. Sebebi ise rejeneratif frenleme enerjisinin enerji tüketimi üzerindeki olumlu katkısıdır. Burada göz ardı edilmemesi gereken gidişi -%2 olan trenin dönüş eğimi %2 olacaktır. Aynı şekilde gidişi %2 olan trenin dönüş eğimi de -%2 olacaktır. Kat edilen yol her iki çalışmada da birbirine eşittir. Bu iki tablodan yapılan matematiksel işlemler sonucunda rejeneratif frenleme enerjisinin bu eğim değerlerinde %14-15 miktarında etki ettiği görülmektedir.

Tablo 4.2'de verilen %2 ve -%2'nin aynı değerler olmamasının sebebi ise 2 simülasyondaki farklı rejeneratif frenleme enerjilerinin etkileridir.

### 4.3.3 Katener Sisteminin Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin SimuX ile İncelenmesi

Tablo 4.3. Trafo Merkezi Uzaklıkları ve Katener Sistemi Değiştirilerek Trafo Merkezinde Katener Sisteminde Harcanan Enerji

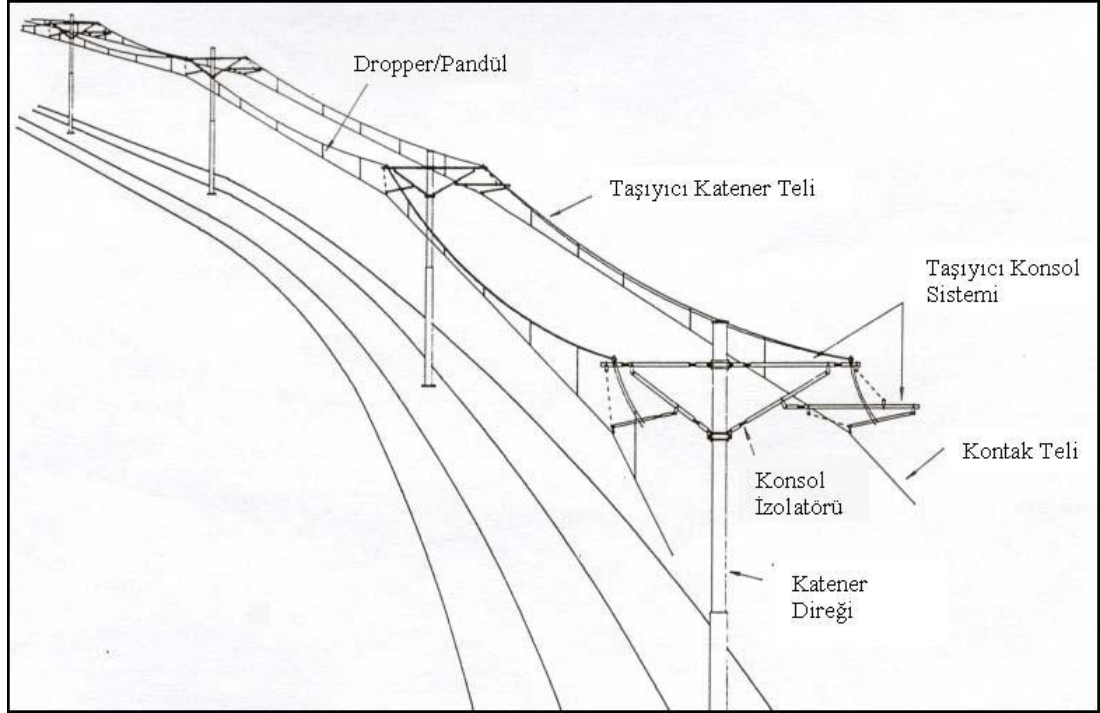
	TM 1500m.	TM 750m.
Tek kontak teli olan katener sistemi (direnci=0,2 ohm/km)	%10,4	%7
Tek kontak teli+ taşıyıcı tel olan katener sistemi (direnci=0,0934 ohm/km)	%5,41	%3,3

Tablo 4.4. Trafo Merkezi Çift Beslemeli Olduğunda ve Katener Sistemi Değiştirilerek Trafo Merkezinde Katener Sisteminde Harcanan Enerji

	Hat Başı ve Hat sonunda İki Adet Trafo Olması Durumunda
Tek kontak teli olan katener sistemi (direnci=0,2 ohm/km)	%4,3
Tek kontak teli+ taşıyıcı tel olan katener sistemi (direnci=0,0934 ohm/km)	%2

Tablo 4.3'te hattın yaklaşık olarak 6 km. olduğu sonucundan yola çıkarak 1500 m. aralıklarla yerleştirilen sistemde dört, 750 m. olan sistemde sekiz adet trafo kullanılmıştır. Tablo 4.4'te ise dört adet trafo kullanılmış olup, hat başı ve hat sonunda iki adet trafo olması durumunda ise çekilen akım ikiye bölündüğünden en düşük kayıp burada elde edilmiştir. Bu değerler sistemin normalde verilen (Hattın katener sistemi direnci  $6.02e-5$  ohm/m, taşıyıcı ray sistemi direnci ise  $2.06e-5$  ohm/m.) değerlerinin değiştirilmesi ile elde edilmiş katener sistemi ve trafo merkezin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini görmek için yapılmış tamamen deneysel sonuçlardır. Sonuçlardan görüldüğü üzere, katenerin cer gücü besleme sistemine

uzaklığına ve direncine bağlı olarak şebekeden çekilen enerjinin %2 - %10,4 arası katener sistemden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.6. Bir Normal Katener Sisteminin Genel Görünüşü [67]

#### 4.3.4 Kişi Sayısının (Ağırlığın) Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin SimuX ile İncelenmesi

Tablo 4.5. Eğimin %0 Olması Durumunda Yolcu Sayısının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisi

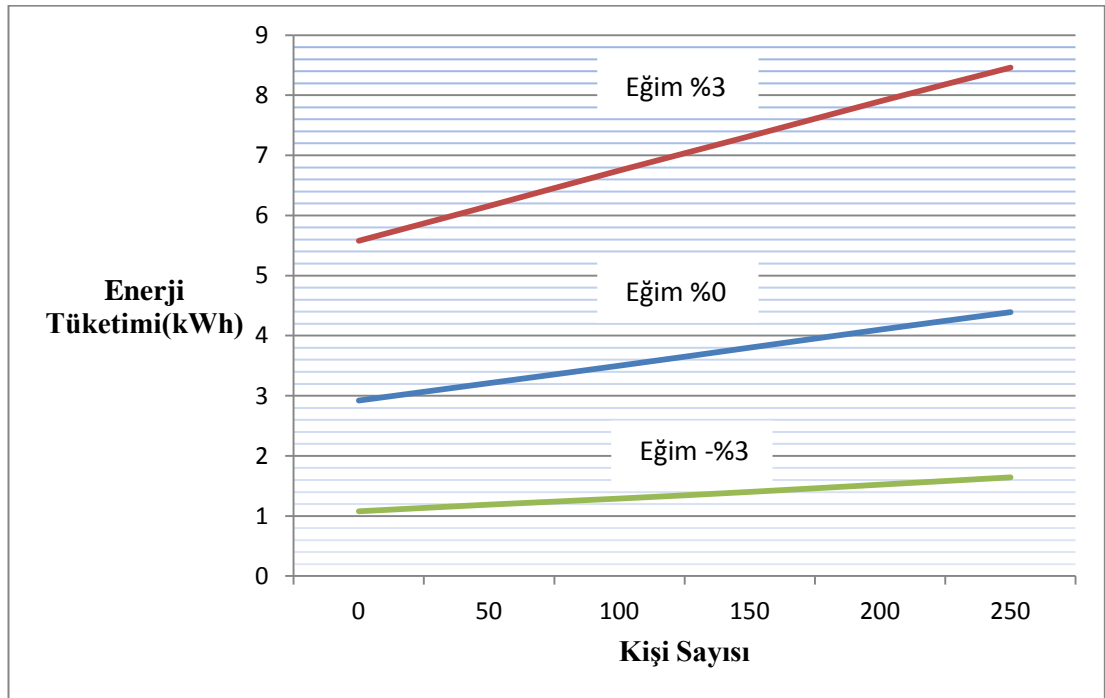
Yolcu Sayısı	Araç Ağırlığı	Araç Ağırlığı Farkı	Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi Farkı
0	31900		2,92	
50	35400	% 11	3,21	%9,93
100	38900	%22	3,5	%19,86
150	42400	%33	3,8	%30,1
200	45900	%44	4,1	%40,4
250	49400	%55	4,39	%50,3

Tablo 4.6. Eğimin %3 Olması Durumunda Yolcu Sayısının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisi

Yolcu Sayısı	Araç Ağırlığı	Araç Ağırlığı Farkı	Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi Farkı
0	31900		5,58	
50	35400	%11	6,16	%10,4
100	38900	%22	6,75	%20,9
150	42400	%33	7,32	%31,2
200	45900	%44	7,9	%41,5
250	49400	%55	8,46	%52

Tablo 4.7. Eğimin -%3 Olması Durumunda Yolcu Sayısının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisi

Yolcu Sayısı	Araç Ağırlığı	Araç Ağırlığı Farkı	Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi Farkı
0	31900		1,08	
50	35400	%11	1,19	%10
100	38900	%22	1,29	%19,4
150	42400	%33	1,4	%29,6
200	45900	%44	1,52	%40,7
250	49400	%55	1,64	%51,8



Şekil 4.7. Farklı Eğim Değerleri ve Kişi Sayıları İçin Enerji Tüketim Miktarları

Tablolardan ve şekilden kişi sayısı (ağırlık) ve eğitim arttıkça enerji tüketiminin arttığı açıkça görülmektedir. Yalnız kişi sayısı arttıkça tüketilen enerji miktarı artmasına rağmen kişi başına tüketilen enerji miktarı azalmaktadır. Eğitim arttıkça kişi sayısının artması, enerji tüketim miktarını daha ivmeli bir şekilde arttırmaktadır.

#### **4.4 Tramvay ve Şehir içi Otobüs Yolcu Taşıma Şekillerinin Enerji Verimliliği Açısından Kıyaslanması**

Burada daha önce tramvayda yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda bulunan enerji tüketim değerleri ile otobüsün enerji tüketim değerleri ve kişi başı maliyetleri karşılaştırılmıştır. Burada yapılan kabuller şunlardır:

- Araçlar eğimsiz bir yolda seyahat etmektedir.
- Araçların yardımcı enerji tüketimleri sıfırdır.
- Her iki araçta tam kapasiteyle yüklenmiştir.
- Kat ettikleri mesafe eşit ve 5570 m. 'dir.
- Otobüsün 14 ayrı istasyonda durup-kalkarken enerji tüketimi sıfırdır.

Otobüsün yolcu taşıma kapasitesi 102 kişi olup en iyi şartlarda motorin kullanım miktarı 0,35 lt/km'dir [68].

Daha önce yapılan simülasyon çalışmalarından tramvayın enerji tüketimi 4,46 kWh/km olduğu Tablo 4.1'den görülmektedir.

Buradan bir maliyet hesabı yapıldığında:

Tramvay için:

$$4,46 \text{ kWh/km} \times 5,570 \text{ km} = 24,8422 \text{ kWh}$$

$$24,8422 \text{ kWh} \times 19,284 \text{ krş/kWh}[69] = 479 \text{ kuruş} = 4,79 \text{ lira}$$

$$\text{Kişi başı maliyeti} = 4,79 \text{ lira} \div 280 \text{ kişi (tamamı oturarak)} = 0,0171 \text{ lira/kişi}$$

Şehir içi Otobüs için:

$$0,35 \text{ lt/km} \times 5,570 \text{ km} = 1,9495 \text{ lt}$$

$$1,9495 \text{ lt} \times 3,92 \text{ lira}[70] = 7,642 \text{ lira}$$

$$7,642 \text{ lira} \div 102 \text{ kişi (21 oturarak + 81 ayakta)} = 0,0749 \text{ lira/kişi}$$

Yapılan maliyet analizleri sonucunda tramvay için kişi başi maliyet 1,71 kuruş iken bu değer şehir içi otobüs için 7,49 kuruştur, yani 4,38 katıdır. (Alt yapı üst yapı maliyetleri inşaat mühendisliğinin alanına girmesi sebebiyle hesaba dâhil edilememiştir.)



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ulaşım sektörü enerji kaynağı olarak maddi ve imkân yetersizliği sebebiyle genelde fosil yakıtlara dayanmaktadır. Bunun sonucu olarak enerji verimliliği ve salınımları ayrı konular gibi düşünmek bir hata olur. Enerji kullanımı bunların dışında çevre dengesinin bozulması gibi her bireyin kendisini sorumlu hissetmesi gerektiği, ulaşım sektöründe enerji tüketiminin hem ekonomik ve hem de çevre dostu politikalar ile gözden geçirilmeye ihtiyaç duyduğunu gözler önüne sermektedir.

Bu tezde ilk önce enerji verimliliği anlatılmış ardından Türkiye'nin enerji durumuna ve son olarak da Türkiye'nin ulaşımındaki enerji durumuna değinilmiş ve görülmüştür ki; artan temiz enerji ihtiyacına rağmen Türkiye ulaşımının sadece % 2,8 'ni raylı tip taşımacılık ile yapmaktadır.

Bu sebeple İstanbul'da otobüs yerine raylı sistemin tercih edilmesi sonucunda hesaplamalar sonucunda İstanbul'da şehir içi insan taşımacılığında otobüs yerine raylı sistemin tercih edilmesinin, kişi başına düşen CO<sub>2</sub> miktarını yakıt tipi kömür dahi olsa 244,6 gr azalttığı gözlenmiştir.

İsmi henüz inşa aşamasında olduğu için verilemeyen bir tramvay hattı için gerçek verilerle SimuX ile yapılan simülasyonlar sonucunda araçlardaki kişi sayısı (tren ağırlığı) enerji tüketiminin doğrusal olduğu görülmektedir. Yeni alınacak araçlarda bu konu mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Fakat işletme açısından önemli parametrelerden biri olan kişi başına enerji tüketiminde araçların belirli bir doluluk oranına sahip olması gerektiği de bilinmektedir.

Daha sonra SimuX simülasyon programı kullanılarak yapılan çalışmada eğim değerinin -%5'den %5'e çıkması durumunda yani eğimdeki %10'luk artışta enerji tüketimi değeri 18,62 kat arttığı görülmüştür. Rejeneratif frenleme enerjisinin etkisinin ise test eğim değerlerinde %14-15 gibi bir kazanç sağladığı hesaplanmıştır. Rejeneratif frenleme enerjisi esnasında araç hız ve ivmeleme ihtiyacına göre nerede rejeneratif frenleme enerjisi kullanacağına veya kullanmayacağına nerede mekanik

nerede elektriksel frenleme yapacağına kendi iç donanımları sayesinde karar verdiği için bu esnadaki hızını bilmek mümkün değildir. Eğimin %3-6 olduğu bir yolda katenerin cer gücü besleme sistemine uzaklığına ve direncine bağlı olarak trafo merkezindeki kayıpların %2 ila %10,4 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Kişi sayısı (ağırlık) ve eğim arttıkça enerji tüketiminin arttığı açıkça görülmektedir. Bunların haricinde kişi sayısı arttıkça tüketilen enerji miktarı artmasına rağmen kişi başına tüketilen enerji miktarı azalmakta ve eğim arttıkça kişi sayısının artması, enerji tüketim miktarını daha ivmeli bir şekilde arttırdığı şekil ve grafiklerden görülmektedir. Son olarak da tramvay ve şehir içi otobüsün yolcu taşıma maliyet analizlerinde tramvayın kişi başına maliyeti otobüsten 4,38 kat daha ucuz olduğu hesaplamalar sonucunda ortaya çıkmıştır.

Enerjinin dünyada ve ülkemizde bu kadar önem kazandığı şu günlerde enerjiyi verimli kullanmak en önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir. Bu amaçla stratejik seviyede enerji politikaları belirlenerek, bu politikaya uygun teknik çözümler üretilmeli, verimlilik uygulamaları gerçekleştirilmelidir. Enerji verimliliğinin en önemli ayaklarından biri de ulaşımdır.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde ise tüm şartlar göz önünde bulundurularak, enerji verimliliği, çevre kirliliği ve maliyet açısından hangi taşımacılığın tercih edilmesi gerektiği ile ilgili bir yazılım programı tasarlanabilir. Ayrıca raylı sistem ulaşımında enerji tüketimine etki eden parametrelerin enerji açısından nasıl daha tasarruflu hale getirilebileceği araştırılabilir.

Verimli toplu taşıma tipini kullanmak ve hangi taşıma şekli olursa olsun verimliliği arttırmak için yapılacaklar öncelikle insanımıza daha sonra ülkemize ve son olarak da dünyamıza yapılacak en büyük iyilik olduğunu yapılan çalışmalar açıkça göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Ahrens C.D., Meteorology Today, Editors: Ahrens C.D., Perlee S., *An Intoduction to Weather, Climate and the Enviroment*, 3rd Edition, West Publishing Com., 581, 1988.
- [2] Dehnez F., *Küresel Isınma Atlası*, 1. Baskı, NTV Yayınları, İstanbul, 2007.
- [3] URL-1: <http://mevzuat.dpt.gov.tr/kanun/5627.html> (Ziyaret tarihi 16 Nisan 2012).
- [4] URL-2: <http://www.tecrec-rail.org> (Ziyaret tarihi 16 Nisan 2012).
- [5] URL-3: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf> (Ziyaret tarihi 16 Nisan 2012).
- [6] EİE Genel Müdürlüğü, Enerji Çevre-Hukuki Zorluklar-Emisyon Hesaplamaları, EİE Genel Müdürlüğü Editörlüğü, *EİEİ Bina Enerji Yöneticileri Eğitimi Cilt 1*, 13-16, 2008.
- [7] URL-4: <http://www.enerji.gov.tr> (Ziyaret tarihi 10 Nisan 2012).
- [8] URL-5: <http://www.dpt.gov.tr> (Ziyaret tarihi 10 Nisan 2012).
- [9] Accardo L., Energy saving onboard, *Energy Efficiency Days7 2009*, France, 2009.
- [10] Gunselmann W., Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems, *Power Electronics and Applications 2005 European Conference*, Dresden, Germany, 2005.
- [11] **Deutsche Bahn AG., Umweltbericht, 2000.**
- [12] Kılıç B., Tuna S., Yağcıtekin B., Metropolitan Raylı Sistemlerde Enerji Yönetimi, *2.Ulusal Enerji Verimliliği Forumu*, İstanbul, Ocak 2011.
- [13] Ho T.K., Chi Y.L., Wang J., Leung K.K., Load flow in electrified railway, *IEEE 2nd Int. Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 2004, 2, 498-503.
- [14] URL-6: <http://www.uitp.org> (Ziyaret tarihi 10 Nisan 2012).
- [15] URL-7: <http://www.letsconserve.org> (Ziyaret tarihi 16 Nisan 2012).

- [16] Weigel W.D., Modeme Drehstromantriebstechnik Stand und Perspektiven, *IZEV Glasers Annalen*, 2002, **126**, 112.
- [17] ATOC, Energy Efficiency for Railway Managers, Editors: Bontinck W., Cox H., *Process, Power, People*, 1nd edition, UIC, Paris, 20-56, 2008.
- [18] URL-8: <http://www.iee.trainer.eu> (Ziyaret tarihi 18 Mayıs 2012).
- [19] URL-9: [http://www.uic.org/download.php/environnement/energy\\_EVENT.pdf](http://www.uic.org/download.php/environnement/energy_EVENT.pdf) (Ziyaret tarihi 18 Mayıs 2012).
- [20] Arlı V., Kent içi Raylı Sistemler, *Teknik*, 2010, **2**, 15-18.
- [21] Açıkbaş S., Söylemez M.T., Energy loss comparison between 750 V DC and 1500 V DC power supply systems using rail power simulation, *Istanbul Municipality*, Istanbul, Turkey, 2005.
- [22] URL-10: <http://www.epdk.gov.tr> (Ziyaret tarihi 15 Nisan 2012)
- [23] Açıkbaş S., ve Söylemez M.T., Raylı toplu taşımada enerji verimliliği ve katener sistemlerinin paralellenmesi, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, 2005.
- [24] Suzuki T., DC Power Supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes, *IEE Proc*, 1982, **129**, 18-26.
- [25] Forsythe J.B., Lihgt rail/rapid transit:A new approaches for the evaluation of energy saving, Editors: Forsythe J.B., *Part II-on the receptivity of a transit system*, 1nd edition, IEEE Trans, USA, 665-678, 1980.
- [26] Coquery G., Electrical Energy saving for urban and suburban guided transport system, *2nd UIC Railway Energy Efficiency Conference*, Paris, 4-5 February 2004.
- [27] Lehmann H., Hauser A., Mehrverbrauch im Eisenbahnbetrieb - Ursachen und Ermittlung, *ZEVrail Glasers Annalen*, 2002, **126**, 41.
- [28] Albrecht T., Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control, Editors: Brebbia C.A.,Allan J., Sciutto G., *Computers in Railways*, 9nd ed., WIT Press, Newyork, 100-114, 2004.
- [29] URL-11: [http://www.uitp.org/eupolicy/positions/2006/03/Climate\\_Change\\_EN](http://www.uitp.org/eupolicy/positions/2006/03/Climate_Change_EN) (Ziyaret tarihi 15 Eylül 2012).
- [30] Gunselmann W., Godbersen C., Double-layer capacitors store surplus braking energy, *Railway Gazette International*, 2001, **1**, 581.

- [31] Albert H., Levin C., Vietrose E., Witte G., Reducing energy consumption in underground systems, *Internationals Metropolitan Railways Comitte*, UITP, September 1995.
- [32] Rufer A., Power electronic interface for a supercapacitor based energy storage substation in DC transportation networks, *EPE 2003*, Toulouse, 2003.
- [33] Steiner M., Scholten J., Energy Storage On Board Of DC Fed Railway Vehicles, *PESC 2004 Conference*, Aachen, Germany, 2004.
- [34] URL-12: <http://www.railway-energy.org> (Ziyaret tarihi 15 Nisan 2012).
- [35] Barrero R., Mierlo J.V., Tackoen X., Supercapacitors on-board light rail vehicles: enhanced energy storage systems for improved vehicle efficiency, *Proc. IEEE/ASME Joint Rail Conference*, Wilmington, April 2008.
- [36] Wong K.K., Ho T.K., *Coast control of train movement with genetic algorithm*, 1nd edition, IEEE Conference Publications, Newyork, 2003.
- [37] Samineni S., Johnson B. K., Hess H. L., Law J. D., Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storage System with a Power Converter Interface, *IPST 2003*, New Orleans, 2003.
- [38] Alstom, Rotterdam Demonstration of Flywheel Test, September 2005.
- [39] Iannuzzi D., (IEEE Member) Improvement of the Energy Recovery of Traction Electric Drives using Supercapacitors, *Electrical Engineering Department*, Naples, Italy, 2008.
- [40] Pagiela S., Steiner M., Klohr M., Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles, *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Danimarka, 2007.
- [41] Steiner M., Klohr M., Pagiela S., Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles, *Power Electronics and Applications 2007 European Conference*, Aalborg, Danimarka, 2007.
- [42] Gordon S.P., Rorke W.S., Energy Storage and Alternatives to Improve Train Voltage on a Mass Transit System, *Sandia National Labs*, Albuquerque, April 1995.
- [43] Kumbaroğlu G., Arıkan Y., Türkiye'nin CO<sub>2</sub> Salımları, *Açık Toplum Vakfı*, İstanbul, 2009.
- [44] Barrero R., Mierlo J. V., Tackoen X., Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network, *VPPC IEEE*, 2008.

- [45] Hull G.J., Simulations of Energy Efficiency Improvements on Commuter Railways ,Msc Thesis,The University of Birmingham, Electrical Engineering, Birmingham, 2009.
- [46] URL-13: <http://www.en-standard.eu/en-50463-railway-applications> energy measurement-on- board-trains (Ziyaret tarihi 15 Nisan 2012).
- [47] Deutsche Bahn AG, Evaluation of energy efficiency technologies for rolling stock and train operation of railways, *UIC*, Berlin, March, 2003.
- [48] URL-14: <http://www.worldenergyoutlook.org> (Ziyaret tarihi 15 Nisan 2012).
- [49] URL-15: [http://www.enerji.gov.tr/yayinlar\\_raporlar](http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar) (Ziyaret tarihi 15 Mart 2012).
- [50] Sussmann J. S., Perspectives on Intelligent Transportation Systems, 1nd edition, *Springer*, 232, New York, 2005.
- [51] İstanbul Ulaşım a.ş. (Görüşme tarihi 10 Nisan 2012).
- [52] URL-16: <http://www.İETT.gov.tr> (Ziyaret tarihi 15 Nisan 2012).
- [53] Kraut R. E., Energy Technology Life Cycle Analysis that Takes CO<sub>2</sub> Emmision Reduction into Consideration, *Central Research Institute of Electric Power Industry*, 2-11-1, 1-3, 1995.
- [54] Doneset R., Greenhouse Gas Emmisions From Energy Systems: Comparasion and Overview, *Paul Scherrer Institut Annual Report 2003*, ISSN 1423-7261, 38, 2003.
- [55] Spadaro J.V., Greenhouse Gas Emmisions of Electricity Generation Chains: Assessing the Difference, *IAEA Bulletin 42/2/2000*, page 21, 2000.
- [56] AEA Technology, Enviromental Product Declaration of Electricity from Torness Nuclear Power Station, *British Energy*, 222, 1-52, May 2005.
- [57] Sertsoz M., Kuşdoğan Ş., Altuntaş Ö., Energy Efficiency In Rail Systems And Comparison Between Rail System In Istanbul And Bus Transportation In Terms Of Carbondioxide (CO<sub>2</sub>) Emission, *GCGW 2012*, 1464-1475, İstanbul, Türkiye.
- [58] Açıkbaz S. Çok Hatlı Çok Araçlı Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 252365.
- [59] Açıkbaz S., Söylemez M.T., Energy wise driving of a mass transit train, *5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey, 2007.

- [60] Söylemez M.T., Açıkbaş S., Kaypmaz A., Controlling rail potential of DC supplied rail traction systems, *Tübitak Elektrik Journal ELECO 2005 Special Edition*, 2005, **1**, 1-10.
- [61] Mellit B., Goodman C. J., Arthurton. R. I. M., Simulator for studying operational and power-supply conditions, *Institution of the Electrical Engineers*, **4**, 298-403,1978.
- [62] Yu D., Lo K. L., Wang X., MRTS traction power supply system simulation using Matlab/Simulink, *Vehicular Technology Conference*, Birmingham, 2002.
- [63] Kurtulan S., Bir elektrikli ulaşım sisteminin modellenmesi ve simülasyonu, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1992, 22030.
- [64] URL-17: [http://www.emo.org.tr/ekler/f504658ddff2e41\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/f504658ddff2e41_ek.pdf) (Ziyaret tarihi 15 Eylül 2012).
- [65] Söylemez M. T., Açıkbaş S., Multi-train simulation of DC rail traction power systems with regenerative braking, Editor: Allan J.J., *Computers in Railways IX*, 1nd edition, WIT Press, Boston, 941-950, 2004.
- [66] URL-18: <http://www.simulatorx.com> (Ziyaret tarihi 15 Eylül 2012).
- [67] Edwards C., LRT İstanbul specification of overhead contact system, *Design and installation document*, 123, 1-18, 1992.
- [68] URL-19: [http://tr.wikipedia.org/wiki/Ikarus\\_260](http://tr.wikipedia.org/wiki/Ikarus_260) (Ziyaret tarihi 15 Eylül 2012).
- [69] URL-20: <http://www.epdk.gov.tr> (Ziyaret tarihi 15 Eylül 2012).
- [70] URL-21: <http://www.opet.com> (Ziyaret tarihi 15 Eylül 2012).

## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Sertsöz M.**, Kuşdoğan Ş., Altuntaş Ö., Energy Efficiency in Rail Systems and Comparison Between Rail System in İstanbul and Bus Transportation in Terms of Carbondioxide (CO<sub>2</sub>) Emission, *GCGW 2012*, İstanbul, Türkiye, 8-12 Haziran 2012.
- [2] **Sertsöz M.**, Kuşdoğan Ş., Raylı Sistemlerde Yolcu Sayısının Enerji Tüketimine ve CO<sub>2</sub> alınımına Etkileri *Eleco 2012*, Bursa, Türkiye, 29 Kasım-1 Aralık 2012.



## **ÖZGEÇMİŞ**

Kasım 1984'te Bilecik'in Pazaryeri ilçesinde doğdu. İlkokulu Pazaryeri'nde, ortaokulu Pazaryeri Anadolu Lisesinde tamamladı. Daha sonra lise eğitimine Kütahya Fen Lisesi'nde devam etti. Üniversite eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliğinde başlayarak 2008 yılında tamamladı. Anadolu Üniversitesi'nde mesleğine bina enerji yöneticisi ve açık öğretim kitap yazarı olarak devam etmekte olup, evli ve bir çocuk annesidir.