

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ŞEHİR İÇİ RAYLI SİSTEM İŞLETİMİNDE REJENERATİF FRENLEME
ENERJİSİNİN KULLANIMI VE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Saim BARAN
(504071015)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 04 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Deniz YILDIRIM (İTÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmam sırasında bana göstermiş oldukları sabır, destek ve cesaretlendirmelerden ötürü aileme teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmam sırasında da vermiş olduğu tam destekten dolayı Danışmanım ve kıymetli büyüğüm Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN’a teşekkürü bir borç bilirim.

Göstermiş oldukları destek ve hoşgörü ile bu çalışmanın sonuçlandırılmasını sağlayan tüm İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistem Müdürlüğü üst yönetimine ve çalışma arkadaşlarıma da teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2009

Saim BARAN
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNZÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Raylı Sistemlerde Kullanılan Gerilim Seviyeleri.....	2
1.2 İstanbul'daki Raylı Sistem Hatları ve Enerji Tüketimleri.....	4
1.2.1 Şişhane - Atatürk Oto Sanayi metro hattı.....	5
1.2.2 Aksaray-Havalimanı metro hattı.....	6
1.2.3 Kabataş-Bağcılar tramvay hatları.....	6
1.3 İstanbul Raylı Sistem Hatlarının Enerji Tüketimleri.....	6
1.4 Frenleme Çeşitleri.....	7
1.4.1 Regeneratif frenleme enerjisinden faydalanma oranını artırma.....	10
2. RAYLI SİSTEMLERDE REJENERATİF ENERJİ ELDE EDİLİMİ.....	13
2.1 İstasyonlarda Enerjinin Tüketimi.....	13
2.1.1 Orta gerilim panosu.....	17
2.1.2 Transformatörler.....	19
2.1.2.1 Çekirdek kısmı.....	20
2.1.2.2 AG sargı kısmı.....	20
2.1.2.3 YG sargı kısmı.....	20
2.1.3 DC şalt panosu ve doğrultucu grubu.....	21
2.1.4 Enerji iletim sistemleri.....	26
2.1.4.1 Üçüncü ray sistemi.....	27
2.1.4.2 Rijit katener sistemi.....	29
2.1.4.3 Normal kataner sistemi.....	30
2.1.4.4 APS (Otomatik Güç Kaynağı) sistemi.....	32
2.2 Raylı Sistem Aracındaki Enerji Tüketimi.....	33
2.2.1 Ana şalter (MS).....	36
2.2.2 Ana bağlantı kesme şalteri.....	36
2.2.3 Ana sigortası (MF), kuplaj sigortası (BF).....	36
2.2.4 Yüksek hızda devre kesici (HSCB).....	36
2.2.5 Hat kontaktörleri (LB/CHK).....	37
2.2.6 Filtre reaktörü (FL).....	37
2.2.7 Fren rezistörü(DBRe).....	37
2.2.8 Filtre kondansatörü(FC).....	38

2.2.9 Elektrik gücü modülü (PEM).....	38
2.2.10 Akım transdüseri (BCCT).....	39
2.2.11 Potansiyel transdüseri(DCPT).....	39
2.2.12 Cer motorları.....	39
3. RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ TASARRUFU İÇİN ALINMASI	
GEREKEN DİĞER TEDBİRLER.....	41
3.1 Yardımcı Servislerin Beslenme Sistemlerinde Yapılabilecek	
Değişiklikler.....	41
3.2 Cer Gücü Beslenme Sistemlerinde Yapılabilecek Değişiklikler.....	41
3.3 Besleme Gerilim Seviyesi Olarak 1500 VDC Seçilmesi.....	42
3.4 Enerji Depolama Sistemleri.....	42
3.4.1 Bataryalar (Akümülatörler).....	44
3.4.2 Çift katmanlı kapasitörler (Ultrakapasitörler).....	44
3.4.3 Flywheel (Volan).....	46
3.5 Araç Üstü Enerji Depolamanın Avantajları.....	47
3.5.1 Gerilim düşümünün azaltılması.....	47
3.5.2 Trafo merkezlerinden talep edilen tepe güç değerinin	
düşürülmesi.....	47
3.5.3 Katenersiz çalışma olanağının elde edilmesi.....	47
3.6 Enerji Verimli Sürüş Yöntemleri.....	48
3.6.1 Optimum enerji tasarrufu hız profili.....	49
3.6.2 Manuel sürüş prosedürleri.....	50
3.6.3 Otomatik sürüş prosedürleri.....	50
3.7 Tren Sürüş Kontrol ve Enerji Yönetim Stratejileri.....	51
3.7.1 Sabit ve hareketli blok sinyalizasyon sistemleri.....	51
3.7.2 HB kontrol ve koruma prensibi.....	52
3.7.3 HB’lu sistemin performans faydaları.....	52
3.7.4 HB sinyalizasyon sisteminde dikkat edilmesi gereken hususlar.....	52
4. RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİ EDEN BAZI	
PARAMETRELERİN SİMULASYON YOLU İLE İNCELENMESİ.....	55
4.1 Test Hattı: Aksaray – Havalimanı Metro Hattı.....	55
4.2 Raylı Sistem Simülasyon Programı RAILSİM.....	56
4.2.1 Sistem parametreleri.....	58
4.2.1.1 Hat ile ilgili gerekli veriler.....	58
4.2.1.2 Cer gücü ve enerji iletim sistemi ile ilgili veriler.....	58
4.2.1.3 Araçlar.....	59
4.3 Enerji Tüketimine Etki Eden Ana Parametrelerin İncelenmesi.....	60
4.3.1 İşletme sıklığının etkisi.....	60
4.3.2 Tren ağırlığının etkisi.....	61
4.3.3 Hızlanma ivmesinin etkisi.....	63
4.3.4 Frenleme ivmesinin etkileri.....	64
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İUAŞ	: İstanbul Ulaşım San ve Tic AŞ
İETT	: İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	: Uluslararası Demiryolu Birliği
UITP	: Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği
NFPA	: Amerikan Ulusal Yangın Koruma Ajansı
LRT	: Hafif Raylı Sistem
APS	: Otomatik Güç Kaynağı
MS	: Ana Şalter
MDS	: Ana Bağlantı Kesme Şalteri
MF	: Ana Sigorta
BF	: Kuplaj Sigortası
HSBC	: Yüksek Hızda Devre Kesici
LB/CHK	: Hat Kontaktörleri
FL	: Filtre Reaktörü
DBRe	: Fren Rezistörü
FC	: Filtre Kondansatörü
PEM	: Elektrik Gücü Modülü
BCCT	: Akım Transdüseri
DCPT	: Potansiyel Transdüseri
TM	: Trafo Merkezi
TAS	: Trenler Arası Süre
ATO	: Otomatik Tren İşletimi
ATC	: Otomatik Tren Kontrolü
ATP	: Otomatik Tren Koruma
SB	: Sabit Blok
HB	: Hareketli Blok

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: EN 50163'e göre elektrikli demiryollarında gerilim seviyeleri.....	2
Çizelge 1.2: Hatların 2004–2008 yıllarındaki ortalama aylık enerji tüketimleri.....	6
Çizelge 2.1: Ana şalter konumları.....	36
Çizelge 4.1: 4'lü tren seti için değişik tas(trenler arası süre) deki talep ettiği enerji ve bu enerjinin rejeneratif enerjiye dönüşen kısmı.....	60
Çizelge 4.2: Farklı hızlanma ivmeleri için enerji tüketimi ve tur süresi.....	62
Çizelge 4.3: Farklı hızlanma ivmeleri için enerji tüketimi.....	63
Çizelge 4.4: Farklı frenleme ivmeleri için enerji tüketimi.....	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: İstanbul'un raylı sistemler haritası (Şubat 2009).....	5
Şekil 1.2: Raylı sistem hatlarının aylık enerji tüketimleri (2006).....	7
Şekil 1.3: Frenleme çeşitleri.....	8
Şekil 1.4: Elektriki frenleme çeşitleri.....	9
Şekil 1.5: Frenleme durumunda rejeneratif enejinin elde edilimi.....	10
Şekil 1.6: Frenleme enerjisinin kullanımı ve diğer enerji tüketimleri.....	11
Şekil 2.1: İstanbul metrosu enerji besleme sistemi.....	14
Şekil 2.2: Şişhane istasyonu enerji besleme sisteminine ait SCADA ekranı görünümü.....	16
Şekil 2.3: Orta gerilim panosunun bölümleri.....	17
Şekil 2.4: Siemens Simoprime serisine ait orta gerilim panosunun yandan görünümü.....	18
Şekil 2.5: Kablo bağlantısı bölümü.....	18
Şekil 2.6: Kesici hücresi.....	18
Şekil 2.7: Bara bağlantısı bölümü.....	19
Şekil 2.8: Alçak gerilim dolabı bölümü.....	19
Şekil 2.9: İstanbul metrosunda kullanılan kuru tip trafonun iç yapısı.....	20
Şekil 2.10: Siemens'e ait Geafol model trafolardaki alçak gerilim ve yüksek gerilim sargı yapıları.....	21
Şekil 2.11: 12 darbeli doğrultucunun prensip çizimi.....	22
Şekil 2.12: Diyot grubunun önden görünümü.....	22
Şekil 2.13: Doğrultucu dolabının dizaynı.....	23
Şekil 2.14: CER besleme merkezi.....	24
Şekil 2.15: Siemens'e yüksek hızlı DC kesicisi panosunun ve kesici arabasının görünümü.....	25
Şekil 2.16: Siemens'e yüksek hızlı DC kesicisi arabasının yandan görünümü.....	25
Şekil 2.17: Siemens'e DC şalt panosu örneği.....	26
Şekil 2.18: Raylı sistemlerde enerji iletim sistemleri.....	27
Şekil 2.19: 3. ray sistemi uygulamaları	27
Şekil 2.20: İstanbul metrosunda korumalı üstten temaslı uygulamalı 3. ray sistemi	28
Şekil 2.21: Rijit katener sistemi.....	29
Şekil 2.22: Bir normal katener sisteminin genel görünüşü.....	31
Şekil 2.23: Bordo şehrinde innorail uygulaması.....	32
Şekil 2.24: Innorail sisteminin besleme şekli.....	33
Şekil 2.25: Şişhane istasyonu'na ait cer gücü besleme sisteminin OG panosu ile 3. ray arasındaki enerji akışı görselinin SCADA Ekranındaki Görünümü.....	34
Şekil 2.26: İstanbul metro projesi kapsamında kullanılmaya başlayan Hyundai- Rotem firmasına ait metro araçlarının elektrik devre şeması.....	35

Şekil 2.27: Yüksek hızda devre kesici.....	37
Şekil 2.28: Fren rezistörü.....	38
Şekil 2.29: Hyundai-Rotem metro araçlarında kullanılan cer motoru.....	40
Şekil 3.1: Araç üstü enerji depolama örneği.....	43
Şekil 3.2: Araç üstü enerji depolama sisteminin genel mantığı.....	43
Şekil 3.3: Farklı enerji depolama ortamları.....	44
Şekil 3.4: Tekli ve çoklu ultrakapasitörlerin görünümü.....	45
Şekil 3.5: Yalnız fren rezistörü bulunan araçtaki enerji tüketimi ve hız grafiği.....	45
Şekil 3.6: Ultrakapasitör kullanılan aracın enerji tüketimi ve hız grafiği.....	45
Şekil 3.7: Ultrakapasitör kullanılan ve kullanılmayan hatlardaki akım–zaman grafiği ve gerilim-zaman grafiği.....	46
Şekil 3.8: Volan kesiti.....	46
Şekil 3.9: Erken veya gecikmeli kalkışların enerji tüketimine etkisi.....	49
Şekil 4.1: RAILSİM arayüzüne bir örnek.....	56
Şekil 4.2: RAILSİM’e ait araç kütüphane arayüzü.....	58
Şekil 4.3: Değişik TAS süreleri için enerji talebi ve rejeneratif enerji grafikleri.....	61
Şekil 4.4: Farklı yolcu sayıları için enerji tüketimi ve tren ağırlığı grafikleri.....	62
Şekil 4.5: Farklı hızlanma ivmeleri için enerji talebi ve rejeneratif enerji grafikleri.....	64
Şekil 4.6: Farklı frenleme ivmeleri için enerji talebi ve rejeneratif enerji grafikleri.....	65

ŞEHİR İÇİ RAYLI SİSTEM İŞLETİMİNDE REJENERATİF FRENLEME ENERJİSİNİN KULLANIMI VE ANALİZİ

ÖZET

Enerji kaynaklarının tehlike sınırına dayandığı dünyamızda ve gerekli altyapı yapılamadığından önümüzdeki yıllarda talebi karşılamakta güçlük çekebilecek ülkemizde enerjinin doğru kullanımı büyük önem arz etmektedir.

Araştırmalar göstermiştir ki, raylı sistem hatları uzun olan şehirlerdeki işletmeci firmalar, tükettikleri enerji açısından o şehrin elektrik dağıtım şirketinin en büyük müşterileridir. Bu bakımdan, raylı sistem işletmecileri tarafından enerji ile yapılacak optimizasyon çalışmaları, çok büyük oranlarda enerji tasarrufuna sebep olacaktır. Bu sayede, hem işletme için daha karlı olacaktır, hem de küresel ısınmanın etkilerinin daha çok hissedildiği günümüzde çevreye büyük fayda sağlayacaktır.

Tezde, İstanbulda İstanbul Ulaşım A.Ş. (İUAŞ) tarafından işletilen raylı sistem hatlarındaki enerji verileri ve enerji tüketim seviyeleri gösterilmiştir. Gerekli koşulların sağlanması durumunda bu tüketimi etkileyecek en önemli parametrelerden biri olan rejeneratif frenlemenin oluşumu ve hatta etkisi sunulacaktır.

Bunun dışında, rejeneratif frenlemeden elde edilecek frenleme enerjisinin oluşumu ile ilgili, bölgesel elektrik dağıtım firmasından alınan enerjinin istasyon içerisindeki elektrik ekipmanlarından enerji iletim sistemlerine ve buradan da İstanbul metrosunda 2009 yılı itibari ile kullanımına başlanan Hyundai-Rotem metro araçlarındaki motorlarda frenleme yapana kadar izlediği yol ve bu enerjinin rejeneratif enerjiye dönüşümü gösterilecektir.

Ayrıca, şehir içi raylı sistem işletmeciliğinde enerji tasarrufuna etki eden diğer yöntemler incelenecek olup, sistemdeki hangi parametrelerin rejeneratif enerjiyi nasıl etkilediği detaylı bir şekilde savunulacaktır.

Son olarak, rejeneratif enerjiye etki eden parametrelerin raylı sistem simülasyon yazılımı ile analiz edilip sonuçları değerlendirilecektir.

THE USAGE AND ANALYSIS OF REGENERATIVE BRAKING ENERGY IN THE URBAN RAIL SYSTEM OPERATION

SUMMARY

Using the energy effectively is crucial in our world of which energy supplies are nearly to extinct and in our country which may have problems in supplying the demand in the future as the required underconstruction is lacked.

According to the researches, the companies in the cities of which rail system lines are long, are the biggest customers of the energy distribution companies in the region they exist, according to the energy amount they spend Therefore, the optimization studies made with energy by the rail system operation companies will save energy in huge amounts. By this way, that will both be more profitable for the company and cause benefit for the environment where the effects of the global warming are seen.

The energy data and the energy consumption levels in the rail system lines operated by Istanbul Ulasim A.S. (IUAS) are shown in this thesis. The generation and the effect of regenerative braking which is one of the most important parameters which will prevent this consumption provided that the required provisions are supplied, will be presented.

In addition to this, regarding the generation of the braking energy supplied from the regenerative braking, the route of the energy supplied from the local distribution company which follows a way from the electrical equipments to the energy transmission system and from there to the motors of the Hyundai- Rotem metro cars started to be used in 2009 in Istanbul metro system, until braking and the transform of this energy to regenerative energy will be presented.

Besides this, other methods affecting the energy saving in the urban rail system operation will be analysed and the fact that which parameters in the system affects the regenerative energy will be discussed.

Finally, the results of the analysis of the parameters affecting the regenerative energy by the rail system simulation software will be evaluated.

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel ısınmanın etkisi ile daha da fazla önem kazanan enerji tasarrufu, kamuya hizmet veren sistemlerde uygulanması zorunlu bir hal almaktadır. Bu bağlamda, raylı sistem altyapısı gelişmiş olan metropollerde raylı sistem için kullanılan enerjinin de verimli bir şekilde kullanılması önem arz etmektedir. Londra metrosunun 2006 yılı itibari ile 1173 GWh enerji tüketerek Londra'nın en büyük enerji tüketicisi konumunda olması raylı sistemlerde enerji tüketim oranının ne kadar büyük olduğunu bize göstermektedir[1]. Bu sebepten Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC–www.uic.asso.fr) enerji tasarruf yöntemlerini araştırıp, değerlendirecek bir proje yürütmüş ve bu konuda Mart 2003 tarihinde bir rapor yayınlayarak, şu ana kadar uygulamaya geçirilmiş olan ve potansiyel fayda içeren çeşitli teknoloji ve yaklaşımları belirlemiştir [2].

Benzer şekilde, Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği (UITP – www.uitp.com) de üyeleri aracılığı ile şehir içi raylı toplu ulaşım sistemlerinde enerji tüketimini azaltıcı tedbirler üzerine sürekli çalışmakta ve bu konuda özel toplantılar düzenlemektedir [3]. Konu, toplu ulaşım sistemlerinin sürdürülebilir gelişmeye katkısı yönünden de büyük önem arz etmektedir.

Gerek ana hat gerekse şehir içi olsun tüm raylı sistemlerin çalışma ve besleme şartları genel olarak birbirine benzemektedir. Dolayısı ile bir sistemde yapılan uygulama diğesinde de genel olarak ufak çaplı uyarlamalarla kullanılabilirler. Tez çalışmasında konu şehir içi raylı toplu taşıma sistemleri açısından ele alınmaktadır.

Takribi 15 milyon nüfusa sahip olan İstanbul'da kişi başına günlük seyahat sayısı 1.1' dir. Günlük yolculukların ancak %7'si raylı toplu taşımacılıkla yapılmaktadır. Dünya metropollerin toplu taşımacılık politikaları incelendiğinde geniş raylı sistemlerin inşaaı trafik probleminin çözülmesinde anahtar parametredir. Böyle raylı sistem ağlarının enerji tüketimleri büyük boyutlarda olmaktadır. Şubat 2009 itibari ile İstanbul Ulaşım A.Ş. işletiminde 70 km uzunluğa sahip raylı sistem hattı bulunup,

bu hatlardan 2008 yılı sonu itibari ile 72,1 milyon kWh aktif elektrik enerjisi tüketmiş ve tüketimi karşılığı 15,525 milyon TL lokal elektrik idaresine tüketim bedeli olarak ödemiştir. Hızla inşaatı devam eden raylı sistemlerle birlikte, İstanbul 2012 yılının sonunda yeni hatlarını bitirmeyi planlamaktadır. Bunlarla birlikte hat uzunluğunun 230 km ve tahmini enerji tüketiminin yılda 450 milyon kWh olması beklenmektedir. Bu açıdan bakıldığında enerji tüketiminde tasarruf, raylı sistem işletmecileri için çok önemli bir kazanç haline geldiği görülmektedir. Bu konu ile ilgili pek çok uygulama hayata geçirilmiştir. Bu uygulamalardan en önemli olanı ortam şartları sağlanması koşulu ile şüphesiz regeneratif frenlemedir. Basit anlatım ile regeneratif frenleme; raylı sistem aracının motorlarının frenleme durumunda generator olarak çalışması nedeniyle elektrik enerjisine tekrar çevrilebilir. Üretilen elektrik enerjisi, enerji iletim hatları yardımı ile (katener, rijit katener, üçüncü ray v.b.) sisteme geri besleme ile tekrar verilir. Bu olay regeneratif frenleme olarak bilinir ve çoğunlukla raylı sistemlerde kullanılır. Bu enerjinin kullanılmayan kısmı araçlar üzerinde var olan frenleme dirençleri üzerinde yakılmaktadır. Regeneratif frenleme enerjisinin kullanım oranı birçok parametreye bağlıdır. Ana parametrelerden biri olarak işletme sıklığı ön plana çıkmaktadır [4].

1.1 Raylı Sistemlerde Kullanılan Gerilim Seviyeleri

Raylı sistem elektrifikasyon sistemlerinde ilk zamanlar 600 VDC sistemi kullanılmıştır. Daha sonraları maliyetleri ve enerji kayıplarını azaltmak için farklı sistemler üzerinde çalışılmıştır. Avrupa Standartlarında [5] tanımlanmış olan elektrikli demiryolları besleme gerilim seviyeleri ve bunların işletmesel limitleri Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1: EN 50163’e göre elektrikli demiryollarında gerilim seviyeleri

Gerilim Seviyesi	U_N (V)	U_{min1} (V)	U_{max1} (V)
600 VDC	600	400	720
750 VDC	750	500	900
1500 VDC	1500	1000	1800
3000 VDC	3000	2000	3600
15 kV AC, 16.66 Hz	15000	12000	17250
25 kV AC, 50 Hz	25000	19000	27500

U_N = Nominal gerilim

U_{min1} = En küçük süreksiz gerilim

U_{max1} = En büyük sürekli gerilim

AC sistemler, genellikle, şehirlerarası ana hat işletmelerinde kullanılırken, hemen hemen dünyadaki bütün şehir içi raylı toplu taşıma sistemleri DC sistemlerle beslenir. Toplu taşıma sistemlerinde kullanılan gerilim düzeyi 1500 VDC' ye kadar çıkmaktadır. Bazı ülkelerde, 1500 ve 3000 VDC sistemler de ana hat uygulamalarında kullanılabilmektedir. Gerçekte, 1990'ların sonlarına kadar tüm dünya çapındaki ana hat şebekesinin neredeyse yarısı DC besleme sistemleriyle beslenmekte idi. Fakat bu durum AC besleme sisteminin üstün gelen özellikleri ve yarı iletken teknolojisinin genişlemesi sayesinde AC besleme sisteminin lehinde değişmiştir.

Şehir içi raylı ulaşım sistemlerinde son zamanlara kadar 750 VDC sistemi yoğun olarak kullanılmış ise de günümüzde artan yolculuk kapasiteleri dolayısı ile tren konfigürasyonlarında motorlu araçların sayısının artırılması, dolayısıyla güç talebinin artması nedeniyle yeni yapılan hatların birçoğunda 1500 VDC gerilim seviyesi seçilmektedir. Ülkemizde, Bursaray ve 2010 hizmete girmesi planlanan Kadıköy-Kartal metro hattı işletmeleri bu gerilim seviyesini kullanmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde İstanbul'da ihaleye çıkmakta olan yeni metro hatları da 1500 VDC olarak tasarlanmaktadır. Dünyada bazı hatlarda ise 600 VDC sistemi 1500 VDC ye dönüştürülmüştür. Bu gerilim seviyesinin avantajları sonraki bölümlerde verilecektir.

Özellikle yeni yapılacak hatlarda besleme gerilimi olarak 1500 VDC seçilmesi hem ilk yatırım hem de işletme maliyetlerinin azaltılması açısından önemlidir. S. Açıkbaz ve M.T. Söylemez tarafından 2004 yılında yapılmış olan bir çalışmada [6] . Aynı şartlar altında 1500 VDC besleme sisteminin cer gücü enerji maliyetinde 750 VDC sisteme göre % 10 azalma sağlayacağı belirlenmiştir. Yapılmış olan başka bir çalışmaya göre [7] Singapur'da 2003 yılında açılmış olan tam otomatik sürücüsüz ağır metro sisteminin yukarıda bahsedilen avantajlarından ötürü 1500 VDC sistemini kullandığı anlatılmaktadır.

İstanbul Ulaşım AŞ tarafından hazırlattırılmış olan detaylı bir inceleme raporunda[8]. İstanbul'un Anadolu Yakasındaki hatlardan birinin verileri kullanılmış ve 2025 yılı işletme planına göre 1500 VDC sisteminin seçilmesi durumunda tasarruf sağlanacak enerji miktarının yıllık 12,5 milyon kWh olacağı görülmüştür.

1.2 İstanbul'daki Raylı Sistem Hatları ve Enerji Tüketimleri

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından İstanbul'da kent içi raylı sistemlerin işletmeciliğini yapmak üzere kurulan İstanbul Ulaşım A.Ş. (İUAŞ), 2009 Şubat itibari ile toplam 70 km uzunluğundaki kent içi raylı sistem hatlarının işletmeciliğini yapmaktadır. Bu hatlar; Şişhane - Atatürk Oto Sanayi, Aksaray – Havalimanı Metro, Kabataş-Zeytinburnu Tramvay, Zeytinburnu-Bağcılar ve son olarak Topkapı-Sultançiftliği Tramvay hatlarıdır. Bu ana hatların haricinde Taksim-Kabataş Füniküler, Kadıköy-Moda Tramvayı, Eyüp-Piyer Loti ve Maçka- Taşkışla Teleferik sistemlerinin de işletmesinden sorumludur. Şekil 1.1'de İstanbul'daki raylı sistemlerin bir haritası verilmiştir. Haritada İETT tarafından işletilmekte olan Karaköy-Şişhane Füniküler (Tünel) ve Taksim-Şişhane Tramvayı, TCDD tarafından işletilmekte olan Haydarpaşa-Gebze ve Sirkeci-Halkalı Banliyö hatları da görülmektedir. İşletmeciliğini yaptığı Zeytinburnu-Kabataş tramvay hattı UITP tarafından 2004 yılında yüksek yolcu talebini karşılama alanında dünyada en iyi uygulama seçilen Ulaşım A.Ş. her gün yaklaşık 750.000 yolcuya hizmet vermektedir. İstanbul'da giderek ivme kazanan raylı sistem yatırımlarının tamamlanmasıyla birlikte kısa zamanda çok daha fazla sayıda yolcuya hizmet verecek olan Ulaşım A.Ş. 2005 yılında imzaladığı Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği Sürdürülebilir Gelişme Beyannamesi ile sürdürülebilir gelişme alanındaki taahhüdünü de ortaya koymuştur.

İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Konya, Adana ve Eskişehir gibi şehirlerimizde raylı sistemler kullanılmakta, Kayseri, Antalya, Samsun, Rize, Gaziantep, Trabzon gibi şehirlerimizde ise çalışmalar çeşitli aşamalarda devam etmektedir. Halen raylı sistemlere sahip illerimizde ise bu hatları uzatma ve/veya yeni hatlar yaparak tüm sistemi birbirine ekleme şeklinde çalışmalar devam etmektedir



Şekil 1.1: İstanbul'un raylı sistemler haritası (Şubat 2009).

1.2.1 Şişhane - Atatürk Oto Sanayi metro hattı

Hat üzerinde her bir istasyon için ikişer adet yardımcı güç transformatörü bulunmakta, bunlar istasyon ve tesislerin 34,5 kV / 400–230 Volt AC besleme kaynağını temin etmekte kullanılmaktadırlar. Toplam sayıları, 2×10 istasyon = 20 adettir. Her istasyon yapısının büyüklüğüne göre kurulu güç değeri değişmekle beraber toplamda yardımcı kurulu gücü, 24 MVA' dır. Bunlara ek olarak yine değişik istasyonlarda kurulu bulunan ana güç transformatör merkezleri ile de 34,5 kV AC gerilim, trafo-redresör gurupları üzerinden 750 V DC anma gerilimine dönüştürülerek, sisteme dağıtılmaktadır. Ana cer gücü, sistemde 10 istasyon $\times 6.6 = 66$ MVA' dır. Acil güç beslemesi olarak hattın her bir ucunda 5 MVA' lık iki adet jeneratör otomatik olarak devreye girmek üzere bekleme konumundadır. Metro

sisteminin TEİAŞ‘dan ring beslemesi Kasımpaşa ve Levent’ten gerçekleştirildiği için, enerji tüketimini belirleyen ölçümlerde buralardan yapılmaktadır.

1.2.2 Aksaray-Havalimanı metro hattı

Hafif Metrodaki trafo merkezi sayısı 12 olup, 9 tanesi katener sistemini beslemektedir. Genelde, her trafo merkezinde 2 adet trafo vardır. Hafif Metro hattının kurulu cer gücü, 38.4 MVA’dır. Yardımcı güçler (10.15 MVA) ile toplam kurulu güç 39.55 MVA’tır. Ferhatpaşa ‘da genel atölye ve idari binalar olduğundan biri yedek olmak üzere 2 adet 1.250 kVA’lık yardımcı trafo ve 80 kVA’lık jeneratör mevcuttur.

1.2.3 Kabataş-Bağcılar arasındaki tramvay hatları

Tramvay hatlarında 5 ayrı 34.5 kV BEDAŞ girişi mevcuttur. Tramvay hatları 10 adet trafo merkezi tarafından beslenmektedir. 5 adet trafo merkezinde 2×1 MVA lık bir kurulu güç vardır. Diğer 5 adet trafo merkezinde ise 2 x 1.5 MVA olmak üzere toplam kurulu gücü 25 MVA’dır. Yardımcı güç ise 500 kVA’dır. Toplam kurulu güç 25.5 MVA olmaktadır.

1.3 İstanbul Raylı Sistem Hatlarının Enerji Tüketimleri

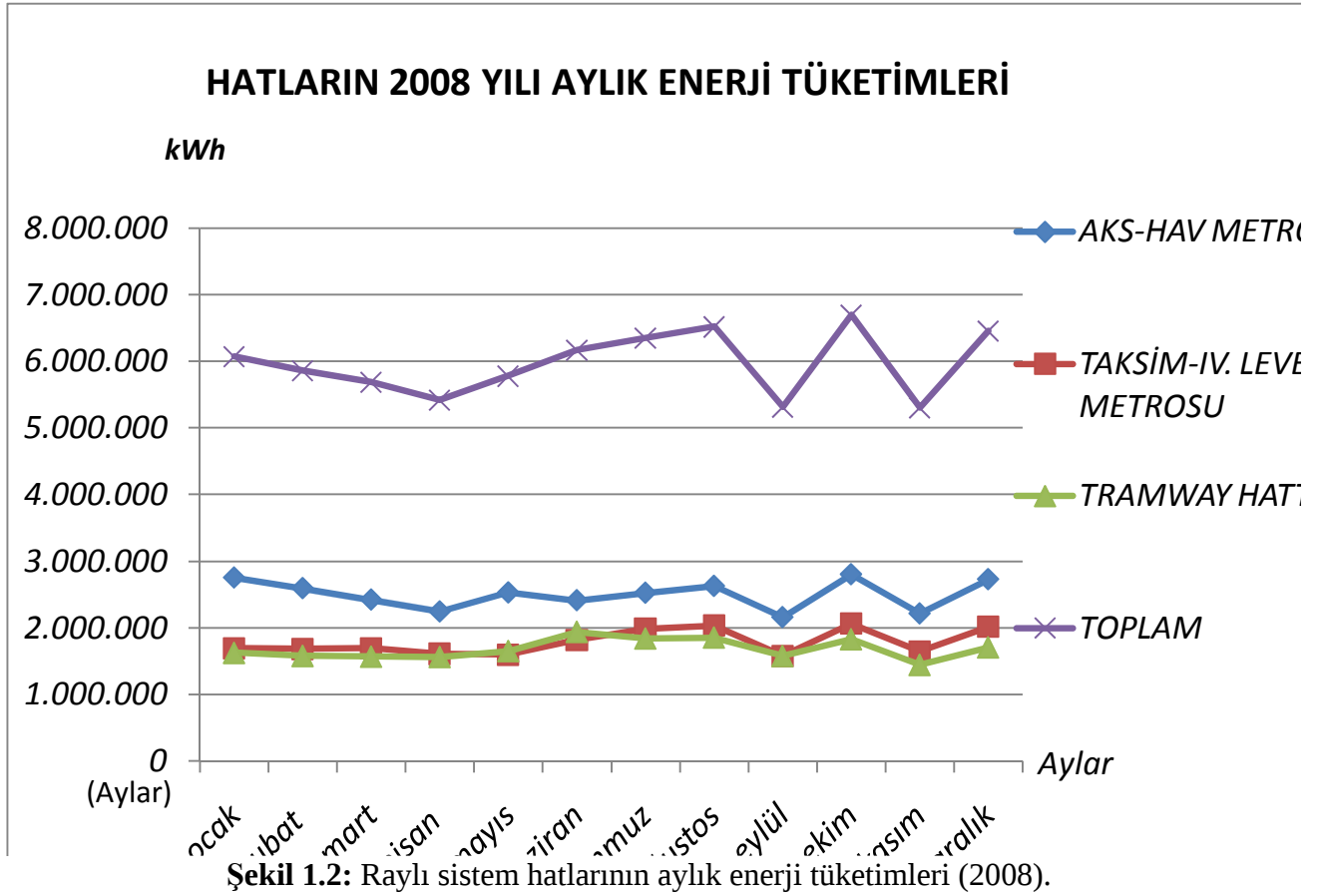
Sistemde 2002–2006 yıllarında BEDAŞ faturalarından tespit edilen ortalama aylık elektrik enerjisi tüketimleri Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2: Hatların 2004–2008 yıllarındaki ortalama aylık enerji tüketimleri

YILLARA GÖRE HATLARIN ORTALAMA ENERJİ TÜKETİMİ				
YIL	Aks-Hav. Metro	Şişhane- AOS Metro	Tramvaylar	TOPLAM
2002	1881400	1268017	928102	4077519
2003	2190612	1294873	963607	4449092
2004	2499968	1461435	1009174	4970577
2005	2656533	1491960	1014507	5163000
2006	2693944	1625311	1225476	5544731
2007	2339732	1762660	1552254	5654646
2008	2504391	1784385	1682380	5971156

Çizelge 1.2’ deki değerler incelendiği zaman enerji tüketim seviyelerinin sürekli olarak artmakta oldukları görülmektedir. Bundaki ana etken taşınan yolcu sayısının artması olmakla beraber büyük artışların gözlendiği 2005–2006 yılları geçişinde Zeytinburnu - Bağcılar Tramvay hattının ve Taksim-Kabataş Füniküler hattının

açılmış olması etkili olmuştur. Şekil 1.2’ deki grafikler hatların 2006 yılındaki enerji tüketimlerinin aylara göre değişimini vermektedir.



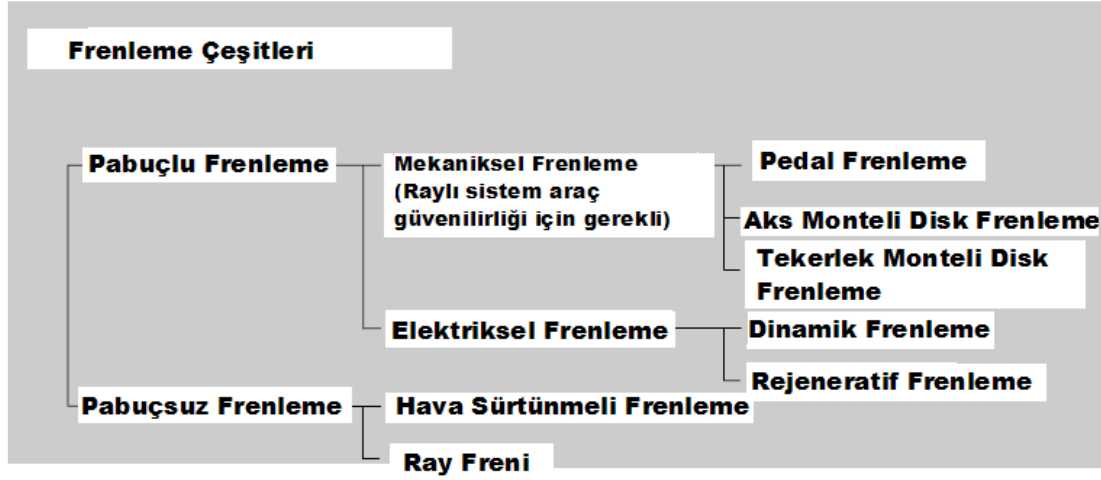
Hafif metro olan Aksaray – Havalimanı hattındaki aylık ortalama enerji tüketim miktarının içinde trenlerin tahriki için kullanılan cer gücü enerji miktarı 2.200.000 kWh’ tır. Dolayısı ile bu miktarda yapılacak olan %1’lik bir tasarruf aylık 22.000 kWh, yıllık ise 264000 kWh daha az enerji tüketimi demektir. Bu hatta cer gücü tüketiminde 1 yılda ortalama %5 tasarruf elde edilmesi tramvay hatlarının 1 aylık tüketimine eşdeğer azaltım sağlayacaktır.

Tek bir hatta elde edilecek tasarrufun miktarı göz önüne alınırsa birçok hattan oluşan komple bir raylı sistem ağında elde edilecek tasarruf miktarı düşünülürse enerji tüketimini azaltma için yapılacak her çalışmanın önemi daha iyi anlaşılacaktır.

1.4 Frenleme Çeşitleri

Elektrik enerjisi ile çalışan raylı sistem araçlarında Şekil 1.3’ de görüleceği gibi iki tip frenleme mekanizması kullanılır. Bunlar; elektrik frenleme ve mekanik

frenlemedir. Bu çalışmada elektrik frenlemenin bir uzantısı olan Rejeneratif frenleme üzerinde yoğunlaşılacaktır



Şekil 1.3: Frenleme çeşitleri.

Prensip olarak dinamik frenleme, motor frenleme modunda generatör olarak çalışacağından dolayı ortaya çıkan kinetik enerjisini araç üzerinde bulunan frenleme dirençleri üzerinde yakılarak ısı enerjisine dönüşmesidir.

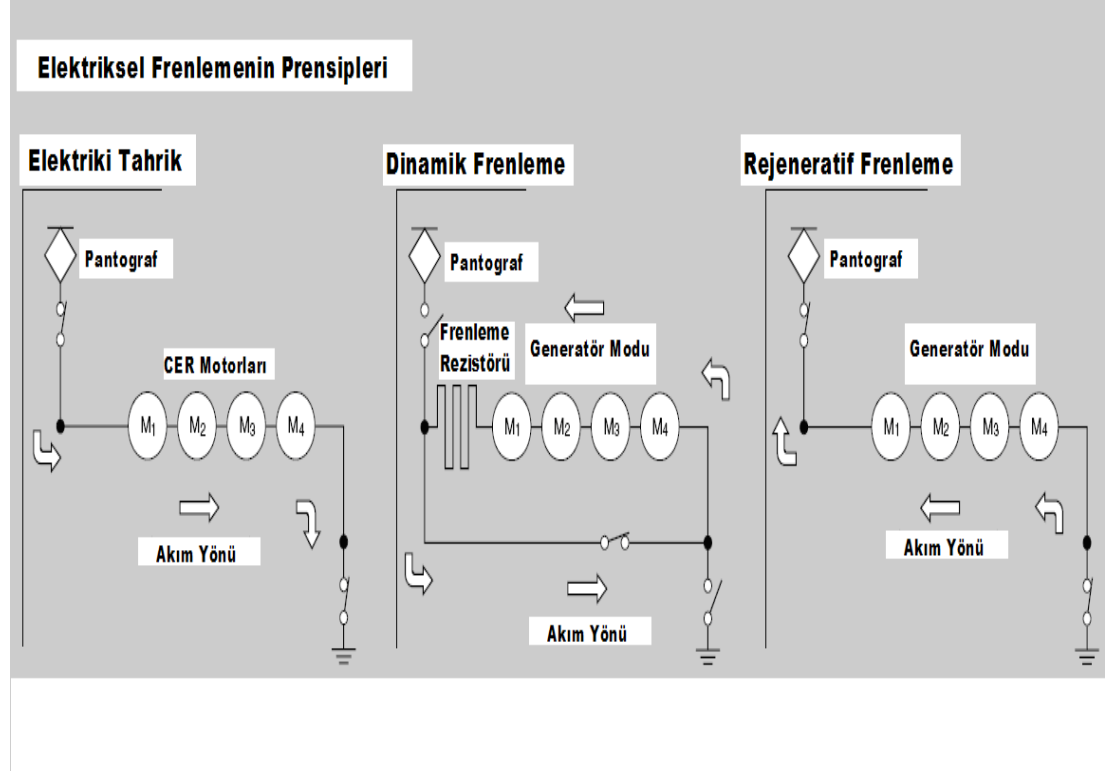
Rejeneratif enerjide ise, generatörden gelen enerjinin fren dirençleri üzerinden yakılmak yerine, uygun koşullar sağlandığı zaman, pantograf veya 3. ray yolu ile hatta geri verilmesi ve enerji tüketimi üzerinde ciddi tasarruflar sağlamayı hedef alan frenleme tipidir. Bu sebepten, Dünya genelinde kullanımı hızla yaygınlaşan bir enerji türüdür. Rejeneratif frenleme ile kazanılmış olan enerji değişik amaçlar için kullanılabilir:

- Trenin kendisinin kullanması (yardımcı servisler ve konfor amaçlı). Araç içi talepler genellikle sağlanan enerjiyi tüketebilmek için çok düşüktür.
- Yeteri kadar yakında bulunan diğer araçların kalkış anında kullanması amacıyla, enerji katener hattına geri beslenir.
- Eğer trafo merkezleri tristörlü evirici üniteler ile donatılmışsa, bunlar enerjiyi elektrik şebekesine geri verebilirler.

Şekil 1.4' de de trenin hareketi için gerekli olan elektriki tahrik modu, dinamik frenleme modu ve rejeneratif mod çalışımı bulunmaktadır. Tren hareketi ve hızlanması için motor şeklinde çalışırken, dinamik frenleme durumunda generatör gibi çalışırken, sistem frenleme direnci, armatürler ve besleme hattından oluşur. Bu

sistem, kinetik enerjiden elektrik enerjisine generatör yardımı ile dönüşürken, frenleme rezistör yardımı ile ısı enerjisine dönüşerek devreden kurtulur.

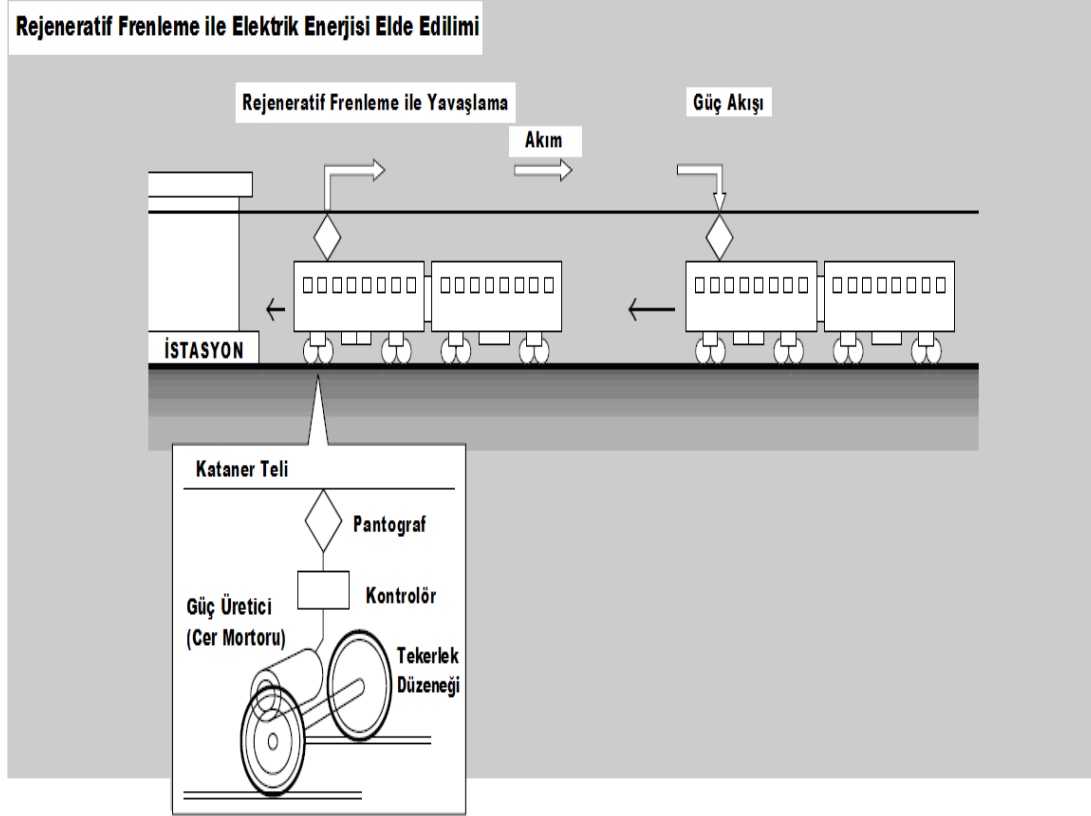
Rejeneratif frenleme durumunda ise aynı tip bir devre kullanılır, fakat dinamik frenleme örneğinde olduğu gibi enerji frenleme dirençleri üzerinde yakılacağı yerine, enerjinin alındığı hatta geri gönderilir.



Şekil 1.4: Elektriki frenleme çeşitleri.

Elektriki frenleme mekanik frenlemeye göre ekonomik bir yöntemdir. Çünkü elektriki sistem mekanik sistemde olduğu gibi birbirine sürtünen elementler içermez. Rejeneratif sistemde harcanan frenleme enerjini tekrar elektrik enerjisine dönüştürüp tekrar hatta verip diğer araçların kalkış ivmelenmesinde kullanıldığı için hepsinden daha ekonomik sistemdir. İstanbul'da kullanılmakta olan metro araçlarında frenleme 80–15 km/h arası elektriksels frenleme 15–0 km/h arası mekaniksel frenleme uygulanır.

Elektriki frenlemenin tek dezavantajı bu frenlemeler bir kontrol devresi tarafından yönetildiği için ve bu devreler zaman zaman bozulabildiği için, elektriki frenlemeler acil durum frenlemesinde güvenlik sebebi ile kullanılamaz. Şekil 1.5' de görüldüğü gibi motorize veya frenleme durumunda motor ile tekerlek arasında bir dişli düzenek bulunur. Bu düzenek yardımı ile motor tekerlek arası enerji dönüşümü gerçekleşir.



Şekil 1.5: Frenleme durumunda rejeneratif enejinin elde ediliimi.

1.4.1 Rejeneratif frenleme enerjisinden faydalanma oranını arttırma

Günümüzde demiryolu taşımacılığı uygulamaları için asenkron motor geliştirme çalışmalarına oldukça büyük ilgi gösterilmekle birlikte, hâlihazırda dünyanın elektrikli taşıma gücünün büyük bir kısmını doğru akım motoru oluşturmaktadır. Elektrikli taşımanın ilk günlerinden bu yana, Doğru akım motoru için uygun rejeneratif frenleme yöntemleri bulma yönünde büyük çabalar sarf edilmiştir. Bu Dönemde reostatik frenleme rejeneratif frenlemeye göre çok daha fazla kullanılmıştır. Buna karşılık, yarı iletken teknolojisinin gelişimi ve demiryolu sistemlerine entegre olması ile birlikte kadar rejeneratif frenleme, sisteme sağladığı ekonomik faydadan dolayı daha fazla kullanılmaya başlanmıştır.

Şehir içi toplu ulaşımında kullanılan sistemlerde enerji beslemesi çoğunlukla doğrultuculu çer gücü besleme istasyonlarından sağlanmaktadır. 500–1500 VDC civarındaki düşük gerilim seviyelerinden ve çok güçlü tahrik gerektiren teknoloji kullanımından dolayı bu tip elektrik sistemleri çoğunlukla dikkat edilmesi gereken bir gerilim düşümüne sebep olur.

2. RAYLI SİSTEMLERDE REJENERATİF ENERJİ ELDE EDİLMİ

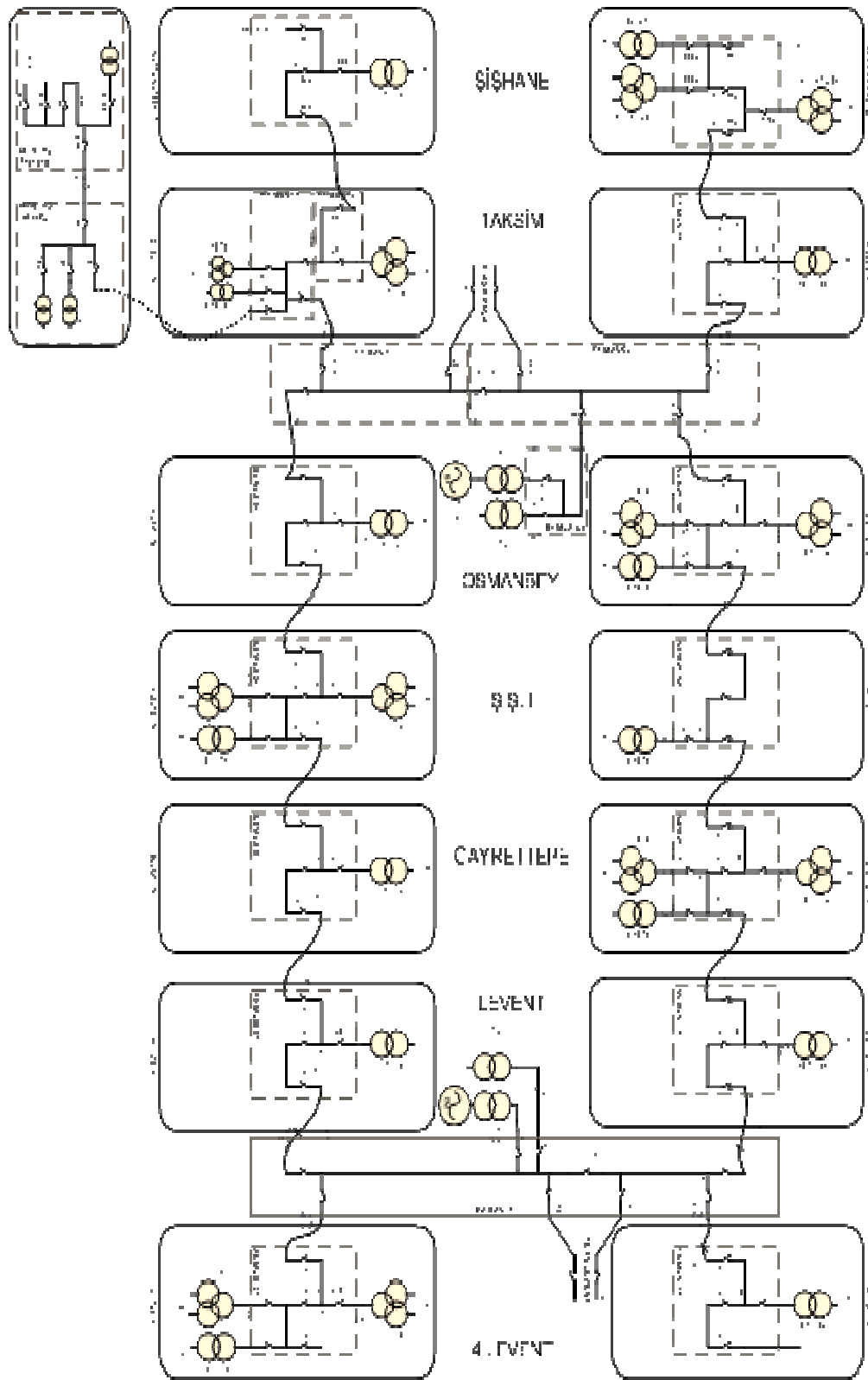
Bu bölümde rejeneratif enerji elde edilene kadar geçen süreçte akımın, Bölgesel Elektrik dağıtıcı firmadan Metro istasyonuna girdiği ekipmandan itibaren istasyon yapısında ve metro aracında izlediği bütün ekipmana kadar gittiği yol ekipmanların tanıtımı ile sunulacaktır.

2.1 İstasyonlarda Enerjinin Tüketimi

Bir raylı sistemin enerji tüketimi iki ana sınıfa ayrılabilir; yolcuları taşıyan trenlerin tahriki (cer gücü) ve yolcuların bekleme yaptığı istasyonlar ve buralara erişim sağlayan alanların enerji ihtiyacını sağlayan yardımcı sistemlerin beslenmesi. Sistemin kendi iç ihtiyaçları ve ofis/idari binaların ve bakım tesislerinin tüketimi de bu sınıfa dâhildir.

Bu iki sınıfın enerji tüketim oranları sisteme göre değişkenlik arz eder. Tüm hattı ve istasyonları ile yeraltında olan metro sistemlerinde tüketilen enerjinin yaklaşık yarısı yardımcı güçlere gitmekte iken cadde tramvay sistemlerinde yardımcı güç tüketimi çok daha düşük değerlerdedir.

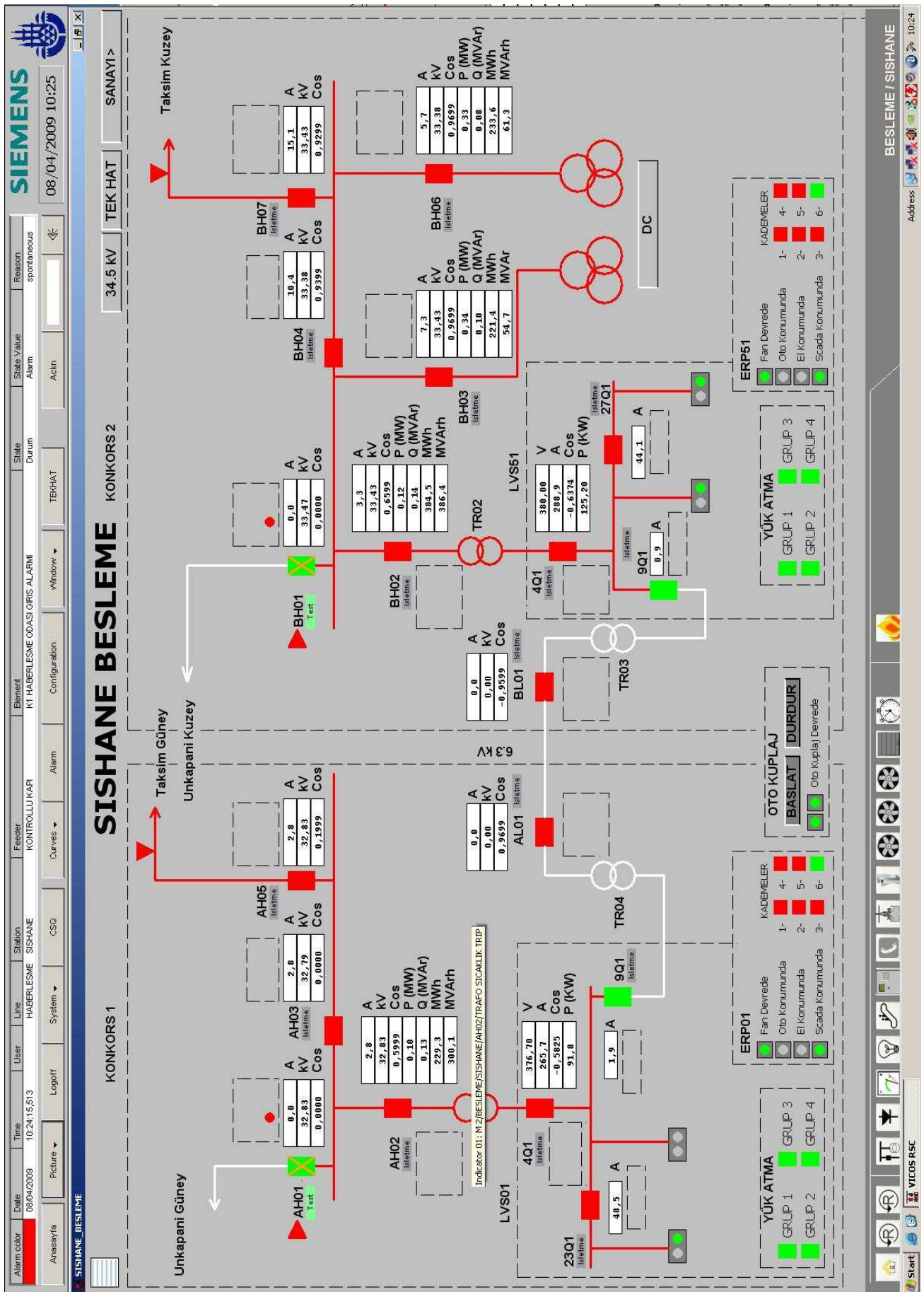
İstanbul Metrosu Kasımpaşa ve Levent GIS (154/34,5kV indirici merkezleri) merkezlerinden aldığı birer kol 34,5kV fideri ile beslenmektedir. Her istasyon mimari olarak kuzey ve güney bölümlerden oluşmaktadır. Bu bölümlerin her birinde OG dağıtım panoları mevcuttur. . İstanbul Metrosu ile ilgili OG besleme sistemi şekil 2.1' de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: İstanbul Metrosu enerji besleme sistemi.

Bu bahsetmiş olduğumuz aynı istasyondaki iki pano, Kasımpaşa ve Levent'ten gelen iki farklı OG besleme kolundan beslenmektedir. Kasımpaşa'dan gelen OG fideri Taksim giriş hücreğine girip tüm istasyonların ilgili lokasyonlarını beslemekte, Levent'ten gelen OG fideri Levent giriş hücreğini beslemekte olup buradan diğer tüm istasyonlara dağılmaktadır. İstasyonlar ardışık olarak birbirlerini beslemektedir. Her istasyonun güney bölümündeki CER merkezleri vardır. Bunun anlamı istasyonun güney bölümlerinde bulunan OG baralarından CER trafoları ve yardımcı tesisler trafoları beslenmektedir. İstasyonun kuzey bölümünde ise sadece ilgili bölgeyi besleyen yardımcı tesisler trafosu beslenmektedir. Yük dengeleri açısından ardışık besleme düzeninde Cer merkezinden çıkan OG fideri CER olmayan OG panolarına girmektedir. Tersisi durum da diğer OG fideri için geçerlidir Şişhane İstasyonu'na ait besleme sisteminin SCADA görünümü Şekil 2.2' deki gibidir.

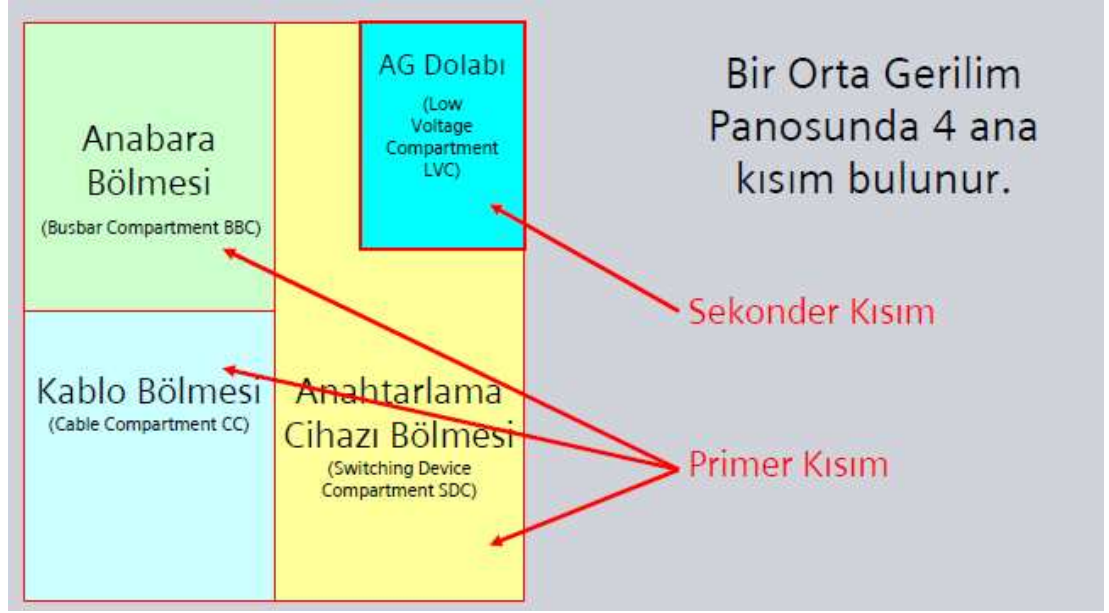
Yapı itibarıyla OG ağı kendi içinde ring şebeke gibi düşünülebilir. Her istasyona OG panoları ve bunları besleyen fiderler ile dağıtılan 34,5kV besleme, istasyonlarda istenen gerilimlere dönüştürülür.



Şekil 2.2: Şişhane istasyonu enerji besleme sisteminine ait SCADA ekran görünümü.

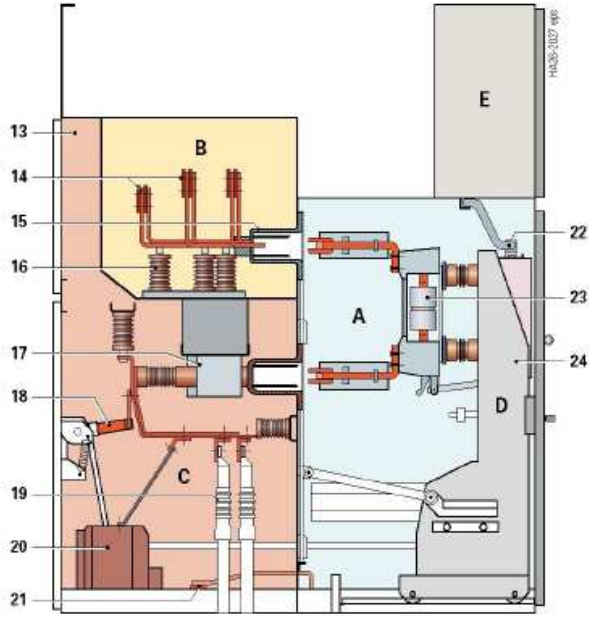
2.1.1 Orta gerilim panosu

Bölgesel Elektrik Dağıtım Şirketinin hattından alınan enerji istasyonda trafolarla gitmeden önce orta gerilim panosuna girer. Bu panoda ki anahtarlama elemanı (kesici ya da yük ayırıcısı) elektrik dağıtım şirketinden gelen akımının şiddetine göre pozisyon değiştirir. Prensip Olarak orta gerilim panosu 4 ana bölümden oluşur. (Şekil 2.3.)



Şekil 2.3: Orta gerilim panosunun bölümleri.

Şekil 2.4’ te yandan görünümü verilen orta gerilim panosu ile ilgili olarak, bölgesel elektrik dağıtım şirketinden gelen enerji kablo yardımı ile Orta Gerilim panosunun kablo bölmesine (şekil 2.5) anahtarlama cihazına bağlanır daha sonra anahtarlama elemanının (şekil 2.6) diğer kısmından ana baraya (Şekil 2.7) bağlanır. Alçak Gerilim dolabında (şekil 2.8) ise panonun manuel veya uzaktan (SCADA Sistemi yardımıyla) çalışmasını sağlayacak kontaktör, röle, sigorta ve anahtarlama cihazı bağlantısını sağlayan fiş-priz sistemleri bulunmaktadır.



- 13. Basınç atma kanalı
- 14. Ana bara
- 15. Geçit izolatörü
- 16. Mesnet İzolatörü
- 17. Akım transformatörü
- 18. Kısa devre day. topraklama şalteri
- 19. Kablo başlıkları
- 20. Gerilim transformatörü
- 21. Topraklama barası
- 22. AG Fiş priz
- 23. Vakum tüpü
- 24. Kesici arabası

A: Araba/çekmece - şalter bölgesi B: Anabara bölgesi
C: Kablo bağlantı bölgesi D: Kesici arabası
E: Alçak gerilim dolabı

Şekil 2.4: Siemens Simoprime serisine ait orta gerilim panosunun yandan görünüşü.



Şekil 2.5: Kablo bağlantısı bölümü.



Şekil 2.6: Kesici hücresi.



Şekil 2.7: Bara bağlantısı bölümü.



Şekil 2.8: Alçak gerilim dolabı bölümü.

2.1.2 Transformatörler

Şekil 2.9' da gösterilen ve orta gerilim panosunun içinde bulunan ana baraya bağlı olan trafolar; istasyonlardaki iç ihtiyacı (aydınlatma, yürüyen merdiven ve havalandırma fanları v.b.) temin etmekle sorumlu iç ihtiyaç trafoları, treni hareket ettiren CER Trafoları ve İstasyondaki konkors yapılarının birinde herhangi sorun olması durumunda diğer konkorsun iç ihtiyaç trafosun beslenmesi için gerekli olan transfer trafolarıdır. Rejeneratif enerji için gerekli olan trafo, trenin motorize olmasını sağlayan CER trafolarıdır. İstanbul Metrosunda kullanılan CER trafolarının kapasitesi 3300 KVA mertebesindedir.

CER merkezleri dediğimiz istasyonların güney bölümlerinde iki adet 3,3 MVA gücünde 34,5/0,58kV çift sekonderli(yıldız-üçgen çıkış), kuru tip, D0d0yn11 vektör grubuna sahip, dökme reçine transformatörler mevcuttur. Yine yardımcı tesisler beslemeleri için ise her istasyonun kuzey ve güney bölümlerinde 2MVA gücünde, 34,5/0,4 kV, kuru tip, dökme reçine transformatörler mevcuttur. Bu trafolar bulundukları bölümlerinde ki ilgili OG baralarından birer OG kesicisi ile beslenmektedirler. Yardımcı tesisler trafosu çıkışı 0,4 kV gerilim direkt alçak gerilim ana dağıtım panosunu beslemekte olup, buradan ilgili istasyon yükleri beslenmektedir. CER trafosu vektör grubundan da anlaşılacağı üzere, sekonderinde fazlar arası 330° olan iki gerilim (0,58 kV) verir.



Şekil 2.9: İstanbul metrosunda kullanılan kuru tip trafonun içyapısı.

2.1.2.1 Çekirdek kısmı

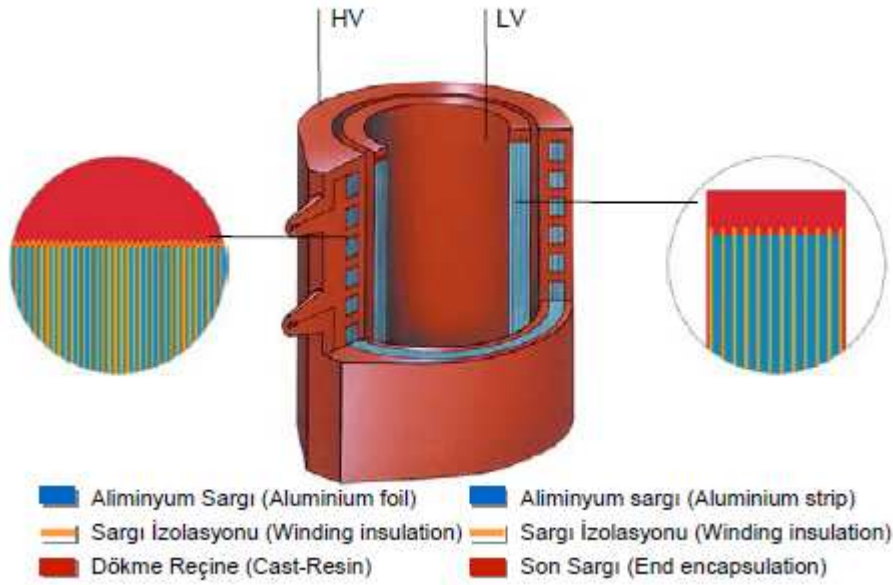
Bir trafonun ana kısımlarının incelendiği Şekil 2.10’da trafonun çekirdek kısmı, demir çekirdek olarak yalnızca her iki tarafı da yalıtılmış tane yönelimli, soğuk haddelenmiş levhalardan meydana gelmiştir. Ayak ve halka kesitleri, farklı laminasyon genişlikleri kullanılarak çakışmayacak şekilde düzenlenmiştir. Dış ayaklarda tırnaklı mafsallar ve ortadaki ayaklarda halka bağlantısında çift tırnaklı mafsallar mevcuttur.

2.1.2.2 AG sargı kısmı

Trafonun cinsine göre bakır veya alüminyum şeritten imal edilen sargılar tamamen yapıştırılmış yalıtım levhası ile kaplanmıştır.

2.1.2.3 YG sargı kısmı

Trafonun cinsine göre bakır veya alüminyum folyodan imal edilen birbirinden bağımsız vakumlu bobinlerden meydana gelir.

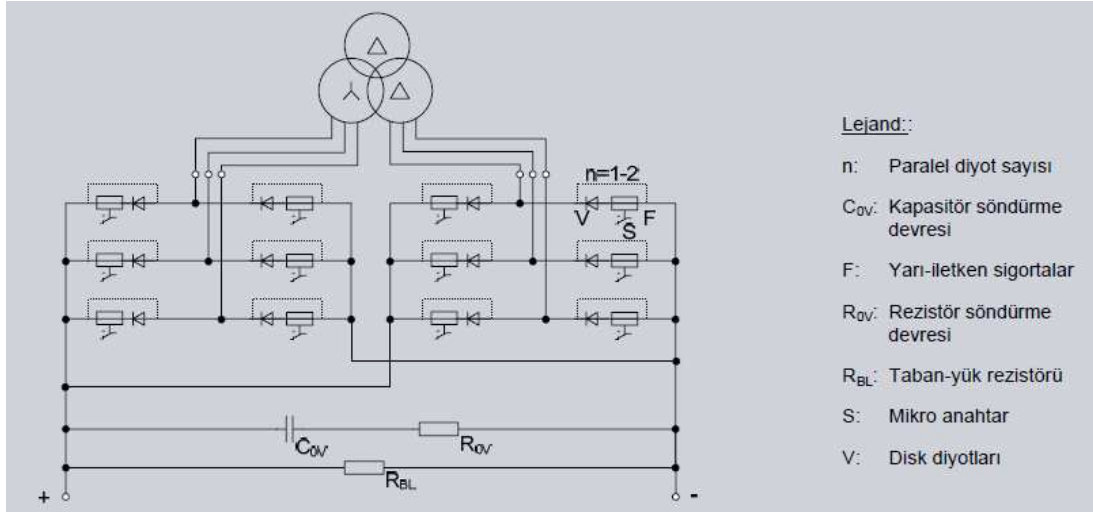


Şekil 2.10: Siemens'e ait GEAFOL model trafolardaki alçak gerilim ve yüksek gerilim sargı yapıları.

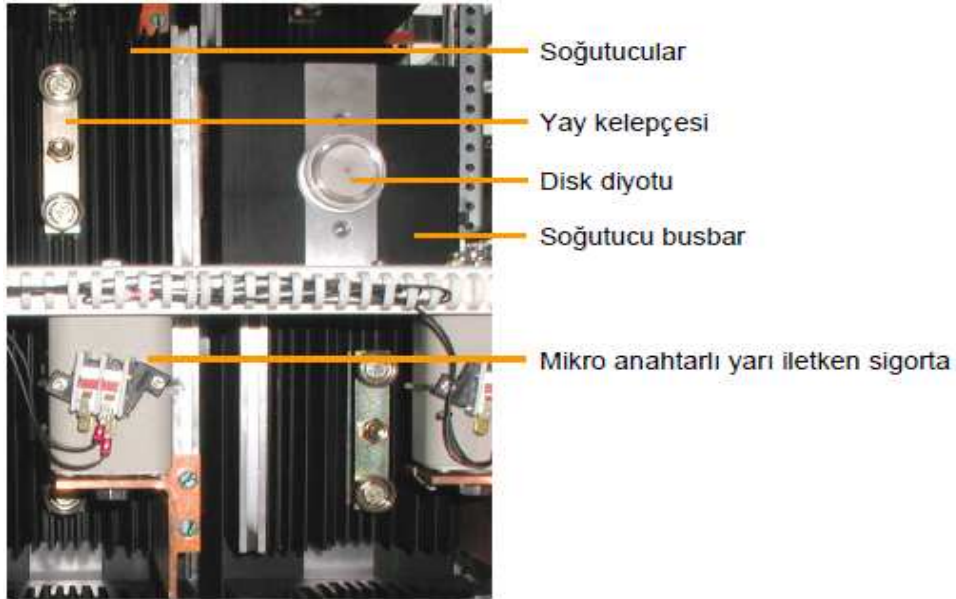
2.1.3 DC şalt panosu ve doğrultucu grubu

Günümüzde şehir içi raylı sistem hatları doğru akım ile çalıştığından dolayı istasyonlarda alternatif akımı doğru akıma çevirecek doğrultucu (diyot) gruplarının (Şekil 2.12-13) bulunması gerekmektedir.

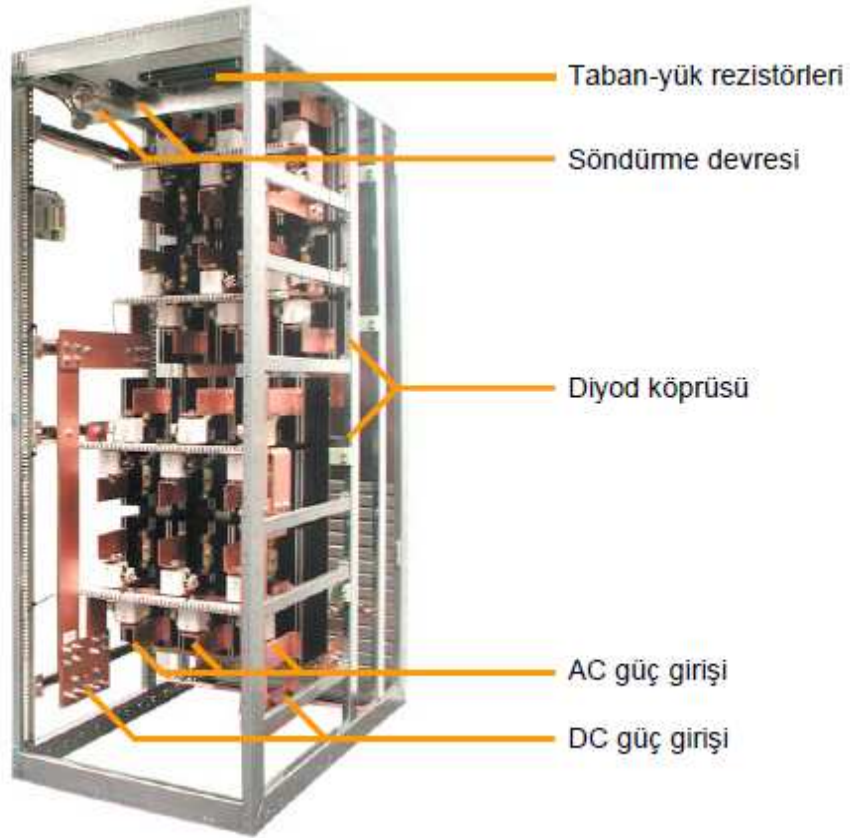
Çift sekonderli CER trafosundan vektör grubundan da anlaşılabacağı üzere, sekonderinde fazlar arası 330° olan iki gerilim (0,58 kV) verir. Şekil 2.11'den görüleceği gibi, bu çift sekonderli CER trafosu, 12 darbeli redresör grubunu beslemek içindir. Redresör grubu iki adet 6 darbeli paralel iki tam dalga kontrolsüz doğrultucudan oluşur. Daha açık bir tabirle, trafonun sekonderinden çıkan ve doğrultucu grubunu besleyen iki gerilim, iki adet aralarında 330° olan 6 darbe'lik gerilimlere çevrilirler. Redresör grupları birbirine paralel çalıştığından iki 6 darbe'lik gerilim birleşerek daha düzgün bir 12 darbe'li gerilim oluştururlar. Bu gerilim redresör çıkışı 750V DC olarak gerçekleşir.



Şekil 2.11: 12 darbeli doğrultucunun prensip çizimi.



Şekil 2.12: Diyot grubunun önden görünümü.

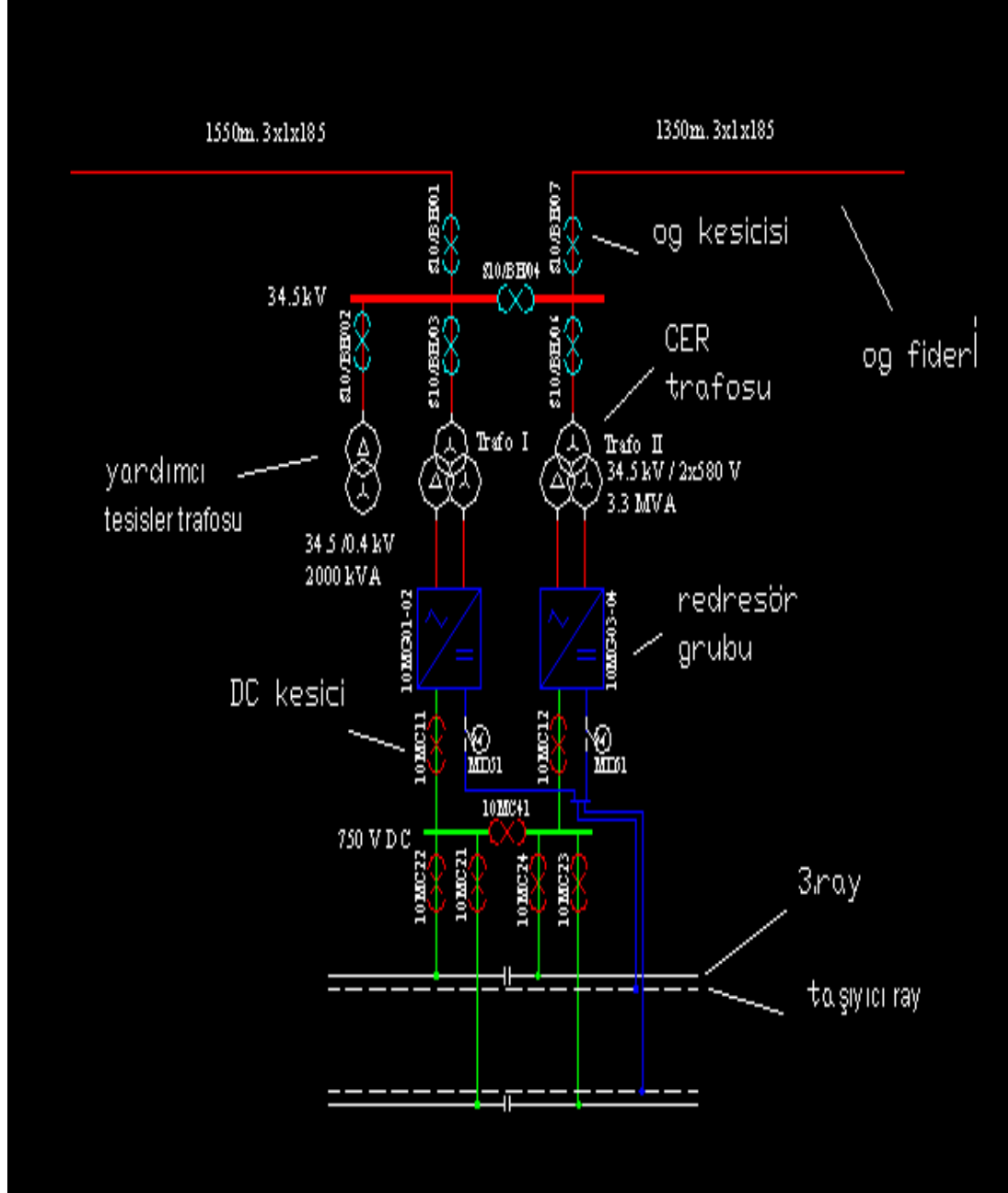


Şekil 2.13: Doğrultucu dolabının dizaynı.

Şekil 2.14’ de belirtildiği üzere iki CER trafosunun beslemiş olduğu iki redresör grubunun çıkışındaki 7500 A’lık DC kesiciler (Şekil:2.15-16), ortak bir barayı beslemektedirler. Bu baradan ise, hat kesicileri üzerinden hattın istenen ilgili bölgeleri beslenir. Besleme 3. ray’a verilir. Negatif geri dönüş ise taşıyıcı ray üzerinden ortak bir negatif baraya gelir. Buradan ise bir negatif ayırıcıya girer ve redresör grubuna döner. Görüldüğü üzere Hat1 ve Hat2 aynı DC bara üzerinden beslendiğinden, ilgili panoda Hat1-2 elektriksel kısa devre gibi düşünülebilir. Buradan kasıt, hat üzerindeki bir araç frenlemesindeki rejeneratif enerji, hat2 üzerinde kalkışta olan bir tren üzerinde bu bara üzerinden beslenebilir. Başka bir ifade ile Hat1 üzerinden Hat2’ye bir akım akar.

Bu ekipmanlar dışında dokunma gerimi güvenilirliği ve sistem güvenliğini sağlamak amacı ile CER merkezlerinde negatif ray-toprak gerilimini kontrol etmek için traction negatif protection cell (TNP) dediğimiz ekipmanlar mevcuttur. Bu ekipman ray-toprak arası gerilimi ölçer, ayarlanan sınır değerler (92V) üzerinde bir değeri 0.1 sn. görmesi anında taşıyıcı ray-toprak arasını bir bobin vasıtasıyla kısa devre eder. 10 sn. boyunca sistemi izler ve bobin kısa devreyi kaldırır. Sistemin güvenli durumunun

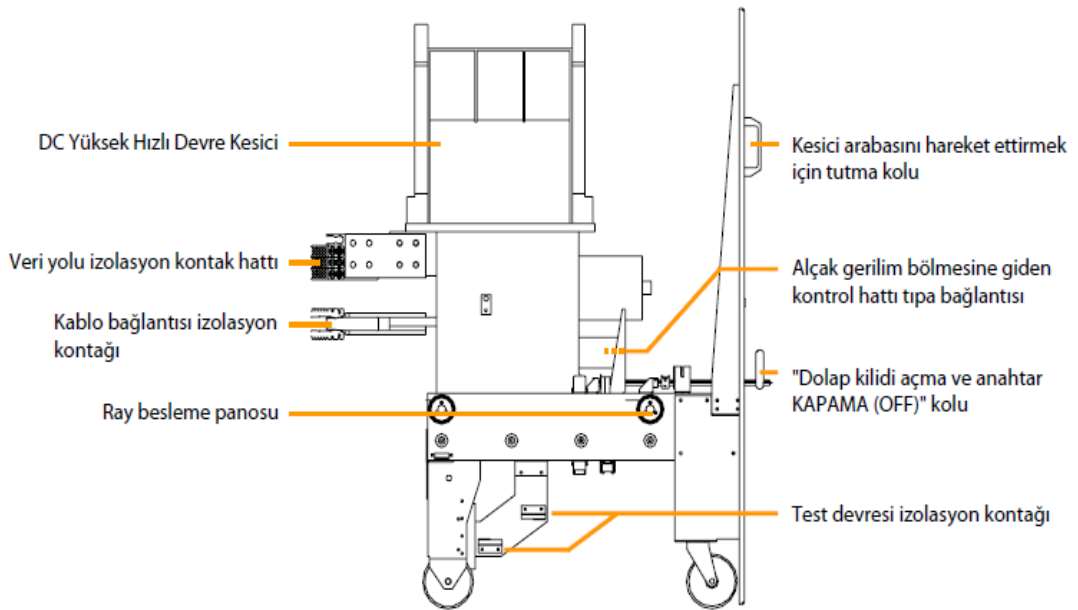
10 sn. izlenmesi durumunda hat güvenli durumdadır ve sistem normal çalışmaya devam eder. Aksi durumda ise bobin tekrar ilgili devreyi kapatır ve teknik ekibin hatta ve ilgili ekipmanda inceleme yapması gerekir. Gerilimin belirlenen sınır değerlerin üzerinde ilgili periyotta 1 sn. üzerinde devamlı gezinmesi durumunda ise hat güvensizdir ve hattı besleyen kesiciler açar, ilgili bölge enerjisiz bırakılır.



Şekil 2.14: CER besleme merkezi.



Şekil 2.15: Siemens'e yüksek hızlı DC kesicisi panosunun ve kesici arabasının görünümü.



Şekil 2.16: Siemens'e ait yüksek hızlı DC kesicisi arabasının yandan görünümü.

Hatta taşıyıcı ray üzerinden toprağa bir akım (kaçak akım) akması istenmez. Çünkü bu akımlar tünel donatısı üzerinde zamanla korozyona yol açar. Sistemde bu kaçak akımlar izlenir. Taşıyıcı ray üzerinden toprağa kaçan bu akımlar, toprak ve taşıyıcı ray arasına bağlanan bir diyot vasıtasıyla taşıyıcı raya (negatif dönüş) verilir. Bu diyot ve ilgili izlemeyi yapan ekipman Stray Current Drenaj (SCD) panosudur (Şekil

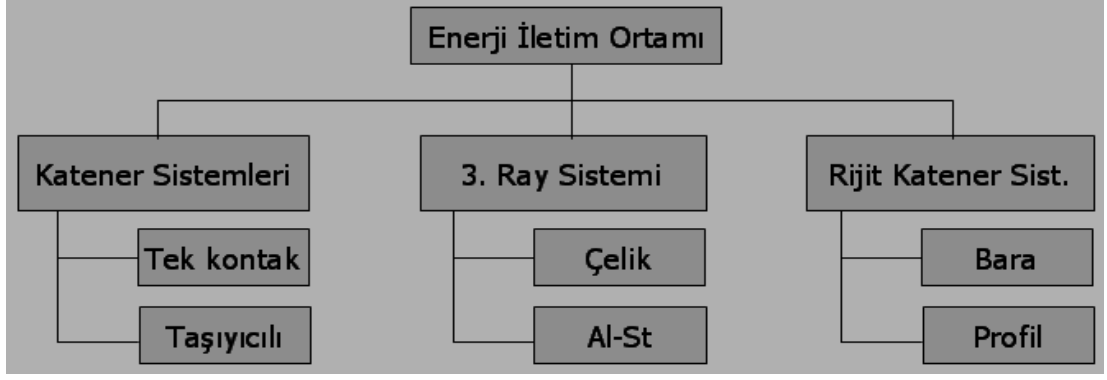
2.17). Toprağa 10A'in üzerinde bir akım aktığı tespit edilirse yine ilgili çalışma bölgesini besleyen DC kesiciler trip (hata) konumuna geçer.



Şekil 2.17: Siemens'e DC şalt panosu örneği.

2.1.4 Enerji iletim sistemleri

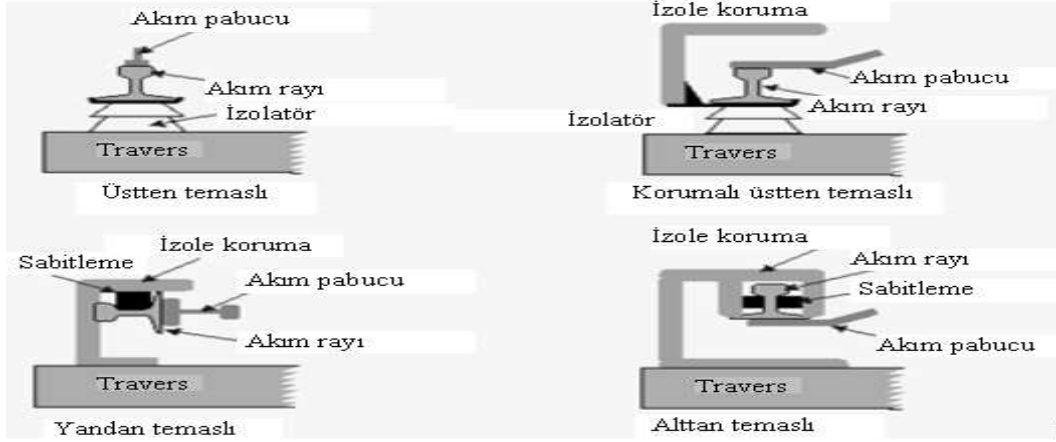
Doğrultucu grubundan gelen akım, raylı sistem aracına hatta bulunan enerji iletim sistemleri (3. ray, kataner, rijit kataner) vasıtası ile ulaşırlar. Şehir içi raylı toplu ulaşım hatlarında enerji iletim sistemi olarak Şekil 2.18'da verilmiş olan çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar sistemin genel özelliklerine göre farklılık arz edebilmektedir: 3. ray, normal katener, rijit katener ve son yıllarda geliştirilmiş olan APS sistemleri. İstanbul'daki metro sistemlerinde, halen işletimi devam eden İstanbul Metrosunda 3. ray, yeni ihale edilen Kadıköy-Kartal, Kirazlı- Olimpiyatköy hatları ve yeni ihale edilecek Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy hatları rijit kataner sistemleri kullanılacaktır. Bu sistemlerin özellikleri, avantajları ve dezavantajları aşağıda kısaca özetlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.18: Raylı sistemlerde enerji iletim sistemleri.

2.1.4.1 Üçüncü ray sistemi

Hat seviyesinde olan 3. ray sistemleri genel olarak metro hatlarında kullanılmaktadır. Üçüncü ray sisteminde araçlar enerjiyi ray pabucu denilen ekipman ile almaktadır. Bu sistem, Şekil 2.19’de gösterildiği gibi pabucun temas şekline göre değişik konfigürasyonlarda olabilmektedir; alttan, üstten veya yandan temaslı sistemler. İstanbul Metrosunda kullanılan cinsi şekil 2.20’den görülebileceği gibi korumalı üstten temaslı sistemdir.



Şekil 2.19: 3. ray sistemi uygulamaları.



Şekil 2.20: İstanbul metrosunda korumalı üstten temaslı uygulamalı 3. ray sistemi.

Yumuşak çelikten imal edilen 3. raylar ebatlarına bağlı olarak 20°C sıcaklıkta 13-22,5 m Ω /km gibi bir iç dirence sahiptir. Giderek kullanımı artmakta olan Al kompozit (Al-MgSi) üçüncü raylar ise çok daha düşük dirence sahiptir: 7–15 m Ω /km. Bu özelliği Al kompozit 3. rayın avantajıdır. 3. ray sisteminin bir diğer avantajı ise katener sistemlerine göre daha az bakım gerektirmesidir. Çalışanların ve yolcuların can güvenliğine getirdiği riskler 3. ray sisteminin en büyük dezavantajıdır. Bu sebeple, tüm hat boyunca ve özellikle yolcu istasyonlarında özel önlemler alınmasını gerektirir. Pham ve arkadaşları [11] çalışmalarında yolcu istasyonlarında “Acil Durum Enerji Kesme” sisteminin kurulmasının NFPA 130 (“Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems”), standardının 2000 versiyonunun gerekliliklerinden biri olduğunu vurgulamışlardır. Katenerli sistemlerde bu gibi sistemlere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu gibi ekstra önlemler ve daha sık mesnet (3-4 metrede bir) konulması 3. ray sistemlerinin ilk inşaat maliyetlerini katener sistemlerine göre yukarıya çekmektedir. 3. ray sistemlerinin bir diğer dezavantajı ise işletme saatleri içinde hatta çalışma yapılmasını riskli hale sokmasıdır. Son olarak, günümüzde emniyet kuralları çerçevesinde 1200 VDC değerinin üzerindeki gerilim değerlerinde ve 100 km/h hızın üstünde işletme yapılan hatlarda 3. ray sistemi kullanılamamaktadır.

2.1.4.2 Rijit katener sistemi

Günümüzde tünellerde üçüncü raya alternatif olarak geliştirilen, hafif, üçüncü raya göre daha esnek, bakımı kolay ve yüksek iletkenliğe sahip rijit katener sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerin normal katener sistemleri ile beraber aynı hat içinde kolaylıkla kullanılabilmesi en büyük avantajlarından biridir. Piyasada değişik profilleri mevcut olmakla birlikte genel olarak Şekil 2.21’de verilmiş olan Al kompozit bir profil ve buna tutturulmuş kontak telinden müteşekkildir.



Şekil 2.21: Rijit katener sistemi.

Sistem 20 yıldan daha fazla bir süredir kullanılmaktadır. Sistemin avantajları aşağıda özetlenmiştir:

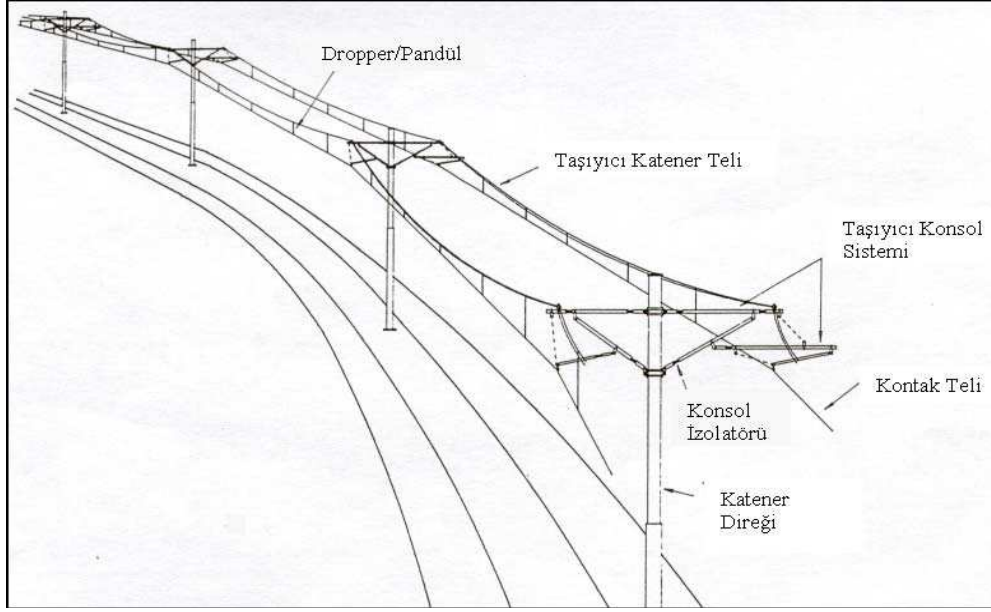
- Rijit katener sisteminin montajı için gerekli olan boşluğun az olması ile tasarım aşamasında daha küçük boyutta tünel planlanması sağlanır. Daha büyük gabarili araçlar için modifiye edilmesi planlanan mevcut tünel hatlarında da hattın alçaltılmasına gerek kalmaz. Böylece, inşaat maliyetlerinde önemli azalmalar elde edilir.
- Geleneksel katener sistemleri ile uyumludur.
- Kontak (Seyir) teli gergisizdir ve pantograf geçişi anında kontak telinde yükselme olmaz. Kontak telinde germe kuvveti bulunmadığı için Rijit katener sistemi halka açık ve istasyon alanlarındaki yüksek seviyeli emniyet standartlarına uyumludur.
- Saatte 250 km hıza kadar kullanılabilir.

- Yüksek kısa devre dayanımı. Bir kısa devre sonucu kontak teli kısmen yanmış olsa dahi normal şekilde işletmeye devam etme seyir telinin gergisiz olması sebebi ile tehlike oluşturmaz.
- Rijit katener sistemi yüksek bakır eşdeğeri kesiti ile 40°C’de 3000 A’dan büyük akımları sürekli taşıyabilir.
- Makas ve çapraz geçiş bölgeleri gibi kompleks hat bölgelerinde basit tasarıma sahiptir.
- Önceden bükülmüş iletken profiller/çubuklar ile 40 metrelik minimum kurp yarıçapları gerçekleştirilebilir.
- Rijit katener sisteminde kontak teli nominal kesit alanının %50’si aşınıncaya kadar kullanılabilir. Bu limit değer geleneksel katener sisteminde %33’dür.
- Kolay montaj ve düzenleme. Basit bir montaj aleti ile kolay ve sürekli kontak teli montajı sağlanmıştır.
- Tecrübeler tasarımın sağlamlığı sebebi ile sistemin neredeyse bakımsız olduğunu göstermiştir.
- Rijit katener sistemi araç bakım yollarında, konteynır terminallerinde, yükleme/boşaltma yollarında, açılabilir köprü geçişlerinde vb. yerlerde de kaldırılabilir katener sistemi olarak hizmet verebilir.

2.1.4.3 Normal katener sistemi

Normal katener sistemi, Şekil 2.22’den de görüleceği üzere zig-zaklı giden kontak teli ve akım ihtiyacına göre seçilen bir veya iki adet taşıyıcı katener telinden müteşekkildir. Bu iletkenlerin akım ihtiyacını karşılamadığı durumlarda ilave fider iletkeni çekilmektedir. 1500 V ve üzeri gerilimlerde katener sisteminin kullanılması gerekmektedir. Dolayısıyla ana hat demiryolu işletmeciliğindeki elektrikli hatlar katener sistemleri ile donatılmıştır.

Kullanılacak katener sisteminin konfigürasyonunu belirleyen başlıca faktörler; o hatta kullanılacak olan maksimum tren hızı, tren sıklığı, tren konfigürasyonu ve trafoların yerleşimidir.



Şekil 2.22: Bir normal katener sisteminin genel görünüşü.

Taşıyıcı katener tellerinin akım taşıma dışındaki görevi kontak telini taşımaktır. Kontak teli dropper veya pandül denilen esnek, örgülü bakır iletken teller ile taşıyıcı katener tellerine asılmaktadır. İyi bir akım alma işlemi için kontak teli mümkün olduğunca homojen bir esneklik sağlamalıdır. Bu sebeple kontak teli belli bir öfleşle montaj edilir.

Pantografin kontak teline teması mümkün olduğunca esnek ve hat boyunca kesintisiz olmalıdır. Kontak teli pantografin itmesiyle esnekliği oranında yükselir. İki askı noktası arasındaki yükselme miktarı askı noktalarındakine göre daha fazladır. Bu durum doğrudan işletme hızını etkileyen faktördür. 120 km/h' ın üzerindeki işletme hızları için askı noktalarında daha hassas esnekliğe sahip bir tasarım gerekir.

Taşıyıcı katener telleri örgülü bakırdan, kontak teli ise katı, oluklu ve sert çekilmiş bakırdan üretilmektedir. Tellerin anma kesiti çoğunlukla 107, 120 mm² veya 150 mm² dir. Termal ve gergi kapasitesini artırma amacı ile Ag veya Mn katkılı kontak telleri de kullanılmaktadır.

Normal şartlarda, kontak teli 30 ile 40 yıl sorunsuz olarak çalışabilir. Çevresel koşullar, iklim şartları ve işletme şartları nedeniyle pantograf teması ile kontak telinde aşınma oluşur. UIC standartlarında kontak telinin nominal kesitinin %20'si aşındığı zaman değiştirilmesini tavsiye edilir. Ancak, çoğu işletmede bu işlem %40 oranında aşınma miktarına ulaşıldığı zaman gerçekleştirilir.

İşletme hızının düşük olduğu nostaljik veya cadde tramvaylarında, depo ve garaj sahalarında sabit gergili basit katener sistemi kullanılır. Bu sistemde, katener etapları doğrudan askı noktalarında sonlandırılır. 100 km/h' e kadar olan maksimum hızların yapıldığı tramvay, hafif metro (LRT) ve metro ana hat güzergahlarında otomatik gergili basit katener sistemi kullanılır. Her bir etap iki ucundan denge-ağırlık gergi düzeneği ile gerdirilir. Otomatik gergi sistemi iletken gerginliğinin hava sıcaklık değişimlerinden etkilenmesini önler. Katener telleri ve kontak telleri birlikte gerdirilebileceği gibi ayrı ayrı da gerdirilebilirler. Sistem yüksekliğinin (askı noktalarında katener ve kontak telleri arasındaki mesafe) 1.4m ve daha fazla olduğu bazı sistemlerde de katener telleri sabit tutulurken kontak teli gerdirilebilir.

Katener iletkenleri direk ve konsol düzenekleri ile taşınır. Sistem yüksekliği bir metre olan katener sisteminde, taşıyıcı mesafesi (iki direk arasındaki mesafe) düz yolda maksimum 60 metredir. Kurplarda, bu mesafe, kurp yarıçapına bağlı olarak düşer.

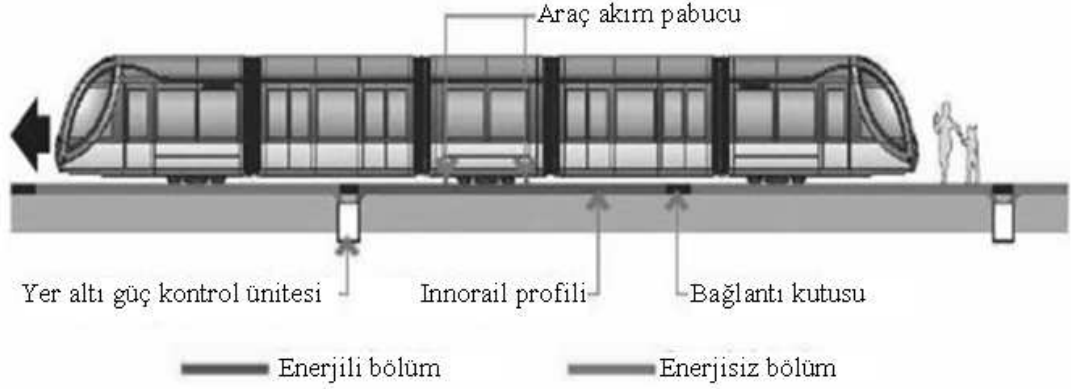
2.1.4.4 APS (Otomatik Güç Kaynağı) sistemi

Tarihi şehir merkezlerindeki tramvay hatlarında görüntü kirliliğini ortadan kaldırmak için geliştirilen bir enerji besleme sistemidir. Innorail olarak da bilinen sisteme 1990'ların sonunda sistem üzerinde çalışılarak yeni teknolojiler ile emniyetli hale sokulmuştur Şekil 2.23'de Fransa'nın Bordeaux kentinde toplam uzunluğu 25 km olan bir tramvay hattının 11,5 km'lik kısmında bu sistem Aralık 2003'de hizmete alınmış bulunmaktadır. Hat, 19 km daha uzatılmakta olup bu uzatmanın 5 km' sinin de Innorail Sistemi ile yapılması planlanmaktadır.



Şekil 2.23: Bordo şehrinde innorail uygulaması.

Şekil 2.24’de prensip olarak gösterilen sistem, sadece üzerinde araç bulunan bölgeyi enerjilendirmektedir. Diğer bölgeler enerjisiz olarak kalmaktadır. İki ray arasında zemine monte edilen Innorail sisteminde 11 metre profilin 8 metresi iletken 3 metresi yalıtkan olup 2 profil bir kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 2.24: Innorail sisteminin besleme şekli.

Sistemin çıkış noktası sıfır görüntü kirliliği oluşturması Şekil 2.23’ den de görülebileceği gibi en büyük avantajdır. Ancak, sistemin ilk montaj maliyetinin oldukça yüksek olması dezavantajdır. Ayrıca, mevcut hatlarda kullanılmak istenmesi durumunda araçlarda yapılacak ilave değişiklikler (akım alma pabucu, acil durum batarya üniteleri vs.) maliyeti arttırmaktadır.

İstasyon içindeki sistemler ile alakalı olarak, şu ana kadar enerjinin ilerlediği yolun (orta gerilim panosundan, enerji iletim sistemlerine kadar) Şişhane metro istasyonu için SCADA ekranından görünümü Şekil 2.25’ deki gibidir.

2.2 Raylı Sistem Aracındaki Enerji Tüketimi

Enerji iletim sistemlerinden gelen akım, artık raylı sistem aracının akım toplayıcısı tarafından araca iletilmiştir. Tezimin bu kısmında enerjinin araç içerisinde motorize durumu ve frenleme durumu sırasında oluşan enerjinin rejeneratif enerjiye dönüşüne kadar takip edeceği ekipmanları göreceğiz. Bu incelemeyi yaparken referans olarak Şekil 2.26’te verilen ve İstanbul Metrosunda yeni kullanılmaya başlanan Hyundai-Rotem firmasına ait metro araçlarının elektrik şeması üzerinden incelememizi sürdüreceğiz.

Hyundai-Rotem metro araçları İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından 11.12.2001 yılında 92 adet olarak ihale edilmiş olup. İhale bedeli 126.669.427 \$’ dır.

2.2.1 Ana şalter (MS)

3.Ray pabucundan giren 750V DC ilk olarak MS – Main Switch ile karşılaşır. Main Switch Çizelge 2.1’ den görüleceği gibi üç konumlu manuel bir şalterdir. Ana şalter manuel olarak üç modan birinde çalıştırılır (üçüncü ray / stinger / OFF (çalışmaz)). Nominal değerleri; Gerilim: 1000Vdc, Akım:1250 A

Çizelge 2.1: Ana şalter konumları.

Şalter konumu	Statü
OFF (ÇALIŞMAZ)	Aracın atölyede güvenli bir şekilde muayene edilip onarılabilmesi için tüm elektrikli ekipmanların elektrik bağlantısı izole edilir.
Üçüncü ray	Üçüncü raya bağlantı sağlanır
Stinger	Atölyede stinger prizine bağlanır.

2.2.2 Ana bağlantı kesme şalteri (MDS)

Ana bağlantı kesme şalteri dış elektrik kaynaklarından izole etmek için monte edilmiştir. Ana bağlantı kesme şalteri açık olduğunda ve ilgili şalter DS de (deşarj şalteri) kapalı olduğunda, filtre kondansatörünün gerilimi güvenli onarım ve muayeneye imkân tanımak için hat kesicisi kutusundakideşarj rezistörü iledeşarj edilir. Bu şalter sadece evireçi güç kaynağından izole edebilir. Nominal değerleri;

Gerilim: 1000Vdc, Akım:1000 A

2.2.3 Ana sigorta (MF), Kuplaj sigortası (BF)

Ana sigorta ve kuplaj sigortası aşırı akımlara karşı sistemi korumak için akımı kesebilir. Nominal değerleri; Gerilim: 750Vdc, Akım:1600 A

2.2.4 Yüksek hızda devre kesici (HSCB)

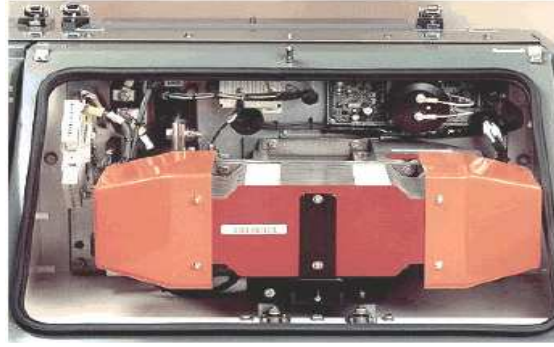
Evireçte bir sorun olduğunda veya aşırı akım olduğunda, HSCB sistemi korumak için açar. Şekil 2.27’te gösterilen HSCB’nin ana işlevi:

- VVVF evireçi hızlanma ya da frenleme komutunu aldığı anda, HSCB kontrolör tarafından kapatılır.
- HSCB öz açma seviyesi 2100 A üzerindeki akımlarda açar HSCB’nin kontrolör tarafından açılması koşulları
- Aşırı akım seviyesinin üzerinde acil açma düğmesi ile büyük arıza olması

durumunda yardımcı kontakların izlenmesi

- HSCB yardımcı kontak sinyalinin açma/kapama komutu ile uymadığını tespit ederse, arıza ortaya çıkar.

Teknik Özellikleri: Gerilim: 1000VDC, Dielektrik Test Gerilimi: 3900V üzeri, İzolasyon Gerilimi: 2000V, Akım 1000A, Kontrol Gerilimi: 72VDC.



Şekil 2.27: Yüksek hızda devre kesici.

2.2.5 Hat kontaktörleri (LB/CHK)

Hat kontaktörleri evireç 1 için LB1, CHK1 ve evireç 2 için de LB2, CHK2'den oluşmaktadır.

Kontaktörler filtrelerini ve güvenli dizi işletmesini gerçekleştirir.

Ana işlevi;

- LB: hat kesme.
- CHK: Akım yüklemesine karşı koruma ve enerji hattının güç kaynağı ile bağlantısının kesilmesi.

2.2.6 Filtre reaktörü (FL)

Filtre reaktörü filtre kondansatörü olan hat filtresinden ibarettir. Ana işlevi

- Akım harmoniklerinin azaltılması
- Ana devre aksamalarının korunması için geçici akımların bastırılması
- Trafo merkezinin topraklama arızasına karşı korunması

2.2.7 Fren rezistörü (DBRe)

Şekil 2.28'da gösterilen fren rezistörü araçta iki yönlü kullanılır. Biri reostatik (dinamik) frenlemede olup diğeri de aşırı gerilime karşı korumada filtre

kapasitörünün deşarj edilmesindedir. Dinamik frenleme rejeneratif fren ve reostatik frenleme olur. Hat üzerinde yeterli seviyede rejeneratif yük mevcutsa, rejeneratif fren çalışır. Eğer rejeneratif yük yeterli değilse, rejenerasyon enerjisinin rezistör boyunca dağılması için reostatik frenlemeyi yapmak amacıyla fren akım kesicisi çalışır.



Şekil 2.28: Fren rezistörü.

2.2.8 Filtre kondansatörü (FC)

Filtre kondansatörü akım harmoniklerini bastırmak ve dengeli hat gerilimi oluşturmak için filtre reaktörü olan LC filtre devrelerinden oluşmaktadır.

Sığa : 9.000uF

Anma gerilimi : 825Vdc

Çalışma sıcaklığı : -40°Celsius ~ 70°Celsius

2.2.9 Elektrik gücü modülü (PEM)

PEM 6 adet IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), güç yarı iletkeni ve fren akım kesicisi, soğutma cihazı, bağlantı ana barasından oluşmaktadır. Bir evireç kutusunda 2 PEM mevcut olup her bir PEM iki adet cer motorunu değişken gerilim değişken frekans (VVVF) kontrolü yaparak PWM'li (darbe genişliği modülasyonu) anahtarlama ile çalıştırmaktadır. Bu sırada, güç yarı iletkeni anahtarlama kaybı nedeniyle ısı yayar. Sonra da bu ısı, ısı borusu ile dağılır.

2.2.10 Akım transdüseri (BCCT)

Delik etkisi ile hat akımını çıktı akımına orantılı hale getirir.

İtibari primer akım I_{pn} : 2.000 Arms

Ölçüm aralığı(I_p maks.) : $\pm 3.000A$ tepe

Dönme oranı(N_p/N_s) : 1/5.000

Sekonder akım I_{pn} 'de I_{sn} : 400mA

Besleme gerilimi : $\pm 24V$

2.2.11 Potansiyel transdüseri (DCPT)

Hat gerilimini çıktı akımı ile orantılı hale dönüştürür.

İtibari primer gerilim V_{pn} : $\pm 1.000V$

Maksimum gerilim : $\pm 1,250V(3min/saat)$

Dönme oranı(N_p/N_s) : 15.000/2.000

Sekonder akım I_{sn} at I_{pn} : 50mA

Besleme gerilimi : $\pm 24V$

2.2.12 Cer motorları

Şekil 2.29'de gösterilen cer motorları araçta 4 adet bulunup, 750Vdc'yi 550Vac'ye çeviren IGBT' lere doğrudan bağlılardır. Teknik tanım bakımından cer motorları;

Tipi: 3 Faz 4 Kutuplu Sincap kafesli indüksiyon motoru

Nominal değerler: 150kW, 550V, 199A, 2210rpm

Bir saatlik değerler: 165kW, 550V, 219A, 2200rpm

Yalıtım sınıfı: Sınıf 200

Havalandırma: Kendiliğinden havalandırılmalı

Dielektrik Test Gerilimi: 3700 V

Çalışma Aralığı: 525Vdc ~ 900Vdc

Çalışma Frekans Aralığı: 0 ~ 155Hz

Maksimum devir: 4492 rpm ($\phi 810mm$ teker ile 85km/saat hız)

Ağırlık: 520kg±5%



Şekil 2.29: Hyundai-Rotem metro araçlarında kullanılan cer motoru.

3. RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ TASARRUFU İÇİN ALINMASI GEREKEN DİĞER TEDBİRLER

Raylı sistemlerde rejeneratif enerjinin kullanımı dışında farklı yöntemlerle de enerji verimliliği sağlanabilir. Bunlar;

3.1 Yardımcı Servislerin Beslenme Sistemlerinde Yapılabilecek Değişiklikler

Yukarıda değinildiği üzere, bu husus, özellikle metro sistemlerinde dikkatlice gözden geçirilmelidir. Sistemin yeraltında olması düşünülerek, emniyetten taviz verilmeden yapılabilecek olan bazı tasarruf sağlayıcı yöntemler aşağıda verilmiştir.

- İstasyon tasarımlarında mümkün mertebe güneş ışığından faydalanma.
- Aydınlatma sistemlerinin optimum şekilde sağlanması ve yüksek verimliliğe sahip elektronik balastlı lambaların kullanılması.
- Yürüyen merdivenlerde frekans sürücüleri uygulamaları.
- Yürüyen merdiven ve bantların yolcuya duyarlı hale getirilerek ihtiyaç olmayan zamanlarda çalışmasının önlenmesi.
- Ofis ve idari binaların ısı izolasyonunun sağlanması.
- Planlı bakım faaliyetleri.
- Etkin bir çevre kontrol sistemi.

3.2 Cer Gücü Beslenme Sistemlerinde Yapılabilecek Değişiklikler

Cer enerji tüketimini belirleyen başlıca faktörler şunlardır:

- Hattın geometrisi; eğimler, istasyonların sıklığı ve yerleri, kurplar, hız sınırlamaları vb. güzergaha 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/3. ray özellikleri, besleme düzeni, TM ekipman tipi vb. kriterler.
- İşletme mantığı; trenler arası süre (TAS), tren kompozisyonu, istasyon bekleme süreleri vb. kriterler.

Bu faktörlerden bazılarında yapılabilecek değişiklikler ile mevcut hatlardaki toplam enerji tüketimi azaltılabilecektir. Bu hususlar aşağıda sıralanmıştır.

- Enerji kayıplarının azaltılması
- Regeneratif enerjiden faydalanma oranını arttırmak.
- Enerji öncelikli (Energy-wise) sürüş yöntemlerinin araştırılarak uygulanması.

3.3 Besleme Gerilim Seviyesi Olarak 1500 VDC Seçilmesi

İstanbul'un Anadolu yakasında ihale aşamasında olan Üsküdar – Ümraniye-Çekmeköy metro hattının cer gücü besleme sisteminin ön boyutlandırılması gerçekleştirilmiş ve bu hat'a ilişkin veriler ile S. Açıkbaş ve M.T. Söylemez tarafından 2004 yılında yapılmış olan çalışmada [6], besleme sisteminin 750 VDC yerine 1500 VDC seçilmesi durumunda elde edilecek tasarrufun %10 mertebelerinde olacağı belirlenmiştir.

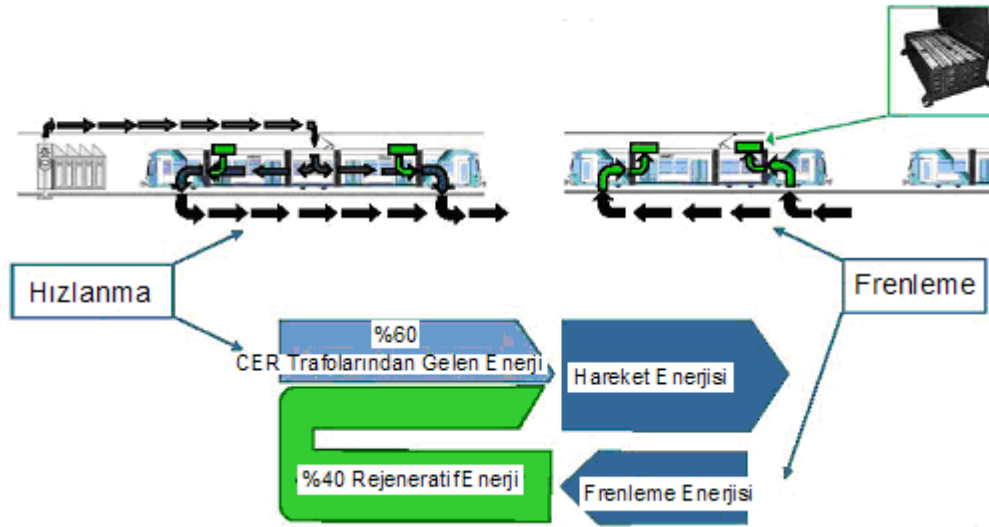
Benzer şekilde, Kadıköy – Kartal metro hattına ilişkin veriler ile yapılan çalışmada da 2025 yılı işletme şartlarında yıllık tasarrufun 12.5 Milyon kWh olarak gerçekleşeceği bulunmuştur.

3.4 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 Şekil 3.1' de gösterildiği üzere araç üstüne uygun bir yere monte edilebilir. 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, inşaat boyutu, ağırlık, yük çevrimi kapasitesi ve güvenlidir [12]. Öne çıkan enerji depolama sistemleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1: Araç üstü enerji depolama örneği.

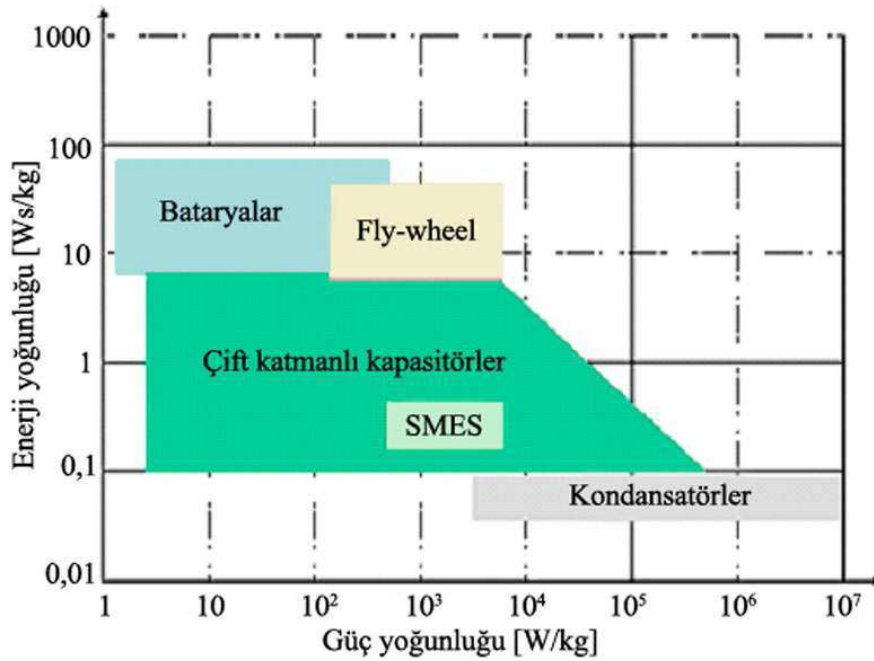


Şekil 3.2: Araç üstü enerji depolama sisteminin genel mantığı.

Şekil 3.2' den de görüleceği gibi, ivme durumunda katener hattından çekilen enerji motorlar tarafından kullanılır. Frenleme durumunda ise açığa çıkan enerji ile trenlerde yerleştirilen ultrakapasitörler şarj edilir ve fren resistörlerinde yakılmadığından dolayı 40% oranında enerji geri kazanımı söz konusudur.

3.4.1 Bataryalar (Akümülatörler)

Sekil 3.3' ten 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, Flywheel ve Süper Kapasitörlerin 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 [13].



Sekil 3.3: Farklı enerji depolama ortamları.

3.4.2 Çift katmanlı kapasitörler (Ultrakapasitörler)

Ultrakapasitörler enerjiyi, elektrokimyasal bir çift katmanın elektrik alanında depolarlar. Şekil 3.4' de görülen ultrakapasitörler, 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 esnekler ve değişik gerilim, güç aralığı ve yüklenen enerji

içeriği değerlerine seri ve paralel bağlama yapılarak basit bir adaptasyon imkânı sağlarlar [10].

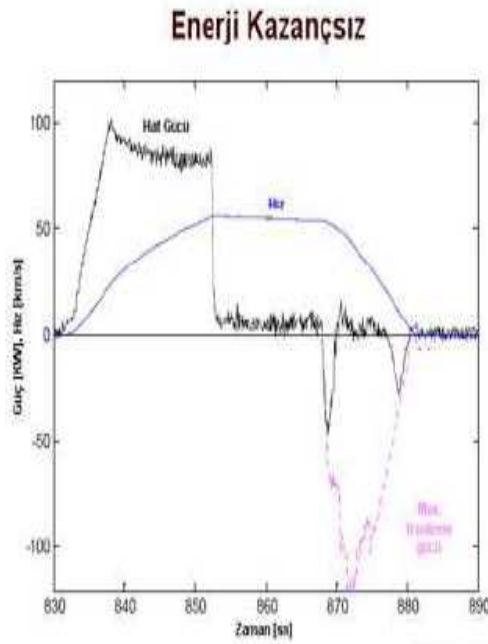


Tek Hücre:
2,5 V

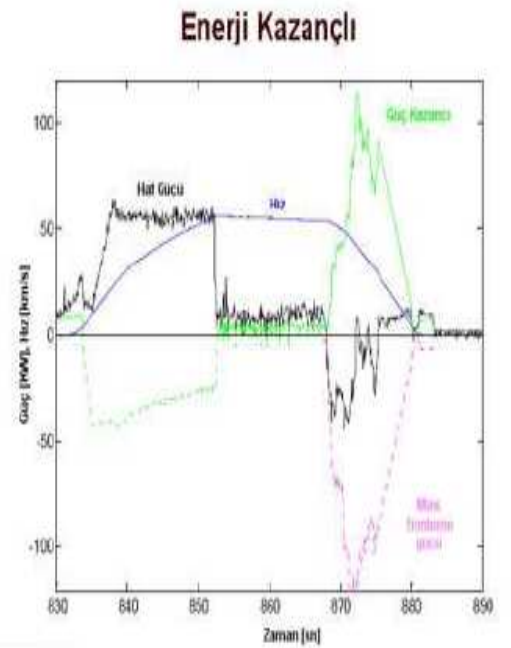


Seri Bağlanmış 160 Hücre:
400V

Şekil 3.4: Tekli ve çoklu ultrakapasitörlerin görünümü.



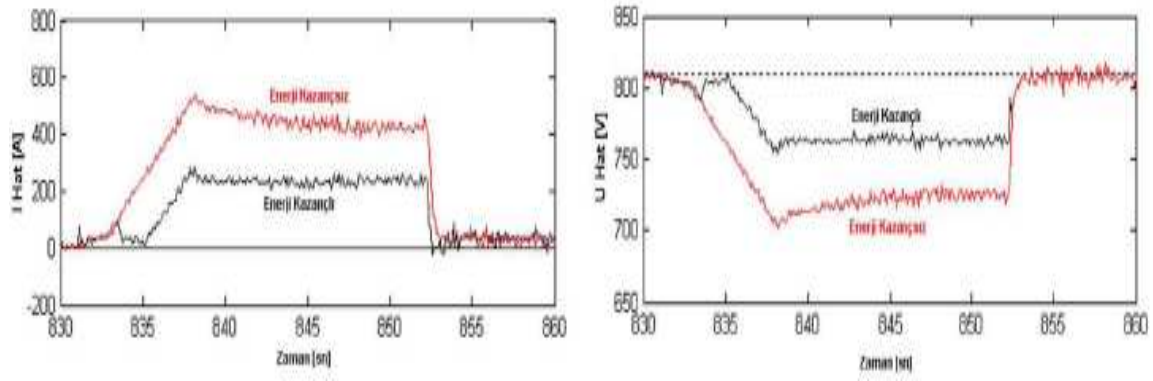
Şekil 3.5: Yalnız fren rezistörü bulunan aracın enerji tüketimi ve hız grafiği.



Şekil 3.6: Ultrakapasitör kullanılan araçtaki enerji tüketimi ve hız grafiği.

Yukarıdaki şekillerden sol taraftaki Şekil 3.5’ de fren resistörü olan araçtan, sağ taraftaki Şekil 3.6’ da araç üstü “Energy Saver” ultrakapasitör kullanılan araçtan alınmıştır. “Energy Saver” kullanılan sistemde, ivmelenme esnasında (0-50 km/h) hattan çekilen akım 50% ‘ye yakın daha düşük olmakta ve frenleme esnasında (50-0 km/h), yeşil renkte gösterildiği üzere, bir enerji kazancı söz konusu olmaktadır.

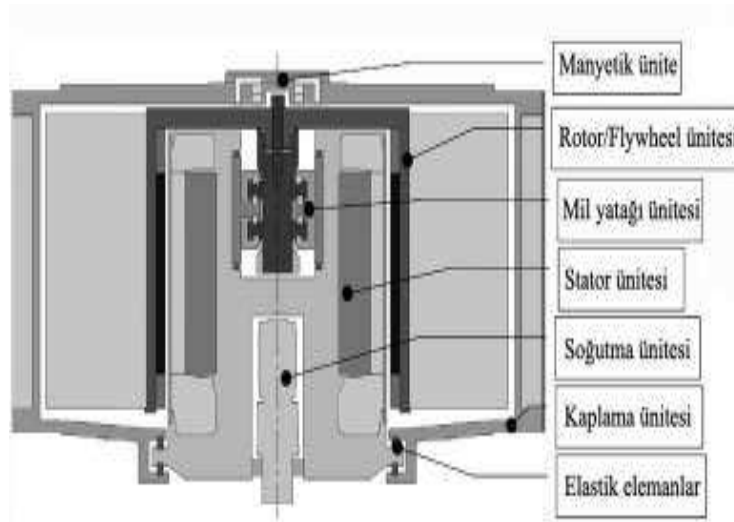
Şekil 3.7’ den de görüldüğü üzere, hattan çekilen akım 50% oranında azalır ve hat direnci gerilim düşümüne sebebiyet verdiğinden, gerilim düşümü 50% oranında düşüktür. [13,14].



Şekil 3.7: Ultrakapasitör kullanılan ve kullanılmayan hatlardaki akım-zaman grafiği ve gerilim-zaman grafiği.

3.4.3 Flywheel (Volan)

Flywheel, dönen kütle üzerine temellenen bir elektromekanik enerji depolama sistemidir. Şekil 3.8 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 yerdedir. %90' dan fazla verimliliği vardır. Piyasada var olan volanların yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Bir araştırmaya göre bunların amortisman süreleri 17–30 yıl olarak hesaplanmıştır[13,15]



Şekil 3.8: Volan kesiti.

3.5 Araç Üstü Enerji Depolamanın Avantajları

Enerji depolama sistemleri enerji tasarrufunu büyük ölçüde artırılabilir. 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. Bu sistemin sağlayacağı başlıca avantajlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

3.5.1 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 ve dolayısı ile araçların performanslarında oluşacak bir düşüşün önüne geçilecektir [16].

3.5.2 Trafo merkezlerinden talep edilen tepe güç değerinin düşürülmesi

Gereken gücün bir kısmının enerji depolamadan gelmesiyle hattan 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.

3.5.3 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 kesintisinin 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.

3.6 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.

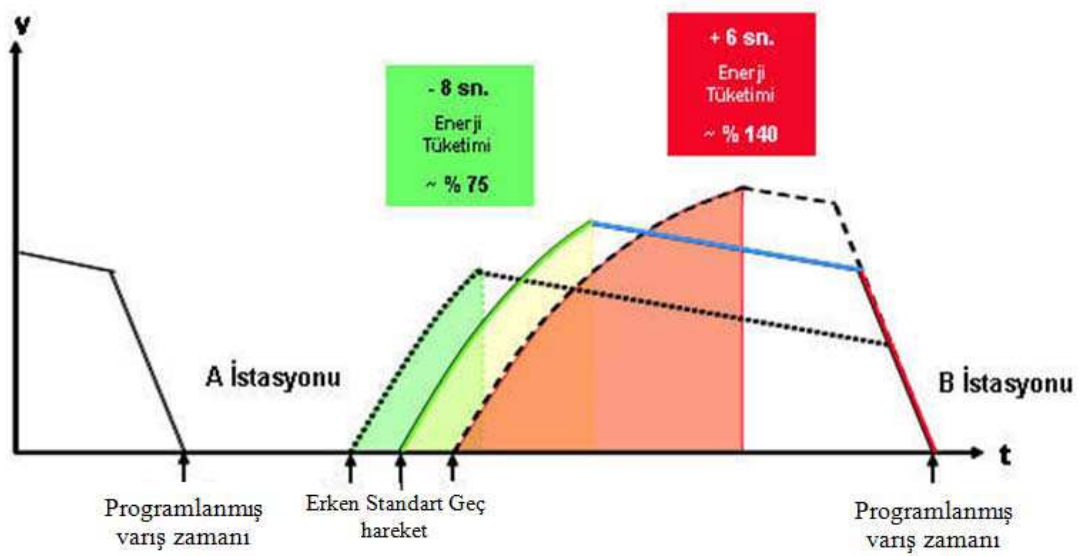
Zaman çizelgeleri genellikle hesaplanmış en düşük sefer süresine eklenmiş olan, tahmin edilemeyen gecikmelerin kapatılmasına imkân tanımak için belirli bir miktar “yedek zaman aralığını” kapsar. Yedek zaman aralıkları dakiklik bakımından da bir anahtar etkidir ve araştırmalar yolcuların çok büyük bir 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.

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 boşta 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.

3.6.1 Optimum enerji tasarrufu hız profili

Raylı sistem araçlarında sürüş teknikleri enerji tüketiminde önemli bir etkidir. Şekil 3.9’da istasyonda bekleme süresinden faydalanarak maksimum hızın indirgenmesinin enerji tüketimi üzerine etkisi görülmektedir.



Şekil 3.9: Erken veya gecikmeli kalkışların enerji tüketimine etkisi [17].

Optimum enerji tasarrufu için hız profili aşağıdaki gibi olmalıdır.

- Yüksek başlangıç ivmesi,
- İstasyonlar arası mesafeyi, yolcu yoğunluğuna, zaman çizelgesine ve hat geometrisini göze alarak en uygun düşük boşa alma hızı,
- Uzun boşa gitme süresi,
- Yüksek frenleme ivmesi,
- Düşük bekleme süresi,

Eğer bu prensipler uygulanabilirse, sürücülerin sürüş durumlarına göre %20–30 oranında enerji tasarrufu sağlanabilir [18].

3.6.2 Manuel sürüş prosedürleri

Manuel sürüş yapılan işletmelerde eğitim yolu ile başlangıçta mümkün olduğunca yüksek ivme ile kalkış, zaman çizelgesine göre mümkün olduğunca uzun süre boşta gitme şeklinde, enerji tasarruflu sürüş teknikleri, makinistlere öğretilir.

Diğer bir yöntem ise hat boyunca, aracı boşta alma noktalarına uyarı tabelaları koymaktır. Bu durumda, makinist tabelaları izleyerek iki istasyon arasında değişik sürüş durumlarına göre treni sürmeye çalışır.

Daha karışık, fakat daha etkili olan bir teknik de değişken hız kontrolü kullanmaktır. Değişken bir hız kesme, istasyon sonlarında makinistin görebileceği bir noktaya merkezle haberleşip makiniste gideceği hızı gösteren bir dijital gösterge yerleştirilir. Makinist de kendine bildirilen hıza göre sürüşünü yapar. Değerlendirme çerçevesinde bütün sürücülere talimatları vermek ve buna göre eğitmek ile %10'luk bir cer enerjisi tüketimi kazancı olacağı öngörülmektedir [18].

3.6.3 Otomatik sürüş prosedürleri

Günümüzde birçok yeni hatta trenler, sistem tarafından enerji verimli sürüş prensipleri göz önüne alınarak otomatik olarak sürülmektedir. Otomatik sürüşün avantajı, manüel sürüşte oluşan makinist ve işletme hatalarının izole edilmesidir. Tren üzerindeki frenleme ve tahrik kontrol ünitesi vasıtası ile trenin hızı, frenleme ve hızlanma ivmesi, boşta gitme süresi ve konforlu sürüş kontrol edilir.

Otomatik sürüşün diğer bir avantajı da trenlerin koordinatlarının ayarlanabilmesinden dolayı bir trenin frenleme yaparken diğer bir trenin aynı anda ivmelenmesi ve rejeneratif frenleme ile üretilen enerjinin harcanması da sağlanabilir. Sürüş tekniklerine ve otomatik sistemin özelliğine göre enerji tasarruflu sürüş durumunda %30'un üzerinde enerji tasarrufu sağlanabilir [18].

Taksim – 4 Levent arasında işletilmekte olan İstanbul Metrosu, normal işletme şartları altında otomatik olarak sistem tarafından sürülmektedir. ATO (Automatic Train Operation, Otomatik Tren İşletimi) sistemi ATC (Automatic Train Control, Otomatik Tren Kontrolü)'den gelen talimatlar doğrultusunda iki istasyon arasındaki en uygun maksimum hızı beş değişik opsiyon içinden seçerek kullanmakta ve bunun enerji tasarrufu sağladığı bildirilmektedir, ancak modern sistemlerde, maksimum hızı

artırarak ve coasting (boşta gitme) moduna geçilmesinin daha fazla enerji tasarrufu sağlanabileceği bildirilmektedir.

3.7 Tren Sürüş Kontrol ve Enerji Yönetim Stratejileri

Şehir içi raylı sistemler, sinyalizasyon sistemlerine göre işletilir ve kontrol edilirler.

Genel olarak sinyalizasyon sistemleri ise sabit bloklu (SB) veya hareketli bloklu (HB) şekilde tasarlanırlar. Trenler, bu blokların meşguliyet (doluluk) durumuna göre hareket ederler. Mevcut Taksim – 4. Levent arası yapılmakta olan işletim sabit bloklu (SB) sisteme göre tasarlanmış olup. Şu anda hattın her iki ucunda eklenen istasyonlar ve daha sonra eklenilecek istasyonlar öngörülerek, İstanbul halkına daha hızlı servis verebilecek ve işletmeci firma için enerji verimliliğinden daha fazla yararlanılabilecek sistem olan hareketli blok (HB) sisteme geçilmeye karar verilmiştir. Bu sistem 29.09.2009 tarihinde faaliyete girecektir.

3.7.1 Sabit ve hareketli blok sinyalizasyon sistemleri

Son zamanlarda, sinyalizasyonda haberleşme tabanlı sistemler yaygınlaşmaktadır. Haberleşme tabanlı sinyalizasyon sistemlerinin en önemli özelliklerinden birisi HB prensibine dayalı otomatik tren kontrolü (ATC) kullanılmasıdır. Bu özellik, SB’lu sistemlere göre hattın kapasitesini ve işletme esnekliğini arttırmaktadır. HB’lu sistemde, SB’lu sisteme göre en büyük fark, hat boyu ve araç üstü ekipmanlar arasındaki emniyet ve kumanda bilgilerinin aktarımının telsiz tabanlı haberleşme ile gerçekleştirilmesidir. Konvansiyonel olan HB sistemlerde bu işlem hat boyunca bulunan endüktif kablo halkaları ile yapılmaktadır. Bu işlem 3. ray uygulaması olan yerlerde güçlük oluşturmakta ve bakım işlemlerini zorlaştırmaktadır. HB’lu ATC’nin işletmesel avantajları her trenin kendi emniyet mesafesini dinamik olarak belirleyebilmesidir. Bu hesaplamayı mevcut hızını, yerini ve frenleme kapasitesini her an bilerek gerçekleştirir. Merkezi sistem her trene önündeki trenin bilgisini iletir. Böylece trenler kendi performanslarını bu bilgiye göre ayarlarlar. Bu sebeple, her zaman trenler arasında “değiştirilebilir hareketli bölüm” olarak tanımlanabilecek bir değişken blok bölümü korunmuş olur.

3.7.2 HB kontrol ve koruma prensibi

HB sistemlerde, trenler arasındaki mesafeyi onların emniyetli duruş mesafesi belirler. Burada farklı kabuller vardır. Geleneksel demiryollarında HB kavramı “tuğla duvar” kavramına dayanır: Öndeki trenin o andaki yerinde sabit durduğu, hareket edemeyeceği kabulü yapılır.

3.7.3 HB’ lu sistemin performans faydaları

SB sistemlerde, hat kapasitesi ilave blokların eklenmesi ile artırılabilir. Ancak, ilave edilen blokların faydası, ilave edilen blok sayısı ile azalır. Ekipman cevap süreleri gibi hususlar, kapasite artışını belli bir noktadan olumsuz etkiler. SB sistemlerde, en büyük hat kapasitesi maksimum tasarım hızında elde edilir. Daha düşük hızlarda işletme sunulan kapasiteyi azaltır. HB sistemde ise tüm hızlar tasarım hızıdır. İşletmede tren çalıştırma sıklığını belirleyen en büyük etken, hat sonu geri dönüşleri ve yolcuların boşaltılıp bindirildiği platform sayısıdır.

Faklı araçların çalıştırılması durumunda, SB sistem en kötü frenleme karakteristiğine sahip trenlere göre tasarlanmalıdır. HB sistemlerde bu bir sorun teşkil etmez. SB sistemlerde hız sınırlama bilgileri kesintili olarak (ray devrelerinin bulunduğu yerlerde) verilirken, HB sistemlerde, bu bilgi sürekli olarak güncellenmektedir. Bu sebeple, yolculuk süresi kısaltmakta ve daha az trenle daha sık sefer yapılabilir.

Boşta gitme (coasting) kontrolü: Metro trenleri genellikle maksimum hız ile gitme (tam gaz modu) durumuna göre yolculuk süresini %10 uzatacak kadar boşta gitme şartında giderler. Burada amaç, enerji tasarrufu ve olabilecek bir aksaklıkta kullanılabilecek zaman elde etmektir. SB sistemde, bu durum hattın maksimum kapasitesini düşerken HB sistemde tersi bir etki yapar: Boşta giden trenler, daha kısa emniyet mesafelerine ihtiyaç duyarlar. Dolayısı ile HB sistemde doruk saatlerde dahi boşta gitme uygulanabilir.

3.7.4 HB sinyalizasyon sisteminde dikkat edilmesi gereken hususlar

HB sinyalizasyon sisteminde trenler arasında, frenleme mesafesine ilave olarak emniyet mesafesi kadar daha bir mesafe vardır. Trenler ve sinyalizasyon sistemine ait hat boyu ekipman arasında çift yönlü haberleşme vardır ve trenlerin yerleri hassas olarak bilinebilir. Haberleşme tam olarak sürekli olmasa da, tarama frekansının

yüksekliği ile neredeyse sürekli şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Haberleşme, iletken halkalar ile gerçekleştirilir ve halkaların uzunluğu, tren yerinin belirlenme hassasiyetini belirler.

Yukarıda anlatılan çalışma prensibi gereği bir sorun oluşması durumunda trenler, emniyet mesafesini gözeterek birbiri ardına dizilirler. Sorun giderilince tüm trenler aynı anda kalkışa geçmeye çalışırlar. Bu gibi trenlerin yığılması durumunda oluşacak olumsuz etkiler düşünölerek TM sayısı arttırılır. İlk maliyet artar ve TM'ler normal şartlar altında düşük kapasite ile çalıştırılırlar.

4. RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİ EDEN BAZI PARAMETRELERİN SİMULASYON YOLU İLE İNCELENMESİ

Bu çalışmada, 3 farklı parametrenin enerji tüketimi üzerine etkileri İstanbul Aksaray – Havalimanı Hafif Metrosu göz önünde bulundurularak araştırılmıştır. Bu parametreler sırasıyla tren ağırlığı, işletme sıklığı, maksimum hızlanma ivmesi. Bu parametrelerden işletme sıklığının enerji tüketimine etkisi simülasyon programı tarafınca incelenmiştir. İlk olarak testlerde kullanılan simülasyon programı ve bildiride kullanılan test sistemi tanıtılmış, ardından da bu parametrelerin enerji tüketimi üzerine etkileri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar en son bölümde özetlenmiştir.

4.1 Test Hattı: Aksaray – Havalimanı Metro Hattı

Yapılan bütün simülasyon testlerinde Aksaray – Havalimanı LRT hattı karakteristikleri kullanılmıştır. Hattın ana özellikleri aşağıdaki gibidir.

Hat uzunluğu: 19 km

Tren Sayısı: 4 tahrikli araçtan müteşekkil, 92 m.

Yolcu istasyonu: 17

Tren Ağırlığı: 116/186 Ton

Trafo merkezi (TM) : 9

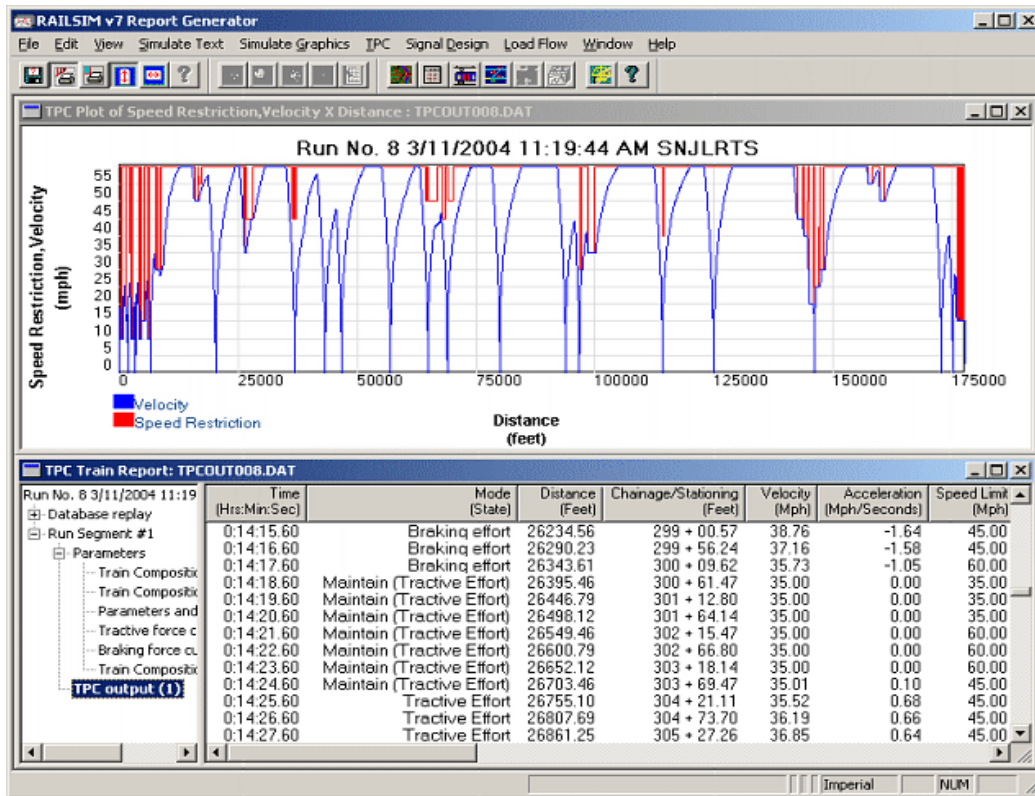
Nominal Gerilim: 750 VDC, Katener sistemi

Günlük Yolcu: 240000

4.2 Raylı Sistem Simülasyon Programı RAILSIM [19]

RAILSIM raylı sistem uygulamalarında kullanılan bir simülasyon yazılımı olup, karmaşık raylı sistem hatlarını (hafif metro, ağır metro, tramvay v.b.) modelleyebilen birçok parametreyi işletmecinin kriterlerine göre analiz edebilen ve kullanıcıya ensek arayüz (Şekil 4.1) seçenekleri ile kolaylık sağlayabilen bir programdır.

İUAŞ tarafından lisansı ile satın alınan RAILSIM İstanbul'daki raylı sistem hatlarından yolcu konforunu en yüksek seviyede tutacak şekilde işletme giderlerini minimumu verebilmek için bu programı kullanmaktadır.



Şekil 4.1: RAILSIM arayüzüne bir örnek.

Bu bağlamda 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. Raylı sistem simülasyon çalışmalarında en önemli husus, analizi yapılacak hattın parametrelerinin doğru ve eksiksiz bir şekilde programa girilmesidir.

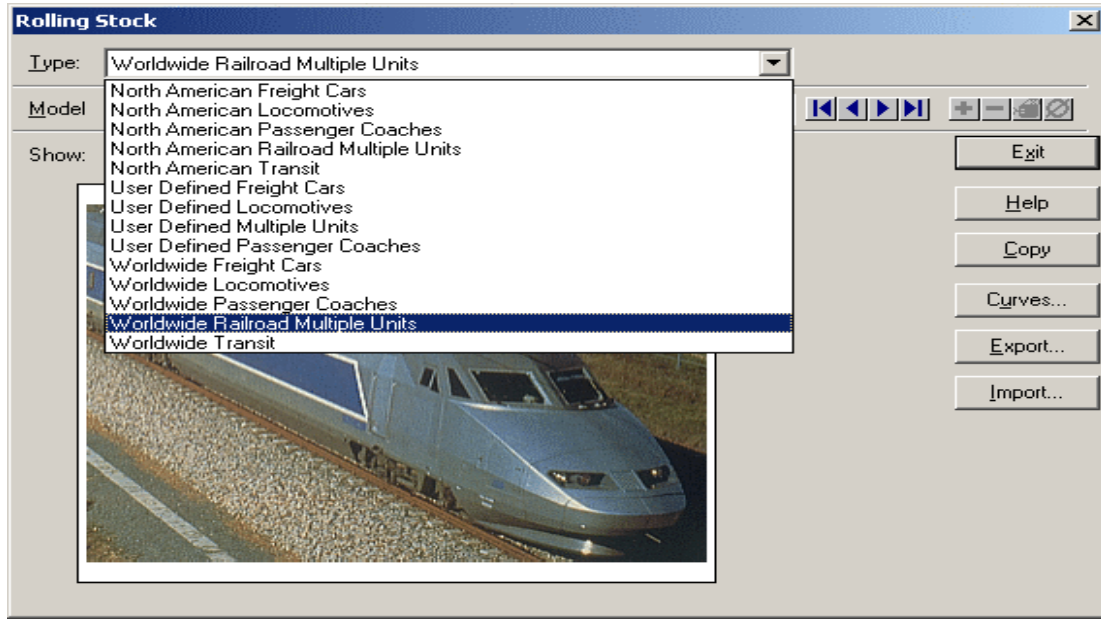
Bunun dışında hazırdaki bir sistem üzerinde kullanılan araçların değiştirilmesi veya headway (trenler arası süre) zamanın kısaltılması gibi büyük modifikasyonlar yapılacağı zaman da simülasyon yapılmalıdır. Genel olarak bakıldığında simülasyon programlarının şu amaçlarla kullanılabileceği görülür:

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
- Enerji tasarruf programlarının uygulamadan önce test edilmesi
- Ray Gerilimi ve Kaçak akım analizi
- Farklı besleme şekillerinin test edilmesi
- 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.

Şekil 4.2' de görülen arayüzde Dünyada ki Raylı sistem araç üreticilerinin yapmış olduğu tren modellerinin birçoğunu kütüphanesi bulunup, kullanıcının hatta kullanılan aracın parametrelerine (maks. hız, maks. hızlanma ivmesi, min. yavaşlama ivmesi v.b.) programa girmesine gerek kalmadan hatta işletilen aracı kullanabilmektedir.



Şekil 4.2: RAILSIM’e ait araç kütüphane arayüzü.

4.2.1 Sistem parametreleri

Yukarıda bahsedildiği gibi doğru bile analiz yapabilmenin en önemli koşulu sistem parametrelerinin doğru ve tam biçimde girilmesidir. Simülasyon için gerekli olan parametrelerden bazıları üç ana bölüm altında aşağıda listelenmiştir:

4.2.1.1 Hat ile ilgili gerekli veriler

- Hat sayısı, isimlendirmeleri ve metrajı
- 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)
- Sinyal ışıkları ve bunlara bağlı ekipmanlara (örneğin, halkalar) ilişkin veriler.

4.2.1.2 Cer gücü ve enerji iletim sistemi ile ilgili veriler

- Trafo merkezi sayısı, hattaki konumları (noktasal olarak)

- Trafo merkezi iç ekipman etiket değerleri
- (+) ve (-) fider kablolarının ve kesicilerinin özellikleri (açma akımları, bunların RMS değerleri, her bir kablo için ayrı ayrı bağlantı noktası)
- Trafolar arası seksiyon bölgeler
- Enerji iletim sistemi verileri (3. ray, kataner v.b.)
- Bonding (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).

4.2.1.3 Araçlar

Raylı sistem araçların mekanik ve elektrik verileri

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

Elektriksel veriler

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

4.3 Enerji Tüketimine Etki Eden Ana Parametrelerin İncelenmesi

Bu bölümde işletme sıklığının, tren ağırlığının, başlangıç ivmesinin trenin performansına, harcadığı elektrik enerjisine ve kullandığı elektrik enerjisine olan etkilerinin öğrenabilmek için simülasyon programlarınca yapılan analizler hem tablo hem de grafik halinde incelenecektir.

4.3.1 İşletme sıklığının etkisi

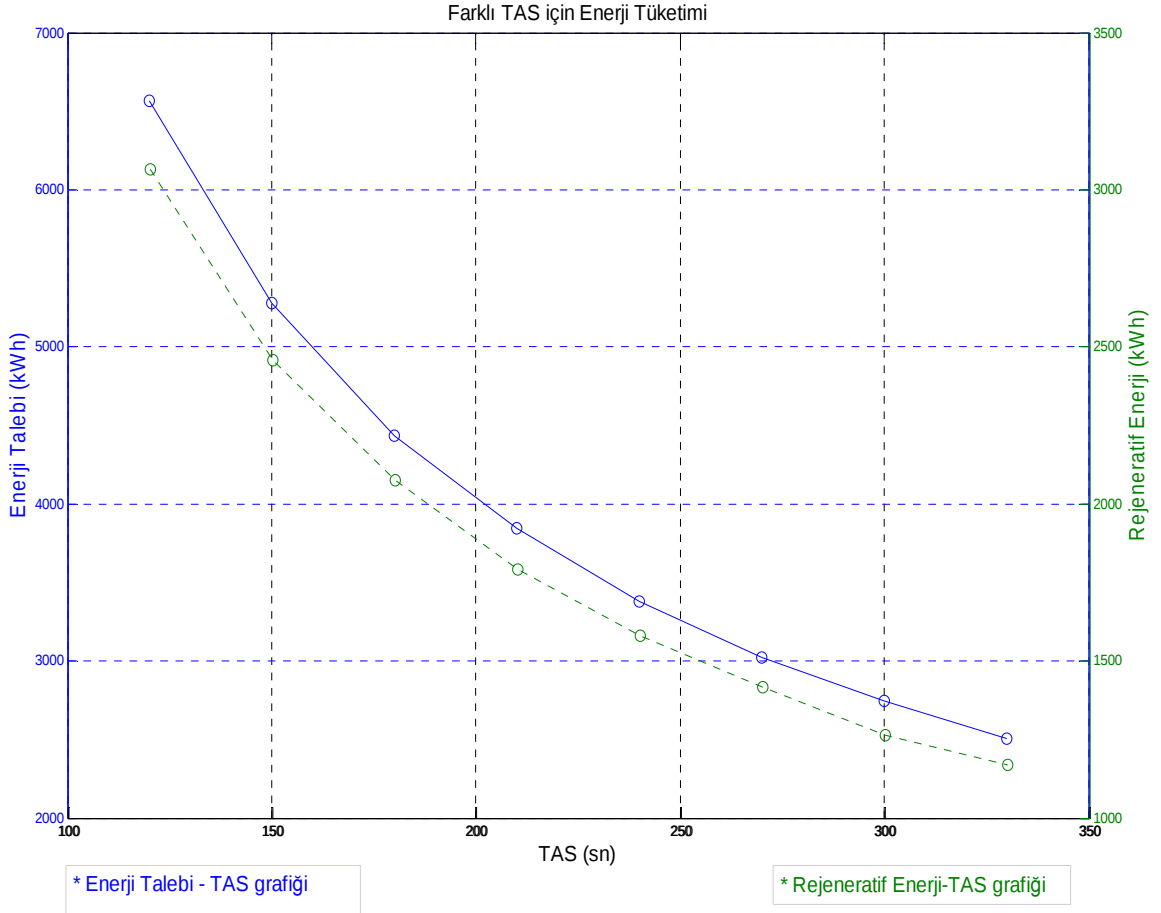
Trenler normal olarak belli zaman aralıkları ile ard arda hat'a gönderilir. Buna trenler arası süre (TAS) denir. Metro sistemlerinde bu 75 saniyeye kadar düşebilir, banliyö hatlarında ise 2.5–10 dakika arasındadır.

TAS hattaki geri kazanım oranını ve dolayısı ile enerji tüketimini etkiler. TAS'ın küçük olması, tanımlanmış bir güç bölgesinde daha çok aracın aynı anda var olması ve dolayısı ile ivmelenen, frenleyen trenlerin eş zamanlı bulunma olasılığının artması demektir.

Bu çalışmada, 120 saniyeden başlayarak, otuzar saniyelik artışlarla, 330 saniyeye kadar, toplam 8 farklı TAS için RAILSİM yardımı ile simulasyon testleri yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.1' de özetlenmiş ve grafik olarak da Şekil 4.3' de verilmiştir.

Çizelge 4.1: 4'lü tren seti için değişik TAS (trenler arası süre) deki talep ettiği enerji ve bu enerjinin rejeneratif enerjiye dönüşen kısmı.

TAS (sn)	Enerji Talebi(kWh)	Rejeneratif Enerji(kWh)
120	6566.81	3064.56
150	5280.46	2457.71
180	4434.26	2073.72
210	3841.61	1790.53
240	3378.36	1580,78
270	3024.37	1416.05
300	2749.35	1264.27
330	2504.29	1168.43



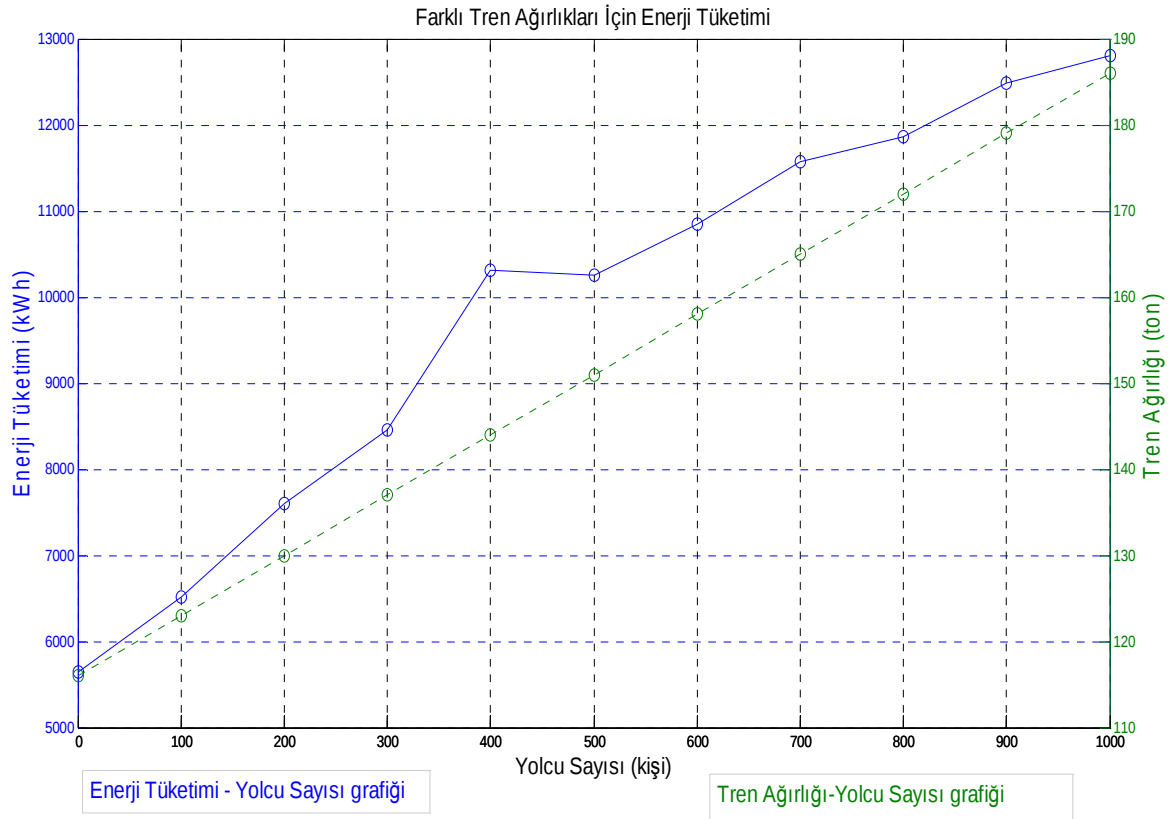
Şekil 4.3: Değişik TAS süreleri için enerji talebi ve rejeneratif enerji grafikleri.

4.3.2 Tren ağırlığının etkisi

Trenin yolcusuz ağırlığı ve kademeli olarak arttırılması ile tam yolculu ağırlıklarının enerji tüketimine etkisini temel alan bu çalışma, aracın (4'lü set) bir sefer süresinde, trenin boşta olan ağırlından başlayıp kişi ağırlığını 70 kg. alarak her sefer sonunda 100 kişi araca ilave ederek aracın tam dolu hale gelene kadar ki enerji tüketimi ilişkisi incelenmiştir. Bu araştırma simülasyon programı RAILSIM yardımı ile yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.2' de özetlenmiş ve grafik olarak da Şekil 4.4' de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Farklı tren ağırlıkları için enerji tüketimi.

Tren Ağırlığı (Ton)	Yolcu Sayısı (Kişi)	Enerji Talebi (kWh)
116	0	5650,40
123	100	6512,73
130	200	7604,25
137	300	8461,72
144	400	10315,91
151	500	10259,10
158	600	10840,58
165	700	11579,11
172	800	11860,61
179	900	12486,76
186	1000	12803,06



Şekil 4.4: Farklı yolcu sayıları için enerji tüketimi ve tren ağırlığı grafikleri.

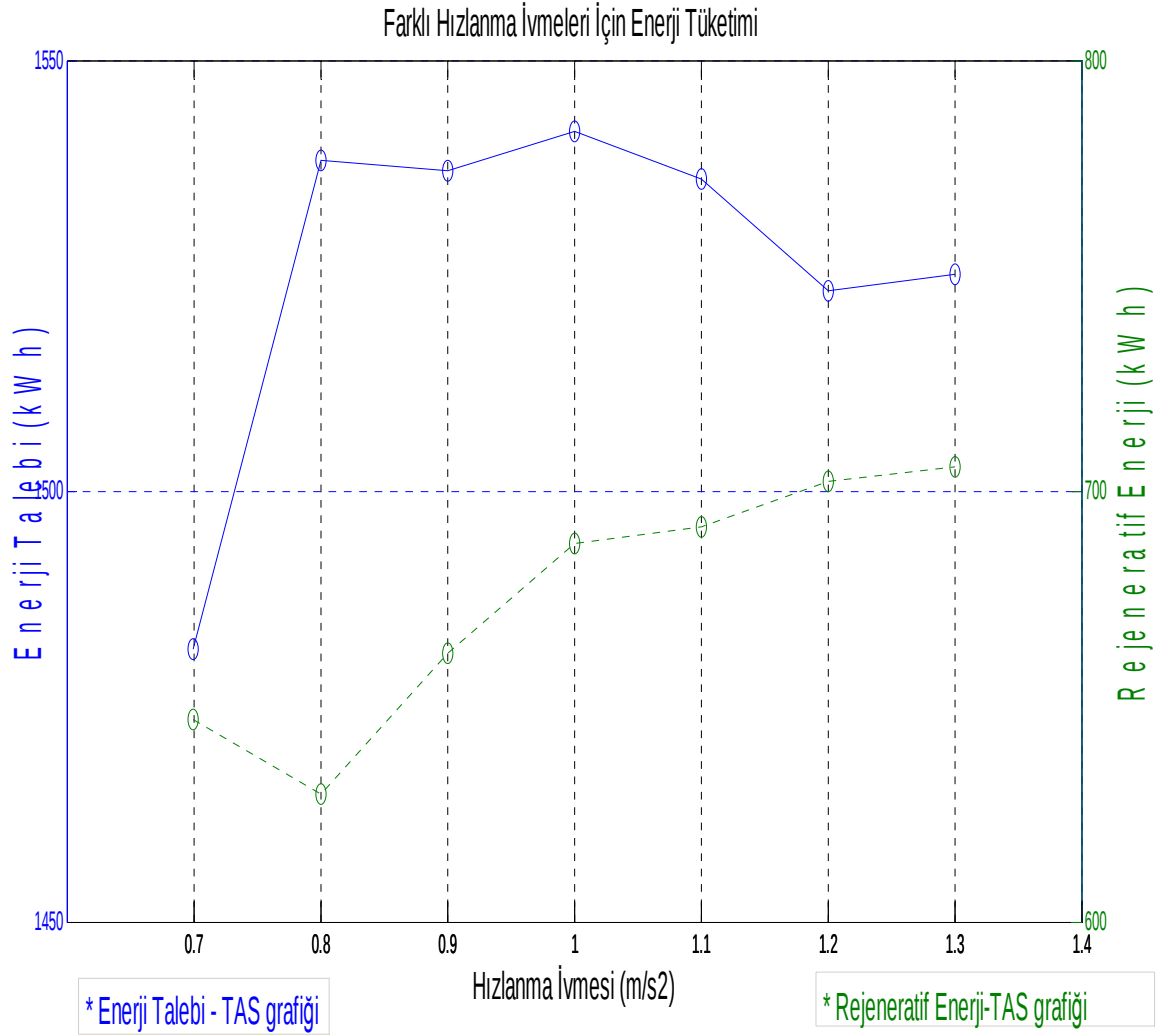
4.3.3 Hızlanma ivmesinin etkisi

Hızlanma ivmesi, aracın kalkışı anında uyguladığı ivmedir. Hızlanma ivmesinin değeri hattan çekilen emnerji ile direkt alakalıdır. Bu değer aracın TAS(Trenler Arası Süre) değerini de etkiler.

Bu çalışmada, 7 turluk bir işletmede sabit bir TAS süresinde (300 sn) hatta kullanılan araçların en büyük hızlanma ivmesi 1.3 m/s^2 ve en küçük hızlanma ivmesi 0.7 m/s^2 değerlerini arasındaki değerleri değiştirerek RAILSIM yardımı ile simülasyon testleri yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.3’ de özetlenmiş ve grafik olarak da Şekil 4.5’ de verilmiştir.

Çizelge 4.3: Farklı hızlanma ivmeleri için enerji tüketimi.

Hızlanma ivmesi (m/s^2)	Enerji Talebi(kWh)	Rejeneratif Enerji(kWh)	TAS (sn)
0.7	1481.73	646.98	300
0.8	1538.41	629.33	300
0.9	1537.16	662.07	300
1.0	1541.74	687.54	300
1.1	1536.08	691.49	300
1.2	1523.09	702.27	300
1.3	1525.05	705.60	300



Şekil 4.5: Farklı hızlanma ivmeleri için enerji talebi ve rejeneratif enerji grafikleri.

Şekil 4.5 incelendiği zaman artan ivme ile enerji tüketiminin arttığı, yolculuk süresinin ise azaldığı görülmektedir. Her iki eğriden de görüldüğü üzere 1.05 m/s² ivme değerinden sonra eğriler düzleşmektedir. Bunun sebebi araçların ürettiği cer kuvvetidir.

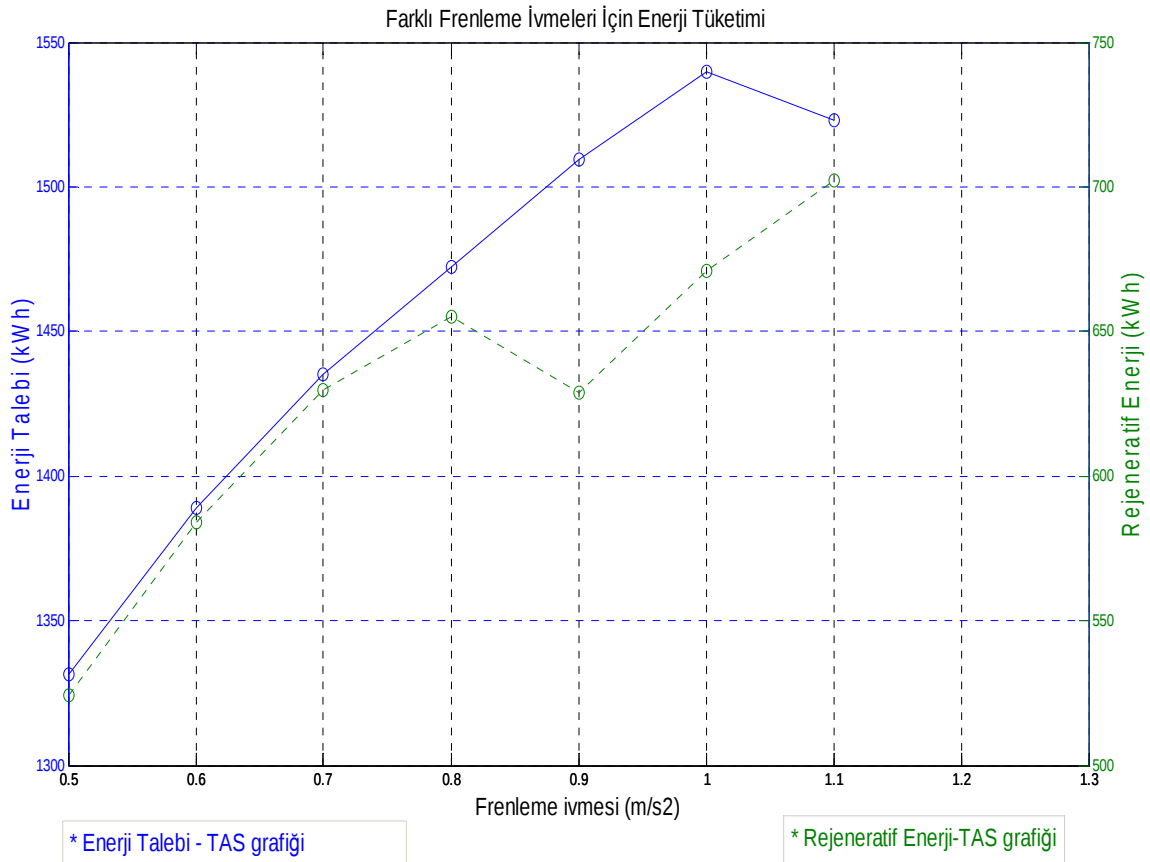
4.3.4 Frenleme ivmesinin etkisi

Frenleme ivmesi, aracın frenleme anında uyguladığı ivmedir. Frenleme ivmesinin değeri de hattan çekilen enerji ile direkt alakalıdır. Bu değer aracın TAS(Trenler Arası Süre) değerini de etkiler.

Bu çalışmada, 7 turluk bir işletmede sabit bir TAS süresinde (300 sn) hatta kullanılan araçların en büyük frenleme ivmesi 1.1 m/s^2 ve en küçük hızlanma ivmesi 0.5 m/s^2 değerlerini arasındaki değerleri değiştirerek RAILSİM yardımı ile simülasyon testleri yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.4’ de özetlenmiş ve grafik olarak da Şekil 4.6’ da verilmiştir.

Çizelge 4.4: Farklı frenleme ivmeleri için enerji tüketimi.

Frenleme İvmesi (m/s^2)	Enerji Talebi(kWh)	Rejeneratif Enerji(kWh)	TAS (sn)
0.5	1331.35	524.03	300
0.6	1389.07	584.15	300
0.7	1435.26	629.83	300
0.8	1472.42	655.27	300
0.9	1509.39	629.06	300
1.0	1539.68	671.02	300
1.1	1523.09	702.27	300



Şekil 4.6: Farklı frenleme ivmeleri için enerji talebi ve rejeneratif enerji grafikleri.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, DC raylı sistemlerdeki enerji tüketim değerinin bazı parametrelerden nasıl etkilendiği incelenmiştir. İncelemeler sonucunda aşağıdaki hususlar tespit edilmiştir:

- Tren işletme sıklığı rejeneratif enerjinin geri kazanımında çok önemlidir. Daha kısa TAS daha fazla geri kazanım dolayısı ile daha az enerji tüketimi anlamına gelmektedir.
- Trenin ağırlığı enerji tüketimini lineer olarak etkilemektedir. Yeni alınacak araçlarda bu husus mutlaka dikkate alınmalıdır.
- Buna karşılık işletme açısından en önemli parametrelerden biri olan kişi başına enerji tüketiminde araçların belirli bir doluluk oranını sağlaması gerektiği bilinen bir gerçektir. İstanbul Aksaray – Havalimanı Hafif Metrosu için gerçekçi verilerle yapılan simülasyonlar sonucunda araçların doluluğu ile kişi başına enerji tüketimi arasındaki ilişki ortaya konmuştur.
- Düşük hızlanma ve frenleme oranları enerji tüketim değerini azaltmaktadır, ancak bu uygulamalar yolculuk süresini arttırmaktadır.
- Araç üstü veya istasyonlarda yerleştirilecek enerji depolama sistemlerinin, ihale döneminde elektrik sistemlerinin tasarım aşamasında düşünülmesi durumunda, sistemdeki bir çok elektrik ekipmanın yerleştirilmesine gerek kalmamasının yanında sistemde önemli oranda enerji verimliliği de sağlayacaktır.
- Manuel sürüşün yapıldığı işletmelerde, yüksek ivme ile hızlanma ve yavaşlama, zaman çizelgesine göre mümkün olduğunca uzun süre boşta gitme şeklinde bir işletmenin yapılması tüketilen enerji bakımından işletmeye önemli tasarruflar kazandıracaktır.

- Otomatik sürüşün yapıldığı işletmelerde, yolcu yoğunluna göre günün değişik saatlerinde uygulanacak farklı otomatik sürüş prosedürleri, trenler arası süreye (TAS) doğrudan etkileyeceğinden dolayı işletmede önemli enerji tüketimi kazançları sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **London Underground Environmental Report**, 2006
- [2] <http://www.railway-energy.org/tfee/index.php>, Son erişim Mart 2009.
- [3] **International Metropolitan Railways Committee**, 1997. Public Transport: The environment and economic efficiency, Part 2, *UITP 52. International Congress*, Stuttgart.
- [4] **Albrecht T.** 2004. Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control, *Computers in Railways IX*, WIT Press, ISBN:1-85312-715-9 pp. 885-894
- [5] **European standard EN 50163.** Railway applications - Supply voltages of traction systems.
- [6] **Açıkbaş, S. and Söylemez, M.T.** 2004. Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation, *Computers in Railways IX*, WIT Press, ISBN:1-85312-715- 9, pp. 951–960.
- [7] **Goh, E.J., Chu, K.N. and Ng, N.K.,** 2004. 1500V DC traction system for the North East Line, *Int'l Conf. on Power System Technology – POWERCON* Singapore, 21-24 November.
- [8] **İstanbul Ulaşım AŞ dahili rapor**, 2006. Kadıköy – Kartal metro hattı enerji tüketiminin 750 VDC ve 1500 VDC durumları için karşılaştırılması.
- [9] **Albert, H., Levin, C., Vietrose, E. and Witte, G.,** 1995. Reducing energy consumption in underground systems, September.
- [10] **Rufer A.** “Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substation in DC-Transportation Networks”, *EPE* 2003, Toulouse.
- [11] **Pham, K.D. Thomas, R.S. and Stinger, W.E.,** 2003. Operational and safety considerations in designing a light rail DC traction electrification system, *IEEE/ASME Joint Rail Conference*.
- [12] **Dr. M. Steiner, Dr.J. Scholten,** “Energy Storage On Board Of DC Fed Railway Vehicles”, *PESC 2004 Conference in Aachen*, Germany.
- [13] **International Union of Railways (UIC)**, (<http://www.railway-energy.org>)
- [14] **Maxwell Technologies** (<http://www.maxwell.com>).
- [15] **S. Samineni, B. K. Johnson, H. L. Hess, J. D. Law,** “Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storage System with a Power Converter Interface”, *IPST 2003 in New Orleans*, USA.

- [16] **S.P.Gordon, W.S.Rorke.** “Energy Storage and Alternatives to Improve TrainVoltage on a Mass Transit System”, April 1995.
- [17] **UITP,** “Energy Consumption At The HOCHBAHN, Energy-Optimized Driving” EIESS, November 2005.
- [18] **Albert, H., Levin, C., Vietrose, E. and Witte, G.** Reducing energy consumption in underground systems, September 1995.
- [19] www.railsim.com Son erişim Mayıs 2009.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Saim BARAN

Doğum Yeri ve Tarihi: Burdur 1982

Adres: Ortabayır Mahallesi Mahallesi. Mayıs Sokak. No:38/7 Gültepe Kağıthane
İstanbul

Lisans Üniversitesi: Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yayın Listesi:

- Türkay B., Mecitoğlu F., Baran S. 2008. Kısa Dönemli Hidrotermal Planlama Probleminin Çözümü İçin Revize Hızlı Evrimsel Programlama Yöntemi. *International Congress. ELECO 2008*. Bursa, Türkiye.