

Raylı Sistemlerde Orta Gerilim Elektrifikasyon Sisteminin Modellenmesi ve Besleme Senaryolarının Belirlenmesi

Modelling of Medium Voltage Electrification Systems and Specification of Feeding Scenarios in Railway Systems

Furkan Karakuş¹, Recep Yumurtacı²

¹Metro İstanbul AŞ
İstanbul Büyükşehir Belediyesi
furkankarakus@yandex.com

²Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi
ryumur@yildiz.edu.tr

Özet

Şehirler arası ve kent içi toplu taşımada cer gücü beslemeli raylı sistemlerin kullanımı yüksek verimli, hızlı ve etkin ulaşım olanağı sağlamasından dolayı hızlı bir şekilde artmaktadır. Mevcut ve yapılması planlanan raylı sistem hatlarının enterkonnekte altyapıya olan etkilerinin incelenmesi ve raylı sistem elektrifikasyon koruma sistemlerinin geliştirilmesi gibi elektriksel etüd çalışmalarının yapılabilmesi için simülasyon programlarının efektif kullanımı önem kazanmaktadır. Raylı sistemlerde bulunan spesifik elektriksel ekipmanlar ve dinamik yük profiline göre raylı sistem elektrifikasyon modelleme çalışmaları geleneksel elektrik dağıtım sistemi modelleme çalışmalarına göre farklılık arz etmektedir. Bu çalışmada raylı sistemler elektrifikasyon sistemleri hakkında bilgiler verilerek cer gücü beslemeli raylı sistemlerin bilgisayar yazılım programında modellenmesi sırasında izlenen metodoloji anlatılmış ve işletmede olan bir raylı sistem hattının orta gerilim elektrifikasyon sisteminin ETAP programında modellenmesi yapılarak besleme senaryolarının analizi yapılmıştır. Oluşturulan model ile bilgisayar programında tüm raylı sistemlerin simülasyonuna uygulanabilen bir raylı sistem modeli elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Raylı Sistemler, Yük Akış Analizi, Modelleme, Simülasyon, ETAP

Abstract

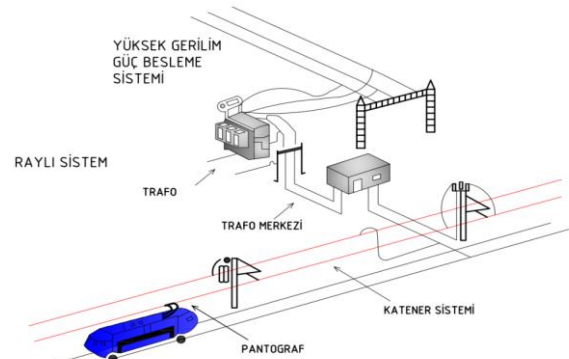
Use of traction power supplied railway systems is rapidly increasing as it provides highly efficient, fast and effective transportation in intercity and urban transportation. Effective usage of simulation programs is important to be able to make electrical studies such as investigation of effects of currently existing railway system lines to interconnected infrastructure and development of railway system electrification protection. Studies of electrification modeling of railway systems differ from conventional electric systems modeling studies as involvement of specific electrical equipment and dynamic

power profile. In this study, methodology that followed while modeling of traction power supplied railway systems in the computer program is explained while giving information about electrification of railway systems and analysis of supply scenarios are made while making modeling of electrification system of Railway system in operation in the ETAP program. A computer program model is developed which can be applied simulation of all railway systems.

Key Words: Rail Systems, Load Flow Analyses, Modelling, Simulation, ETAP

1. Giriş

Kent içi raylı toplu taşıma elektrifikasyon sistemleri orta gerilim seviyesinden alınan enerjiyi transformatör merkezlerinde indirip doğrultucu ile doğrultarak çeşitli değerlerde bulunan DC volt seviyesinde katener veya 3. ray vasıtası ile hareket halindeki trene ulaştırır. AC akım ile çalışan sistemlerde doğrultucu gurubuna gerek duyulmadan belirlenen AC gerilim değerlerine indirilerek cer gücü enerjisi temini sağlanır [1]



Şekil 1: Raylı sistem elektrifikasyon sistemlerinin basitleştirilmiş diyagramı [2]

Raylı sistem elektrifikasyon sistemlerinin basitleştirilmiş diyagramı Şekil 1’de gösterilmiştir. Dünya genelinde tren gerilim seviyeleri belirli değerler aralığında çalışmakta olup bu değerler EN 50163 standardında tanımlanmıştır. [3] İlgili değerler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1 : EN 50163’e göre elektrikli demiryollarında gerilim seviyeleri [4]

	Un	Umin2	Umin1	Umax1	Umax2	Umax3
DC 600 V	600	-	400	720	770	1015
DC 750 V	750	-	500	900	950	1269
DC 1,5 kV	1500	-	1000	1800	1950	2538
DC 3,0 kV	3000	-	2000	3600	3900	5075
AC 15kV 16,7 Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24311
AC 25kV 50 Hz	25000	17500	19000	27500	29000	38746

Elektrifikasyon sistemi cer gücünü tedarik eden transformatör merkezleri, katener sistemleri ve araçlardan oluşmaktadır. Transformatör merkezi güç talebi tren anma gücüne, yüküne, tren sefer sıklığına, bu merkezden beslenen ray sayısına vs. gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Raylı sistemlerde transformatör merkezleri dizayn edilmeden önce DC simülasyon yapılarak transformatör merkezi konumları belirlenir. [5] DC simülasyon yapım aşamasında kötü durum senaryosu olarak hatta göre bir transformatör merkezinde bulunan cer transformatörlerinden birisinin kaybedilmesi yada komşu bir veya iki transformatör merkezinin tamamının kayıp edilmesi durumları belirlenerek transformatör merkezi dizaynı yapılmaktadır.[6] Kesintisiz enerji sürekliliğini sağlamak amacıyla yapılan bu yedeklemeler yüksek oranda enerji sarfiyatına neden olmaktadır. İşletme şartları altında sıcak yedekli olarak çalışan cer transformatörleri yedekli çalışma durumundan dolayı % 33 oranında daha fazla enerji tüketmektedir.[7] Raylı sistemlerde kesintisiz enerji sürekliliğini sağlayarak arızalardan etkilenmeyen konforlu bir işletme sunmak için yedekleme yaparak önlem alınması zorunlu bir durumdur. Fakat işletme güvenliği ve enerji verimliliği arasında optimum dengeyi sağlamak önem arz etmektedir. Optimum besleme senaryolarının belirlenmesi ve enerji sarfiyatının minimum seviyede tutulması için simülasyon programlarını efektif olarak kullanmak gerekmektedir.

2. M1A - M1B LRT HATTI

M1A Yenikapı - Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı - Kirazlı hafif raylı sistem hattı 1989 yılında hizmete açılan Türkiye’nin ilk hafif raylı sistem metro hattıdır. Zaman içerisinde yeni açılan istasyonlar, değişen ekipman ve eklenen enerji besleme noktaları ile birlikte sistemin elektriksel parametreleri büyük oranda değişmiştir. TEİAŞ indirici merkezlerinde son yıllarda meydana gelen enerji kesintileri ile birlikte besleme noktalarının kaybedilmesi durumunda kalan besleme noktalarından hattın beslenmesi durumunda elektrifikasyon sisteminin altyapı yeterliliğinin bilinmesi enerji sürekliliği açısından önem arz etmektedir. Bu sebeplerden ötürü M1A Yenikapı - Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı - Kirazlı hafif raylı sistem metro hattının orta gerilim elektrifikasyon sisteminin ETAP programında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada ETAP simülasyon programı ile model oluşturulmuş olup mevcut elektrifikasyon altyapısındaki elementlerin gerçek elektriksel parametreleri

simülasyonda kullanılmıştır. Benzer çalışmalarda genelde elektriksel ekipmanların (cer transformatörsü, servis transformatörü, orta gerilim kablosu, TEİAŞ indirici merkez kısa devre güçleri vs.) parametreleri var sayım ile sabit alınarak modelleme yapılırken bu hat için yapılan modelde yer alan ekipmanların hepsi için gerçek etiket değerleri ve yüklenme değerleri kullanılmıştır. Sahada bulunan enerji analizörlerinden alınan veriler analiz edilerek orta gerilime bağlı bulunan 19 adeti cer 17 adeti iç ihtiyaç olmak üzere toplam 36 adet transformatörün tamamı yüklenme karakteristikleri ve etiket değerleri sahadan alınan gerçek değerler ile ayrı ayrı simule edilmiştir. Model çalışması sonucunda besleme noktalarının yüklenmeleri ve ilgili noktaların yerel elektrik dağıtım şirketi ile olan sözleşme güçleri karşılaştırılarak gelecekte sözleşme güçlerinin hesaplanması konusunda yaklaşımda bulunulmuştur

2.1. İstasyon Bilgileri

İlk olarak 1989 yılında Aksaray, Emniyet-Fatih, Topkapı-Ulubatlı, Bayrampaşa-Maltepe, Sağmalcılar, Kocatepe istasyonları açılarak hizmete başlayan hatta aynı yıl sonunda Esenler istasyonu eklenmiştir. 1994 yılında Otogar, Terazidere, Davutpaşa-YTÜ, Merter, Zeytinburnu, Bakırköy-İncirli istasyonları hizmete açılmıştır. 1995 yılında Ataköy-Şirinevler ve Yenibosna istasyonları, 1999 yılında Bahçelievler istasyonu, 2002 yılında DTM-İstanbul Fuar Merkezi, Atatürk Havalimanı istasyonları, 2013 yılında Menderes, Üçyüzlü, Bağcılar Meydan, Kirazlı istasyonları ve en son 2014 yılında ise Yenikapı istasyonu hizmete açılmıştır.



Şekil 2: M1A - M1B hattı istasyon tek hat diyagramı [8]

Yenikapı – Otogar istasyonları arasında sefer sıklığı daha fazla olduğu için cer gücü enerji tüketimi hattın diğer istasyonlarını besleyen transformatör merkezlerine göre daha fazla olmaktadır.

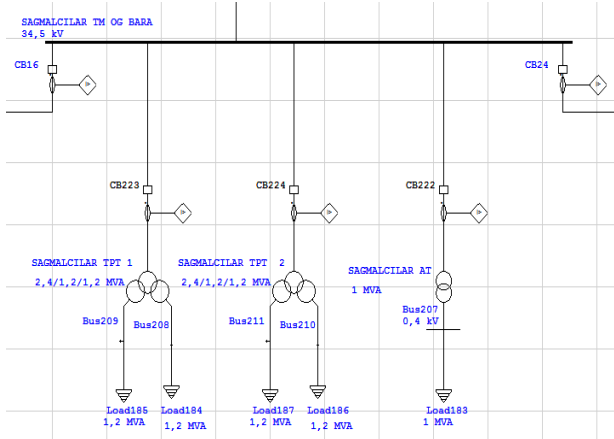
3. Elektrifikasyon Sistemi

M1A Yenikapı - Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı - Kirazlı hafif raylı sistem hattında bulunan toplam 23 adet istasyon ve 26,1 km uzunluğundaki katener hattının enerji beslenmesi hat üzerinde çeşitli lokasyonlarda kurulu olan toplam 19 adet transformatör merkezi ile sağlanmaktadır. Transformatör merkezlerinde 34,5 kV AC orta gerilim baralar bulunmakta olup transformatör merkezleri birbirlerine OG enerji kabloları üzerinden bağlanarak ring şebeke oluşturmaktadır.

3.1. Transformatör Merkezleri

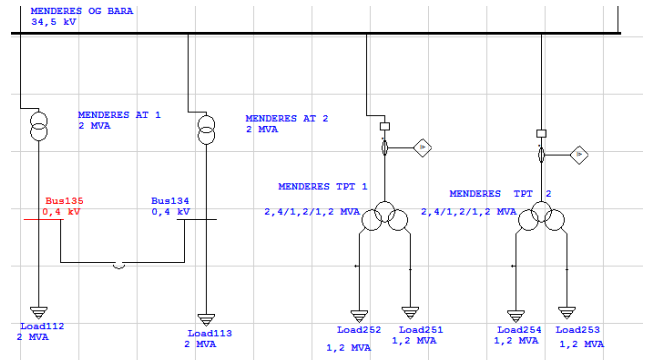
M1A - M1B hattında bulunan transformatör merkezleri içerisinde lokasyona göre sayısı değişen cer transformatörleri ve servis transformatörleri bulunmaktadır. Tren cer gücü ve istasyon enerji ihtiyaçları kurulu olan transformatör merkezleri

aracılığıyla temin edilmektedir. 19 adet transformatör merkezinde içindeki transformatör karakteristiklerine göre ETAP programında modellenmiştir. Örnek olarak Sağmalcılar transformatör merkezinin ETAP programında oluşturulan modeli Şekil 3’de gösterilmiştir.

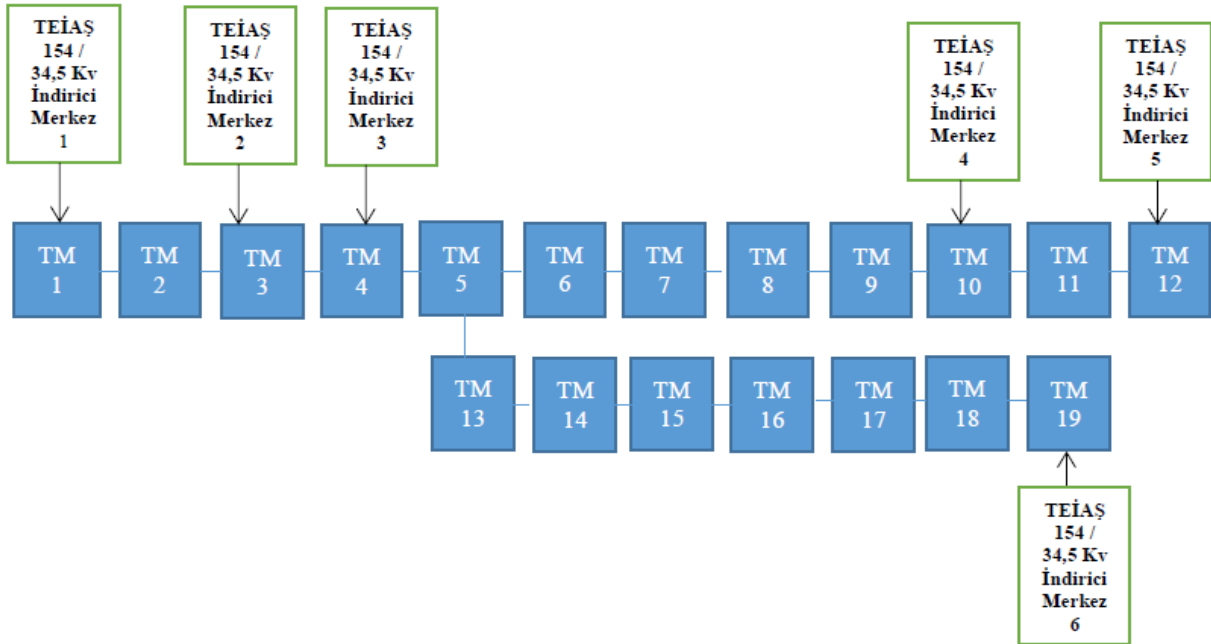


Şekil 3: Sağmalcılar transformatör merkezi ETAP modeli

Bazı transformatör merkezlerinde iki adet servis transformatörü bulunmaktadır. Örnek olarak iki adet servis transformatörü bulunan Bağcılar transformatör merkezinin Şekil 4’de ETAP model örneğinin gösterimi yapılmıştır.



Şekil 4: Menderes transformatör merkezi ETAP modeli



Şekil 5: Sistemin basitleştirilmiş tek hat diyagramı

Şekil 5' de belirtilen (TM) kısaltması transformatör merkezlerini simgelemektedir. 154 / 34,5 kV TEİAŞ indirici merkezleri basitleştirilmiş tek hat diyagramında çizilerek bağlı oldukları transformatör merkezleri belirtilmiştir.

Tablo 1: Transformatör merkezi kurulu güç bilgisi

M1A - M1B Hattı	Değer
TM 1- Yenikapı	6,5 MVA
TM 2- Aksaray	5,8 MVA
TM 3- Ulubatlı	5,8 MVA
TM 4- Sağmalcılar	5,8 MVA
TM 5- Otogar	7,6 MVA
TM 6- Mimarşinan	5,8 MVA
TM 7- Belpa	5,8 MVA
TM 8- Bakırköy	0,63 MVA
TM 9- Bahçelievler	6,4 MVA
TM 10- Yenibosna	5,8 MVA
TM 11- DTM	3,03 MVA
TM 12- Havalimanı	1 MVA
TM 13- Ferhatpaşa	2,5 MVA
TM 14- Garaj Sahası	2,4 MVA
TM 15- Esenler	0,63 MVA
TM 16- Menderes	8,8 MVA
TM 17- Üçyüzlü	4 MVA
TM 18- Bağcılar	8,8 MVA
TM 19- Kirazlı	6,4 MVA
Toplam Kurulu Güç	93,49 MVA

154 / 34,5 kV TEİAŞ indirici merkezleri Yenikapı, Ulubatlı, Sağmalcılar, Yenibosna, Havalimanı ve Kirazlı transformatör merkezleri orta gerilim baralarına bağlanarak enerji teminini sağlamaktadır. Toplam altı adet indirici merkez üzerinden Tablo 1'de belirtilen 19 adet transformatör merkezi enerjilendirilmektedir.

4. SİMULASYON

Simulasyon programı olarak dünyada elektrifikasyon sistemlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan ETAP (Electrical Power System Analysis & Operation Software) programının 12.5 numaralı sürümü kullanılmıştır. Simulasyon programında 19 adet transformatör merkezi ve bu transformatör merkezleri arasındaki orta gerilim kablo bağlantılarının modellenmesi yapılarak yük akış analizi

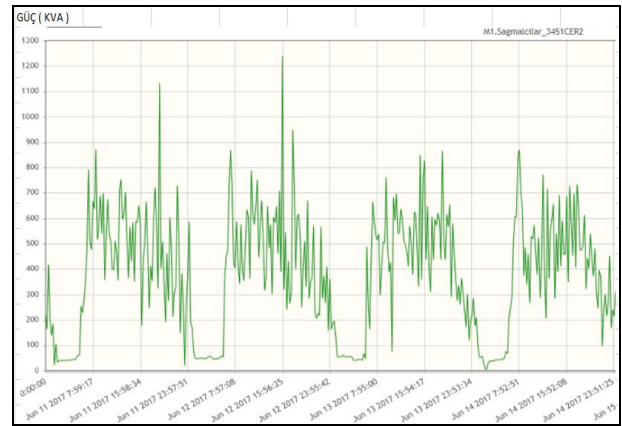
gerçekleştirilmiştir. Transformatör merkezleri arasında bulunan bakır orta gerilim kabloları için ETAP kütüphanesinde bulunan kablolar seçilmiştir.

Library Impedance	R	X	L	Z	X/R	R/X	Y
→ Pos.	98	125	0,3978874	158,836	1,276	0,784	0
→ Zero	155,82	317,5	1,01063	353,675	2,038	0,491	0

Şekil 6: OG 240 mm² bakır kablo ETAP empedans değerleri

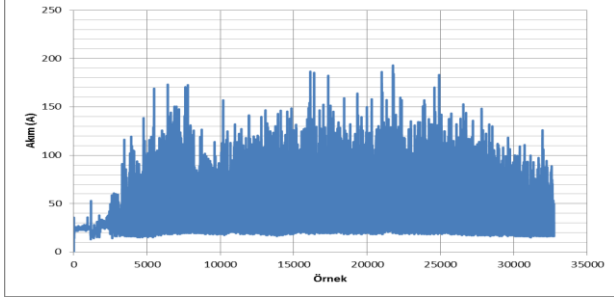
4.1. Yükleme Profilinin Belirlenmesi

Raylı sistemlerde Transformatör merkezlerinde bulunan çift sekonderli cer transformatörleri besleme alanına tren geldiği anda çalışmaya başlayıp tren akım-zaman grafiğine göre tepe akım değerine ulaştıktan sonra minimum akım çekme seviyesine geri gelmektedir. Bu çalışma durumundan dolayı cer transformatörleri sabit akım çekmemekte çok hızlı bir şekilde değişen güç değerlerinde çalışmaktadır.



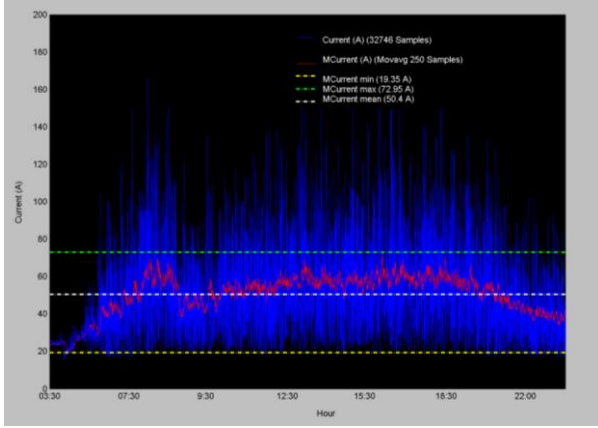
Şekil 7: Sağmalcılar cer transformatörsü güç-zaman grafiği

Şekil 7' de 11.06.2017 – 14.06.2017 tarihleri arasında sağmalcılar transformatör merkezinde bulunan cer transformatörünün görünür güç-zaman grafiği verilmiştir. Şekil 7' de görüldüğü üzere cer transformatörünün sabit bir yüklenme eğrisi olmayıp hızlı bir şekilde değişen dinamik bir yüklenme eğrisi bulunmaktadır. Cer transformatörünün değişken dinamik yüklenmesinin etkisi TEİAŞ indirici merkezlerinin bağlandığı hücrelerde de görülmektedir.



Şekil 8: 05.06.2017 tarihinde kirazlı transformatör merkezi TEİAŞ bağlantı noktasında ölçülen akım örnekleme grafiği

Şekil 8’ da Kirazlı transformatör merkezinden 2 saniye aralıklarla alınan toplam 32476 adet akım örneğinin grafiği bulunmaktadır. Cer transformatörlerinin dinamik değişen yük profilinin indirici merkezlerden temin edilen enerji noktalarına olan etkisi grafikten analiz edilebilmektedir. Bu şekilde dinamik değişen yük grafiğinin orta gerilim simülasyon programlarında kullanılabilmesi için filtrelemeler uygulanmıştır.



Şekil 9: 05.06.2017 tarihinde kirazlı transformatör merkezi TEİAŞ bağlantı noktasında ölçülen akım örnekleme grafiği (filtrelenmiş)

Filtreleme için 250 örnekte hareketli ortalama kullanılmıştır. Şekil 9’da kırmızı ile gösterilen çizgi filtrelenmiş akım bilgisidir. Simülasyon yük profilleri oluşturulurken 250 örnek için alınan hareketli ortalama ile ulaşılan değer yük profili olarak baz alınmış olup her bir transformatör yükü için bu yöntem ayrı örneklemelemlerle kullanılmıştır.

4.2.Genel Besleme Senaryosuna Göre Yük Akış Analizi

ETAP programında yük profilleri oluşturulurken 250 örnek için alınan hareketli ortalamanın maksimum değeri kullanılarak en ağır işletme şartları altında oluşan yük profilinin simülasyon programına yansıtılması hedeflenmiştir. Metro İstanbul firmasının M1 hattı için genel besleme senaryosu aşağıdaki şekildedir ;

- **Ulubatlı Bedaş** : Aksaray TM, Ulubatlı TM
- **Sağmalcılar Bedaş** : Sağmalcılar TM,Otogar TM, Mimarşinan TM, Ferhatpaşa TM

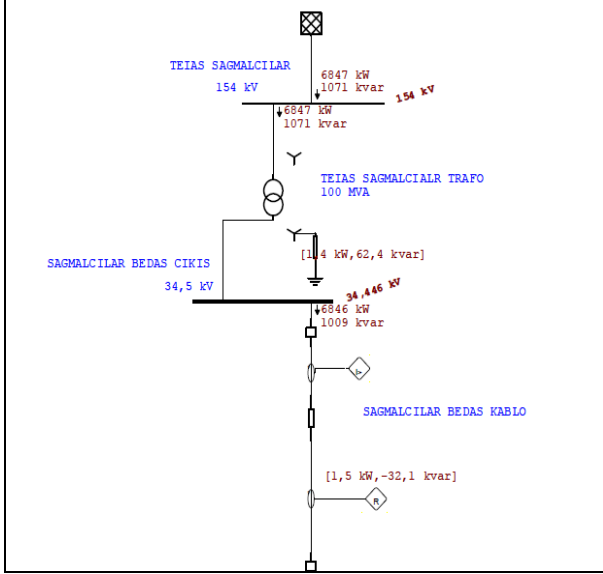
- **Yenibosna Bedaş**: Yenibosna TM, Bahçelievler TM, Bakırköy TM, Belpa TM,
- **Havalimanı Bedaş**: Havalimanı TM, DTM TM,
- **Bağcılar Bedaş**: Kirazlı TM, Bağcılar TM, Üçyüzlü TM, Menderes TM, Esenler TM

Model içerisinde oluşturulan orta gerilim kesicilerin açık-kapalı konumları kullanılarak enerji besleme senaryoları ETAP modelinde oluşturulmuştur. M1A - M1B hattı genel besleme senaryoları ve bir TEİAŞ 154 / 34,5 kV indirici merkezinden tüm hattın enerji temini senaryosu uygulanarak simülasyonlar uygulanmıştır.

Tablo 2 : Genel Besleme Senaryosu Yük Akış Analizi Sonuçları

Transformatör Merkezi	Gerilim Değeri (V)	OG Bara Güç Değeri (MW)	OG Bara Reaktif Güç Değeri (MVAR)	OG Bara Akım Değeri (A)
TM 1 Yenikapı	34451,7	0,159	0,095	2,673
TM 2 Aksaray	34451,7	1,726	0,346	29,51
TM 3 Ulubatlı	34465,5	3,059	0,638	52,35
TM 4 Sağmalcılar	34437,9	6,844	1,041	116,1
TM 5 Otogar	34375,8	4,706	0,99	80,76
TM 6 Mimarşinan	34368,9	1,276	0,283	21,95
TM 7 Belpa	34451,7	1,199	0,194	20,36
TM 8 Bakırköy	34458,6	1,375	0,137	23,15
TM 9 Bahçelievle	34465,5	2,244	0,285	37,89
TM 10 Yenibosna	34486,2	3,076	0,392	51,92
TM 11 DTM	34489,7	0,657	0,132	11,22
TM 12 Havalimanı	34493,1	0,99	0,058	16,61
TM 13 Ferhatpaşa	34372,4	0,875	0,142	14,9
TM 14 Garaj S.	34441,4	0,175	0,036	2,995
TM 15 Esenler	34441,4	0,268	0,05	4,563
TM 16 Menderes	34444,8	1,412	0,218	23,95
TM 17 Üçyüzlü	34448,3	1,755	0,289	29,81
TM 18 Bağcılar	34458,6	2,605	0,467	44,34
TM 19 Kirazlı	34465,5	3,637	0,556	61,63

Genel enerji besleme senaryosunda en düşük bara gerilimi Mimarşinan transformatör merkezinde gerçekleşerek 34368 V olmuştur. 132 V değerinde meydana gelen gerilim düşümü kabul edilebilir bir değer olmakta olup tren hareketi ve istasyon enerji beslemesi açısından negatif bir duruma sebep olmayacaktır.



Şekil 10: Sağmalcılar indirici merkezi ETAP simülasyon görüntüsü

Genel enerji beslemesi senaryosu sonucu yük akış analizi sonuçlarına göre en fazla aktif güç Sağmalcılar transformatör merkezinden çekilerek 6847 kW değerinde aktif gücün çekildiği görülmüştür.

Tablo 3 : Genel Enerji Besleme Senaryosu Kablo Yüklenme Sonuçları

Kablo İsmi	Akım Değeri (A)	Kablo Yüklenme Oranı (%)
YENİKAPI - AKSARAY	2,673	0,5
AKSARAY - ULUBATLI	29,51	5,1
SAGMALCILAR - OTOGAR	80,76	17,6
OTOGAR - MİMARŞINAN	21,95	4,8
MİMARŞINAN - BELPA	1,43	0,3
BELPA - BAKIRKÖY	20,18	4,4
BAKIRKÖY - BAHCELİEVLER	23,15	5
BAHCELİEVLER - YENİBOSNA	37,89	8,2
YENİBOSNA - DTM	2,155	0,4

DTM - HAVALİMANI	11,22	2,2
OTO - FERTHAPAŞA	14,9	3,2
GARAJ SAHASI - ESENLER	2,995	0,5
ESENLER - MENDERES	4,563	0,8
MENDERES - UCYUZLU	23,95	4,2
UCYUZLU - BAGCILAR	29,81	5,2
BAGCILAR - KIRAZLI	44,34	7,7

Raylı sistem hatlarının tasarım aşamasında çoklu indirici merkezler olmasına rağmen tek bir indirici merkezden hattın tamamının enerji temini düşünüldüğü için genel besleme senaryosunda kablo yüklenme oranları oldukça düşük çıkmaktadır

4.3. Tek Noktadan Tüm Hattın Enerji Temini Senaryosuna Göre Yük Akış Analizi

Sistem için en riskli durum 6 adet 154 /34,5 kV indirici merkezlerinden 5 tanesinin kaybedilerek tek bir besleme kaynağından tüm hattın beslenmesi olacaktır. Bu durumun analizini yapmak için Ulubatlı, Sağmalcılar, Yenibosna, Bağcılar ve Havalimanı indirici merkezlerinden enerji temin edilemediği varsayılarak tüm hattın Yenikapı 154 /34,5 kV indirici merkezinden enerji teminin yapıldığı senaryo modelde oluşturulmuştur. Bu besleme senaryosunda çalıştırılan yük akış analizinde kablo yüklenmeleri ve transformatör merkezleri elektriksel parametreleri incelenmiştir.

Tablo 4 : Yenikapı indirici merkezinden M1 hattının tamamının beslenmesi

Kablo İsmi	Akım Değeri (A)	Kablo Yüklenme Oranı (%)
YENİKAPI-AKSARAY	291,1	50,5
AKSARAY-ULUBATLI	264,4	45,9
ULUBATLI-SAGMALCILAR	241,9	42
SAGMALCILAR-OTOGAR	206,9	45
OTOGAR-MİMARŞINAN	88,48	19,2
MİMARŞINAN-BELPA	67,13	14,6
BELPA-BAKIRKÖY	47,18	10,3
BAKIRKÖY - BAHCELİEVLER	44,27	9,6
BAHCELİEVLER - YENİBOSNA	29,13	6,3

YENİBOSNA-DTM	15,87	3,2
DTM-HAVALİMANI	5,458	1,1
OTOGAR-FERTHAPAŞA	67,63	14,7
FERHATPAŞA-GARAJ SAHASI	53,32	9,3
GARAJ SAHASI - ESENLER	50,45	8,8
ESENELR-MENDERES	48,95	8,5
MENDERES-UCYUZLU	30,38	5,3
UCYUZLU-BAGCILAR	24,76	4,3
BAGCILAR-KIRAZLI	10,87	1,9

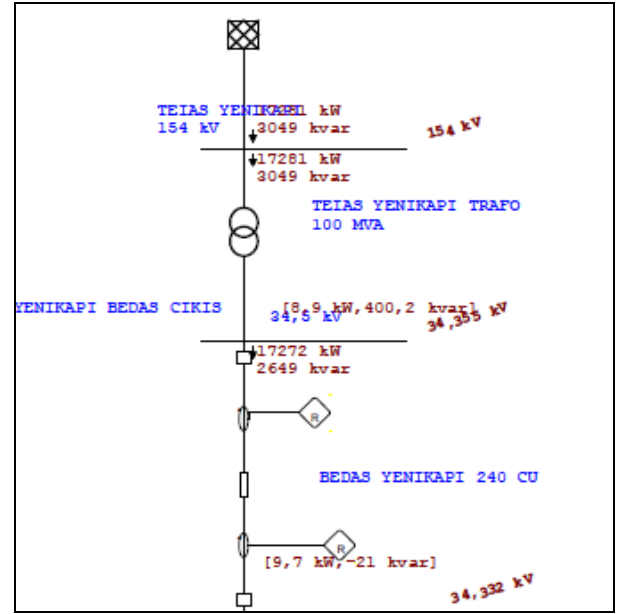
Raylı sistem hatlarının tasarım aşamasında çoklu indirici merkezler olmasına rağmen tek bir indirici merkezden hattın tamamının enerji temini düşünüldüğü için kablo yüklenme oranları bu durumlarda genellikle kritik seviyelere ulaşmamaktadır. Yenikapı indirici merkezinden tüm hattın enerji temini senaryosuna göre en yüksek kablo yüklenme oranı Yenikapı – Aksaray transformatör merkezleri arasında görülmüş olup bu değer % 50,5 olmuştur.

Tablo 5 : Yenikapı indirici merkezinden M1 hattının tamamının beslenmesi senaryosunda göre yük akış analizi sonuçları

Transformatör Merkezi	Gerilim Değeri (V)	OG Bara Güç Değeri (MW)	OG Bara Reaktif Güç Değeri (MVAR)	OG Bara Akım Değeri (A)
TM 1 Yenikapı	34330,95	17,263	2,67	293,8
TM 2 Aksaray	34279,2	17,082	2,639	291,1
TM 3 Ulubatlı	34168,8	15,489	2,275	264,5
TM 4 Sağmalcılar	34041,15	14,133	1,927	241,9
TM 5 Otogar	33896,25	12,007	1,823	206,9
TM 6 Mimarsinan	33861,75	5,156	0,588	88,48
TM 7 Belpa	33851,4	3,916	0,394	67,13
TM 8 Bakırköy	33834,15	2,757	0,204	47,18
TM 9 Bahçelievle	33820,35	2,587	0,177	44,27
TM 10 Yenibosna	33810	1,75	0,102	29,93
TM 11 DTM	33803,1	0,951	0,127	16,39

TM 12 Havalimanı	33799,65	0,32	0,052	5,538
TM 13 Ferhatpaşa	33879	4,362	0,677	75,22
TM 14 Garaj S.	33875,55	3,511	0,539	60,54
TM 15 Esenler	33872,1	3,342	0,504	57,6
TM 16 Menderes	33854,85	3,251	0,488	56,06
TM 17 Üçyüzlü	33847,95	2,145	0,326	37
TM 18 Bağcılar	33841,05	1,813	0,256	31,24
TM 19 Kirazlı	33837,6	0,994	0,086	17,02

Bu besleme senaryosunda en yüksek gerilim düşümü Havalimanı transformatör merkezinde gerçekleşerek 33799,65 V olmuştur. Yaklaşık yüzde % 2,03 oranında meydana gelen gerilim düşümü kabul edilebilir bir oran olmakta olup tren hareketi ve istasyon enerji beslemesi açısından negatif bir duruma sebep olmayacaktır.



Şekil 10: Yenikapı indirici merkezi ETAP simülasyon görüntüsü

Yenikapı indirici merkezinden tüm hattın enerji temini besleme senaryosuna göre Yenikapı indirici merkezinden 17281 kW değerinde aktif gücün çekildiği görülmüştür.

4.4. Gerilim Seviyesi Değişikliğinin Simülasyona Olan Etkisi

Yurtiçinde yapılan çalışmalarda çoğunlukla TEİAŞ orta gerilim seviyesi 34500 V alınarak yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. İstanbul içi metro hatlarının bağlı bulunduğu TEİAŞ 154 / 34,5 kV indirici merkezlerin gerilim seviyeleri incelendiğinde hemen hemen gün içinde hiçbir zaman 34500 V gerilim seviyesine ulaşmadığı

gözlemlenmiştir. Yenikapı indirici merkezinden tüm hattın enerji beslemesi gerçekleştirilirken gerilim düzeyinin yük akış sonuçlarına olan etkisini incelemek için iki farklı gerilim düzeyinde aynı simülasyon tekrarlanmıştır.

Tablo 6 : Yenikapı indirici merkezinden M1 hattının tamamının beslenmesi senaryosunda göre yük akış analizi sonuçları(33600 V)

Transformatör Merkezi	Gerilim Değeri (V)	OG Bara Güç Değeri (kW)	OG Bara Reaktif Güç Değeri (MVAR)	OG Bara Akım Değeri (A)
TM 1 Yenikapı	33444,3	16381	2534	286,2
TM 2 Aksaray	33392,55	16210	2505	283,6
TM 3 Ulubatlı	33285,6	14698	2159	257,7
TM 4 Sağmalcılar	33161,4	13412	1829	235,7
TM 5 Otogar	33019,95	11394	1730	201,5
TM 6 Mimarsinan	32985,45	4892	558	86,19
TM 7 Belpa	32975,1	3716	374	65,4
TM 8 Bakırköy	32957,85	2617	194	45,96
TM 9 Bahçelievle	32947,5	2455	168	43,13
TM 10 Yenibosna	32933,7	1661	96,346	29,16
TM 11 DTM	32930,25	903	120	15,97
TM 12 Havalimanı	32926,8	304	49,458	5,395
TM 13 Ferhatpaşa	33002,7	4139	643	73,28
TM 14 Garaj S.	32999,25	3332	512	58,98
TM 15 Esenler	32995,8	3171	478	56,11
TM 16 Menderes	32978,55	3085	464	54,61
TM 17 Üçyüzlü	32971,65	2035	309	36,05
TM 18 Bağcılar	32964,75	1721	243	30,44
TM 19 Kirazlı	32961,3	0,994	0,086	17,02

Tablo 4'de TEİAŞ indirici transformatörünün sekonder gerilim değeri 34500 V alınırken Tablo 6'da TEİAŞ indirici transformatörünün sekonder gerilim değeri 33600 V ayarlanarak aynı simülasyon tekrar çalıştırılmıştır.

TEİAŞ indirici merkezde bulunan transformatörün sekonder gerilim değeri 33600 alındığı takdirde Simülasyon 2 numaralı çalışmada en düşük gerilim seviyesi Havalimanı transformatör merkezinde gerçekleşerek 32926,8 V olmuştur. Bu besleme senaryosunda Yenikapı indirici merkezinin ilk bağlandığı transformatör merkezi olan Yenikapı transformatör merkezinin orta gerilim barasından çekilen aktif güç 16381 kW olmuştur. İndirici merkezde bulunan TEİAŞ transformatörünün sekonder gerilimi 34500 V kabulü ile yapılan simülasyon çalışmasında ise Yenikapı transformatör merkezi orta gerilim barasından 17263 kW aktif güç çekildiği tespit edilerek Tablo 5'de paylaşılmıştır.

5. Etap Programı İle Yapılan Simülasyon Çalışmaları

Yang pang ve arkadaşlarının " Analysis and treatment of harmonic in power network with railway based on ETAP software " (2016) isimli çalışmasında ETAP yazılımına dayalı demiryolu ile güç şebekesinde harmonik analizi ve yönetimi yapmış ve sistemde yer alan 110 kV orta gerilim baralarının modellenmesini gerçekleştirmiştir. ETAP simülasyon sonuçları, iyileştirmelerin belirgin bir etkiye sahip olduğunu ve harmonik gerilim içeriğinin, harmonik azaltmanın amacına erişen sınır aralığı dahilinde azaltıldığını ve güç şebekesindeki güç kalitesinin iyileştirilmesi için teorik bir referans sağladığını çalışmasında paylaşmıştır. [9] Ahmet Yousuf Saber " Power system stabilizer tuning using swarm based optimization in ETAP " (2015) isimli çalışmasında ETAP programında dinamik parametre tahmini ve ayarlama algoritması geliştirmiş ve ayarlanabilir parametreleri otomatik olarak kodlayan akıllı sürü tabanlı optimizasyon yaklaşımını program aracılığıyla gerçekleştirmiştir [10] S. N. Afifi ve arkadaşları " Impact of DFIG wind turbines on short circuit levels in distribution networks using ETAP " (2014) isimli DFIG rüzgar türbinlerinin kısa devre seviyelerine etkisini ETAP programında modellemiş ve rüzgar türbinlerinin şebekeye olan etkisini inceleyerek 13 baralı bir dağıtım test sistemini ETAP programında modellemiştir [11] Rohit Kapahi " Load Flow Analysis of 132 kV substation using ETAP Software " (2013) isimli çalışmasında 132 kV gerilim sistemi bulunan bir şebekenin transformatör merkezlerini ETAP programında modellemiştir. Yük akış çalışmaları sonucunda düşük gerilim problemi yaşanan transformatör merkezlerinin tespitini gerçekleştirmiştir.[12] Nadia M. Mahdi " Power flow analysis of Rafah governorate distribution network using ETAP software" (2013) isimli çalışmasında Rafah valiliği dağıtım şebekesinin yük akış analizini ETAP programında gerçekleştirmiştir. Çalışmada 22 kV orta gerilim sistemindeki düşük gerilim, yüksek kayıplar, aşırı yüklenmeler gibi elektriksel sorunlu bölgeler tespit edilerek ekonomik açıdan uygulanabilir öneriler getirilmiş ve altyapı revizyonları ETAP programında simüle edilmiştir. Yapılan simülasyonlar ile sorunların çözüldüğü teorik olarak ETAP programında ispatlanmıştır. [13]

6. SONUÇ

Yapılan çalışmada M1A - M1B hafif metro hattının elektrifikasyon sisteminin enerji teminini sağlayan 6 adet TEİAŞ 154 / 34.5 kV indirici merkezin, istasyon ve cer enerjisinin temin edildiği 19 adet transformatör merkezinin,

transformatör merkezi içerisinde yer alan cer transformatörleri ve yardımcı servis transformatörlerinin, transformatör merkezleri arasında bulunan orta gerilim kablolarının ETAP (Electrical Power System Analysis & Operation Software) programında oluşturulan modelleri paylaşılmıştır. En riskli senaryo olarak 5 indirici merkezin tamamından enerji temin edilemediği durum simüle edilerek geriye kalan bir indirici merkezden tüm hattın enerji temini edildiği besleme senaryosu ve genel enerji besleme senaryosu kesici manevraları ile simülasyonda oluşturulmuştur. Yapılan analizlerde elektrifikasyon altyapısının genel besleme ve kötü durum senaryoları için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Yenikapı indirici merkezinden (33,6 kV) M1 hattında bulunan 19 adet transformatör merkezinin beslenme senaryosunu M1 hattı elektrifikasyon sistemi senaryoları içerisinde en riskli senaryo durumu olarak ele alabiliriz. Bu durumda bile gerilim düşümünün en yüksek seviyede olacağı uç transformatör merkezlerinden Havalimanı transformatör merkezinde gerilim 32926 V, Kirazlı transformatör merkezinde ise gerilim 32961,3 V olmaktadır. Kirazlı transformatör merkezinde % 4,47 , havalimanı transformatör merkezinde % 4,56 oranında kabul edilebilir bir seviyede olan gerilim düşümü yaşanmıştır.

Yapılan yük akış analizi sonucu M1 hattında bulunan toplam 19 adet transformatör merkezinin toplam güç talebinin 16,4 MW seviyesinde olduğu görülmektedir. Genel enerji besleme senaryosunda ise en yüksek aktif güç sağmalcılar indirici merkezinden çekilmiş olup bu değer 6,84 MW olduğu tespit edilmiştir. Hatta bulunan 154 /34,5 kV indirici merkezlerinin Metro İstanbul AŞ ile yapılan anlaşma gereği sözleşme güçleri ise aşağıda verilmiştir ;

- Yenikapı TM indirici merkez : 25000 kW
- Ulubathı TM indirici merkez : 4800 kW
- Sağmalcılar TM indirici merkez : 6000 kW
- Yenibosna TM indirici merkez : 5200 kW
- Havalimanı TM indirici merkez : 5000 kW
- Kirazlı TM indirici merkez :26000 kW

İndirici merkezlerin her biri kötü durum senaryosunda ihtiyaç duyulan toplam güç değerini (16,4 MW) karşılayacak düzeyde elektrifikasyon altyapısına sahip olmalıdır. Yük akış analizi sonuçları TEİAŞ ve yerel elektrik dağıtım şirketi ile paylaşılarak ilgili merkezlerin elektrifikasyon altyapılarının uygunluğunun araştırılması istenilmelidir. M1A - M1B hafif metro hattının kurulu güç bilgisi Tablo 1' de paylaşılarak toplam kurulu gücün 93.49 MVA olduğu tespit edilmiştir. M1A - M1B hafif metro hattının enerji teminini sağlayan indirici merkezler ile yapılan toplam sözleşme gücü 72,038 MVA değerindedir. 19 transformatör merkezinin toplam güç ihtiyacı ise 16,4 MW değerindedir. Yüksek seçilen sözleşme güçleri, raylı sistemlerin yaygınlaşması ile birlikte önümüzdeki yıllarda ulusal enerji ağımızda bir problem olarak karşımıza çıkacaktır. TEİAŞ ile yapılan sözleşme güçlerinde tek bir değer yerine iki farklı güç değerinde anlaşma veya protokol düzenlenmelidir. Raylı sistem hattının orta gerilim simülasyonu yapılarak genel enerji besleme senaryosuna ve kötü durum enerji besleme senaryosuna göre iki farklı güç değeri TEİAŞ tarafından değerlendirmeye alınarak sözleşme güçlerinde optimizasyon yapılmalıdır.

Literatürde yapılan çalışmalarda teorik olarak gerilim seviyesi 34500 V olarak kabul edilmesine rağmen TEİAŞ 154 / 34,5 kV indirici merkezlerinde veya yerel elektrik dağıtım şirketi orta gerilim dağıtım merkezlerinde bu değerlerin görülmesi çok nadir olmaktadır. Gün içerisinde genellikle 33 kV ve 34 kV arasındaki gerilim seviyesi üzerinden enerji temini yapılabilmektedir. Yapılan simülasyonlarda gerçeğe en yakın değerlere ulaşmak için gerilim değişikliğinin yük akış analiz sonuçlarına olan etkisi araştırılmıştır. Tek bir besleme noktasından tüm hattın enerji temini 34500 V ve 33600 V orta gerilim değerleri için ayrı olarak yapılarak sonuçlar paylaşılmıştır. 33600 V gerilim seviyesinde yapılan simülasyon sonucunda 16381 kW aktif güç çekilirken, 34500 V gerilim değerinde 17263 kW aktif güç çekildiği tespit edilmiştir. Gerçek orta gerilim seviyesi 33600 V olan bir sistem için bu değerler göstermektedir ki 34500 V olarak gerilim seviyesi kabul edilen simülasyonlar sadece gerilim seviyesi yanlış kabul edildiğinden dolayı %5,38 sapma gösterecektir. Gerilim seviyesinin 32-33 kV gibi daha düşük olduğu sistemlerde bu sapma oranı daha fazla artacaktır. Mobilite yaşam kalitesinin anahtarı ve ekonominin bel kemiğidir [14]. Bununla birlikte, ulaşım gelişen ve gelişmekte olan ülkelerde en çok enerji tüketen ve çevreyi kirleten sektörlerden biridir. Avrupa birliğinde, toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %31'ine neden olmaktadır [15]. Bu sektör içinde büyükşehirlerdeki taşımacılık toplam CO2 emisyonlarının yaklaşık %25'inden sorumludur [16]. Yüksek hava kirliliği ve kalabalık kentsel alanlardaki ulaşım problemi, büyük şehirlerin üzerine düşmesi gereken önemli konulardır. Bu nedenle, büyümekte olan kentleşme bağlamında, verimli, güvenilir ve çevre dostu ulaşım sistemlerinin uygulanması sadece sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ilişkin uluslararası anlaşmalara uymakla kalmamakla birlikte kentsel alanlarda yaşanabilir koşulları garanti altına almak ve enerji verimliliği için de bir şart olmaktadır. [17,18] . Bu bağlamda kent içi toplu taşımacılık sistemleri içerisinde ana enerji tüketici unsurlardan birisi olan raylı sistem taşımacılığında enerji verimliliğinin simülasyon programlarıyla modellenerek izlenilmesi, takibi ve planlanması mutlaka yapılmalıdır.

İşletme güvenliği ve enerji sürekliliğini sağlayarak minimum enerji kaybı ile işletmenin yapılabilmesi için orta gerilim simülasyonlarının analizi ve dinamik yük profilinin çıkarılması önem arz etmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre besleme senaryolarının revize edilmesi gerekmektedir. Akıllı şebeke otomasyon yazılımları kullanılarak hat enerji kayıpları simülasyon desteği ile minimum seviyede tutulmalıdır. Değişen istasyon yapısı ve artan enerji ihtiyacı göz önüne alınarak belirli sürelerde simülasyonların tekraren yapılması işletme güvenliğine katkıda bulunulmasını sağlayacaktır.

7. Kaynaklar

- [1] Melvyn Thong T.L, Adrian Cheong W.O, Hadi Wijaya ,”Effective Use of Energy in Singapore Rapid Transit Systems”, Urban Transit Conf. 2010 (WUTC2010)
- [2] Aydın, T., Hafif Raylı Sistemlerin Elektrik Güç Beslemesinde Güvenilirlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013
- [3] www.en-standard.eu/en-50463-railway-applications-energy-measurement-on-board-trains

- [4] Karakuş, F., Raylı Sistemlerde Orta Gerilim Elektrifikasyon Sisteminin Modellenmesi Ve Besleme Senaryolarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017
- [5] Melvyn Thong T.L, Malvin Ho H.C , Simsiow Peng, "Energy Conservation MEASURES FOR rapid Transit Systems in Singapore ", IEEE Int Conf. On Power System Technology, 2005,POWERCON 2005
- [6] Açıkbaş, S. (2008). Çok Hatlı Çok Araçlı Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] "Energy Audit of Railway Traction Distribution System",case study EA-254 www.letsconserve.org
- [8] "Ağ haritaları", 2017 . <http://www.metro.istanbul>
- [9] Pang, Y. ve Xu, Y. (2016) "Analysis and treatment of harmonic in power network with railway based on ETAP software", Power and Engineering Conference, 25-28 October 2016, China.
- [10] Saber, A. (2015) "Power system stabilizer tuning using swarm based optimization in ETAP", IEEE International Conference on Power Electronic, 16-19 December 2014, Mumbai.
- [11] Afifi, S., Wang, H., Taylor, G. ve Irving, M. (2014) "Impact of DFIG wind turbines on short circuit levels in distribution networks using ETAP", UPEC Power Engineering Conference, 2-5 September 2013, Dublin.
- [12] Kapahi, R. (2013) "Load Flow Analysis of 132 kV substation using ETAP Software" International Journal of Scientific & Engineering Research, 4:48-55
- [13] Mahdi, N. (2013) "Power flow analysis of Rafah governorate distribution network using ETAP software" International Journal of Physical Sciences, 1: 19-26
- [14] "Environmental Guidline for the procurement of new rolling stock, outcome of the UIC project", PROSPE R, Henning Schwatz, DB AG.
- [15] IEA and UIC, "Railway handbook 2012 – energy consumption CO₂ emissions", International Energy Agency;2012.http://www.uic.org/IMG/pdf/ieauic_energy_consumption_and_co2_emission_of_world_railway_sector.pdf.
- [16] European Commission, "Roadmap to a single European transport area – towards a competitive and resource efficienttransportssystem";2011.<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:en:PDF>.
- [17] Official Journal of the European Union, Decision No 406/2009/EC on the effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020;2009.<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0136:0148:EN:PDF>.
- [18] European Commission, "A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050" – ref. COM(2011) 112 final; 2011.