



Metro AC CER Güç Dağıtım Sistemlerinde Yük Paylaşımının Modellenmesi

Turan ÖLMEZ^{*1} , Beyhan KILIÇ² 

¹Metro İstanbul Anadolu Bölge İşletmeler Müdürlüğü, 34768, İstanbul Türkiye

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği, 34220, İstanbul Türkiye

*turanolmez@hotmail.com

(Alınış/Received: 27.01.2029, Kabul/Accepted: 14.03.2029, Yayımlama/Published: 31.07.2020)

Öz: Türkiye’de, Büyükşehirlerdeki trafik sorununa çözüm olarak raylı sistemler gibi kendisine ayrılmış yol üzerinde hareket eden toplu taşıma araçları tercih edilmektedir. Raylı sistemler, taşıma kapasitesi ve düşük maliyetli enerji tüketimi nedeniyle gelişmiş ülkelerde en çok tercih edilen toplu taşıma türüdür. Artan taleple doğru orantılı olarak enerji ihtiyacı ve güç kaybında da bir artış vardır. Bundan dolayı raylı sistemlerin proje tasarım aşamasındaki güç akışı analizi kritik önem arz etmektedir. Güç akışı analizi ile raylı sistemlerde kullanılacak ekipmanlar (kablo kesiti, OG hücresi, CER transformator gücü, yük ayırıcı ve kesiciler vb) ve bu ekipmanların teknik özellikleri belirlenir. Bu makalede M5 Üsküdar – Yamanevler Sürücüsüz metro hattında güç akışı analizi, alternatif işletme senaryoları için yapılmıştır. Bu çalışmada ETAP (Elektriksel Geçici Rejimve Analiz Programı) yazılımı kullanılarak elde edilen benzetim sonuçlarına göre, güvenli ve sürdürülebilir güç akışı için en kötü durumlar gözönüne alınarak çözümler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Raylı Sistemler, Enerji, Yük Analizi, Modelleme

Load Sharing Modelling in AC Traction Power Distribution Systems of Urban Metros

Abstract: In Turkey, as a solution to traffic problems in metropolitan areas public transportation that travel on the guided way such as rail systems is preferred. Railway transport is the most preferred type of public transport, as well as its carrying capacity and low-cost energy consumption in developed countries. Therefore, the demand for rail transport has been increasing significantly over the years in proportion to increasing urban population. There is also an increase in energy consumption and accordingly power loss in proportion to increasing demand. Therefore, power flow analysis of the rail systems in the project design phase is critical. By means of AC power flow analysis, equipment to be used in rail systems (cable cross section, MV switchgear, transformer power, load separator and breakers, etc) and the characteristics of these equipments are determined. In this study, power flow analysis is performed on M5 Üsküdar – Yamanevler driverless metro line. According to the simulation results obtained by using ETAP(Electrical Transient and Analysis Program) software, solutions are provided considering the worst cases for the safe and sustainable power flow.

Keywords: Rail Systems, Energy, Load Analysis, Modelling

1. Giriş

Raylı sistemler metropolitan alanlarda artan nüfusun yolculuk talebinin karşılanmasında, güvenli, çevre dostu olması ve enerji verimliliği sebebiyle tercih edilmektedir. Raylı sistemlerin yolcu/km başına enerji tüketimi karayolları araçlarına göre 1/7 oranında daha azdır [1]. Kentsel alanlarda metro sistemleri güç akışı, orta gerilim seviyesinden alınan gücün CER transformator merkezlerinde indirildikten sonra doğrultularak kullanılması ile sağlanır. Trenler verilen DC güç hat tasarım parametrelerine göre 600 V DC, 750 V DC veya 1500 V DC gerilim seviyelerinden birini kullanmaktadır [2]. DC gerilim kullanımı, DC motorun tork hızını kontrol etme, daha kısa ve daha ince iletkenler aracılığıyla DC gerilim iletiminde düşük güç kaybı gibi avantajlar sağlamaktadır. 34,5kV orta gerilim enterkonnekte sistemden alınan güç, CER transformator

Atıf için/Cite as: T. Ölmez, B. Kılıç, “Metro AC CER güç dağıtım sistemlerinde yük paylaşımının modellenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 11, pp. 22-33, July 2020. doi: 10.47072/demiryolu.680510

merkezlerine iletilir, güç akışının buraya kadar olan kısmı AC (Alternatif Akım) taraf olarak adlandırılır [3]. CER transformatörü çıkışında bulunan doğrultucu ünite ile elde edilen DC (Doğru Akım) güç katener sistemi vasıtasıyla araçlara iletilir. Dolayısıyla raylı sistemlerde hem AC hem de DC güç akışı söz konusudur, bu karmaşık yapıdan dolayı güç akış analizlerin tasarım safhasında yapılması ve sistemin raylı uygulamaları standardını sağladığının belirlenmesi gereklidir [4].Yük akışı analizi ile, raylı sistemlerde kullanılan ekipmanların yüklenme değerleri belirlenir.

Bu çalışmada, M5 Üsküdar – Yamanevler sürücüsüz metro hattı CER güç dağıtım transformatörleri normal çalışma ve arızalı durumlar için incelenecektir. Literatürde bugüne kadar yapılan çalışmalarda, analizi yapılan metro hattının şirket için bilgileri olarak kabul edilen tren kayıt ünitesi verileri, tren özellikleri, tren test sürüşü verileri ve SCADA'dan ölçülen değerler gibi teknik detayları içeren bilgiye ulaşım yoktur. Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak tren kayıt ünitesi verileri, tren özellikleri, tren test sürüşü verileri ve SCADA'dan ölçülen değerler ile gerçeğe en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyonda ETAP yazılımının maksimum 100 baralılık paketi kullanıldığı için yalnızca hattın ilk 9 istasyonluk (Faz 1) bölümü kullanılmıştır. Üsküdar - Çekmeköy hattında toplam uzunluk yaklaşık 17,2 km ve 1500 V DC gerilim ile enerjilendirilmiştir. Bu çalışmada raylı sistemler, M5 Üsküdar – Yamanevler sürücüsüz metro hattı AC taraf CER transformatörleri güç akışı ETAP yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Çeşitli arıza senaryoları için güç akışı belirlenerek öneriler sunulmuştur.

2. Raylı Sistem Elektrifikasyonu

Metro ve tramvay hatlarındaki besleme gerilimi 600V DC, 750V DC ile 1500V DC arasında değişmektedir. Şehirlerarası ve banliyö hatları besleyici gerilimi 25kV 50Hz, nostaljik tramvay gibi eski banliyö trenleri 600V DC, hafif raylı sistem ve metro sistemleri 750V DC ve 1500V DC besleme gerilimine sahiptir [5]. Raylı Sistemlerin Elektrifikasyonu aşağıdaki alt-sistemlerden oluşur:

1. Transformatör Merkezleri 2. Hücreler 3. Gerilim ve Akım Transformatörleri 4. Aşırı Akım Koruma Rölesi 5. Diferansiyel Koruma Rölesi 6. DC Hücreler 7. Doğrultucular 8. Negatif Besleyici 9. Sinyal / Trafik sistemleri 10. Katener Sistemi 11. İletişim sistemleri 12. SCADA ve Uzaktan Kumanda Sistemleri [6].

2.1. Yükler ve özellikleri

Raylı sistemlerde yükler, CER ve istasyon olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır, metro sistemleri için CER yükü ve istasyon yükleri arasında %40 CER %60 istasyon tüketimi şeklinde bir oran bulunmaktadır [4, 7]. İstasyon yükleri metro hattında rezistif, endüktif ve kapasitif yükler olmak üzere 3 bölüme ayrılmıştır. Metrolarda rezistif yükler ısıtıcılar ve bazı elektronik yüklerdir. Endüktif yükler yardımcı servis transformatörleri, yürüyen merdivenler, aydınlatma, iklimlendirme, motorlar ve pompalardır. Kapasitif yükler hat boyunca besleyici kablolar, elektronik balastlı aydınlatma yükleri ve kesintisiz güç kaynaklarıdır [8]. Kapasitif yükler üç farklı metro istasyonunda endüktif reaktörler ile dengelenir.

CER yükü ise trenlerin çektiği güç ve güç dağıtım sistemi gidiş ve dönüş iletkenlerinde oluşan kayıplarının toplamından oluşur [9].

3. M5 Üsküdar – Yamanevler Sürücüsüz Metro Hattı

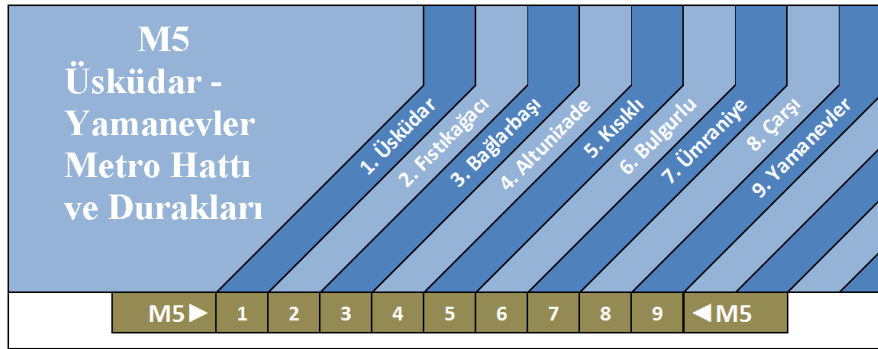
M5 metro hattı İstanbul'un Anadolu yakasının ikinci metro hattı, ancak Türkiye'nin ilk sürücüsüz metro hattıdır. M5 metro hattı karakteristik bilgileri; Tablo 1'de verilmiştir.

Demiryolu Mühendisliği

Tablo 1. M5 metro hattı bilgileri

Açıklama	Değer
Hattın ismi :	M5 Üsküdar – Yamanevler
Hat Uzunluğu:	17,2 km
İstasyon Sayısı:	16
Tren Sayısı:	126
Servis Süresi:	32 dakika
Günlük Yolcu Sayısı:	200.000
Çift yönlü Sefer Sayısı:	358
Sefer Aralığı:	5 dakika

Yoğun saatlerde, bir yönden diğerine sürekli olarak sefer yapan 13 tren vardır. Buna ek olarak, headway (sefer aralıkları) yoğun saatlerde en az 5 dakikaya kadar azalır. Maksimum headway gece işletmelerinde 20 dakikadır. M5 Üsküdar – Yamanevler Sürücüsüz Metro hattı istasyon yerleşimleri Şekil 1’de gösterilmiştir [4].



Şekil 1. M5 hattı istasyonları (1. faz)

3.1. Tren bilgileri

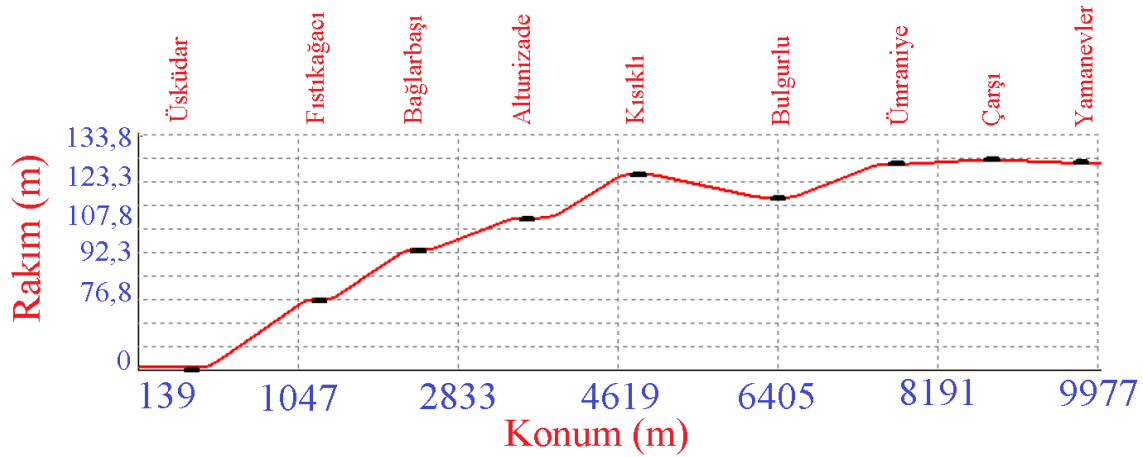
Bir tren 6 araçtan oluşan bir dizidir. Tren yapısını oluşturan araç başına alınan ortalama değerler Tablo 2’de verilmiştir [4].

Tablo 2. Tren verileri

Açıklama	Değer
Ağırlık	31805,671 kg
Uzunluk	21.440 metre
Maksimum Tren Uzunluğu	6
Sürekli Güç	561 kW
Motor Verimliliği	85%
Yardımcı Güç Yüğü	70 kW
Güç Faktörü (Yardımcı)	0,85
Maksimum Hız	80 km/h
Başlangıç İvme Limiti	1,03 m/s ²
Maksimum İvme	1,1337 m/s ²
Yolcu Kapasitesi (Oturun)	42
Yolcu Kapasitesi (Toplam)	270
Nominal Hat Gerilimi	1500 VDC

Demiryolu Mühendisliği

Metro hattının eğimi, trenlerin enerji tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir. İstasyonun yüksekliği Çarşı istasyonunda en üst noktasına ulaşmaktadır ve Üsküdar istasyonunda yükseklik 0 metre seviyesine kadar inmektedir. Üsküdar istasyonu denize yakın olduğu için bu istasyon en düşük rakım değerine sahiptir. İstasyonların deniz seviyesine göre yüksekliği Şekil 2’de gösterilmiştir [10].



Şekil 2. Üsküdar – Yamanevler eğimi

Hat eğiminin enerji tüketimine olan etkisi Tablo 3’de görülmektedir. Üsküdar – Yamanevler yönündeki trenin enerji tüketimi, Yamanevler ile Üsküdar yönündeki değerin neredeyse iki katıdır [4]. (Bu değerler M5 metro trenin kontrol ünitesinden (TCU) kaydedilen değerlerdir.)

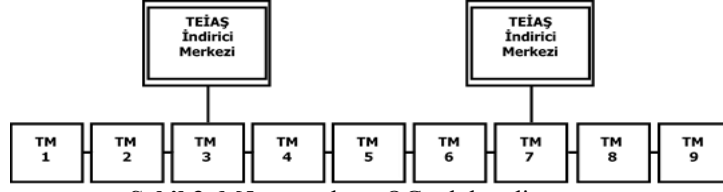
Tablo 3. M5 metro hattında trenlerin enerji tüketimi

Üsküdar - Yamanevler TCU Enerji Tüketimi	Yamanevler - Üsküdar TCU Enerji Tüketimi
Test Sürüşünde Ölçülen Değerler	Test Sürüşünde Ölçülen Değerler
4 TCU Aktif	4 TCU Aktif
348,64 kWh	177,93 kWh
Üsküdar - Yamanevler Uzaklığı: 9,978 Metre	

3.2. M5 Üsküdar – Yamanevler metro hattı elektrifikasyonu

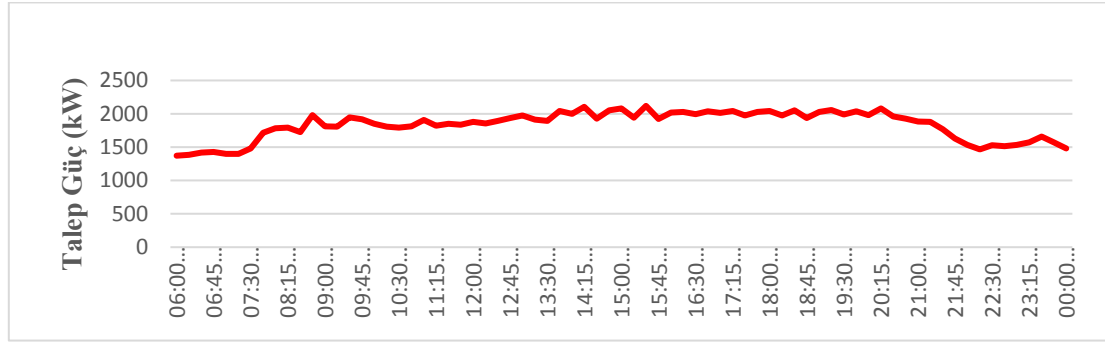
Üsküdar - Yamanevler metro hattının beslenmesi için 2 adet TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) indirici merkezi bulunmaktadır. Bağlarbaşı ve Ümraniye indirici merkezlerinin toplam gücü 180 MVA olup, metro hattının tek bir indirici merkezinden bile çalışmasına olanak sağlar. M5 metro hattının TEİAŞ indirici merkezinden enerji alma noktalarını gösteren OG tek hat şeması şekil 3’te basitleştirilmiş şekilde gösterilmiştir. Bağlarbaşı TEİAŞ indirici merkezinden Üsküdar transformator merkezi (TM1), Fıstıkağacı transformator merkezi (TM 2), Bağlarbaşı transformator merkezi (TM 3), Altunizade transformator merkezi (TM 4), Kısıklı transformator merkezi (TM 5) ve Bulgurlu transformator merkezi (TM 6) beslenmektedir. Ümraniye TEİAŞ indirici merkezinden, Ümraniye transformator merkezi (TM 7), Çarşı transformator merkezi (TM 8), Yamanevler transformator merkezi (TM 9) ve yeni açılan faz 2 istasyonları enerjilendirilmektedir. Faz 2 olarak adlandırılan istasyonlar, Çakmak, İhlamurkuyu, Altınşehir, Lise, Dudullu, Necip Fazıl, Çekmeköy ve Dudullu depo sahasıdır. Bu çalışmada faz 1 istasyonları ele alındığından dolayı sadece ilk 9 istasyon gösterilmiştir.

Demiryolu Mühendisliği



Şekil 3. M5 metro hattı OG tek hat diyagramı

Şekil 4'te Ümraniye TEİAŞ indirici merkezinin 24 saatlik yük zaman grafiği gösterilmiştir. Yük artışı işletmeye başlamadan önce trenlerin konumlandırılması ile saat 05.00 ile başlamaktadır ve saat 20:00'a kadar devam etmektedir. Talep güç gün içerisinde işletme saatlerinin sonuna doğru azalmaktadır.



Şekil 4. Ümraniye-1 TEİAŞ indirici merkezi yük-zaman eğrisi

3.3. CER gücü transformatör merkezleri

İstasyonlar, iki OG hücre üzerinden 34,5kV orta gerilim elektrik enerjisi TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) indirici merkezine bağlanır. DC ile enerjilendirilmiş sistemlerde CER transformatör merkezlerinde doğrultucular AC 34,5kV / 1200V CER transformatörlerinden beslenir [11]. Tablo 4'de M5 sürücüsüz metro hatının CER transformatör bilgileri görülmektedir.

Tablo 4. CER transformatörleri kurulu güç bilgisi
CER Transformatörleri

1- Üsküdar	1 x 3,3 MVA
2- Fıstıkağacı	2 x 3,3 MVA
3- Bağlarbaşı	-
4- Altunizade	2 x 3,3 MVA
5- Kısıklı	-
6- Bulgurlu	2 x 3,3 MVA
7- Ümraniye	-
8- Çarşı	2 x 3,3 MVA
9- Yamanevler	-
10- Çakmak	2 x 3,3 MVA
11- İhlamurkuyu	-
12- Altınşehir	2 x 3,3 MVA
13- Lise	-
14- Dudullu	2 x 3,3 MVA
Dudullu Depo	2 x 3,3 MVA
15- Necip Fazıl	-
16- Çekmeköy	1 x 3,3 MVA
Dudullu – Gen	-
Toplam Güç	59,4 MVA

Demiryolu Mühendisliği

Her transformator merkezinin yedek sistemi vardır. Transformator merkezleri OG hücrelerden, iki doğrultucu transformatoründen, iki doğrultucu, dört çıkış besleyicisi ve iki yardımcı transformatörden oluşmaktadır. Doğrultucular, 1200V AC gerilimi 1500 V DC nominal gerilimine dönüştürür [12]. Bu dönüşüm Denklem 1, Denklem 2 ve Denklem 3'te verilmiştir.

$$V_{\text{çıkış}} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{\frac{2\pi}{3}} V_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{3 \cdot V_m}{\pi} \int_{\pi/3}^{\frac{2\pi}{3}} \sin(\omega t) \cdot d\omega t \quad (1)$$
$$= \frac{3 \cdot V_m}{\pi} \cdot \left(-\cos \frac{2\pi}{3} + \cos \frac{\pi}{3} \right) = \frac{3 \cdot V_m}{\pi}$$

$$V_m = \sqrt{2} \cdot V_{\text{Hat}} \quad (2)$$

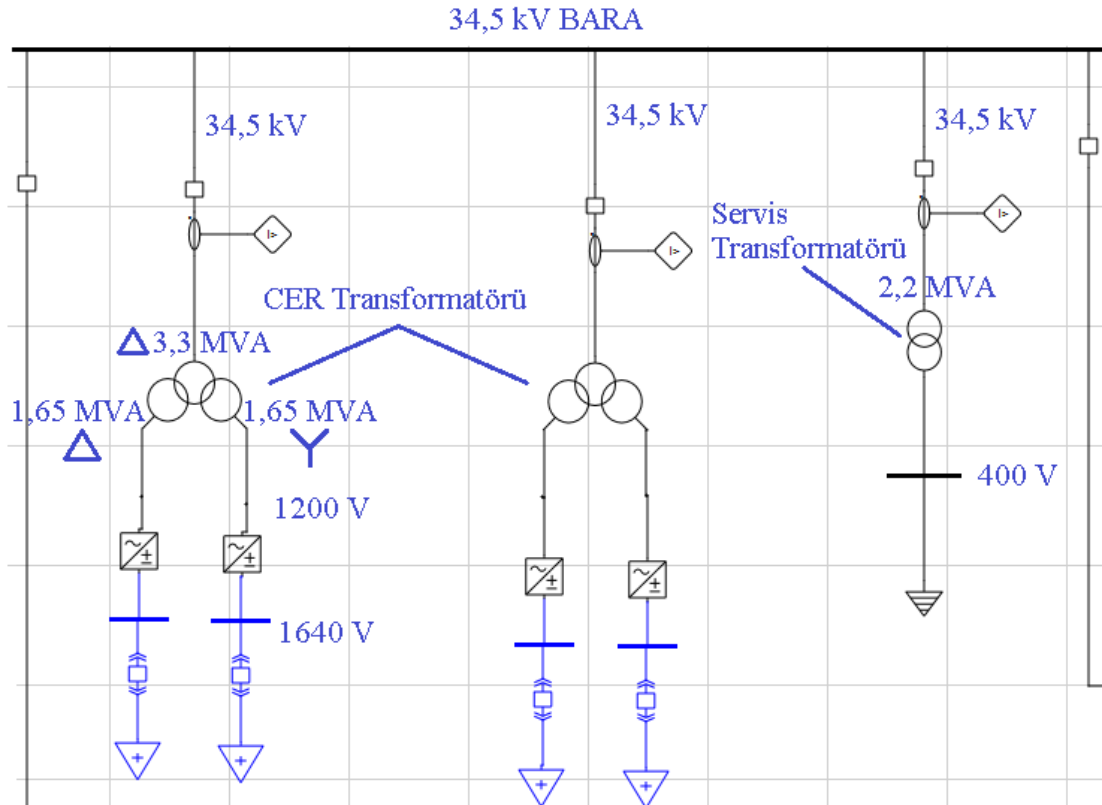
$$V_{\text{çıkış}} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{\text{Hat}}}{\pi} = 1,35 \cdot V_{\text{Hat}} \quad (3)$$

Denklemin parametreleri:

$V_{\text{çıkış}}$: DC çıkış gerilimi V_m : Efektif hat gerilimin maksimum değeri

V_{hat} : Transformator çıkış gerilimi

Elde edilen DC gerilimi, pozitif tarafı oluşturan kesici ve ayırıcı sistem vasıtasıyla rijit katener sistemine iletilir. Şekil 5'te M5 hattında bulunan CER gücü transformator merkezinin tek hat şeması görülmektedir.



Şekil 5. CER gücü transformator merkezi tek hat şeması

3.4. Aylık enerji tüketimi

Tablo 5’te, ikinci fazın açılmasından sonra yolcu sayıları artışının enerji tüketimi üzerindeki etkileri görülmektedir. Enerji tüketim ortalaması, 2,67 kWh / yolcu değerinden, 0,81 kWh / yolcu değerine düşmüştür.

Tablo 5. Yolcu ve tüketim bilgileri

2018	Toplam Tüketim (kWh)	Yolcu Sayısı	Tüketim Ortalaması (kWh/Yolcu)
Ocak	2.877.300	2.195.069	1,31
Şubat	2.648.480	2.103.222	1,26
Mart	2.486.570	2.465.550	1,01
Nisan	2.840.140	2.492.762	1,14
Mayıs	3.051.330	2.370.370	1,29
Haziran	3.179.460	2.049.398	1,55
Temmuz	3.573.100	1.340.542	2,67
Ağustos	3.228.320	1.578.206	2,05
Eylül	3.368.660	1.857.204	1,81
Ekim	3.705.180	3.585.606	1,03
Kasım	4.182.660	5.147.560	0,81
Aralık	4.401.000	5.199.064	0,85
2018 Toplam	39.542.200	32.384.553	1,22

4. M5 Üsküdar- Yamanevler Metro Hattı Analizi

Yük akışı analizi, düğüm gerilimlerinin, güç faktörünün, güç kayıplarının ve gücünün sabit durum değerlerini veren doğrusal olmayan cebirsel denklemlere sahip bir elektrik sisteminin çözümüne yardımcı olur [13]. Metro hattında Yük Akışı analizi en önemli çalışmadır. Ekipmanlar (kablo iletken kesiti, şalt, transformatör gücü, yük şalterleri ve devre kesiciler) yük akış analizinden elde edilen bilgilere dayanarak seçilmelidir [14]. Bu bölümde, M5 metro hattı’nın yük akışı analiz edilecektir.

4.1. M5 metro hattı yük akışı analizi

Üsküdar - Yamanevler hattının projesi 2 aşamadan oluşmaktadır ve üç farklı indirici merkezden enerji almak için tasarlanmıştır. Bu çalışmada, 1. fazdaki enerjilendirme şeklinin ayrı ayrı ve birlikte 2 farklı besleme noktasından yük analizi yapılacaktır. Etap programında seçilen ekipmanlar M5 Üsküdar - Yamanevler Metro hattından seçilmiştir. Yük akışı için kullanılan yöntem Newton – Raphson yöntemidir. Bu yöntem hızlı ayrıştırılmış yük akışı yöntemine göre daha az yinelemeye sahiptir ve daha kısa sürede sonuç vermektedir [15]. Newton – Raphson yöntemine göre, başlangıçta değişkenlerin değerleri rastgele belirlenir ve tekrar tekrar bu değerler kullanılarak yeni değerler üretilir [16]. Aynı işlem, en son oluşturulan iki değer arasında kabul edilebilir küçük bir fark oluşuncaya kadar sürekli olarak sürdürülür. Newton-Raphson yönteminin formülü Denklem 4’deki gibidir. ΔP , aktif değerler arasındaki fark ve ΔQ , reaktif değerler arasındaki güç farkıdır. $\Delta |V|$ Bara gerilimi, $\Delta \delta$ bara geriliminin faz açısının değişimidir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (4)$$

Jacobian matrisi açı ve gerilime göre reaktif ve aktif güç denklemlerinin kısmi türevinden oluşur. Jacobian matrisi Denklem 5’ teki gibidir.

$$J = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (5)$$

4.2. İşletme enerjilendirme metodu

Üsküdar - Yamanevler yük akışının analizine göre, iki TEİAŞ indirici merkezinden metro hattını beslemek, gerilim düşümü açısından en verimli besleme şeklidir. Bu besleme yönteminde metro hattı üçüncü (Bağlarbaşı) istasyonda 154 kV / 34,5 kV ve yedinci (Ümraniye) istasyonda 380 kV / 34,5 kV indirici merkezine sahiptir. Bu nedenle, enerji verilen istasyonlar indirici merkezlere çok yakındır. İlk indirici merkez birinci istasyondan altıncı istasyona, ikinci indirici merkez yedinci istasyondan on altıncı istasyona kadar enerji verir. İndirici merkezler ile istasyonlar arasındaki mesafe daha kısadır. Ayrıca, TEİAŞ indirici merkezde meydana gelen herhangi bir enerji dalgalanması durumunda, daha az istasyonu etkileyecektir. Girişlerden biri kaybedilirse, başka bir giriş tüm metro hattına enerji verebilir. Tablo 6’da Her iki TEİAŞ indirici merkezin aktif olduğu yük akış analizi görülmektedir.

Tablo 6. Her iki TEİAŞ indirici merkezin aktif olduğu yük akış analizi

OG Bara	Bara Gerilimi (kV)	Baradan Çekilen Güç (kW)	Bara Reaktif Yükü (kVAr)	Bara Akımı (Amper)	Kayıp Güç (kWh)	Güç Faktörü (%)
Üsküdar 1	34,478	198	30,74	3,361	1,1	99
Üsküdar 2	34,479	197	30	3,336	1,1	99
Fıstıkağacı 1	34,479	393,2	72,1	6,694	2	98,7
Fıstıkağacı 2	34,48	394,6	72,94	6,719	2	98,7
Bağlarbaşı TEİAŞ 1	34,482	1182,5	218	20,13	1,7	98,7
Bağlarbaşı TEİAŞ 2	34,482	1177,5	216,3	20,05	1,5	98,9
Altunizade 1	34,479	588,8	101,3	10	2,6	98,9
Altunizade 2	34,478	592,2	115,8	10,1	2,9	97,8
Kısıklı 1	34,476	394,5	72,92	6,718	0,9	97,8
Kısıklı 2	34,475	394	59,77	6,673	1,1	98,9
Bulgurlu 1	34,476	199,7	31,45	3,386	1,7	98,8
Bulgurlu 2	34,443	197	29,76	3,337	1,6	98,9
Ümraniye TEİAŞ 1	34,46	1845,6	746,7	33,37	0,9	98
Ümraniye TEİAŞ 2	34,433	1814,9	508,7	31,58	0,8	99
Çarşı 1	34,43	1650,4	705,1	3,09	1,9	97,8
Çarşı 2	34,446	1617,6	478,4	28,27	2	97,8
Yamanevler 1	34,426	1453,7	675,1	26,88	1,3	97,8
Yamanevler 2	34,44	1420,1	435,3	24,9	1,1	97,8
TEİAŞ Bağlarbaşı	154	2360,1	440,3	9,001	0,9	98,5
TEİAŞ Ümraniye	380	3660,5	1271,1	14,53	1,1	98,6

İşletme enerjilendirme metoduna göre en yüksek gerilim düşümü 74 volt ile Yamanevler 1 OG barasında bulunmaktadır, bu gerilim düşümünün esas sebebi Yamanevler istasyonundan 7 istasyon ve Dudullu tren atölyesinin beslenmesidir. Dudullu TEİAŞ girişi henüz aktif olmadığı için 7. istasyondan 16. istasyona kadar enerji beslemesi yapılmaktadır. Maksimum gerilim düşümü %0,2 dir ve tek indirici merkezden tüm istasyonların beslenmesi gibi senaryolar düşünüldüğü için oldukça düşük bir gerilim düşümü vardır. Güç faktörü değeri minimum 97,8’dir

ve EN 50160 standardına göre optimum güç faktörü aralığı içerisinde [17]. Her istasyondaki güç faktörünün farklı olmasının sebebi Bağlarbaşı, Kısıklı, Ümraniye ve Yamanevler istasyonlarında CER transformatörlerinin bulunmamasıdır. Bu enerjilendirme metodunda toplamda 30,2 kWh'lık bir güç kaybı görülmüştür, bu kayıp güç bir meskenin dört günlük tüketimine eşittir [18]. Program sonucuna göre her iki TEİAŞ indirici merkezinden toplamda 6020,6 kW değerinde aktif güç çekilmiştir, bu değer tüm TEİAŞ indirici merkezleri kaybedildiğinde aktif olan jeneratörün değeri ile aynıdır. Hattın tamamını beslemesi için seçilen jeneratörün de doğru bir seçim olduğu bu sonuçlar ile teyit edilmiş bulunmaktadır.

4.3. İkinci alternatif enerjilendirme metodu

Bağlarbaşı indirici merkezi inaktif, Ümraniye indirici merkezinin aktif olduğu enerji besleme alternatifidir. M5 Üsküdar - Yamanevler metro hattının ikinci besleme alternatifidir. Ümraniye indirici merkezi metro hattının orta noktasında olduğundan, gerilim düşümü üçüncü alternatif enerjilendirme metoduna göre daha azdır. OG baralar arasında en yüksek gerilim düşümü 93 volt ile Yamanevler 1 barasındadır ve %0,26 gibi çok düşük bir gerilim düşümü gerçekleşmiştir. Güç faktörü değeri minimum 97,8'dir ve EN 50160 standardına göre optimum güç faktörü aralığı içerisinde [17]. Bu enerjilendirme metodunda toplamda 44,3 kWh'lık bir güç kaybı görülmüştür, bu kayıp güç bir meskenin yaklaşık altı günlük tüketimine eşittir [18]. En yüksek güç kaybı bu besleme senaryosunda gözlemlenmiştir. Toplam çekilen güç ikinci ve üçüncü alternatif enerjilendirme metodunda birbirine yakındır. Tablo 7'de gösterildiği gibi Ümraniye TEİAŞ indirici merkezinden 6009,5 kW güç çekilirken sadece Bağlarbaşı istasyonundan enerji beslemesi yapıldığında 6003,2 kW güç çekilmiştir.

Tablo 7. Sadece Ümraniye TEİAŞ indirici merkezin aktif olduğu yük akış analizi

OG Bara	Bara Gerilimi (kV)	Baradan Çekilen Güç (kW)	Bara Reaktif Yükü (kVAr)	Bara Akımı (Amper)	Kayıp Güç (kWh)	Güç Faktörü (%)
Üsküdar 1	34,402	197,5	30,71	3,354	1,1	98,8
Üsküdar 2	34,419	196,3	29,9	3,331	1,1	98,9
Fıstıkağacı 1	34,403	391,5	71,78	6,679	2,2	98,7
Fıstıkağacı 2	34,42	393,2	72,7	6,708	2	98,7
Bağlarbaşı TEİAŞ 1	34,405	587,6	101,7	10,01	0	98,7
Bağlarbaşı TEİAŞ 2	34,422	586,7	114,6	10,03	0	98,7
Altunizade 1	34,425	780,9	156	13,35	4,1	98,7
Altunizade 2	34,408	784,6	144,4	13,39	3,1	98,7
Kısıklı 1	34,411	978,6	185,8	16,71	2,3	98,7
Kısıklı 2	34,429	977,3	186	16,68	1,3	98,6
Bulgurlu 1	34,417	1177,8	217,3	20,09	4,8	98,7
Bulgurlu 2	34,434	1174	215,8	20,01	4,6	98,6
Ümraniye TEİAŞ 1	34,423	3021,2	963,3	53,19	5,7	98,4
Ümraniye TEİAŞ 2	34,44	2987,1	724,1	51,53	5,2	98,4
Çarşı 1	34,414	1648,6	704,3	30,08	2	98
Çarşı 2	34,428	1615,8	477,8	28,26	2	98
Yamanevler 1	34,407	1452,1	674,4	26,87	0,7	97,8
Yamanevler 2	34,421	1418,6	434,8	24,89	0,6	97,8
TEİAŞ Bağlarbaşı	154	0	0	0	0	0
TEİAŞ Ümraniye	380	6009,5	1728,6	23,44	1,5	98,4

4.4. Üçüncü alternatif enerjilendirme metodu

Bağlarbaşı indirici merkezi aktif, Ümraniye indirici merkezi inaktif olan enerjilendirme, bir alternatif besleme şeklidir. Bu besleme metodunda metro hattı, ikinci indirici merkezine (Ümraniye 7. İstasyon) kıyasla hattın daha uç kısmında giriş noktasına sahiptir. Tablo 8’de görüldüğü gibi bu senaryoda Yamanevler 1 OG barasının gerilimi diğer baralara göre en yüksek gerilim düşümüne maruz kalmıştır fakat 145 voltluk bir gerilim düşümü tren performansını ve işletmeyi olumsuz bir şekilde etkilememektedir. İşletme ve ikinci alternatif enerjilendirme metodlarında olduğu gibi bu enerjilendirme metodunda da güç faktörü değeri minimum 97,8’dir ve EN 50160 standardına göre optimum güç faktörü aralığı içerisinde [17]. Bu besleme senaryosunda toplamda 37,3 kWh’lık bir güç kaybı görülmüştür, bu kayıp güç bir meskenin yaklaşık beş günlük tüketimine eşittir [18].

Tablo 8. Sadece Bağlarbaşı TEİAŞ indirici merkezin aktif olduğu yük akış analizi

OG Bara	Bara Gerilimi (kV)	Baradan Çekilen Güç (kW)	Bara Reaktif Yükü (kVAr)	Bara Akımı (Amper)	Kayıp Güç (kWh)	Güç Faktörü (%)
Üsküdar 1	34,419	197,7	30,74	3,355	1,1	99
Üsküdar 2	34,437	196,5	29,93	3,332	1,1	98,9
Fıstıkağacı 1	34,42	391,9	71,85	6,683	2	99
Fıstıkağacı 2	34,438	393,6	72,77	6,711	2	98
Bağlarbaşı TEİAŞ 1	34,422	3017,7	963,5	53,13	1,7	98,7
Bağlarbaşı TEİAŞ 2	34,439	2984,1	725	51,48	1,6	98,7
Altunizade 1	34,427	2396,2	609,5	41,46	3,2	98,7
Altunizade 2	34,408	2428,8	860,8	43,24	3,1	98,7
Kısıklı 1	34,396	2231,3	817,5	39,89	1,5	98
Kısıklı 2	34,416	2201,4	567,5	38,14	1,2	99
Bulgurlu 1	34,382	2036,8	775,4	36,6	3,4	99
Bulgurlu 2	34,403	2004,6	536,9	34,83	3,1	99
Ümraniye TEİAŞ 1	34,371	1837,6	743,6	33,3	1,5	98,4
Ümraniye TEİAŞ 2	34,393	1808	506,7	31,52	1,4	98,7
Çarşı 1	34,362	1643,7	702,2	30,03	2,2	97,8
Çarşı 2	34,381	1611,4	476,5	28,22	2,2	97,8
Yamanevler 1	34,355	1447,7	672,4	26,83	0,2	97,8
Yamanevler 2	34,374	1414,7	433,6	24,85	0,2	97,8
TEİAŞ Bağlarbaşı	154	6003,2	1729,7	23,42	4,6	98,4
TEİAŞ Ümraniye	380	0	0	0	0	0

5. Sonuç

Bu çalışmada üç farklı besleme alternatifi için ayrı ayrı senaryo uygulanmıştır. Birinci besleme metodu her zaman kullanılan işletme besleme metodudur. Her iki TEİAŞ indirici merkezi aktiftir ve güç kaybı – gerilim düşümü olabilecek minimum seviyeye ulaşmıştır. M5 metro hattının uzatması olan 2. Fazda Çekmeköy istasyonuna kadar 7 istasyon ve bir tren atölyesi daha hatta eklenmiştir. Güç kaybı ve gerilim düşümü gibi hususlar göz önünde bulundurulduğunda 2. fazın indirici merkezinin Dudullu istasyonunda bulunması en doğrusudur. Çünkü istasyonların yanı sıra tren atölyesi ve Dudullu yerleşkesini de beslemektedir. Konum itibarıyla beslenen noktaların tam

ortasındadır.

İkinci alternatif besleme metodunda sadece Ümraniye indirici merkezi aktiftir. En yüksek güç kayıplarının olduğu enerjilendirme metodudur. SCADA sisteminde görülen değerlere göre Ümraniye TEİAŞ indirici merkez gerilim kalitesi Bağlarbaşı indirici merkezinden daha kötüdür. 34,5 kV nominal gerilim gün içerisinde 31,8 kV seviyesine kadar düşmektedir, 2700 voltluk bir düşüş nominal gerilimin %7,8 'ine tekabül etmektedir ve ciddi bir gerilim düşümedir, bu seviyedeki bir gerilim düşümü herhangi bir enerji dalgalanmasında ekipmanların düşük gerilimden kendisini korumaya alıp devre dışı konuma getirmesine sebep olur. Ümraniye TEİAŞ indirici merkezindeki gerilim düşümünün sebebi 380 kV'luk hattın alınan enerjinin zaman zaman gerilim seviyesinin enterkonnekte hattaki yüke bağlı olarak düşmesidir.

Üçüncü alternatif besleme metodunda metro hattının tamamen Bağlarbaşı indirici merkezinden enerjilendirilmesi analiz edilmiştir. Bağlarbaşı istasyonu Üsküdar'dan itibaren 3. İstasyondur ve hattın son istasyonuna 13,7 km uzak mesafededir. Son istasyona Ümraniye TEİAŞ indirici merkezinden daha uzak olmasına rağmen gerilim düşümü %0,4 seviyesindedir. Gerilim düşümünün bu kadar ideal olmasının sebebi orta gerilim dağıtımında istasyonlar arası (3x(1x240) kablo kullanılması ve doğru ekipmanların seçilmiş olmasıdır [19]. Metro hatlarının tasarımında hattın tamamının tek indirici merkezden beslenmesi planladığı için ekipman seçiminde standardın üzerinde özellikteki ekipmanlar seçilmiştir (Aşırı kalın kablolar, yüksek güçlü transformatörler gibi).

Çözüm olarak TEİAŞ indirici merkezinin 380 kV hat fiderinden besleme almak yerine daha stabil dalga formuna sahip hat fiderinden besleme alınması TEİAŞ'tan istenmelidir yada transformatörlerde yük altında kademe değiştiricileri kullanılmalıdır. Bu şekilde gerilim düşümü ve güç kaybı azaltılmış olacaktır. M5 hattının 2. Fazının açılmış olması ve üçüncü fazının inşaat aşamasında olduğundan dolayı en kısa sürede Dudullu TEİAŞ indirici merkezinden enerji alınması gerekmektedir.

Kaynakça

- [1] Railway network key elements and main sub-systems, specification [Online] Available: http://www.merlin-rail.eu/wp-content/uploads/2012/12/MRL-WP1-D-ANS-013-06-D1_1-Railway_network_key_elements_and_main_sub-systems_specification.pdf [Accessed: 4-Ara-2019]
- [2] UNECE, The United Nations Economic Commission for Europe, [Online] Available: www.unece.org [Accessed: 4-Ara-2019]
- [3] H. Alnuman, D. Gladwin and M. Foster, "Electrical modelling of a dc railway system with multiple trains", *IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering Palermo*, Italy, 2018 pp: 1-2.
- [4] "Üsküdar - Çekmeköy metro tren performansı ve CER gücü raporu", Metro İstanbul, İstanbul
- [5] A. R. Mario and G. Ramos, "Power system modelling for urban massive transportation systems" *International Conference on Power System Technology 2012* pp:3
- [6] H. J. Chuang, C. S. Chen, C. H. Lin, J.Y. Chen and C. Y. Ho, "Optimal expansion planning of traction substations for an electrified mass rapid transit system" , *International Conference on Power System Technology*, 22-26 Oct. 2006 ,pp 1-7
- [7] S. Su, T. Tang and Y. Wang, "Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an optimal train control simulation model", *Energies* 2016, pp:2
- [8] A. Belay, "Design and simulation of traction power supply system: case study of Modjo~Hawassa line" Master Thesis, The Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia, pp.4, June 2016.
- [9] S. Su, T. Tang and Y. Wang "The effect of train length on determining train control regimes on inter-station" *State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety*, Beijing Jiaotong University, pp:3
- [10] N. R. Richard, K. Tristan, M. K. Fitzgerald and A. M. John, "Analyzing transit AC and DC traction power networks" [Online]. Available: <https://www.apta.com/mc/rail/previous/2014/papers/Pages/default.aspx> [Accessed: 4-Ara-2019]
- [11] S. H. Hosseini and F. Shahnia "Load flow calculation and short circuit fault transients in ac electrified

- railways” ICCAS2005 June 2-5, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea Azarbaijan Regional Electric Company, Tabriz, Iran pp. 34-38, June 2005.
- [12] N. A. Raval, Prof. S. N. Shivani, Prof. M. K. Kathariya, “Review paper on AC traction power line fault analysis and simulation”, *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development* Vol. 3, Issue 08, 2015 | ISSN: 2321-0613
- [13] C.J.Chen, Ch. H. Lin, “Optimal expansion plannign in traction substations for an electrified mass rapid transit system”, *International Conference on power system tech.* pp , 1-7, 2006
- [14] T. Kulworawanichpong, “Multi-train modelling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method”, *J.Mod.Transport 2015*, 23(4), pp:241-251
- [15] J. Zhang, M. Wu and Qi Liu, “A novel power algorithm for traction power supply systems based on the thevenin equivalent”, *energies*, pp. 38–44, july.2018
- [16] Y. Yuan, W. J. Yong and X J. Jian, ”Reliability evaluation of a bulk power system for the traction power supply system of a high-speed railway”, Beijing Jiao Tong University, China 2009 *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 26-29 Jan. 2009
- [17] *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*, EN 50160: Standard 1999.
- [18] EMO İstanbul Şubesi, 2008, “Akıllı sayaç yoktur, akıllı ve bilinçli insan vardır”, 3e *Electrotech Dergi*, 169: 64-66.
- [19] Electrical Engineerign Portal, 2013. How to calculate voltage regulation of distribution line. [Online] Available: <https://electrical-engineering-portal.com/how-to-calculate-voltage-regulation-of-distribution-line#2> [Accessed 12 şubat 2020].

Özgeçmiş



Turan ÖLMEZ

Lisans eğitimini İstanbul Aydın Üniversitesinde tamamlamıştır. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir. 2016 yılından beri Metro İstanbul A.Ş. Anadolu Bölge İşletme Müdürlüğünde çalışmaktadır.
E-Posta: turanolmez@hotmail.com



Beyhan KILIÇ

1987 yılında Yıldız Teknik Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak başladığı görevine halen devam etmektedir.
E-Posta: beykilig@yildiz.edu.tr

Beyanlar

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.
Tüm yazarların eşit oranda katkısı olmuştur.