

DA TAHRİKLİ RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE RAY-TOPRAK GERİLİMİNİN İNCELENMESİ

Kerim ÇOLAK¹

M. Hakan HOCAOĞLU²

Mühendislik Fakültesi

GebzeYüksek Teknoloji Enstitüsü, 41400, Gebze KOCAELİ

¹e-posta: kerim_colak@yahoo.com

²e-posta: hocaoglu@gyte.edu.tr

Anahtar sözcükler: Raylı ulaşım, Sızıntı Akımı, Dokunma gerilimi

ABSTRACT

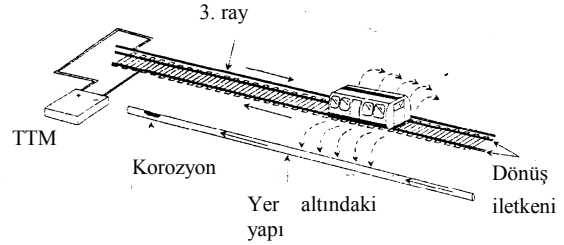
One of the most important problems faced in the electrified railway systems is the stray currents and related touch potentials. Currents which are deviated from their intended path are termed as the stray currents. In this paper, the stray currents and related rail potentials are calculated for a single fed DC railway system. Analytical formulae for the problem are determined by taking into account proper boundary conditions for a single fed system. Presented analytical formulae have shown close agreement with the numerical solutions which have been implemented by using distributed parameters approach. Developed formulae are applied to a real railway system. Results have shown that earthing resistance of the system has a great influence on the magnitude of stray currents and related rail potentials.

1. GİRİŞ

Raylı taşımacılık güç besleme sistemleri üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar tahrik sistemi trafo merkezleri (TTM), gidiş devresi ve dönüş devresidir (Şekil 1). TTM' de AA giriş gerilimi indirilerek doğrultulduktan sonra DA gerilim elde edilmektedir. Araçların artı beslemesi gidiş devresi üzerinden yapılmakta olup gidiş iletkeni olarak katener hattı yada 3. ray kullanılmaktadır. Ray, ray bağlantı kabloları ve dönüş kablosu da dönüş iletkeni olarak kullanılmaktadır.

Araç hareket halinde iken belirli bir akım çekmektedir. Raylı ulaşım sistemlerinde ray-toprak arası sonlu direnç akımın bir kısmının dönüş yolu yerine toprak veya toprağa gömülü metalik yapı üzerinden akmasını sağlayacaktır. Ray-toprak yolu üzerinden akan bu akıma sızıntı akımı veya kaçak akım (*Stray Current*) denilmektedir. Bu akım sebebiyle dokunma gerilimi ve ray potansiyeli olarak bilinen bir gerilim yükselmesi oluşur [1]. Herhangi bir arıza durumunda kaçak akım ve dokunma gerilimi değerleri yüksek değerlere çıkmaktadır. Sızıntı akımı ve bu akım dolayısıyla oluşan dokunma geriliminin meydana getirdiği problemleri gidermek kolay değildir. Örneğin ray-toprak arası izolasyonun büyük olması dokunma geriliminin büyük, kaçak akımın ise küçük olmasına neden olur. 35 yıllık bir ömür için tasarlanan rayların kaçak akımların etkisi ve rayda oluşan çatlaklar nedeniyle yedi yıl içerisinde değiştirilmesi gerektiği görülmüştür [2]. Bu çalışmada topraklama sistemlerinin kaçak akım ve dokunma gerilimi üzerindeki etkileri analitik ve nümerik olarak incelenmiştir.

Bir elektrikli ray taşıma sistemi için temel tahrik besleme sistemi oldukça basittir. Tipik olarak alt istasyonlar 650VDA veya 1000VDA gerilim seviyesinde olup trenin büyüklüğüne ve araç sayısına bağlı olarak 1000A den 8000A e kadar akım verebilmektedir. TTM trene giden tahrik enerjisini düşüren güç beslemeleri arasındaki büyük gerilim düşmelerini önlemek için 2km arayla dizayn edilirler. Bir güç beslemesi negatif dönüş yolu gerektirdiğinden iki taşıyıcı ray akımın geriye dönüşü için kullanılır.



Şekil 1: Raylı taşıma güç besleme sistemi

Taşıyıcı ray üzerindeki gerilim düşümünün azaltılmasının yolu taşıyıcı dönüş ray direncinin düşürülmesidir. Dönüş ray devresi direncinin düşürülmesinde kullanılan üç tedbir vardır [3]. Bunlar:

1. Ray boyutunun veya kesitinin arttırılması.
2. Uygun raydan raya bağlantıların sağlanması.
3. Tahrik besleme istasyonları arasındaki mesafenin kısa tutulması.

Şeklinde sıralanabilir. Bugün taşıma sistemlerinde rayın bir metresi 40-55kg gelmekte ve bu ağırlıktaki rayın kesiti akım için yeterli bir dönüş direncini sağlamaktadır. Ayrıca ray kesitini istediğimiz kadar arttırmakta elimizde değildir. İkinci önemli tedbir, taşıyıcı ray direncinin negatif akım dönüşü için sürekli bir elektrikselsel yol oluşturacak kadar düşürülmesidir. Bu yeni inşa edilen taşıma hatlarında standart uygulama olan sürekli kaynaklı raylar kullanılarak yada hattın ayrı seksiyonları arasında kaynaklı kablo bağları kullanılarak oluşturulabilir. Son metot kesik ray uzunluklarına sahip eski sistemler üzerinde ve makas bölgeleri, dönüş alanları gibi özel ray hattı bölgelerinde faydalıdır. Ek olarak iki taşıyıcı rayın her 150-300m de bir çapraz bağlanması kaynaklı ve kablo bağlantılı taşıyıcı rayların direncini daha da düşürür. Negatif dönüş devresinin direncinin düşürülmesi için üçüncü tedbir tahrik besleme istasyonları arasındaki mesafeyi düşürmektir. Bu pozitif besleme ve negatif dönüş devresi uzunluğunu düşürür. Böylece gerilim

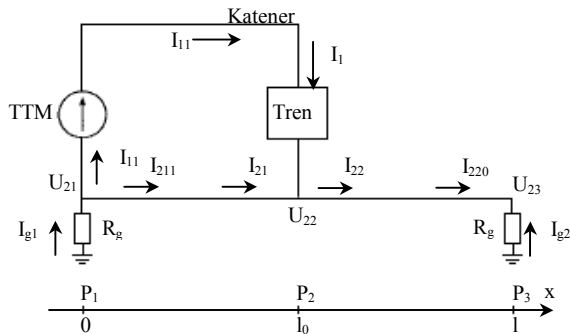
düşümü azalır. Kaçak akım yolu kısalarak genişliği düşürülür. Bugün yeni taşıma sistemleri tahrik besleme transformatörleri 1.5-3km aralıklar ile yerleştirilmektedirler. Tahrik besleme trafolarının sıklığı kaçak akımı azaltmanın yanında ek faydalar sağlar. Bu durumda besleme noktaları yolcu istasyonlarına da yakın olacaktır. Trenin perondan harekete başladığı zaman maksimum akımı çekecektir. Tren ile besleme noktası arası mesafe kısa olacağından gerilim düşümü fazla olmayacaktır [1].

Kaçak akımın büyüklüğü rayların topraklanıp topraklanmaması ile de doğrudan ilgilidir. Raylar doğrudan topraklanacağı gibi bir diyot üzerinden de topraklanabilirler. Topraklama sızıntı akımını artırırken ray-toprak ve dolayısıyla dokunma gerilimini düşürecek yönde etki yapacaktır. Topraklanmış sistemlerde doğrultucu ünitenin negatif barası direkt olarak topraklama barasına bağlanmıştır. Taşıyıcı raylar üzerinde de yalıtım yoktur. Bu şekilde bir sistemde sızıntı akımı hiçbir kısıtlama olmaksızın negatif bara ile yer altındaki metalik yüzeyler arasında akar. Topraksız sistemlerde toprak ile negatif bara arasında metalik bir bağlantı yoktur. Teoride ray kısadevrelerinin oluşmasına izin verilmediği müddetçe kaçak akımlar düşük olmalıdır. Topraksız sistemlerin dezavantajı platform ile toprak arasında insan hayatı içinde tehlike oluşturabilecek gerilim farkının oluşmasıdır.

Diyot topraklı sistemler, topraklanmış sistemlerdeki korozyon etkisini, topraklanmamış sistemlerde de ray gerilimi problemini azaltmak için kullanılmaktadır. Diyot topraklı sistemlerde diyot doğrultucunun negatif barası ile trafo merkezinin topraklama barasına bağlanmıştır. Diyot devresi ray-toprak arası gerilim belirli bir gerilim seviyesine ulaştığı zaman topraktan negatif baraya doğru akım akmasına izin verir. Diyot topraklı sistemlerde ray-toprak arası direncin yüksek olması için gerekli tedbirler de alınmaktadır. Ray toprak arası bulunan diyot gerilim seviyesi aşıldığı zaman dönüş rayları topraklanmış olur[4].

2. Sistemin analitik olarak incelenmesi

Şekil 2 de tek taraftan beslenen bir tahrik sistemi görülmektedir. Ray her iki taraftan da R_g direnci ile topraklanmıştır ve tren TTM den I_1 akımını çekmektedir.



Şekil 2: Hattın tek taraftan beslenmesi.

burada;

P_1 : TTM nin bulunduğu nokta

$P_2 (l_0)$: trenin bulunduğu nokta (m)

$P_3 (l)$: hat sonu (m)

U_{21} : hat başındaki ray gerilimi (V)

U_{22} : trenin bulunduğu noktadaki ray gerilimi (V)

U_{23} : hat sonundaki ray gerilimi

P_1 - P_2 bölgesi için konuma bağlı akım ve gerilim (1) ve (2) ile P_2 - P_3 bölgesi için ise (3) ve (4) den hesaplanabilir [1, 5].

$$i(x) = c_1 e^{\gamma x} + c_2 e^{-\gamma x} \quad (1)$$

$$v(x) = -R_0 (c_1 e^{\gamma x} - c_2 e^{-\gamma x}) \quad (2)$$

$$i(x) = c_3 e^{\gamma x} + c_4 e^{-\gamma x} \quad (3)$$

$$v(x) = -R_0 (c_3 e^{\gamma x} - c_4 e^{-\gamma x}) \quad (4)$$

Burada;

$$\gamma = \sqrt{RG} \text{ propogasyon sabiti (m}^{-1}\text{)}$$

$$R_0 = \sqrt{R/G} \text{ Ray iletkeninin karakteristik direnci (\Omega)}$$

$$R = \text{Ray direnci (\Omega m}^{-1}\text{)}$$

$$G = \text{Ray toprak arası kaçak iletkenlik (Sm}^{-1}\text{)}$$

Burada c_1, c_2, c_3, c_4 sabitleri özel sınır koşullarına göre belirlenmektedir.

P_1 noktası için sırasıyla (1) ve (2) denklemleri,

$$I_{211} = c_1 + c_2 \quad (5)$$

$$U_{21} = -R_0 (c_1 - c_2) \quad (6)$$

P_1 noktası için akım denklemi,

$$I_{11} + I_{211} = I_{g1} \quad (7)$$

olarak bulunur. P_1 noktasının gerilimi

$$U_{21} = -I_{g1} \cdot R_g \quad (8)$$

olarak yazılır. (5), (6) ve (7) denklemlerinden;

$$(1 - k_g) c_1 + (1 + k_g) c_2 = -I_{11} \quad (9)$$

olarak elde edilir. Burada $k_g = R_0/R_g$ dir.

P_3 noktası için sırasıyla (3) ve (4) denklemleri yazılırsa

$$I_{220} = c_3 e^{\gamma l} + c_4 e^{-\gamma l} \quad (10)$$

$$U_{23} = -R_0 (c_3 e^{\gamma l} - c_4 e^{-\gamma l}) \quad (11)$$

P_3 noktası için sırasıyla akım ve gerilim denklemi yazılırsa

$$0 = I_{220} + I_{g2} \quad (12)$$

$$U_{23} = -R_g \cdot I_{g2} \quad (13)$$

(10), (11), (12) ve (13) denklemleri kullanılarak

$$0 = (1 + k_g) e^{\gamma l} c_3 + (1 - k_g) c_4 e^{-\gamma l} \quad (14)$$

elde edilir.

P_2 noktasındaki akım denklemi

$$I_1 + I_{21} = I_{22} \quad (15)$$

olarak yazılır.

P2 noktası için (1) ve (3) denklemi sırasıyla

$$I_{22} = c_3 e^{\gamma l_0} + c_4 e^{-\gamma l_0} \quad (16)$$

$$I_{21} = c_1 e^{\gamma l_0} + c_2 e^{-\gamma l_0} \quad (17)$$

olarak yazılır. (15), (16) ve (17) denklemlerinden

$$-I_1 = e^{\gamma l_0} (c_1 - c_3) + e^{-\gamma l_0} (c_2 - c_4) \quad (18)$$

olarak bulunur.

P2 noktasının gerilimi (2) ve (4) denklemleri için aynı olacaktır.

$$e^{\gamma l_0} (c_1 - c_3) = e^{-\gamma l_0} (c_2 - c_4) \quad (19)$$

olarak yazılabilir.

(18) ve (19) denklemlerinden;

$$c_3 = c_1 + I_1 e^{-\gamma l_0} / 2 \quad (20)$$

$$c_4 = c_2 + I_1 e^{\gamma l_0} / 2 \quad (21)$$

olarak bulunur.

(20) ve (21), (14) denkleminde yerine yazılırsa;

$$-k_p I_1 / 2 = (1 + k_g) e^{\gamma l} c_1 + (1 - k_g) c_2 e^{-\gamma l} \quad (22)$$

(9) ve (22) denklemlerinden ;

$$c_1 = \Delta^{-1} [-(1 - k_g) e^{-\gamma l} I_{11} + (1 + k_g) k_p I_1 / 2] \quad (23)$$

$$c_2 = \Delta^{-1} [(1 + k_g) e^{\gamma l} I_{11} - (1 - k_g) k_p I_1 / 2] \quad (24)$$

olarak hesaplanır. Burada;

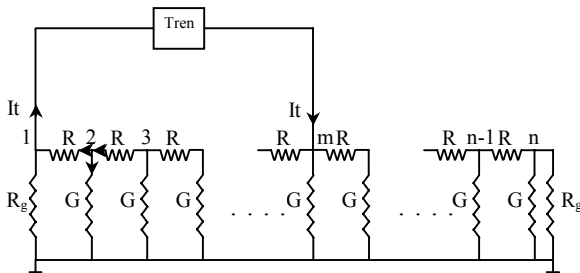
$$\Delta = (1 - k_g)(1 - k_g) e^{-\gamma l} - (1 + k_g)(1 + k_g) e^{\gamma l}$$

$$k_p = (1 + k_g) e^{\gamma l_p} + (1 - k_g) e^{-\gamma l_p}$$

$$l_p = l - l_0, I_{11} = I_1 \text{ dir.}$$

3. Sistemin Nümerik Olarak İncelenmesi:

Sistemin nümerik olarak modellenmesi için raylar kaskad bağlı elemanlar şeklinde gösterilir. (Şekil 3) Bu devrede her bir düğüm noktası için akım bağıntısı yazılarak admitans matrisi ve akım matrisi oluşturulur. Admitans matrisinin tersi ile akım matrisinin çarpımı bize ray üzerindeki gerilim dağılımını verecektir.



Şekil 3: Sistem modeli

Burada;

r : Ray direnci (ohm/m)

g : Ray toprak arası kaçak iletkenlik (S/m)

Rg : Topraklama direnci (ohm)

L : Hattın uzunluğu (m)

n : Nokta sayısı

$\Delta x = L/(n-1)$ birim uzunluk (m)

R : Birim uzunluğa karşılık gelen ray direnci (ohm)

G : Birim uzunluğa karşılık gelen ray toprak arası kaçak iletkenlik (S)

Admitans matrisi oluşturulurken denklemler ray hattının başında ve sonunda, trenin bulunduğu noktada farklılık gösterecektir. diğer noktadaki akım denklemleri aynı olacaktır. Buna göre akım denklemleri yazılırsa;

1. nokta için akım denklemi;

$$-I_t = -(U_2 - U_1) \frac{1}{R} + U_1 \frac{1}{R_g} = \quad (25)$$

$$U_1 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_g} \right) - U_2 \frac{1}{R}$$

olarak yazılır. 2. nokta için akım denklemi ise;

$$(U_2 - U_1) \frac{1}{R} - (U_3 - U_2) \frac{1}{R} + U_2 G = \quad (26)$$

$$U_2 \left(\frac{2}{R} + G \right) - U_1 \frac{1}{R} - U_3 \frac{1}{R} = 0$$

Aracın bulunduğu m noktası için akım denklemi ;

$$I_t = -(U_{m+1} - U_m) \frac{1}{R} + (U_m - U_{m-1}) \frac{1}{R} + U_m G = \quad (27)$$

$$U_m \left(\frac{2}{R} + G \right) - U_{m-1} \frac{1}{R} - U_{m+1} \frac{1}{R}$$

olarak yazılır. Hat sonundaki n noktası için akım denklemi ;

$$0 = (U_n - U_{n-1}) \frac{1}{R} + U_n \frac{1}{R_g} + U_n G = \quad (28)$$

$$U_n \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_g} + G \right) - U_{n-1} \frac{1}{R}$$

olarak yazılır. Akım ve gerilim arasındaki bağıntı;

$$[I] = [Y][U] \quad (29)$$

olduğundan ray üzerindeki gerilim dağılımı;

$$[U] = [Y]^{-1}[I] \quad (30)$$

denklemleriyle bulunabilir. Her bir düğüm noktası için oluşturulan denklemlerden admitans matrisi;

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} + \frac{1}{R_g} & -\frac{1}{R} & & & \\ -\frac{1}{R} & \frac{2}{R} + G & -\frac{1}{R} & & \\ & -\frac{1}{R} & \frac{2}{R} + G & -\frac{1}{R} & \\ & & & \ddots & \\ & & & & -\frac{1}{R} & \frac{2}{R} + G & -\frac{1}{R} \\ & & & & & -\frac{1}{R} & \frac{1}{R} + \frac{1}{R_g} + G \end{bmatrix} \quad (n \times n) \quad (31)$$

şeklinde yazılır. Akım matrisi ise

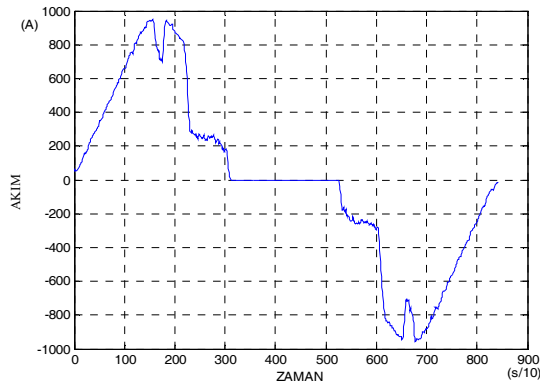
$$I = \begin{bmatrix} -I \\ 0 \\ \vdots \\ I \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

(1×n)

olarak yazılır.

4. Simülasyon Sonuçları ve Analizi:

Aksaray' dan Yenibosna' ya kadar hattın uzunluğu 18.5km' dir. 8 adet TTM de 34.5kV şebeke gerilimi indirildikten sonra doğrultularak 750VDA elde edilmektedir. Bu güzergah boyunca bir metro aracının çektiği akım Şekil 4 de verilmiştir.

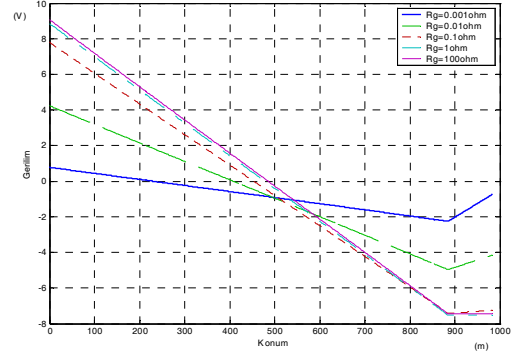


Şekil 4: Metro aracının akım zaman grafiği

Akımın pozitif değerleri için araç motor olarak çalışmakta ve hattan akım çekmektedir. Akımın negatif değerlerinde ise araç generatör olarak çalışmakta ve hatta akım basmaktadır. Bu durum ancak aracın beslendiği enerji bölgesinde başka bir aracın bu enerjiyi kullanabilmesi durumunda olabilir. Eğer herhangi bir alıcı yoksa hat gerilimi yükseleceğinden bu enerji fren dirençlerinde harcanacaktır. Akımın pozitif değerleri Aksaray-Emniyet istasyonları arasında yapılan tip testlerinden alınmıştır. Tip testleri sırasında hatta başka alıcı olmadığından araç hatta akım basamamaktadır. Fakat teorik olarak aracın çektiği enerjiyi aynen hatta geri verdiği düşünülerek motor ve generatör çalışmada akımın mutlak değer olarak birbirine eşit olduğu düşünülmüştür.

Hattın Aksaray-Emniyet arası yaklaşık 981m dir ve araç iki istasyon arasını yaklaşık 84s de gitmektedir. Ray direnci 0.02Ω/km olarak alınmıştır. Ray üzerindeki gerilim dağılımı motor ve generatör çalışma için ayrı incelenmiştir.

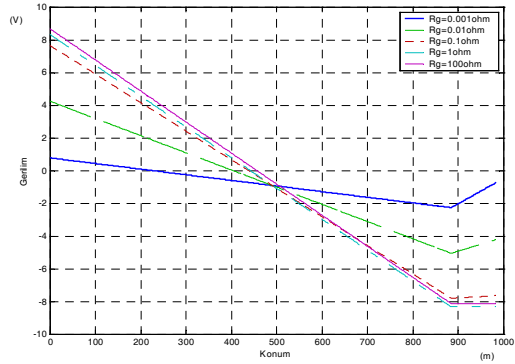
Şekil 5 de ray-toprak arası direncin 10S/km olması halinde değişik topraklama direnci değerleri için aracın generatör olarak çalışması durumunda ray üzerindeki gerilim dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 5: G=10 S/km iken değişik topraklama direnci değerlerinde frenleme durumunda ray gerilimi dağılımı

Topraklama direncinin çok küçük olduğu durumda ray üzerindeki gerilim bir 1V-2V lar mertebesinde dir. Topraklama direncinin 100Ω olması durumunda gerilim 9V lar seviyesine çıkmaktadır.

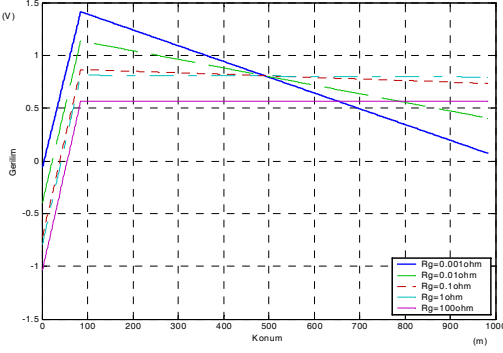
Şekil 6 da ray-toprak arası kaçak iletkenliğin 0.01S/km iken generatör olarak çalışmada ray üzerindeki gerilim dağılımı görülmektedir.



Şekil 6: G=0.01 S/km iken değişik topraklama direnci değerlerinde frenleme durumunda ray gerilimi dağılımı

Şekil 5 ve Şekil 6 ya bakıldığı zaman G=10 S/km ve G= 0.01 S/km için ray gerilim dağılımının da fazla bir fark olmadığı görülmektedir.

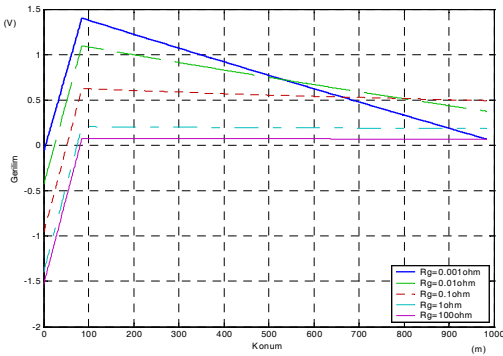
Şekil 7 de ray-toprak arası kaçak iletkenliğin 0.01 S/km iken motor olarak çalışmada ray üzerindeki gerilim dağılımı görülmektedir



Şekil 7: $G=0.01$ S/km iken değişik topraklama direnci değerlerinde motor durumunda ray gerilimi dağılımı

Motor ve generatör çalışmada hattın aynı akım geçmesine rağmen motor olarak çalışmada daha düşük gerilim değerleri elde edilmektedir. bunun sebebi aracın TTM ye daha yakın olması ve gerilim düşümünün daha az olmasından dolayıdır.

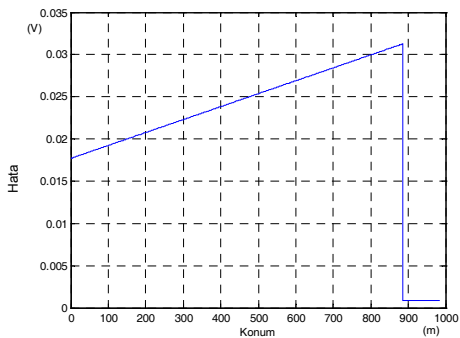
Şekil 8 de ray-toprak arası kaçak iletkenliğin 10 S/km iken motor olarak çalışmada ray üzerindeki gerilim dağılımı görülmektedir



Şekil 8: $G=10$ S/km iken değişik topraklama direnci değerlerinde motor durumunda ray gerilimi dağılımı

Ray-toprak arası kaçak iletkenliğin 10 S/km ve 0.01 S/km değerleri için motor çalışmada da gerilim dağılımında fazla bir fark olmadığı görülmektedir.

Şekil 9 da ray üzerindeki gerilimin analitik olarak hesaplanan gerçek sonuçla nümerik yöntemle hesaplanan sonuç arasındaki fark görülmektedir.



Şekil 9: $G=0.01$ S/km ve $R_g=1$ iken frenleme durumunda analitik ve nümerik olarak hesaplanan değerler arasındaki fark

Nümerik yöntemle bulunan çözümün doğruluğu alınan nokta sayısına bağlıdır. Şekilde de görüldüğü gibi sonuçlar arasındaki fark dikkate alınacak derecede değildir.

5. Sonuç

Elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde ray üzerindeki gerilim dağılımı topraklama sistemine göre değişmektedir. Topraklanmış sistemlerde gerilim dağılımı büyük değildir. Yalıtılmış sistemlerde ray üzerindeki gerilim dağılımı daha büyüktür. Aynı akım değerlerinde TTM den uzaklaştıkça daha yüksek gerilimler oluşmaktadır. Bir besleme bölgesinde birden fazla araç olabileceği düşünülürse TTM den daha fazla akım çekileceğinden gerilim değerleri daha yüksek seviyelere gelecektir ve insan hayatı için tehlike oluşturabilecektir. Bu nedenle sistem dizayn edilirken istasyonların TTM lere yakın olmasında fayda olacaktır.

Bu çalışmada analitik ve nümerik sonuçlar arasında önemli bir fark bulunmadığı gösterilmiştir. Ray toprak geriliminin topraklama direnci ile değiştiği belirlenmiştir. Sistemde birden fazla tren olduğu, farklı akımlar çekildiği, hattın birden fazla noktadan beslendiği durumlar ayrıca incelenecektir. Rayların bağlantı noktalarında meydana gelebilecek bir arıza, ray-toprak, katener-ray kısadevreleri ayrıca incelenerek her bir senaryo için hesaplanan dokunma gerilimi değerleri standartlarda verilen izin verilebilir azami vücut akımı değerleri ile karşılaştırılacaktır.

KAYNAKLAR

- 1 Lee, C.H., Wang, H. M.: 'Effects of Grounding Schemes on Rail Potential and Stray Currents in Taipei Rail Transit Systems', IEE Proc. Elec. Power App. Vol.148, No. 2, March 2001, pp. 148-154
- 2 IEE PROFESSIONAL GROUP P2 (Railway Traction and Signaling): 'IEE Colloquium on Stray Current Effects of DC Railway and Tramways', The IEE, London, 11 October 1990
- 3 IEE PROFESSIONAL GROUP P2 (Railway Traction and Signaling): 'IEE Colloquium on DC Traction Stray Current Control-“Offer a stray a good ohm?”', The IEE, London, 21 October 1999
- 4 Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems: http://iti.acns.nwu.edu/projects/stray2_lit.html Erişim Tarihi (9 A ğ ustos 2002).
- 5 Yu, J.G., and Goodman, C.J.: 'Modelling of rail potential raise and Leakage Current in DC Rail Transit Systems', 'IEE Colloquium on Stray Current Effects of DC Railway and Tramways', London, October 1990, pp 221-226.
- 6 Bahra, K. S., Batty, P.G.: 'Earthing and Bonding of Electrified Railways', Int. Conf. On Developments in Mass Transit Systems 20-23 April, 1998, pp. 296-303