

BİR YILDIRIMLIKTAN AKAN AKIMIN YARATTIĞI MANYETİK ALANIN BİNA İÇİ KABLOLARLA ETKİLEŞİMİ

Özcan KALENDERLİ
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
Maslak/İstanbul
kalenderli@itu.edu.tr

Ali Sinan ÇABUK
İstanbul Teknik Üniversitesi
Meslek Yüksekokulu
Maslak/İstanbul
ascabuk@itu.edu.tr

ÖZET

Bir doğa olayı olarak bilinen yıldırım; bulut ile yeryüzü arasında bir elektrik boşalmasıdır. Bir yıldırım boşalması sırasında 3 kA ile 200 kA arasında akımlar akabilir. Ülkemizde içinde bulunduğu Avrupa-Asya kuşağında bu akım değeri, 5 kA-25 kA amper civarındadır. Yıldırımların kentsel bölgelerde oldukça yıkıcı zararları olur. Bu zararları en aza indirebilmek için binalarda yıldırımlık (paratoner) ismi verilen, binaları yıldırımın etkilerinden koruyan tesisatlar kullanılmaktadır. Bu tesisatların amacı yüksek yıldırım akımlarını çarpma noktasından toprağa, indirme iletkenleri üzerinden, güvenli bir şekilde ulaştırmaktır. Bu çalışmada, yıldırım indirme iletkenlerinden geçen yüksek akımların yarattığı manyetik alanların, yakınındaki bina içi kablolarla olan elektromanyetik etkilerinin incelenmesi ve sonuçları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yıldırımdan korunma, Manyetik alan, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Manyetik kuplaj, Kablolar.

1. GİRİŞ

Yıldırımdan korunmak için binaların yüksek yerlerine yakalama ucu adı verilen madeni çubuklar yerleştirilir. İndirme iletkeni adı verilen iletkenlerle topraklama tesisatına bağlanan bu düzene “yıldırımlık (paratoner)” adı verilir. İndirme iletkeni bir ya da birkaç paralel akım yolu olabilir. İndirme iletkeninin biçimi, akım yolu uzunluğu en kısa olacak şekilde düzenlenmelidir [1, 2].



Şekil 1: Yıldırım.

Yıldırımlık uygulamalarında Franklin yakalama uçları (çubukları veya telleri) ya da Faraday kafesi yöntemi

kullanılır. Temel ilke, binanın yüksek yerinden yıldırımın çarpmasıyla alınan yüksek akımın toprağa güvenle indirilmesidir. İndirme iletkeni olarak Faraday kafesi yönteminde, birbirlerine elektriksel olarak bağlı olmaları koşuluyla binanın çelik donatıları da kullanılabilir. Franklin yakalama uçlarında ise bina dış cephesi yüzeyinden toprağa indirilen, bu nedenle indirme iletkeni adı verilen iletkenler yer alır. İndirme iletkeni olarak genellikle 50 mm²’lik elektrolitik bakır (som bakır) veya galvanizli şerit iletkenler kullanılır. Bu iletkenler ile duvar arasında, duvar malzemesinin yancılık durumu da göz önüne alınarak en az 10 cm açıklık olmalıdır. İndirme iletkenlerini duvar üzerine sabitlemek için tutturucu duvar indirme kroşeleri kullanılır. Her iki tutturucu kroşe arasında genellikle 90 cm aralık bırakılır. Duvar yüzeyinden indirilen bu iletkenler yerden 250 cm yükseklikten itibaren yere kadar koruyucu bir boru içerinden geçirilir. Bu iletken veya iletkenler, potansiyel dengelemesi için kuşaklanmaları yanında, eşdeğer topraklama direnci 10 Ω değerini geçmeyen topraklama tesisatına (topraklama elektrotlarına, topraklayıcılara) bağlanır [2].

2. YILDIRIMLIK MANYETİK ALAN ANALİZİ

Yıldırımların ses, ışık, ısı, elektromanyetik alan, elektrodinamik, elektrokimyasal gibi çeşitli etkileri vardır [3]. Yıldırım akımı kendi boşalma kanalından, bir nesneden veya bir iletkenin akarken çevresinde oluşturduğu etkilerden birisi de manyetik alandır [4-6]. Bu manyetik alanın en etkili olabileceği durumlardan birisi, yıldırım akımının bir indirme iletkeninden akarken yakınındaki iletkenlerde ve kablolarda, yarattığı manyetik alan nedeniyle endüklediği gerilimlerdir [7, 8]. Bu gerilimler, yapının çalışmasını bozabileceği, yapıya hasar verebileceği gibi, bu iletkenlerle teması olacak insanlar için de tehlikeli olabilir [9, 10]. Özellikle indirme iletkenine paralel, yakındaki kablolarda bu etkinin daha çok görüleceği açıktır. Bu çalışmada, bir yapının dış duvarı yüzeyinden 10 cm uzakta yerleştirilmiş bir indirme iletkeninden 5 kA ile 25 kA arasında farklı genliklerde yıldırım akımları geçmesi durumunda, duvarın arkasında, bina içindeki bir kabloda manyetik alanın etkileri incelenmiştir. Yine bu kapsam içinde, indirme iletkeni ile kablo arasındaki uzaklık değiştiğinde manyetik alandaki değişim miktarı

araştırılmıştır. İncelemeler, elektromanyetik alanların sayısal olarak incelenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) [11] ile yapılmıştır. İnceleme analitik olarak yapılmak istenseydi alan dağılımını çıkarmak farklı etkenlerin etkisini göz önüne almak olanaksız veya çok zor olacağı için böyle bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemle bu çalışmada incelenen problemlerin çözümlenmesinde, FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics Version 4.2) adlı, açık kodlu bir bilgisayar programından yararlanılmıştır. Bu bilgisayar programı, sonlu elemanlar ağı oluşturmada üçgen sonlu elemanlar kullanan ve üçgen elemanlar içinde birinci derece yaklaşım işlevleri kullanarak çözümlenme yapan bir programdır.

Bu çalışmadaki incelemeler, aşağıdaki varsayımlarla yapılmıştır:

- İndirme iletkeni olarak 50 mm² kesitli, öz direnci $\rho_{cu} = 58 \Omega.m$ olan som bakır kullanılmıştır.
- Bina içindeki kablo olarak 2,5 mm² kesitli, öz direnci $\rho_{cu} = 58 \Omega.m$ olan, tek damarlı, bakır iletkenli, PVC yalıtımlı kablo göz önüne alınmıştır.
- Kablonun PVC (Polivinilklorür) yalıtkanı için bağıl manyetik geçirgenlik $\mu_r = 1$ alınmıştır.
- İndirme iletkeni ile bina içindeki kablo arasındaki duvar için bağıl manyetik geçirgenlik $\mu_r = 1$ alınmıştır.
- Yıldırımaktan 5 kA, 10 kA, 15 kA, 20 kA ve 25 kA akım geçmesi durumları için ayrı ayrı incelemeler yapılmıştır.
- İncelenen her durumda bina içindeki kablodan 10 A akım aktığı varsayılmıştır.
- İndirme iletkeninin binanın dış duvarı yüzeyinden 10 cm uzakta, duvara paralel olarak, bina çatısından zemine kadar tutturularla sabitlenmiş olduğu düşünülmüştür.

Bu varsayımlarla oluşturulan modellerin sonlu elemanlar yöntemiyle elektromanyetik alan analizleri yapılmıştır. Aşağıda incelenen farklı durumlar ve sonuçları verilmiştir.

2.1. Kablonun Duvar İçinde veya Dışında Olması Durumu

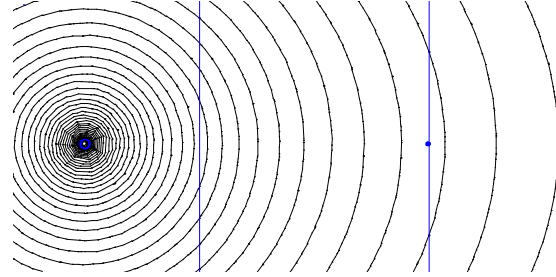
Bu incelemede indirme iletkeni ile kablonun, birbirine paralel ve olabilecek en yakın konumda (incelenen durum için, indirme iletkeninin duvardan uzaklığı 10 cm, duvar kalınlığı 20 cm yani aralarında toplam 30 cm uzaklık var) iken, bina içindeki kablonun

- a) Duvarın içinde (Şekil 2) ve
- b) Duvarın üzerinde (Şekil 3)

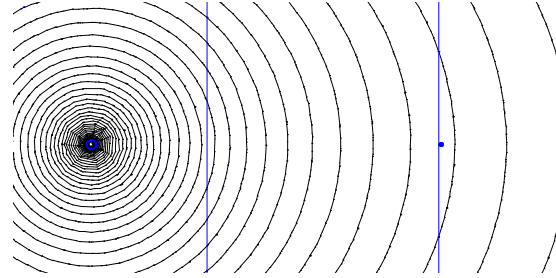
olması durumları incelenmiştir. İncelemede, indirme iletkeninden akan akım 5 kA'den 25 kA'ye kadar 5 kA'lık basamaklarla değiştirilerek her bir akım değeri için kablodaki manyetik endüksiyon değeri elde edilmiştir. Çizelge 1'de hesaplanan değerler, Şekil 4'te de bu bilgilerle çizilmiş grafikler verilmiştir.

Çizelge 1: Kablo konumuna göre değişen akımla kabloda oluşan manyetik endüksiyon değerleri.

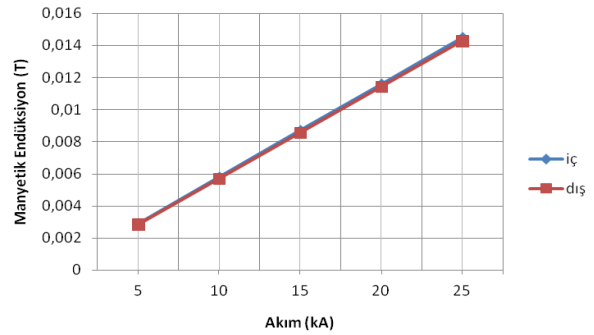
Kablo Konumu	Manyetik Endüksiyon B (T)				
	5 kA	10 kA	15 kA	20 kA	25 kA
Dış	0,002849	0,005709	0,008569	0,011429	0,014289
İç	0,002867	0,005770	0,008674	0,011577	0,014480



Şekil 2: Bina içindeki kablonun duvarın içinde olması durumunda manyetik alan dağılımı.



Şekil 3: Bina içindeki kablonun duvarın üzerinde olması durumunda manyetik alan dağılımı.

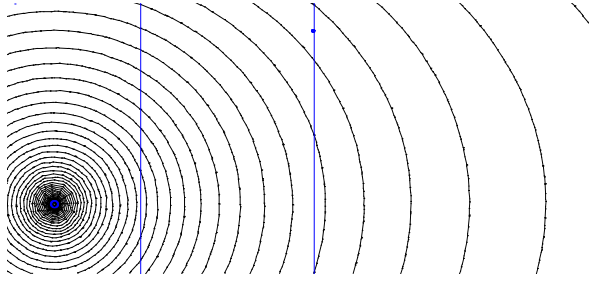


Şekil 4: Bina içindeki kablonun, duvarın içinde ve dışında olması durumlarında, indirme iletkeninden geçen akımla kablo üzerindeki manyetik endüksiyon değerinin değişimi.

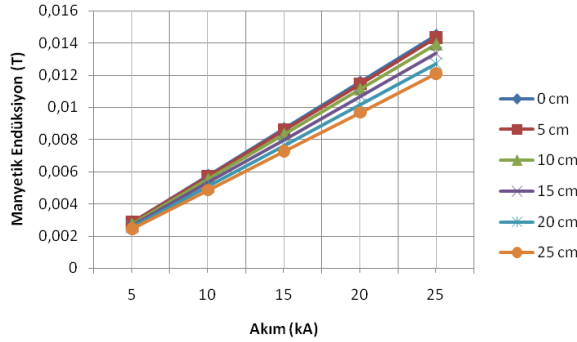
Şekil 4'te görüldüğü gibi, indirme iletkeninden geçen akımın artmasıyla, kablonun bulunduğu noktada oluşturulan manyetik endüksiyon doğrusal olarak artmaktadır. Artışın sayısal olarak miktarı veya oranı Çizelge 1'den elde edilebilir. Örneğin 5 kA için $B = 0,002849$ T ve 25 kA için $B = 0,014289$ T olduğundan manyetik endüksiyondaki artış, akımdaki artış oranı gibi yaklaşık 5 kat olmuştur. İncelenen durumda kablonun duvarın içinde veya dışında olması, kablonun indirme iletkeninden uzaklığını fazla değiştirmedikten elde edilen manyetik endüksiyon değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur.

2.2. İndirme İletkeni ile Kablo Arasındaki Uzaklığın Değişimi

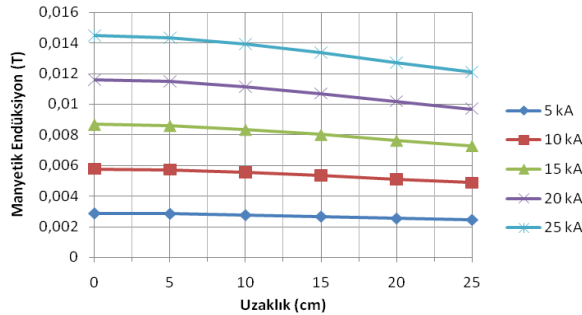
İncelemenin bu bölümünde, indirme iletkeni ile kablo arasındaki uzaklığın değişmesi durumunda (Şekil 5), değişen yıldırım akımı değerleri için kabloda oluşan manyetik endüksiyon ve manyetik alan şiddeti hesapları yapılmıştır. Bu incelemelerde kablo, duvarın içinde kabul edilmiş; indirme iletkeni ile kablonun aynı hizada olduğu durum 0 cm olarak alınmış, sonraki uzaklıklar bu referansa göre düşeyde 5 cm ile 25 cm'ye kadar 5 cm adımlarla öteleme olarak alınmıştır. 0 cm alınan durum, kablonun indirme iletkeninden 30 cm uzakta olduğu durumdur. Farklı uzaklıklarda kabloda oluşan manyetik endüksiyonun yıldırım akımı değeri ile değişimi Şekil 6'da; farklı akımlarda kabloda oluşan manyetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi de Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 5: Kablo ile indirme iletkeni arasında uzaklığın artması durumunda manyetik alan dağılımı.



Şekil 6: Kablo ile indirme iletkeni arasında 6 farklı uzaklıkta indirme iletkeninden geçen akımla kablo üzerindeki manyetik endüksiyonun değişimi.



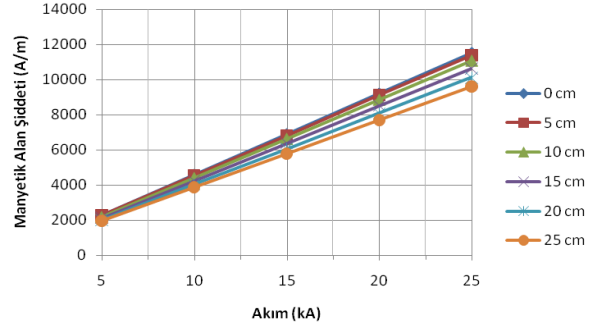
Şekil 7: İndirme iletkeninden geçen akımın 5 farklı değeri için kablo ile indirme iletkeni arasındaki uzaklıkla kablodaki manyetik endüksiyonun değişimi.

Bu şekiller, Çizelge 2'de verilen SEY ile hesaplanan değerlerle çizilmiştir.

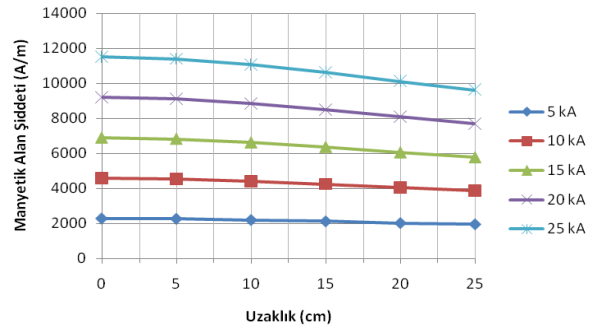
Çizelge 2: Farklı uzaklıklarda, değişen akımla kabloda oluşan manyetik endüksiyon değerleri.

Uzaklık	Manyetik Endüksiyon B(T)				
	5 kA	10 kA	15 kA	20 kA	25 kA
0 cm	0,002867	0,005770	0,008674	0,011577	0,014481
5 cm	0,002844	0,005716	0,008588	0,011460	0,014332
10 cm	0,002756	0,005546	0,008335	0,011125	0,013914
15 cm	0,002659	0,005333	0,008006	0,010680	0,013354
20 cm	0,002535	0,005081	0,007626	0,010171	0,012716
25 cm	0,002447	0,004859	0,007271	0,009682	0,012094

Manyetik endüksiyon hesaplarının yapıldığı aynı koşullarda, farklı uzaklıklarda kablonun bulunduğu yerde oluşan manyetik alan şiddetinin yıldırım akım değeri ile değişimi Şekil 8'de; farklı akımlarda kablonun bulunduğu yerde oluşan manyetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi de Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu şekiller, Çizelge 3'de verilen SEY ile hesaplanan değerlerle çizilmiştir.



Şekil 8: Kablo ile indirme iletkeni arasında 6 farklı uzaklıkta indirme iletkeninden geçen akımla kablo üzerindeki manyetik alan şiddetinin değişimi.



Şekil 9: İndirme iletkeninden geçen akımın 5 farklı değeri için kablo ile indirme iletkeni arasındaki uzaklıkla kablodaki manyetik alan şiddetinin değişimi.

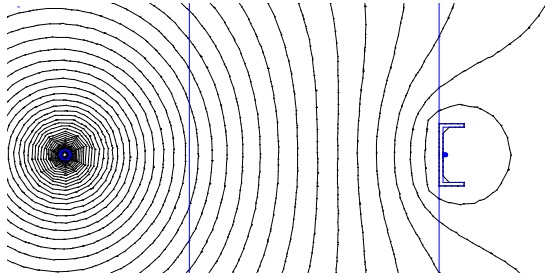
Çizelge 3: Farklı uzaklıklarda, değişen akımla kablodaki manyetik alan şiddeti değerleri.

Uzaklık	Manyetik Alan Şiddeti H (A/m)				
	5 kA	10 kA	15 kA	20 kA	25 kA
0 cm	2281,42	4591,93	6902,44	9212,96	11523,5
5 cm	2262,86	4548,42	6834,01	9119,6	11405,2
10 cm	2193,16	4413,01	6632,89	8852,78	11072,7
15 cm	2115,96	4243,61	6371,27	8498,94	10626,6
20 cm	2017,45	4042,91	6068,39	8093,88	10119,4
25 cm	1947,02	3866,32	5785,66	7705	9624,34

Şekil 6 ve Şekil 8'den görüldüğü gibi, indirme iletkeninden geçen akımın artmasıyla, kablunun bulunduğu noktada oluşturulan manyetik endüksiyon ve manyetik alan şiddeti doğrusal olarak artmaktadır. Buna karşılık, beklendiği gibi, indirme iletkeni ile kablo iletkeni arasındaki uzaklık arttıkça kablunun bulunduğu noktada oluşturulan manyetik endüksiyon ve manyetik alan şiddeti, Şekil 7 ve Şekil 9'dan görüldüğü gibi yaklaşık doğrusal olarak yavaşça azalmaktadır.

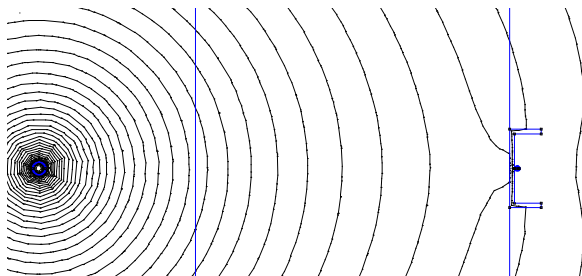
2.3. Kablunun Metal Kablo Kanalı İçinde Bulunması Durumu

Bu kısımda, kablunun 4 mm kalınlığında metal kablo kanalı içinde bulunması ve metal kablo kanalının topraklanmış olması ($A = 0$) (Şekil 10) ve topraklanmamış olması (Şekil 11) durumlarında, indirme iletkeninden 25 kA yıldırım akımı akarken kablunun bulunduğu noktada oluşan manyetik endüksiyon ve manyetik alan şiddetleri ve dağılımları hesaplanarak incelenmiştir.



Şekil 10: Kablunun topraklı metal kablo kanalı içinde olması durumunda, indirme iletkeninden 25 kA geçen manyetik endüksiyonun dağılımı.

Kablunun topraklanmış metal kablo kanalı içinde bulunması durumunda, kablunun bulunduğu konumda SEY ile $|B| = 0,0074495$ T ve $|H| = 5928,14$ A/m hesaplanmıştır. Kablo kanalı yokken aynı noktadaki $|B| = 0,014481$ T ve $|H| = 11523,5$ A/m olduğundan kablo kanalının varlığı, alan değerlerini yaklaşık yarıya düşürmüştür.



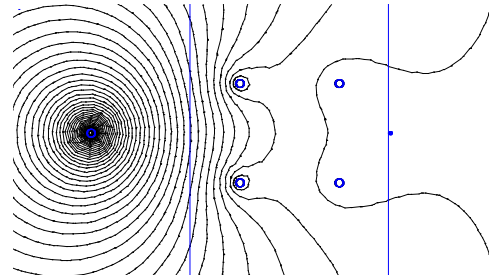
Şekil 11: Kablunun metal kablo kanalı içinde olması durumunda, indirme iletkeninden 25 kA geçen manyetik endüksiyonun dağılımı.

Kablunun topraklanmamış metal kablo kanalı içinde bulunması durumunda, kablunun bulunduğu konumda SEY ile $|B| = 0,0008630$ T ve $|H| = 686,783$ A/m

hesaplanmıştır. Kablo kanalı yokken aynı noktadaki $|B| = 0,014481$ T ve $|H| = 11523,5$ A/m olduğundan topraklanmamış kablo kanalının varlığı, alan değerlerini yaklaşık %95 düşürmüştür.

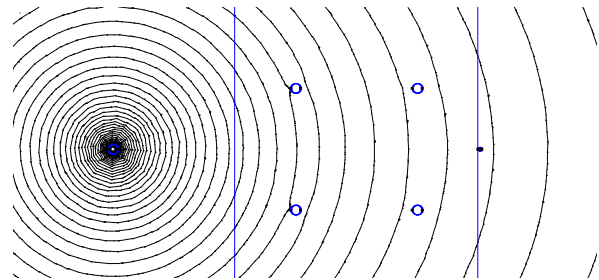
2.4. İndirme İletkeni ile Kablo Arasına Bina Kolon Çelik Donatılarının Gelmesi Durumu

Bu kısımda ise indirme iletkeni ile kablo arasında bina kolon çelik donatılarının gelmesi ve çelik donatının topraklanmış olması ($A = 0$) (Şekil 12) ve topraklanmamış olması (Şekil 13) durumlarında, indirme iletkeninden 25 kA yıldırım akımı akarken kablunun bulunduğu noktada oluşan manyetik endüksiyon ve manyetik alan şiddetleri ve dağılımları hesaplanarak incelenmiştir. Çelik donatının, bir karenin köşelerine yerleştirilmiş 4 adet, daire kesitli (yuvarlak) çelik çubuktan oluştuğu varsayılmıştır.



Şekil 12: Kablo ile indirme iletkeni arasında topraklı çelik donatılar varlığında, indirme iletkeninden 25 kA geçen manyetik endüksiyonun dağılımı.

Kablo ile indirme iletkeni arasında topraklanmış çelik donatıların varlığında, kablunun bulunduğu konumda SEY ile $|B| = 0,0011212$ T ve $|H| = 892,243$ A/m hesaplanmıştır. Çelik donatılar yokken aynı noktadaki $|B| = 0,014481$ T ve $|H| = 11523,5$ A/m olduğundan çelik donatıların varlığı, alan değerlerini yaklaşık %92 düşürmüştür.



Şekil 13: Kablo ile indirme iletkeni arasında çelik donatılar varlığında, indirme iletkeninden 25 kA geçen manyetik endüksiyonun dağılımı.

Kablo ile indirme iletkeni arasında topraklanmamış 4 adet çelik telden oluşan donatıların varlığında, kablunun bulunduğu konumda SEY ile $|B| = 0,014309$ T ve $|H| = 11386,6$ A/m hesaplanmıştır. Çelik donatılar yokken aynı noktadaki $|B| = 0,014481$ T ve $|H| = 11523,5$ A/m olduğundan çelik donatıların

varlığı, alan değerlerini yaklaşık %2 kadar düşürmüştür.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yıldırımılık indirme iletkenlerinden yıldırım akımı geçişi sırasında, indirme iletkeni yakında bulunan bina içi kablolarda, yıldırım akımının elektromanyetik alan etkisi düzeyleri, SEY ile yapılan sayısal hesaplarla incelenmiştir. Bu çalışmada ele alınan manyetik endüksiyon ve manyetik alan etkilerinin bina içindeki bir kabloda artan akımla artan, buna karşılık artan uzaklıkla azalan etkiye sahip olduğunu, alan dağılımı ve değerleri ile görmek olanağını vermiştir. Bu sunulan bilgi, indirme iletkenlerini ve kabloları döşerken göz önüne alınarak manyetik kuplajı dolayısıyla etkileşimi en aza indirerek çalışmak veya çalıştırmak için bir öneri veya bir kılavuz olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] IEC 62305-4 Protection against lightning, Part 4: Electrical and electronic systems within structures, First edition, 2006-01.
- [2] IEC 60364-4-44:2001, Electrical installations of buildings – Part 4-44: Protection for safety – Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances
- [3] M. A. Uman, *The Lightning Discharge*, Academic Press, San Diego, 1987.
- [4] V. A. Rakov, Lightning electric and magnetic fields, in *Proc. 13th Int. Zurich Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, 1999, pp. 561-566.
- [5] V. A. Rakov, Lightning electromagnetic fields: Modeling and measurements, in *Proc. 12th Int. Zurich Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, 1997, pp. 59-64.
- [6] J. M. Cvetič and B. V. Stanić, LEMP calculation using an improved return stroke model, in *Proc. 12th Int. Zurich Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 77-82, 1997.
- [7] L. M. Scott, K. E. Susan, N. K. Ivica and E. T. Niescja, The Magnetic field induced by a lightning strike's indirect effect double exponential current waveform, *Journal of Mathematics and Statistics*, 6 (3): 221-225, 2010.
- [8] Sowar, G., Lightning radial electric fields and their contribution to induced voltages, *IEEE Symposium on EMC*, 1999.
- [9] Flisowski, Stanczak, Kuca, Mazzeti, Orlandi, Yarmarkin, Induced currents and voltages inside LPS models due to lightning current, 23rd ICLP, Firenze, 1996.
- [10] Noda, Takami, Nagaoka, Amantani, Basic investigation of lightning induced voltages to an electronic appliance, 23rd ICLP, France, 1996.
- [11] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, Orlando, Florida, 1994.