

Uçaklara Yıldırım Çarpma Koşullarının Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Özcan KALENDERLİ

ozcan@elk.itu.edu.tr

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Suna BOLAT

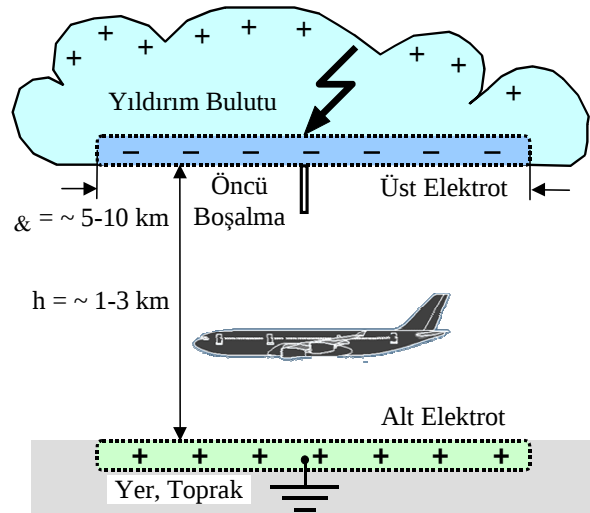
bolats@elk.itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada bulut-yer arası bölgedeki uçaklara yıldırım çarpma olayı, düzgün alanda iletken nesne yaklaşımı ile uçağın normal uçuş, kalkış, iniş ve farklı hareket durumlarını ve konumlarını dikkate alarak, farklı bulut potansiyelleri için sonlu elemanlar yöntemi ile elektrik alan ve potansiyel hesabı yapılarak incelenmiştir. Kanatlar, kuyruk ve burun gibi bir uçağın eğrilik yarıçapı küçük yerlerinde elektrik alan şiddetlerinin büyük değerlere ulaştığı, yıldırım çarpması bakımından yönlendirici olduğu, uçağın uçuş konumuna göre alan ve çarpma koşullarının değiştiği gösterilmiştir.

1 GİRİŞ

Yıldırım, bulut ile yer arasında veya bulut içi elektrik yük merkezleri arasında veya bulutlar arasında olan, sesi ile, ışığı ile, elektriksel etkileri ile tanınmış bir elektriksel boşalma olayıdır [1, 2]. Gerilimi 100 MV'lara, akımı 200 kA'lara varan bu hızlı boşalmanın gücü MW'lar, enerjisi ise J (Ws)'ler mertebesinde. Bu özellikleri ile yıldırım çarptıkları nesnelerden geçirdikleri akımlarıyla tehlikeli olaylara neden olmaktadır. Yıldırımın kaynağını oluşturan yıldırım bulutları yaklaşık 5-10 km çapında, 10-15 km yüksekliğinde hava kütleleridir. Olan yıldırımların %70-90'ı negatif kutbiyetli, %10-30'u pozitif kutbiyetlidir. Bu durum, yıldırım bulutlarının büyük çoğunluğunda üst kısmında pozitif elektrik yüklerinin, alt kısmında ise negatif elektrik yüklerinin bulunması ve dolayısıyla yerin yıldırım bulutuna bakan kısmında pozitif elektrik yüklerinin toplanması anlamına gelir. Yıldırım bulutlarının yerden 1-3 km (ortalama 2 km) yükseklikte olduğu göz önüne alınırsa ortaya çıkan elektriksel yapı, yaklaşık olarak bulutun bir düzlem elektrot, yerinse karşı düzlem elektrot olduğu yaklaşık 2 km elektrot açıklıklı düzgün alanlı düzlem-düzlem elektrot sistemidir (Şekil 1). Bu düzende, buluttan başlayan ve öncü boşalma adı verilen boşalma kanalları, 50-80 m'lik adımlarla yere doğru ilerler; potansiyel ve elektrik alan bakımından uygun olan yerlerle birleşerek (çarparak) toprağa varırlar. Bu olaydan hava taşıtları ve araçları, hem boşalma başlatıcı (tetikleyici) olarak hem de başlamış boşalmanın hedefi olarak etkilenir.



Şekil 1: Göz önüne alınan model.

Bu çalışmada bulut-yer arası bölgedeki uçaklara yıldırım çarpma olayı, düzgün alanda iletken nesne yaklaşımı ile uçağın normal uçuş, kalkış, iniş ve farklı hareket durumlarını ve konumlarını dikkate alarak, farklı yıldırım akımı ve gerilimi değerleri için sonlu elemanlar yöntemi adı verilen bir sayısal yöntemle elektrik alan ve potansiyel dağılımı hesabı yapılarak incelenmiştir. Literatürde de bir çok sayısal yöntemle yapılmış çalışma bulunmaktadır [2-6]. Hesaplarda uçak düzgün alanda yüksüz iletken nesne olarak alınmış, üzerindeki elektrik alan değerlerinin en büyük olduğu yerler, düzeyleri ve dış alanla değişimleri hesaplanmıştır. Hesaplar, uçağa yıldırım boşalmasının yaklaşması ve uçağın yıldırım boşalma kanalına yaklaşması durumları için yinelenmiştir. Böylelikle zamanda ve uzayda uçak üzerindeki maksimum alan değişimi çıkarılarak bir uçağın yıldırıma yaklaşması veya yıldırımın bir uçağa yaklaşması ve çarpması durumları değerlendirilmiştir.

2 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Bu çalışma kapsamındaki statik elektrik alan probleminin çözümü, Laplace denklemi olarak bilinen

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

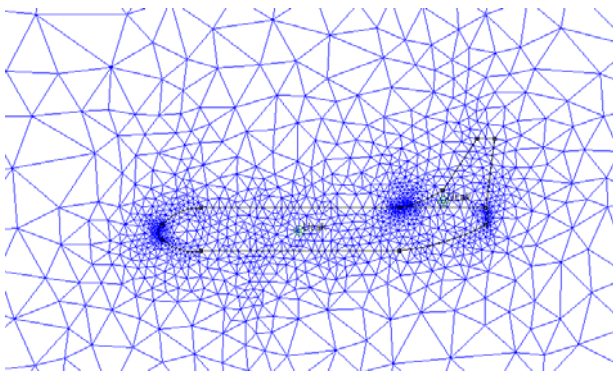
ikinci mertebeden bir homojen diferansiyel denklemin çözümünü gerektirir. Sonlu elemanlar yöntemi bu denklemi

$$W = z \iint \left\{ \frac{1}{2} \left[\epsilon_x \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \epsilon_y \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (5)$$

elektiriksel enerji denkleminin çözüm bölgesi içinde en küçük değere indirgenmesi (minimizasyon) ilkesi ile çözer. Çünkü bu yolla bulunan çözüm, Laplace denkleminin de aranan çözümüdür. Bu bağıntılarda $V = V(x, y, z)$ elektiriksel potansiyeldir.

Problem eksenel simetriye sahip değildir. Bu nedenle çözümde kartezyen koordinatlar kullanılabilir. Bunun için sözü edilen bölge sonlu elemanlara bölünür. Buna bölgenin ayrıklaştırılması denir. Bölmelemede, yani problemi sonlu elemanlara ayırmada genellikle üçgen elemanlar kullanılır (Şekil 2). Sonra sınır koşulları, bilinen potansiyeller ve malzeme özellikleri kullanılarak her bir eleman içinde geçerli olduğu kabul edilen birinci dereceden polinomsal yaklaşım işlevleri ile eleman denklemleri ve problemin birleşik (genel) denklemi elde edilir. Elde edilen denklem, matris olarak bol sıfırlı (seyrek), büyük boyutlu bir doğrusal denklem takımındır. Bu doğrusal denklem takımı yinelemeli bir sayısal çözüm yöntemi ile çözülerek üçgen elemanların köşe (düğüm) noktalarının potansiyelleri bulunur. Potansiyel değerlerine bağlı olarak eleman potansiyel yaklaşım işlevleri, herhangi bir noktadaki potansiyel ve elektrik alan değerleri bulunabilir [6-8].

Bu çalışmada elektrik alan verileri, ilkesi yukarıda özetlenen sonlu elemanlar yöntemine dayanan FEMM 4.0 paket programı kullanılarak hesaplanmıştır [9].

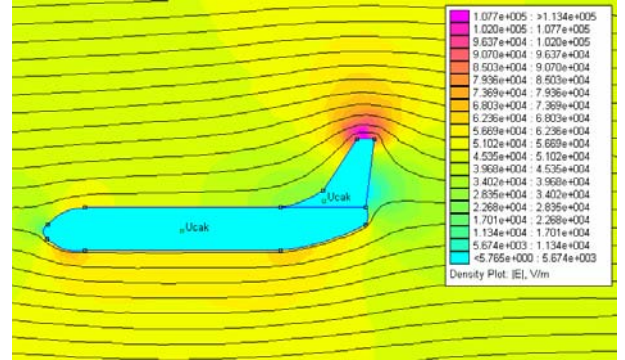


Şekil 2: Problemin çözümünde kullanılan bir sonlu elemanlar ağı örneği.

3 MODELLER

Burada amaç, bir uçağın yıldırıma, öncü boşalmasına ve yıldırım bulutuna göre konumuna bağlı olarak uçak üzerindeki maksimum alan şiddetlerinin değişimini

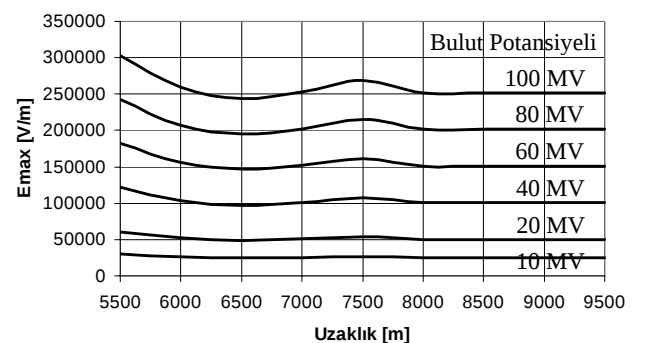
incelemektir. Şekil 3'te verilen bir hesap sonucu örneğinden de görüleceği gibi, uçak çevresindeki potansiyel dağılımını ve uçak üzerindeki elektrik alan şiddetinin yüksek olduğu yerleri görmek ve değerini bulmak olanaklıdır. Bu incelemenin, hem uçaktaki alan şiddeti bilgisinden yıldırıma olan yakınlık-uzaklık ilişkisini kestirmeye, hem de yıldırımın uçağa yönelme koşullarını belirlemeye yarayacağı düşünülmüştür.



Şekil 3: Bir uçağın normal uçuş konumunda elektrik alan ve potansiyel dağılımı.

3.1 Uçağın Yıldırıma Yaklaşması

Bu durumda, yaklaşık 10 km çaplı bir yıldırım bulutunun bir ucundan yıldırım bulutu altına girmiş bir uçağın, bulutun ortasından başladığı ve bulut ile yer arası yüksekliğin yarısına kadar ilerlemiş olduğu düşünülen bir yıldırım öncü boşalmasına yaklaşması durumunda uçak üzerinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetinin, yıldırım bulutu potansiyeline bağlı olarak yıldırıma yaklaştıkça değişimi incelenmiştir. Yıldırım bulutunun yere göre potansiyeli 10 MV'tan 100 MV'a kadar değiştirilmiştir (1 MV = 1.10^6 Volt). Bu potansiyel değerleri, hem yıldırım geriliminin hem de yıldırım akımının oluşan elektrik alanlarına etkisini görmek amacıyla, doğada en sık karşılaşılan değerlere uygun olarak alınmıştır. Bu duruma ilişkin inceleme sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir.

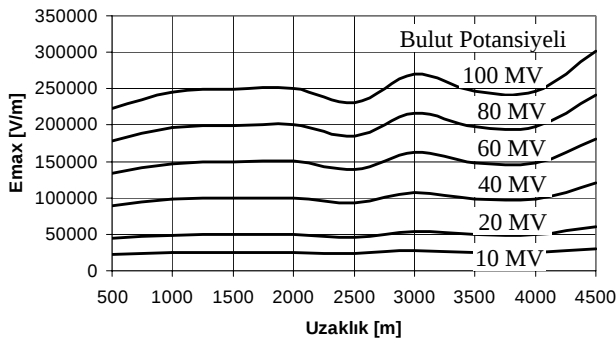


Şekil 4: Bir uçağın yıldırıma yaklaşması durumunda uçaktaki maksimum alan şiddetinin yıldırıma olan uzaklıkla değişimi. Şekil 4'ten görüldüğü gibi, uçak yıldırıma (öncü boşalmaya) yaklaştıkça üzerindeki maksimum alan şiddeti artmaktadır. Bu artış, aynı zamanda bulut potansiyeli ile yaklaşık olarak doğru orantılıdır. Uçağın yıldırımdan uzak olduğu bölgelerde öncü boşalmanın

uçak üzerindeki alana etkisi kaybolmakta sadece yıldırım bulutunun belirlediği elektrik alanı söz konusu olmaktadır. Yıldırım bulutu yükünün dolayısıyla potansiyelinin yüksek olduğu havalarda uçak üzerindeki alanın diğer zamanlardan yüksek olması, hem uçağın yıldırım tetiklemesi (başlatması) hem de yıldırımın yüksek elektrik alanlı yere yönelmesi bakımından önemlidir. Çünkü yüksek elektrik alanlı yerlerde başlayan elektriksel iyonizasyon yıldırıma karşı, yakalayıcı boşalmanın çıkışıyla yıldırım bu yere yönelmesini kolaylaştırır.

3.2 Uçağın Yıldırımdan Uzaklaşması

Bu durumda ise yine 10 km çapında bir yıldırım bulutu altına girmiş bir uçağın, bulutun ortasından başladığı ve bulut ile yer arası yüksekliğin yarısına kadar ilerlemiş olduğu düşünülen bir yıldırım öncü boşalmasından uzaklaşması durumunda uçak üzerinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetinin, yıldırım bulutu potansiyeline bağlı olarak yıldırımdan uzaklaştıkça değişimi incelenmiştir. Bu duruma ilişkin inceleme sonuçları Şekil 5'te gösterilmiştir.



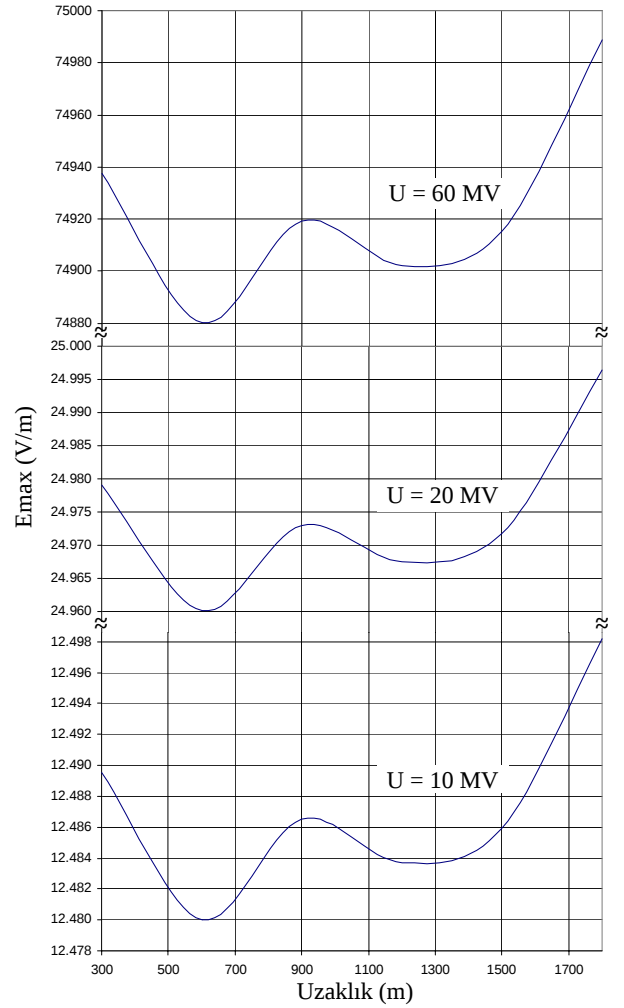
Şekil 5: Bir uçağın yıldırımdan uzaklaşması durumunda uçaktaki maksimum alan şiddetinin yıldırıma olan uzaklıkla değişimi.

Burada bir önceki uçağın yıldırıma yaklaşması durumunun tersine bir elektrik alan davranışı görülmektedir. Yani uçak yıldırım öncü boşalmasından uzaklaştıkça üzerindeki maksimum alan şiddeti hızla azalmakta ve yaklaşık 1 km uzaklaştıktan sonra uçakta yalnızca yüklü yıldırım bulutunun etkisinin yarattığı kadar bir elektrik alanı kalmaktadır. Bu durumda da yükselen bulut potansiyeli ile elektrik alan değerleri yükselmekte ancak uzaklıkla değişim davranışları aynı karakteri göstermektedir.

3.3 Uçağın Yıldırım Bulutuna Yaklaşması

Bu durumda, yine 10 km çaplı yıldırım bulutu altında ve orta bölgesindeki bir uçağın, yerden yüklü yıldırım bulutuna yaklaştıkça, uçak üzerinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetinin, yıldırım bulutu potansiyeline bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Bu incelemede yıldırım bulutunun yerden yüksekliği 2 km alınmıştır. Yerden 300 metre yükseklikten başlayarak buluta 200 m kalana kadar 100'er metrelik adımlarla, uçak üzerindeki maksimum elektrik alan şiddetleri hesaplanmıştır. Hesaplar, üç farklı bulut potansiyel değeri için

tekrarlanmış ve elde edilen hesap sonuçları, Şekil 6'da gösterilmiştir.



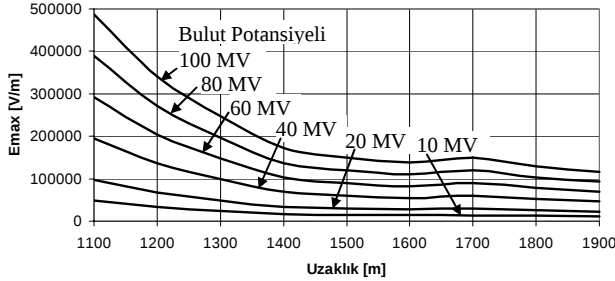
Şekil 6: Bir uçağın yüklü bir yıldırım bulutuna yaklaşması durumunda uçaktaki maksimum alan şiddetinin buluta olan uzaklıkla değişimi.

Şekil 6'dan uçağın yere ve özellikle yıldırım bulutuna yakın olduğu yüksekliklerde üzerindeki elektrik alan şiddetinin hızla yükseldiği, 600 m ile 1200 m arasındaki yüksekliklerde alanın uçağın hem yerden hem de yıldırım bulutundan uzakta kalması nedeniyle küçük kaldığı görülmektedir. Buna yıldırım etkisinin az olacağı bölge gibi bakabiliriz. Benzer davranışın farklı bulut potansiyelleri için de tekrarladığı ancak bulut potansiyeli yükseldikçe doğal olarak uçakta oluşan alan şiddetlerinin de yükseldiği görülmektedir. Yüklü bir buluta yaklaştıkça uçağa yıldırım çarpma riskinin hızla artacağı açıktır. Alan değişimleri, yıldırım bulutunun yüksekliği bilinmese bile buluta yaklaşıldığının ve riskin arttığının habercisi olarak veya yıldırımdan uzak bölgede uçmayı planlamak bakımından yararlı olabilir.

3.4 Yıldırımın Uçağa Yaklaşması

Bu durumda, yıldırım bulutu altındaki bir uçağa, bulutun ortasından başladığı ve 100 metrelik adımlarla uçağa doğru yaklaştığı düşünülen bir yıldırım öncü

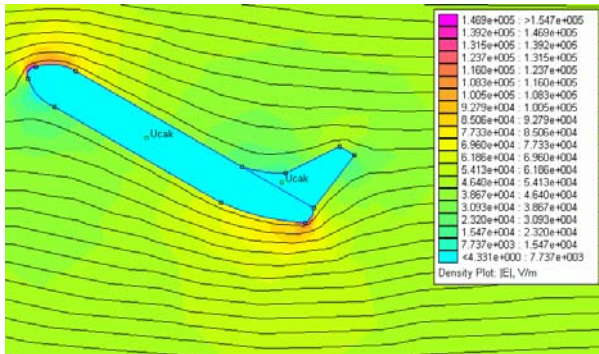
boşalmasının uçak üzerinde oluşturduğu maksimum elektrik alan şiddetinin, yıldırım bulutu potansiyeline bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Şekil 7'de elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Öncü boşalma uçağa yaklaştıkça ve daha yüksek potansiyelli bir buluttan kaynaklandıkça uçak üzerindeki alan şiddetleri de hızla yükselmektedir.



Şekil 7: Yıldırımın bir uçağa yaklaşması durumunda uçaktaki maksimum alan şiddetinin yıldırımın uçağa olan uzaklığıyla değişimi.

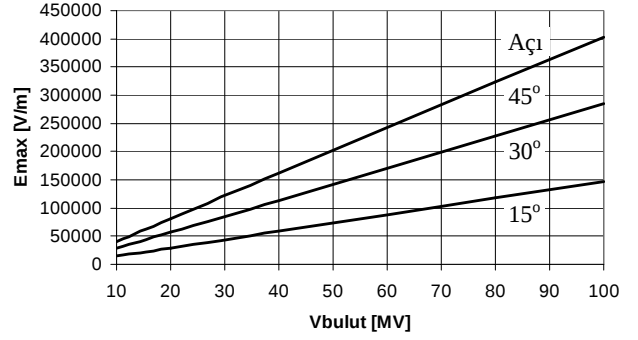
3.5 Yıldırımlı Havada Burnu Yukarıda Uçak

Bu durumda yıldırım bulutu altındaki bir uçağın, burnu farklı açılarda (yataya göre 15°, 30° ve 45° açılarda) yüklü yıldırım bulutuna dönük iken uçak üzerinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetinin, yıldırım bulutu potansiyeline bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Şekil 8'de böyle bir durum için sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen uçak çevresinde potansiyel ve elektrik alan dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 8: Bir uçağın 30° açıyla yükseliş konumunda elektrik alan ve potansiyel dağılımı.

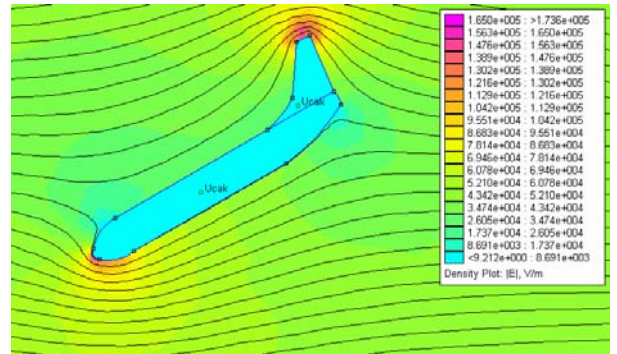
Şekil 9'da ise üç farklı açı için bulut potansiyeli ile uçak üzerindeki maksimum alan şiddetinin değişimleri verilmiştir. Burun yukarı kalktıkça, özellikle uçak burnu üzerindeki elektrik alan şiddeti de doğrusal olarak yükselmektedir. Bunun uçağın pistten kalkışı veya normal uçuşu sırasında hareketlerini yıldırıma hedef olmadan gerçekleştirmesi bakımından önemi vardır.



Şekil 9: Yıldırımlı havada burnu yukarıda uçak için burnun yatayla yaptığı açığa bağlı olarak uçaktaki maksimum alan şiddetinin bulut potansiyeli ile değişimi.

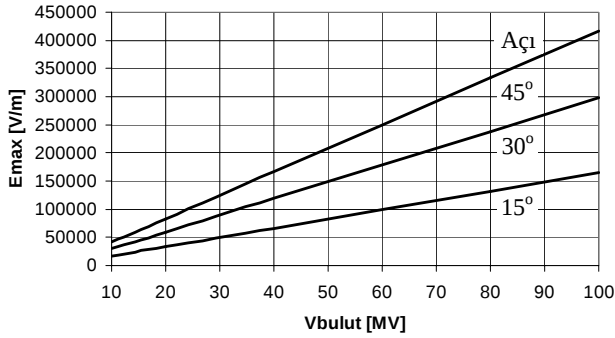
3.6 Yıldırımlı Havada Burnu Aşağıda Uçak

Bu durumda yıldırım bulutu altındaki bir uçağın, burnu farklı açılarda (yataya göre 15°, 30° ve 45° açılarda) yüklü yıldırım bulutuna dönük iken uçak üzerinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetinin, yıldırım bulutu potansiyeline bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Şekil 10'da böyle bir durum için sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen uçak çevresinde potansiyel ve elektrik alan dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 10: Bir uçağın 30° açıyla yere yönelik konumunda elektrik alan ve potansiyel dağılımı.

Şekil 11'de ise üç farklı açı için bulut potansiyeli ile uçak üzerindeki maksimum alan şiddetinin değişimleri verilmiştir. Bir önceki duruma benzer olarak uçak burnu aşağıya yöneldikçe, bu defa da burun aşağıda ama uçak kuyruğu yukarıda kaldığı için, kuyruk üzerindeki elektrik alan şiddeti, artan bulut potansiyeli ve artan açıyla doğrusal olarak yükselmektedir. Bunun da uçağın pistte inişi veya normal uçuşu sırasında hareketlerini yıldırıma hedef olmadan gerçekleştirmesi bakımından önemi vardır. Uçağın eğrilik yarıçapı küçük olan yerlerinde elektrik alanı yüksek olur. Bu yerleri öne çıkaracak uçak konumlarından olabildiğince sakınmak yıldırımla olan etkileşimi azaltacağı açıktır.



Şekil 11: Yıldırımlı havada burnu aşağıda uçak için burnun yatayla yaptığı açıya bağlı olarak uçaktaki maksimum alan şiddetinin bulut potansiyeli ile değişimi.

Buraya kadar belirtilen modeller, bir sonlu elemanlar programında modellenmiştir. Modellerde yer (potansiyeli sıfır olan) topraklı bir düzlem elektrotla, bulut ise sözü edilen potansiyel değerleri uygulanan diğer bir düzlem elektrotla modellenmiştir. İki elektrot arası 2 km, ortam ise bağlı dielektrik sabiti 1 olan hava olarak alınmıştır. Uçak modeli olarak hava taşımacılığında çok kullanılan modellerden olan A340-300 tipi bir uçağın gerçek boyutları ve geometrisi kullanılmıştır.

Tablo 1: A340-300 tipi uçağın boyutları

Gövde Uzunluğu	63,689 m
Gövde Çapı	5,640 m
Yerden Yüksekliği	16,990 m
Kanat Açıklığı	60,304 m

Bu tip uçakların yaklaşık gövde çapı 6 m olduğu için çözümde problem derinliği 3 m alınmıştır. Böylelikle uçak ekseninden geçen kesit düzlemi üzerinde incelemeler yapılmıştır. Sonlu elemanlar sayısal çözümlemesindeki hata 10^{-16} ile sınırlandırılmıştır. Her çözümlemede ortalama 20000 elemanlı ağların çözümü yapılmıştır.

4 DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Uçağın hareket halinde iken yıldırımın durduğu ve uçağın yıldırıma yaklaştığı veya uzaklaştığı durumlarda elektrik alan incelemeleri, uzayda uçak-yıldırım ilişkisini ortaya koymuştur. Diğer yaklaşımda, uçağın konumunun sabit, yıldırımın uçağa yaklaşması durumu da zamanda uçak-yıldırım ilişkisini vermiştir. Her iki incelemede elde edilen uçaktaki elektrik alan değişimlerinin, bir uçağa yıldırım çarpma durumu hakkında bilgi verebilecek özellikte olduğu görülmüştür. Bu durum uçakları yıldırımdan korumak bakımından önemlidir.

Kanatlar, kuyruk ve burun gibi bir uçağın eğrilik yarıçapı küçük yerlerinde elektrik alan şiddetlerinin büyük değerlere ulaştığı, yıldırımı yönlendirme ve çarpma bakımından etkili olduğu, uçağın uçuş konumuna göre alan ve çarpma koşullarının değiştiği görülmüştür.

Elde edilen elektrik alan bilgisinden bir uçağın yıldırım tehlikesi bakımından konum, yön ve doğrultusunu güvenli olacak şekilde belirlenebileceği düşünülmektedir. Buradaki zorluk gerek yıldırımın gerekse uçağın yüksek hızla hareket etmeleridir. Bu hızlarda değişen durumlarda alanın ölçülmesi, ölçülen alana göre uçak hareketinin belirlenmesi hem bilgisayar destekli donanımları hem de yapay sinir ağı, bulanık mantık gibi algoritmik yöntemlerin kullanılmasını gerektirebilir.

İncelemeler bulut-yer arası yıldırımların etkisini incelemekle sınırlı tutulmuş, bulut içi, bulutlar arası ve bulut üstü yıldırımlar ayrı bir çalışma konusu olarak bırakılmıştır. Ayrıca uçağın kanat hareketlerini de dikkate alan çalışmalar yapılabilir.

5 KAYNAKLAR

- [1] Özkaya, M., Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Birsan Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [2] Naidu, M. S., Kamaraju, V., High Voltage Engineering, Tata McGraw Hill, New Delhi, 1997.
- [3] He, T., Sherman, B. D., Nozari, B., Rudolph, T., "Time Domain Finite Difference Validation for Transport Aircraft Lightning Induced Effect Studies", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 14-18 Aug. 1995, pp. 359 –364.
- [4] Ballas, G., Balanis, C. A., "Modeling of Lightning Effects on Simple Structures and Helicopter Airframes Using FDTD", IEEE International Symposium, Antennas and Propagation Society, Vol. 1, 11-16 July 1999, pp. 598 – 601.
- [5] Hoole, P. R. P., Hoole, S. R. H., "Simulation of Lightning Attachment to Open Ground, Tall Towers and Aircraft", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993, pp. 732 –740.
- [6] Perala, R. A., Rudolph, T. H., McKenna, P. M., Jones, C., "Application of Numerical Analysis to the Electromagnetic Effects Validation of Aircraft", 12th DASC Digital Avionics Systems Conference, AIAA/IEEE, pp. 185 –190, 25-28 Oct. 1993.
- [7] D'Amore, M., Sabrina Sarto, M., "Time-Domain Analysis of Lightning Interaction to Aeronautical Structures Composite Materials", IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 18-22 Aug. 1997, pp. 397 –402.
- [8] Jin, J., The Finite Element Method in Electromagnetics, Wiley, New York, 1993.
- [9] Zhou, P. B., Numerical Analysis of Electromagnetic Fields, Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [10] Kalenderli, Ö., Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ders Notları, İ.T.Ü., 1997.
- [11] Meeker, D., FEMM 4.0 Finite Element Method Magnetics Software, June 2004.