



YILDIRIM DARBELERİNİN SİLAHLI İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI (SİHA) ÜZERİNDEKİ DOLAYLI ETKİLERİNİN ANALİZİ

Muhammet Hilmi NİŞANCI*, Ahmet Yahya TEŞNELİ, Nigar Berna TEŞNELİ

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Serdivan Sakarya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Yıldırım darbesi,
SİHA,
Dolaylı etkiler,
Elektromanyetik alanlar,
Yıldırım akım yolu.

Öz

Yıldırımın elektronik sistemler üzerindeki dolaylı etkilerini ortadan kaldırmak ya da en aza indirmek için başta hava olmak üzere kara ve deniz taşıtlarının tasarımlarında yıldırım darbe riskleri göz önüne alınmaktadır. Bu çalışmada yıldırım darbelerinin askeri alanda kullanımları yaygınlaşan silahlı insansız hava araçları (SİHA) üzerindeki dolaylı etkileri incelenmiştir. Tipik bir SİHA üç boyutlu olarak modellenmiş ve bilgisayar tabanlı benzetimler ile nümerik olarak analiz edilmiştir. Yıldırım darbesi SİHA'da bulunan farklı yakalama çubuklarına ayrı ayrı uygulanarak oluşturduğu geri dönüş darbe akımı elde edilmiştir. Geri dönüş darbe akımının sebep olduğu elektromanyetik (EM) alan şiddeti ve yüzey akım dağılımları bulunarak elektriksel sürekliliğe sahip olması gereken yıldırım akım yolları belirlenmiştir. Ayrıca PEC, alüminyum ve karbon fiber takviyeli kompozit ile kaplanmış SİHA'lar için geri dönüş darbe akımları karşılaştırılmıştır.

ANALYSIS OF THE INDIRECT EFFECTS OF LIGHTNING STRIKES ON THE ARMED UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVs)

Keywords

Lightning strike,
Armed UAV,
Indirect effects,
Electromagnetic fields,
Lightning current path.

Abstract

The risks of lightning strike take into account in the design of all vehicles on land, sea and especially air, in order to eliminate or to minimize the indirect effects of lightning on the electronic systems. In this study, the indirect effects of lightning strikes on the armed unmanned aerial vehicles (UAVs), which are widely used in military fields, have been examined. A typical armed UAV is modelled in three-dimensions and numerically analysed with computer-based simulations. The return stroke currents generated by separately applying the lightning strike to the different lightning rods on the armed UAV were obtained. Lightning current paths that should have electrical continuity were determined by computing the electromagnetic (EM) field intensity and surface current distributions caused by the return stroke current. In addition, return stroke currents are compared for PEC, aluminium and carbon fiber reinforced composite coated armed UAVs.

Alıntı / Cite

Nişancı M. H., Teşneli A. Y., Teşneli N. B. (2018). Analysis Of The Indirect Effects Of Lightning Strikes On The Armed Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(3), 390-395.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Hilmi NİŞANCI / 0000-0002-8210-7260
A. Yahya TEŞNELİ / 0000-0003-0534-5473
N. Berna TEŞNELİ / 0000-0002-1649-934X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	10.06.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.07.2018
Kabul Tarihi / Accepted Date	03.07.2018
Yayın Tarihi / Published Date	11.09.2018

* İlgili yazar / Corresponding author: nisananci@sakarya.edu.tr, +90-264-295-5813

1. Giriş

Hava yolu şirketlerinin tarifeli seferlerinde uçaklara yıldırım isabet etme olasılığını ortalama 10000 uçuş saatinde bir olarak ortaya koyan istatistikler sahip oldukları iklim koşulları nedeniyle yıldırım düşme olaylarının daha sık görüldüğü bölgelere yapılan uçuşlarda bu olasılığın 1000 uçuş saatinde bire yükseldiğini göstermektedirler (İnce, 2003). Yıldırım darbelerinin uçaklar üzerindeki etkileri doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki şekilde incelenebilir. Doğrudan etkiler uçakların yüzeylerinde ısınma, erime, delinme gibi yapısal hasarlara yol açarken dolaylı etkiler ise uçak elektronik kontrol sistemlerinin kısmen veya tamamen işlevsiz kalmasına yol açmakta ve uçuş güvenliğini tehlikeye sokmaktadır (Apr'a vd., 2008; Avrootskij vd.,1991; Beniguel, 1985; Huang vd., 2017; Meyer vd., 2008; Nahai vd., 2001). Uçuş güvenliğini sağlamak amacıyla yıldırımın doğrudan ve dolaylı etkileri tasarım ve geliştirme süreçlerinde göz önüne alınmaktadır. Literatürde uçakların tasarım ve geliştirme süreçleriyle ilişkili olarak yıldırımın dolaylı etkilerini nümerik yöntemlerle araştıran çalışmalar mevcuttur (Fisher vd., 2016; Gameraota vd.,2012; Gutiérrez vd., 2011; Hu vd., 2013; Huang vd. 2017; Rakov, 2012). Günümüzde farklı nümerik yöntemler içeren simülasyon programları sayesinde standartlara uygun olarak tanımlanan yıldırım akım kaynağı üç boyutlu (3D) uçak modellerine uygulanarak yıldırımın etkilediği bölgeler belirlenmekte ve önleyici tedbirler ile yıldırımın dolaylı etkileri minimize edilmektedir.

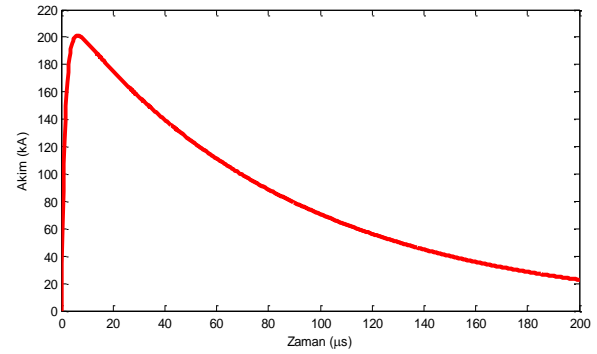
Askeri alanlarda silahlı insansız hava araçlarının (SİHA) kullanımları can kaybı riski bulundurmaması, mürettebatsız olarak tekrar tekrar uçabilmesi, sınırlı insan kabiliyetlerine (yorgunluk, çalışma saati, yer çekimi kuvveti vb.) bağlı olmaması, düşük yakıt ve uçuş maliyeti sağlaması gibi avantajları sebebiyle her geçen gün yeni fonksiyon ve teknolojiler ilave edilerek hızla artmaktadır. Literatürde yıldırımın uçak ve gemilerin elektronik sistemleri üzerindeki dolaylı etkilerinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Kullanımları her geçen gün yaygınlaşan SİHA'lar uçaklara göre farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak yıldırım darbelerinin bir SİHA üzerindeki dolaylı etkileri bilgisayar tabanlı benzetim modeli kullanılarak analiz edilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Hava taşıtlarının tasarım, imalat ve modifiyelerinde yıldırım akımlarının elektrik ve elektronik sistemler üzerindeki etkilerinin göz önüne alınması için MIL-STD-464, DO160, SAE-ARP 5412B ve SAE-ARP 5416A standartları geliştirilmiştir (MIL-STD-464C, 2010; ARP-5412B, 2013; ARP-5416A, 2013). MIL-STD-464, DO160 standardına göre, tipik bir yıldırım darbe akımının zamana bağlı matematiksel ifadesi Eşitlik 1'de verilmiştir.

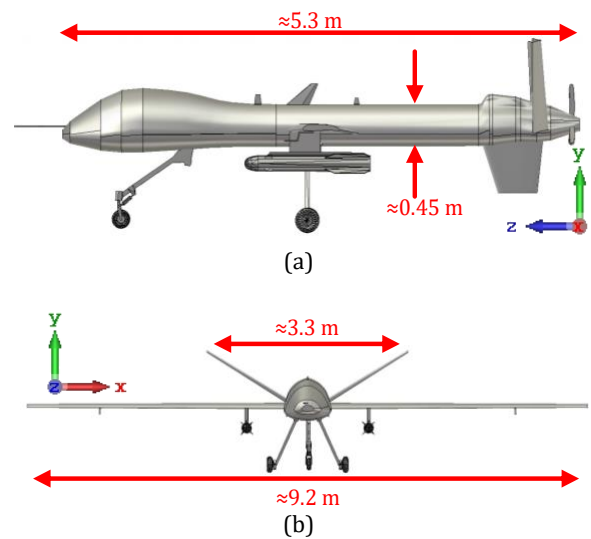
$$i(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

Burada I_0 akımın tepe değeri, α ön zayıflatma katsayısı ve β kuyruk zayıflatma katsayısıdır. Eşitlik 1'de zayıflama ve yükselme süreleri sırası ile 88 μ s ($\alpha = 11.354$) ve 1.55 μ s ($\beta = 647.265$) seçildiğinde 200 kA tepe değerine sahip tipik bir yıldırım darbe akımının dalga şekli Şekil 1'de gösterildiği gibi elde edilmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde nadiren 500 kA'e kadar yüksek akımlar rapor edilmekle birlikte genellikle yıldırım darbe akımı için 200 kA tepe değerinin maksimum akım değeri olarak kullanıldığı görülmektedir (Fisher vd., 2016; Gameraota vd., 2012; Heidler vd., 2008; Larsson vd., 2000).



Şekil 1. Zamana bağlı yıldırım darbe akımı

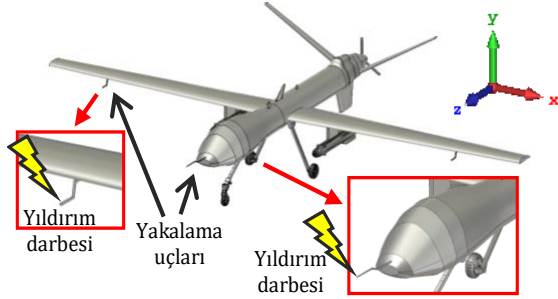
Yıldırım darbe akımının SİHA'lar üzerindeki dolaylı etkilerinin araştırılması için Şekil 2'de modeli verilen yaklaşık 5.3 m gövde uzunluğuna, 0.45 m gövde çapına ve 9.2 m kanat açıklığına sahip tipik bir muharip/keşif maksatlı SİHA Computer Simulation Technology (CST) paket programı kullanılarak üç boyutlu tasarlanmıştır (CST, 2018).



Şekil 2. SİHA modelinin fiziksel boyutları (a) yan görünüş (b) ön görünüş

Uçağın yıldırıma maruz kalabilecek hassas bölgelerinin ayrı ayrı incelenmesi için, tasarımlarda yıldırımın sadece SİHA'nın uç kısmında bulunan

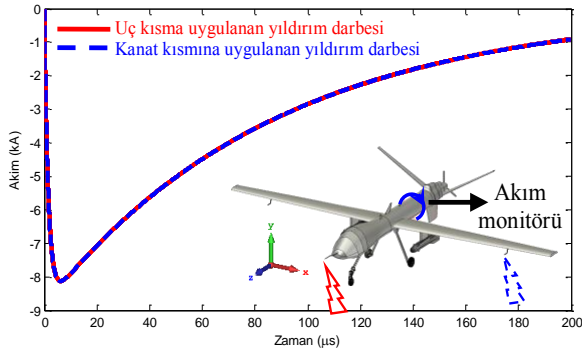
yakalama çubuğuna değil, kanatlar üzerinde bulunan yakalama çubuklarına da düşme ihtimali göz önüne alınmıştır. Bu amaçla Şekil 3'te gösterildiği gibi yıldırım darbesi SİHA'nın hem uç hem de kanatlar üzerinde bulunan yakalama çubuklarına ayrı ayrı uygulanmıştır.



Şekil 3. Yıldırım darbe akımının SİHA modeline uygulanma noktaları

Hesaplama zamanının azaltılması için, benzetim sonuçları üzerinde çok az etkisi olan küçük boşluklar ve vida gibi ince yapılar tasarımlarda dikkate alınmayıp sadece ana yapılar modellenmiştir. Ayrıca bilgisayar tabanlı benzetimlerde çalışma frekansı mesh sayısını dolayısı ile hesaplama süresini etkilediği için frekans aralığı 0-50 MHz olarak seçilmiştir. Seçilen frekans aralığı SAE-ARP 5412B standardının yıldırım sebebiyle etki testlerinde kullanılan 0 ile 10 MHz frekans aralığını da kapsamaktadır (ARP-5412B, 2013). Tasarımları yapılan SİHA'nın 0-50 MHz frekans aralığı için benzetim modeli yaklaşık olarak 229000 mesh içermektedir.

Bilindiği gibi darbe akımı yıldırımın neden olduğu termal ve mekanik hasarların ana kaynağıdır. Darbe akımının zamanla yüksek oranda değişmesi (di/dt) endüktif empedanslı elektronik sistemlerde yüksek voltaj düşümlerine ($v = L \cdot di/dt$) yol açmakta ve uçağın elektronik sistemlerine zarar verebilecek şiddetli EM alanlar üretebilmektedir. Bu nedenle çalışmanın ilk aşamasında yıldırım darbesi sonucu oluşan geri dönüş darbe akımı etkisi araştırılmıştır.

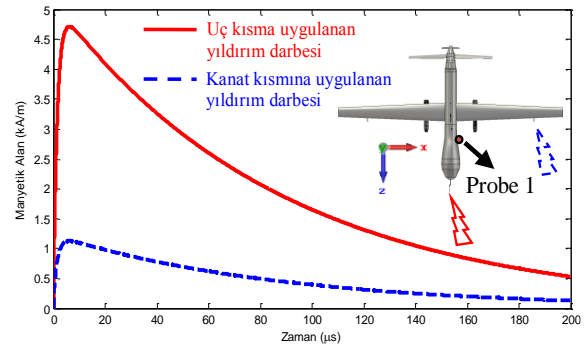


Şekil 4. Yıldırım darbesi sonucu oluşan geri dönüş darbe akımı

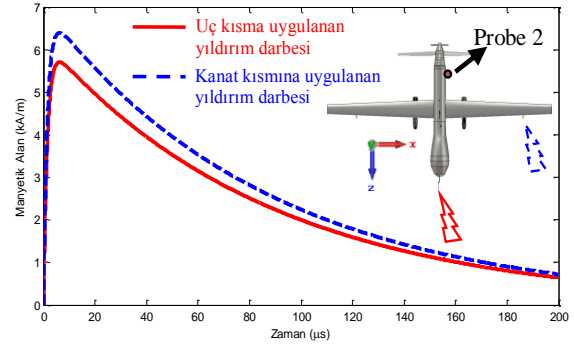
SİHA modelinin kanatları ile kuyruk kısmı arasında akım monitörü konumlandırılarak yıldırım darbesinin farklı yakalama çubuklarına düşmesi durumunda gövde yüzeyi boyunca oluşan akım değerleri 0-200 µs

zaman aralığı için Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekil 4'te verilen karşılaştırmadan yıldırım darbesinin farklı konumlara uygulanması durumunda geri dönüş darbe akımının değişmediği ve 8.127 kA tepe değerine sahip olduğu görülmektedir.

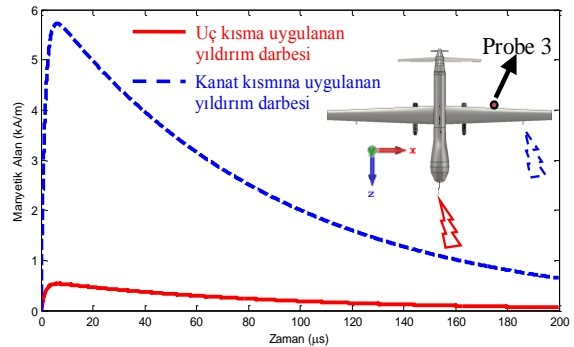
Çalışmanın ikinci aşamasında bilgisayar tabanlı benzetimler ile yıldırım darbesinin konumuna bağlı olarak SİHA yüzeyinde oluşan yüzey akımından kaynaklanan EM alanlar belirlenmiştir. Kontrol panel bölgesi, kuyruk bölgesi ve kanat bölgesi olmak üzere SİHA üzerindeki üç farklı noktada zamana bağlı manyetik alan şiddetleri elde edilmiş ve Şekil 5'de karşılaştırılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. Yıldırım darbesi sonucu (a) kontrol panel bölgesinde, (b) kuyruk bölgesinde ve (c) kanat bölgesinde oluşan zamana bağlı manyetik alan şiddetleri

Yıldırım darbesinin SİHA'nın uç kısmında bulunan yakalama çubuğuna düşmesi durumunda kontrol panel bölgesinde, kuyruk bölgesinde ve kanat bölgesinde oluşan maksimum manyetik alan şiddetleri sırası ile 4.71 kA/m, 5.70 kA/m ve 0.53

kA/m iken darbenin kanatlar üzerinde bulunan yakalama çubuğuna düşmesi durumunda aynı bölgelerde oluşan maksimum manyetik alan şiddetlerinin sırasıyla 1.26 kA/m, 6.39 kA/m ve 5.72 kA/m olduğu Şekil 5’de görülmektedir. Elde edilen manyetik alan şiddetleri Tablo 1’de listelenmiştir.

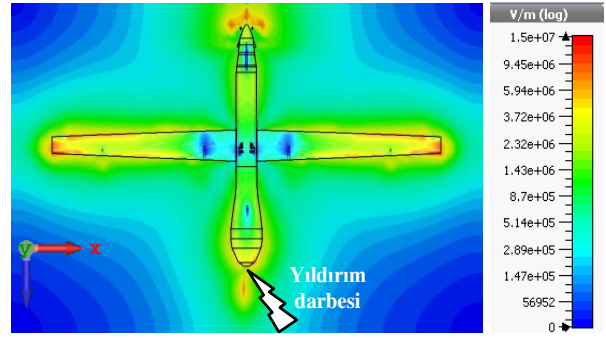
Tablo 1. Yıldırım darbesi sonucu oluşan maksimum manyetik alan şiddetleri

Yıldırım darbesi uygulama noktası	Probe konumu	Maksimum manyetik alan şiddeti
Uç kısımda bulunan yakalama çubuğu	kontrol panel bölgesi	4.71 kA/m
	kuyruk bölgesi	5.70 kA/m
	kanat bölgesi	0.53 kA/m
Kanat kısımda bulunan yakalama çubuğu	kontrol panel bölgesi	1.26 kA/m
	kuyruk bölgesi	6.39 kA/m
	kanat bölgesi	5.72 kA/m

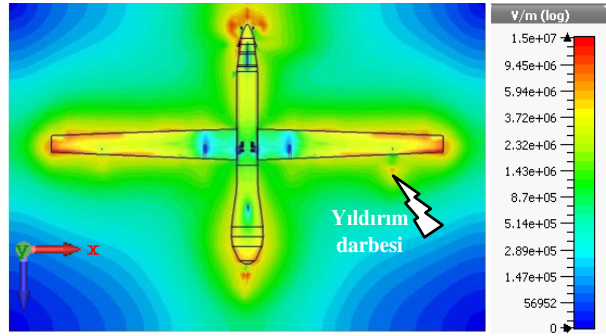
Tablo 1 incelendiğinde SİHA’nın uç kısmına düşen yıldırım darbesinin kontrol panel bölgesinde indüklediği manyetik alan şiddetinin kanatlar üzerinde bulunan yakalama çubuğuna düşmesi durumunda indüklenen manyetik alan şiddetinden daha fazla olduğu görülmektedir. Benzer şekilde SİHA’nın kanat kısmına düşen yıldırım darbesinin kanat bölgesinde indüklediği manyetik alan şiddetinin SİHA’nın uç kısmında bulunan yakalama çubuğuna düşmesi durumunda indüklenen manyetik alan şiddetinden daha fazla olduğu görülmektedir.

Elde edilen EM alan şiddeti sonuçlarının daha iyi irdelenmesi amacıyla çalışmanın üçüncü aşamasında, Şekil 1’de verilen zamana bağlı yıldırım darbe akımı SİHA’nın hem uç kısmında hem de kanatlar üzerinde bulunan yakalama çubuklarına ayrı ayrı uygulanarak EM alan şiddeti ve yüzey akımı dağılımları 6.4 µs anı için analiz edilmiştir. Seçilen 6.4 µs anı Şekil 1’den açıkça görülebileceği gibi yıldırım darbe akımının maksimuma ulaştığı zaman değeridir.

SİHA üzerinde xz düzleminde oluşan elektrik ve manyetik alan şiddeti dağılımları sırası ile Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 6’dan elektrik alan şiddeti dağılımının her iki durumda da benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Bunun nedeni elektrik alan şiddeti dağılımında kanat uçları, iniş takımları ve rotorlar gibi daha küçük eğrilik yarıçapına sahip kısımlarda uç etkisi nedeni ile daha güçlü bir elektrik alan şiddeti oluşmasıdır. Dolayısı ile farklı noktalardan uygulanan yıldırım darbesi SİHA’nın fiziksel şeklinden dolayı benzer elektrik alan şiddeti dağılımı sonuçları vermektedir.

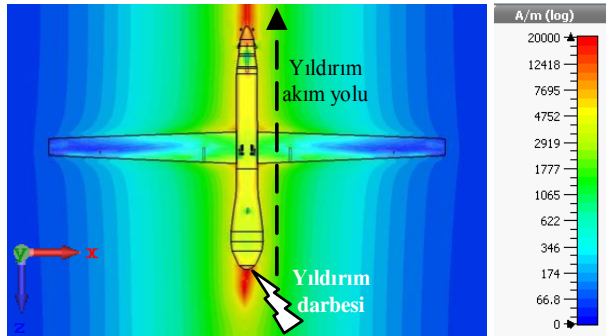


(a)

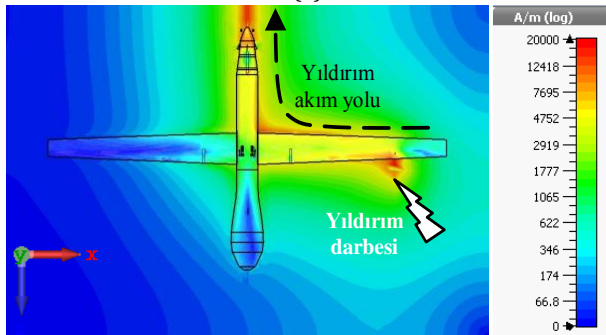


(b)

Şekil 6. Yıldırım darbe akımı SİHA’nın (a) uç kısmındaki yakalama çubuğuna (b) kanatlarında bulunan yakalama çubuğuna uygulandığında xz düzleminde oluşan elektrik alan şiddeti dağılımları



(a)



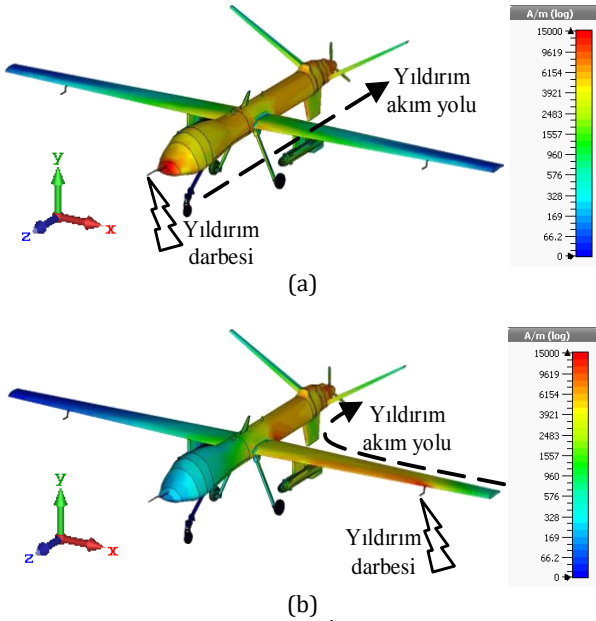
(b)

Şekil 7. Yıldırım darbe akımı SİHA’nın (a) uç kısmındaki yakalama çubuğuna (b) kanatlarında bulunan yakalama çubuğuna uygulandığında xz düzleminde oluşan manyetik alan şiddeti dağılımları

Yıldırım boşalmasının yıldırım darbesinin SİHA’ya isabet ettiği ark noktasından başlayıp aracın arkasına doğru devam eden bir yıldırım akım yolu oluşturduğu Şekil 7’de görülmektedir. Oluşan yıldırım akım yolu

SİHA'nın geometrisine, gövde yapısında kullanılan malzemenin türüne ve yakalama uçlarının konumuna bağlı olarak değişmekte ve her SİHA modeli için farklılık göstermektedir.

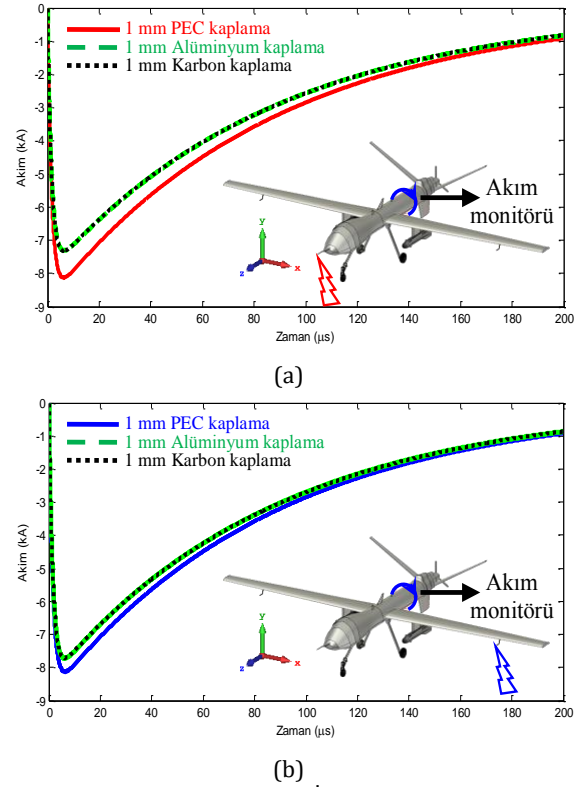
Yıldırım darbesinin büyük oranda etkilediği bölgelerin belirlenmesi için SİHA'nın yüzeyinde oluşan akım dağılımları her iki durum için de incelenmiştir. Şekil 8'den akım dağılımlarının manyetik alan şiddeti dağılımlarına benzer olarak yıldırım akım yolu boyunca aktığı görülmektedir. Ayrıca hem manyetik alan şiddeti hem de akım dağılımlarının yıldırım akım yolu yakınında daha güçlü olması nedeniyle yıldırım girişi ve çıkışı bölümlerinde ve yıldırım akım yollarında elektriksel sürekliliğinin sağlanması gerekmektedir. Bu sayede yıldırım akımı SİHA'nın dış gövde yüzeyinden akararak SİHA'nın içindeki sistemlere zarar vermeden SİHA'yı terk edebilecektir (İnce, 2003; Odam vd., 1991; Rakov vd. 2003).



Şekil 8. Yıldırım darbe akımı SİHA'nın (a) uç kısmındaki yakalama çubuğuna (b) kanatlarında bulunan yakalama çubuğuna uygulandığında oluşan yüzey akım dağılımları

Buraya kadar yapılan analizlerde kullanılan SİHA modelinin gövde malzemesi mükemmel elektriksel iletken (PEC) olarak seçilmiştir. SİHA yüzeyinde kullanılan kaplama malzemesi türünün yıldırım darbesi sonucu oluşan geri dönüş darbe akımı üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla benzetimlerde kullanılan SİHA modelinin yüzeyi 1 mm kalınlığında alüminyum ve karbon fiber takviyeli kompozit malzeme ile ayrı ayrı kaplanmıştır. Kaplamalarda kullanılan alüminyum ve kompozit yapının iletkenlikleri sırası ile 3.77×10^7 S/m ve 7.3×10^4 S/m olarak alınmıştır (Apr'a vd. 2001; Fisher vd., 2016; Jazzar vd. 2014; Meyer, 2008). Yıldırım darbesi sonucu farklı kaplama malzemeleri için SİHA yüzeyinde oluşan zamana bağlı geri dönüş darbe akım değerleri kanatlar ile kuyruk kısmına konumlandırılan akım monitörü ile elde edilmiş ve yıldırım darbesinin konumuna bağlı olarak Şekil 9'da

karşılaştırılmıştır. Yıldırım darbesinin SİHA'nın uç kısmında bulunan yakalama çubuğuna düşmesi durumunda PEC, alüminyum ve karbon fiber takviyeli kompozit kaplamalar için geri dönüş darbe akımının tepe değeri sırasıyla 8.127 kA, 7.309 kA ve 7.318 kA olarak elde edilirken darbenin kanatlar üzerinde bulunan yakalama çubuğuna düşmesi durumunda ise 8.127 kA, 7.719 kA ve 7.711 kA olarak bulunmuştur. Kaplama malzemesi olarak PEC'den başka bir malzeme seçilmesi durumunda SİHA yüzeyinde oluşan geri dönüş darbe akımı tepe değerinin her iki yıldırım darbesi konumu için de azaldığı görülmektedir.



Şekil 9. Yıldırım darbe akımı SİHA'nın (a) uç kısmındaki yakalama çubuğuna (b) kanatlarında bulunan yakalama çubuğuna uygulandığında farklı kaplama malzemeleri için SİHA yüzeyinde oluşan zamana bağlı geri dönüş darbe akımları

3. Sonuç ve Tartışma

Yıldırım darbelerinden kaynaklanan yapısal hasarları önlemek için yıldırım akım yollarında elektriksel sürekliliğinin sağlanması gerektiği bilinmektedir. Bu çalışmada tipik bir SİHA üç boyutlu olarak modellenmiş ve bilgisayar tabanlı benzetimler ile yıldırım akım yolları belirlenmiştir. Yıldırım akım yollarının belirlenmesi için SİHA üzerindeki farklı yakalama uçlarına yıldırım darbe akımları uygulanmıştır. Yıldırım darbesinin SİHA'nın uç kısmında ve kanatlar üzerinde bulunan yakalama çubuklarına düşmesi durumunda oluşan geri dönüş darbe akımları belirlenerek oluşturdukları EM alan şiddetleri SİHA gövdesi üzerindeki farklı noktalar için ayrı ayrı elde edilmiştir. Yıldırım darbe akımının

maksimuma ulaştığı zaman değeri için alan şiddeti ve yüzey akımı dağılımları elde edilerek yıldırım akım yolları gösterilmiş ve ulaşılan sonuçların birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca SİHA gövdesinin PEC yerine alüminyum ve karbon fiber takviyeli kompozit malzeme ile kaplanması durumunda geri dönüş darbe akımı değişimleri karşılaştırılmıştır. Geri dönüş darbe akımının PEC için daha yüksek olduğu ve alüminyum ile kompozit malzemenin birbirine yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

- Apr`a, M., D'Amore, M., Sarto, M. S., Volpi, V., 2001. Prediction of Indirect Lightning Effects on a Metallic-Composite Aircraft. AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit., 1-7.
- Apr`a, M., D'Amore, M., Gigliotti, K., Sarto, M. S., Volpi, V., 2008. Lightning Indirect Effect Certification of a Transport Aircraft by Numerical Simulation. IEEE, Transactions on Electromagnetic Compatibility, 50 (3), 513-523.
- ARP-5416A, 2013. Aircraft Lightning Test Methods, SAE Aerospace Recommended Practice.
- ARP-5412B, 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms, SAE Aerospace Recommended Practice.
- Avrootskij, V.A., Bizaev, A.S., Borisov, R.K., Levitova, L.V., Prokhorov, E.N., Sergievskaya, I.M., 1991. Investigation of Hazardous Factors of Lightning and Development of Lightning Protection Systems for Aircrafts. International Symposium on High Voltage Engineering, 77-79.
- Beniguel, Y., 1985. Induced Current Surface Density After a Direct Lightning Strike on an Aircraft. International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, 25-28.
- CST, 2018. Computer Simulation Technology, CST Studio Suite, User Guide, available at www.cst.com.
- Fisher, J., Hoole, P.R., Pirapaharan K., Hoole S.R.H., 2016. Parameters of Cloud to Cloud and Intra-cloud Lightning Strikes to CFC and Metallic Aircraft Structures. International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering University Politechnica of Bucharest,1-6.
- Gamerota, W. R., Elisme, J. O., Uman, M. A., Rakov, V. A., 2012. Current Waveforms for Lightning Simulations. IEEE, Transactions on Electromagnetic Compatibility, 54 (4), 880-888.
- Gutiérrez, G. G., Gil, E. P., Gómez, D. G., Gómez, J. I. P., 2011. Finite-Difference Time-Domain Method applied to Lightning Simulation and Aircraft Certification Process. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 750-755.
- Heidler, F., Flisowski, Z., Zischank, W., Bouquegneau C., Mazzetti, C., 2008. Parameters of Lightning Current Given in IEC 62305-Background, Experience and Outlook. International Conference on Lightning Protection, 1-22.
- Hu, T., Yan, H., Wang, X.C., Yu, Q., 2013. Helicopter Lightning Protection. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 33 (4), 775-778.
- Huang, L., Gao, C., Guo, F., Sun C., 2017. Lightning Indirect Effects on Helicopter: Numerical Simulation and Experiment Validation. IEEE, Transactions on Electromagnetic Compatibility, 59 (4), 1171 – 1179.
- İnce, S., 2003. Yıldırımın Uçaklara Etkileri ve Korunma Yöntemleri. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Jazzar, A., Clavel, E., Meunier, G., Vialardi, E., 2014. Study of Lightning Effects on Aircraft with predominately Composite Structures. IEEE, Transactions on Electromagnetic Compatibility, 56 (3), 675-682.
- Larsson, A., Ladande, P., Clergerie, A. B., Delannoy, A., 2000. Thermodynamic and Electric Properties of a Lightning Arc Channel During its Continuous Current Phase When The Lightning Strikes an Aircraft in Flight. International Conference on Gas Discharges and Their Applications, 214-217.
- Meyer, M., Flourens, F., Rouquette, J. A., Delnevo, A., 2008. Modeling of Lightning Indirect Effects in CFRP Aircraft. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1-5.
- MIL-STD-464C, 2010. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. United States Department of Defense.
- Nahaj, M., Clelland, M., Whitaker, M., McClure, B., Schneide, J., 2001. Indirect Lightning Effects Evaluation of an F/A-18E/F. International Conference on Lightning & Static Electricity, 513 - 523.
- Odam, G. A. M., Hanson, A. W., Evans, R. H., 1991. Lightning Protection Requirements for Aircraft – A Proposed Specification. Defence Research Agency, Controller HMSO.
- Rakov, V. A., Uman, M. A., 2003. Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press.
- Rakov, V. A., 2012. Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection. Journal of Lightning Research, 4, 3-11.