

# Askeri Sistemlerin Elektromanyetik Uyumluluğunun (EMC) Önemi ve EMC Eğitimi

**Levent GÜREL**

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bilkent Üniversitesi, Ankara  
lgurel@bilkent.edu.tr.

## Öz

Uydular ve yer istasyonları da dahil olmak üzere, her çeşit askeri elektronik sistemin uyması gereken Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) konusunun önemi anlatılacaktır. Bu konuda, Bilkent Üniversitesi'nde yapmakta olduğumuz simülasyon, ölçüm ve (MIL) standartlar çalışmaları hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca, Bilkent Üniversitesi'nde verilmekte olan EMC eğitimine de kısaca değinilecektir.

## 1. EMC Hakkında Genel Bilgiler

Elektromanyetik uyumluluk (electromagnetic compatibility: EMC), elektronik ve elektrikli aygıt, gereç ve sistemlerin içinde buldukları elektromanyetik (EM) ortamlarında, kendileri çok yüksek EM ışınımları yaratmamak koşuluyla, normal ve tatminkar çalışmalarını yerine getirebilmeleri, birbirleriyle uyum içinde yaşayabilmeleridir. Örneğin, aynı EM ortamında bulunan bir radardan, bir alıcı/verici telsizden ve bir uçağın savaş sistemlerini denetleyen mikroişlemci kartından çıkan EM dalgaların yüksekliklerinin ve sıklıklarının, bu aygıtların birbirlerine zarar vermeden, uyum içinde çalışabilecekleri şekilde düzenlenmesi gerekiyor. Elektronik aletlerin ve özellikle sayısal (digital) sistemlerin hem sivil, hem de askeri ortamlarda günden güne çoğalması ve çeşitlenmesi, ve çalışma sıklıklarının yükselmesi, bu uyumu bozuyor, elektromanyetik karışmayı (electromagnetic interference: EMI) git gide daha sık karışımıza çıkarıyor ve EMC konusunu daha önemli kılıyor.

EMC problemlerinin çözümü için pek çok yol olmasına karşın, en iyi yol, problemin daha ortaya çıkmadan önlenmesidir. Bunun için de, elektronik ve elektrikli aygıt, gereç ve sistemlerin tasarımlarının EM ışınımını azaltacak şekilde yapılması gerekiyor. EM ve özellikle sayısal EM alanlarında yapılan araştırmaların bu konuya önemli katkıları olabilir. Sayısal EM bilimi kullanılarak, tasarım aşamasındaki bir fiziksel sistem hakkında, henüz sistem üretilmeden, elektromanyetik çözümleme (analysis) ve benzetim (simulation) yoluyla önemli bilgiler elde edilebilir. Bu da zaman ve para tasarrufu anlamına gelir. Örneğin, bilgisayarların çalışma sıklıkları (operating frequency) günden güne yükseldiği için, bir bilgisayar kartının tasarımını artık sadece bir devre tasarımı programıyla yapmak olanaksız. Günümüzde, elemanların baskı devre kartı üzerinde yerleşimini yapmak devre tasarımını bitirmiyor. Sıklığın yüksekliği nedeniyle, bu kartın doğru çalıştığına ve elektromanyetik uyumluluk koşullarını sağladığına emin olmak için, artık devre tasarımının içine elektromanyetik çözümleme ve benzetimi de katmak şart.

## 2. Askeri Sistemlerde EMC'nin Önemi

Sivil ortamlarda bile EMC problemleri rahatsız edici olabiliyorken, askeri ortamlarda EMC problemleri can kaybına ve diğer önemli stratejik kayıplara yol açabiliyor. Bu önem ve öncelik farkına ek olarak, askeri ve sivil uygulamalardaki EM ortam da çok farklıdır. Sivil uygulamalarda, EMC'nin sağlanabilmesi ve EMI'nin önlenmesi için bir takım kurallar konmuştur ve bütün elektronik sistemlerin bu kurallara uyması için yasal düzenlemeler

yapılmıştır. Bu kurallar, elektronik sistemlerin hangi frekans bantlarında çalışabileceklerini ve EM ışınlarının en fazla ne kadar olabileceğini düzenlemektedir. Sivil sistemler bu düzenlemelere uyacak şekilde üretilmektedir. Öte yandan, askeri sistemlerin, bu kurallara barış zamanlarında uysalar bile, savaş zamanlarında herhangi bir kurala bağlı kalmaları beklenemez. Bu nedenle, askeri uygulamalarda (özellikle savaş zamanlarında) EM ortamı hiç beklenmedik ve hiç görülmedik derecede karmaşık ve düşmanca olabilir. Bu durumun önleminin çok önceden alınması için bu projeyi öneriyoruz.

Askeri EM ortamlarının sivil EM ortamlarından bir diğer farkı da, normal haberleşme uygulamalarına ek olarak, jamming ve yönlendirilmiş enerji silahlarının kullanılması gibi düşmanca uygulamaları içermesidir. Yani, dost ve düşman elektromanyetik sinyallerinin bizim elektronik sistemlerimizle istenmeden ve amaçlanmadan karışmasına ek olarak, bizim elektronik sistemlerimize ve alıcılarımıza bilerek ve isteyerek yönlendirilmiş çok yüksek EM ışınları söz konusudur. Özellikle, yönlendirilmiş enerji silahları uygulamalarında amaç, düşmanca EMI operasyonlarının da ötesine geçerek, elektronik alıcı sistemlerimizin yüksek EM ışınımı altında yakılarak tamamen devre dışı bırakılmasıdır. Bu düşmanca uygulamalara karşı savunma olarak elektronik sistemlerimizin elektromanyetik hassasiyetlerinin (electromagnetic susceptibility: EMS) azaltılması gerekmektedir. Bu konunun da, hem bilgisayar simülasyonları, hem de laboratuvar ölçümleri yoluyla araştırılması ve askeri elektronik sistemlerimizin EMS'lerinin azaltılarak savunma özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

### **3. Dünyada EMC'ye Verilen Önem**

Hemen hemen bütün gelişmiş ülkelerde elektromanyetik uyumluluk konusunda uyulması zorunlu yasal düzenlemeler bulunuyor. Örneğin, ABD'de FCC, Almanya'da VDE, İngiltere'de BSI ve Hollanda'da NNI tarafından hazırlanmış yönergeler yürürlükte. Avrupa Topluluğu'nun (AT) ürün güvenliği ve EM konusundaki düzenlemelerini ise CEN'in bir alt komitesi olan CENELEC yapıyor. Günden güne şekillenen AT'de hemen her konuda konulan yasa, kural ve yönetmelikler, gelişmiş ülkelerden alındığı gibi, öncekilerin hatalarını yinelememek ve deneyimlerinden yararlanabilmek için titizlikle gözden geçirilip yeniden ve daha sıkı olarak yazılıyor. Bu ülkelerde ticaret yapmak isteyen firmalar EMC konusundaki yasal düzenlemelere uymak zorunda kalıyorlar. Bu da, bu ülkelerin sivil endüstrilerinde EMC konusunda büyük bir bilgi birikimi oluşmasına yol açıyor. Doğal olarak, bu bilgi birikiminin savunma endüstrisinde de kullanılması kendiliğinden gerçekleşiyor.

Gelişmiş ülkelerin (sivil ve askeri) elektronik şirketlerinde EMC bölümleri önemli bir yer tutuyor. Pek çok üniversitede EMC konusunda araştırma yapılıyor. EMC konusunda konferanslar düzenleniyor ve bilimsel dergiler basılıyor.

### **4. Türkiye'de EMC'nin Durumu ve Sorunlar**

#### **Türkiye'de Sivil EMC**

Ülkemizde sivil EMC uygulamaları konusunda bir bilgi eksikliği bulunmaktadır. Bunun nedeni, Türkiye'de EMC konusunda gerekli yasal düzenlemelerin yapılmamış olmasıdır. Yukarıdaki bölümde anlatıldığı gibi, bütün gelişmiş ülkelerde EMC konusunda uyulması zorunlu yasal düzenlemeler bulunuyor. Bu durum, bu ülkelerde EMC konusunda sivil kurumlardan başlayarak bir bilgi birikimi oluşmasına yol açmaktadır. Türkiye'de ise, sivil EMC uygulamaları konusundaki bilgi eksikliği askeri uygulamalara da ters bir şekilde yansımaktadır. Bu sorunun çözümü hükümetlerin gerekli yasal düzenlemeleri yapmasından geçmektedir. Bizim gerekli uyarıları yapmamıza rağmen, sorunun algılanmasını beklemekten başka çaremiz yoktur. Yani, sivil uygulamalardaki EMC problemleri bir süre daha devam edecektir.

#### **Türkiye'de Askeri EMC**

Askeri uygulamalardaki EMC problemleri, Türkiye'deki sivil EMC uygulamaları alanında bilgi birikimi oluşmasını bekleyemeyecek kadar önemli, ciddi ve acildir. Bu nedenle, bu konuda

hem teorik, hem de pratik bilgi birikimini oluşturmak için çalışmalar yapılması gerektiğini düşünmekteyiz.

Jamming ve yönlendirilmiş enerji silahları uygulamaları nedeniyle, EMI ve buna karşı savunma olarak EMS teknikleri stratejik bilgiler haline gelmiştir. Bu çeşit stratejik bilgiler Türkiye'ye en yakın müttefikleri tarafından bile verilmemektedir ve verilmesi de beklenmemelidir. Bu konuda dışa bağımlı kalmadan, kendi bilgilerimizi kendimiz üretmeliyiz.

Unutulmamalı ki, savaş ortamı barış ortamından çok farklı olabilir. Büyük özverilerle yurt dışından satın aldığımız çeşitli askeri elektronik sistemler, barış zamanlarında tam olarak çalışmasına rağmen, savaş sırasında bu sistemleri bize satanlar tarafından etkisiz (jamming ile) veya tamamen çalışmaz (yönlendirilmiş enerji silahlarıyla) hale getirilebilir. Başka ülkelere olan bağımlılığımız nedeniyle, şu anda elimizde olduğunu sandığımız elektronik sistemler, aslında tam gerektiği zamanlarda elimizde olmayabilir. Bu senaryoya karşı, gelişmiş elektronik sistemleri yurt dışından alıyor olsak bile, bu sistemlerin EMS'lerinin nasıl azaltılacağı konusunda Türkiye'de çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar sonucunda, bu sistemlere küçük değişiklikler yaparak (örneğin, alıcı devrelerinin EMS özelliklerini iyileştirerek) bütün bir sistemi korumak mümkün olabilir.

## 5. EMC Konusunda Yapılan Çalışmalar

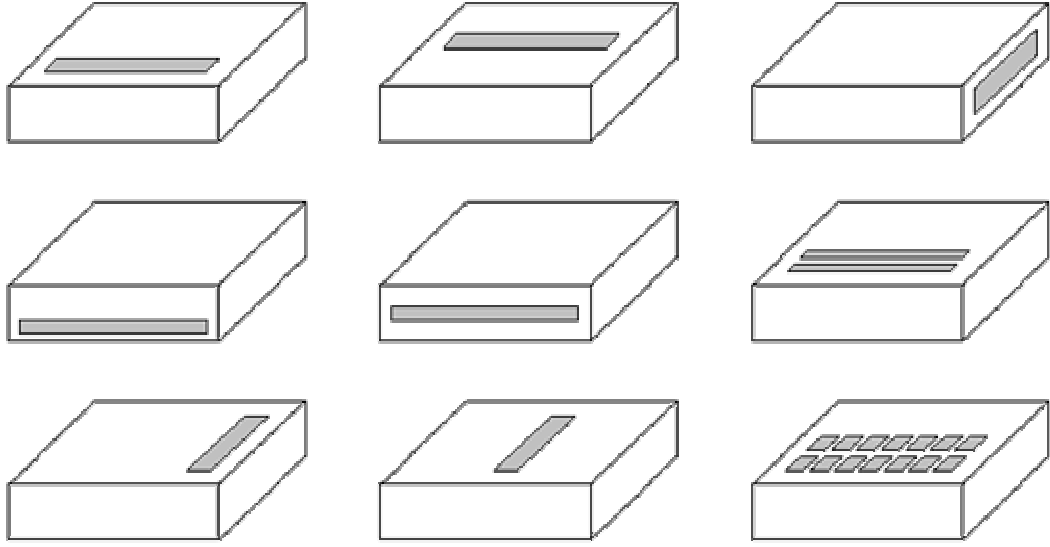
Bilkent Üniversitesi bünyesinde yaptığımız EMC çalışmalarını aşağıdaki ana başlıklar altında özetleyebiliriz:

1. Askeri ve sivil EMC standartlarının izlenmesi ve bu standartlara uymak zorunda olan gerek askeri ve gerek sivil kuruluşlara bilgi desteği sağlanması.
2. Hem askeri, hem de sivil EMC konuları hakkında ilgili kuruluşlara eğitim verilmesi.
3. EMC sorunlarının çözümüne yönelik olarak bilgisayar simülasyonları gerçekleştirilmesi.
4. Askeri ve sivil EMC standartlarına uygunluk sağlayabilmek için standartlara uygun EMC ölçümleri gerçekleştirmek ve bu çeşit ölçümlerin yapılabileceği laboratuvarlar kurmak.

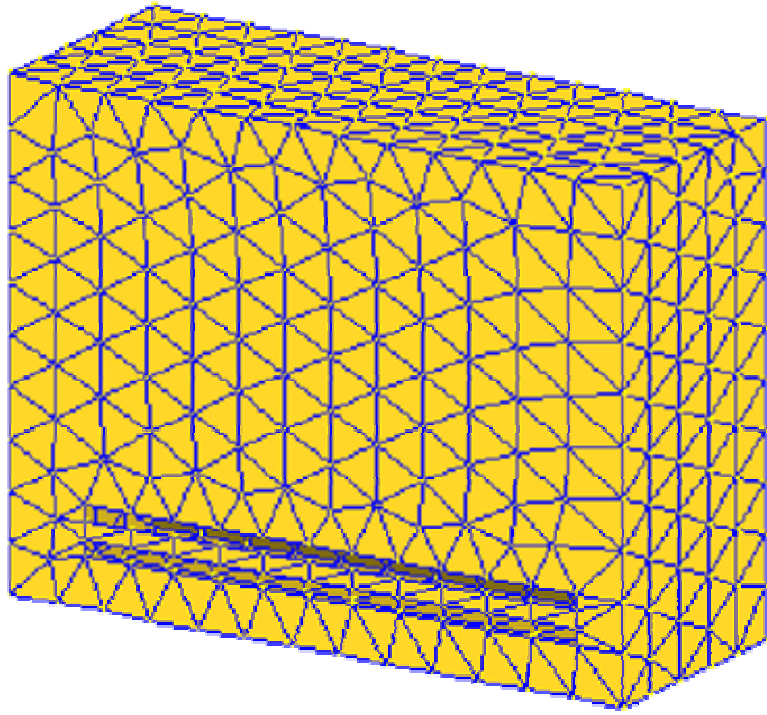
Aşağıda bu konuların bazılarıyla ilgili olarak daha ayrıntılı bilgi verilecektir.

## 6. Bilgisayar Simülasyonları

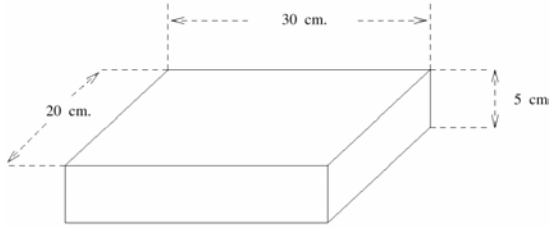
EMC sorunlarının bilgisayar simülasyonları yoluyla çözülmesine bir örnek olarak üstünde açıklıklar bulunan bir kutunun tasarımını ele alacağız. Bu kutuyu herhangi bir elektronik sistemi çevreleyen bir kutu veya bir kalkan (shield) olarak düşünebiliriz. Örneğin, bir bilgisayar kutusu olabilir. Bu çeşit kutuların üstünde açıklıklar bırakmak işlevsel olarak gereklidir; örneğin, hava delikleri, kablo giriş ve çıkışları gibi. Bu açıklıklar nedeniyle kutunun dışına bir miktar elektromanyetik radyasyonun çıkması kaçınılmazdır. Bu örnek problemde, kutunun üstündeki açıklıkların toplam alanını sabit tutmak şartıyla, açıklıkların sayısı, büyüklük ve yerleşim parametrelerinin kutu dışına kaçan elektromanyetik radyasyonu en az düzeye indirecek şekilde tasarlanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, bilgisayar simülasyonları kullanılacaktır. Şekil 1'de gösterilenlere benzer kutu konfigürasyonları simüle edilecektir. İlk adım olarak, incelenecek olan her kutu konfigürasyonunun bilgisayar ortamında modeli hazırlanacaktır. Geometrik modellemesi ve üçgenlenmesi (mesh) bitmiş ve elektromanyetik simülasyona hazır hale getirilmiş olan bir kutu örneği Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 3'te beş farklı kutu ve açıklık konfigürasyonlarının simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 3(a) ve 3(b)'de tamamen kapalı bir kutu ve bu kutunun çok düşük radyasyona neden olduğunu gösteren simülasyon sonuçları verilmiştir. Diğer dört konfigürasyon içinde, en düşük elektromanyetik radyasyonun Şekil 3(i) ve 3(ii)'de verilen kutuya ait olduğu görülmektedir. Toplam açıklık alanı aynı olmasına rağmen, çok sayıda ve küçük boyutlu açıklıkların daha az radyasyona neden olduğu simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir.



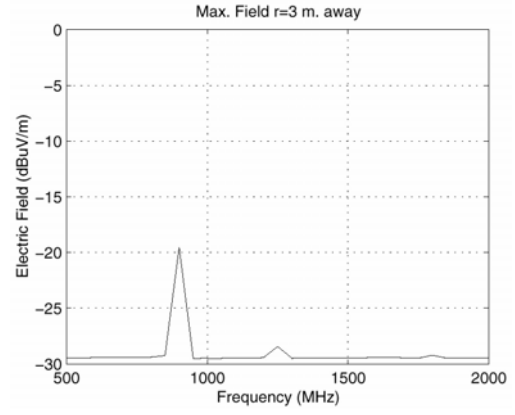
**Şekil 1. Üstlerinde çeşitli açıklıklar bulunan kutu örnekleri.**



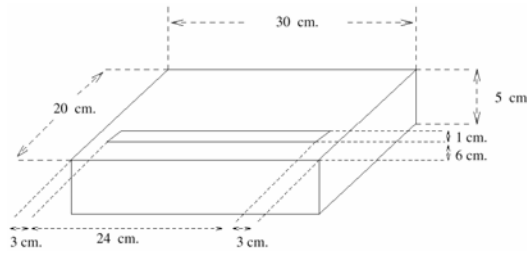
**Şekil 2. Bilgisayar simülasyonlarında kullanılan bir kutu modeli.**



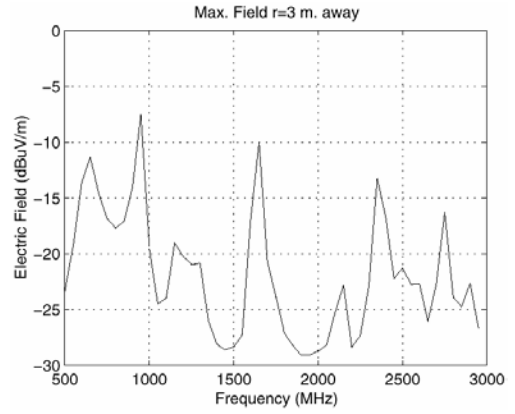
(a)



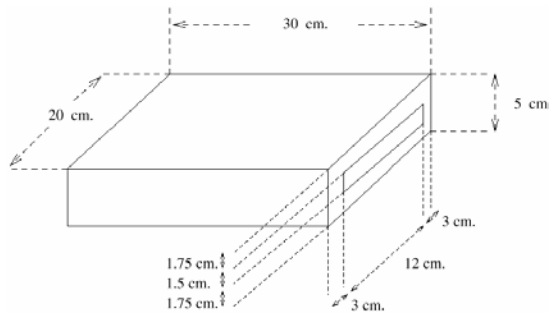
(b)



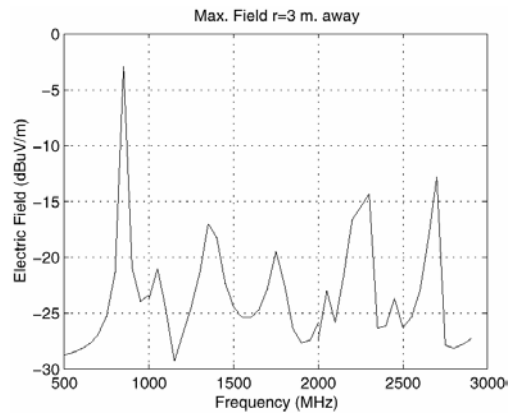
(c)



(d)

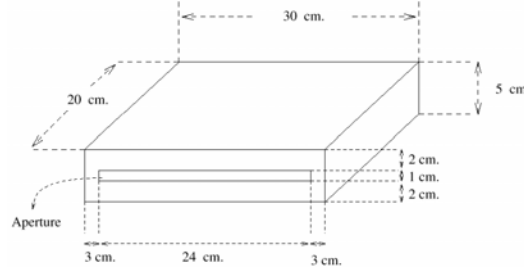


(e)

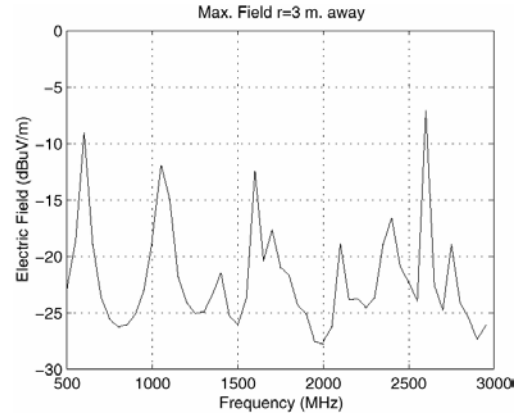


(f)

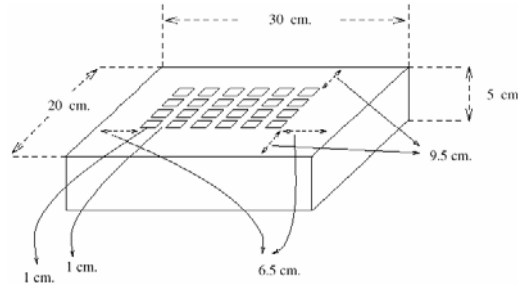
**Şekil 3. Elektromanyetik simülasyonları yapılan kutuların ayrıntılı parametreleri ve simülasyonlar sonucunda elde edilen elektromanyetik radyasyon seviyeleri.**



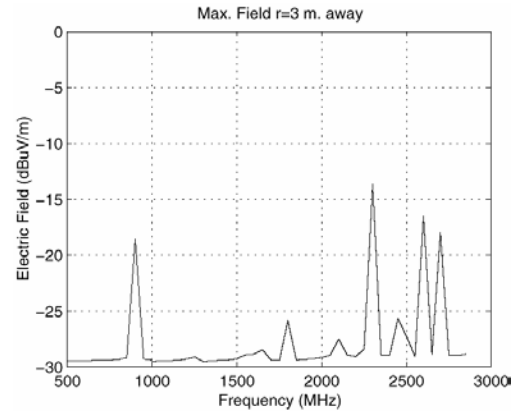
(g)



(h)



(i)



(i)

**Şekil 3. (Devam) Elektromanyetik simülasyonları yapılan kutuların ayrıntılı parametreleri ve simülasyonlar sonucunda elde edilen elektromanyetik radyasyon seviyeleri.**

## 7. Savunma Sanayiine Yönelik EMC Eğitimi

Bu bildiriye daha önce belirtildiği gibi, ülkemizde EMC konusunda bir bilgi eksikliği bulunmaktadır. Bu eksikliği bir ölçüde giderebilmek için, Bilkent Üniversitesi'nde hem sivil, hem de askeri EMC konularına yönelik olarak dersler ve kısa süreli kurslar vermekteyiz. Tablo 1'de askeri uygulamalara yönelik bir EMC dersiyle ilgili olarak örnek bir konu listesi verilmiştir. Her ne kadar bu listedeki konular bir genel amaçlı bir askeri EMC desinde bulunması gerektiğini düşündüğümüz konular ise de, dersi veya kursu talep eden grubun özel ihtiyaçları da göz önüne alınmakta ve gerekirse bu listenin detayları büyük oranda değişebilmektedir.

EMC Konusuna Hazırlık	EMC Kavramları	Askeri EMC Standartları
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Elektromanyetik Teorisine Giriş</b> Basic electromagnetic principles Maxwell's equations Static electric and magnetic fields</li> <li>• <b>Elektromanyetik Dalgalar</b> Time-varying electromagnetic fields Electromagnetic boundary conditions Wave equations and their solutions Plane electromagnetic waves Reflection and transmission</li> <li>• <b>İletim Hatları ve Dalga Kılavuzları</b> Transmission lines and the Smith chart Waveguides and cavity resonators</li> <li>• <b>Antenler Teorisine Giriş</b> Radiation, ideal dipole, Green's function Antenna parameters (pattern, beamwidth, impedance, gain) <b>DEMO: Antenna Measurements</b> Receiving antennas Friis transmission formula Radar range equation Simple antennas, dipoles and loops.</li> <li>• <b>Antenler Teorisi</b> Array theory Line sources and wire antennas. Biconical antennas, bow-tie antennas Traveling wave antennas Broadband and frequency-independent antennas. Spiral and log-periodic antennas Aperture antennas, microstrip antennas Horn and reflector antennas</li> <li>• <b>Bilgisayar Ortamında Anten Tasarımı</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>EMC Konusuna Giriş</b> Introduction to EMC Common-Mode versus Differential-Mode Currents Radiated Emissions and Susceptibility Conducted Emissions and Susceptibility Components Shielding Grounding Cables, connectors Crosstalk, coupling Signal spectra, nonlinear phenomena, digital circuits</li> <li>• <b>Diğer EMC Konuları</b> PCB design for EMC System design for EMC Frequency spectrum management Electrostatic Discharge (ESD) Lightning Protection Regulations EMC testing and measurements TEMPEST</li> <li>• <b>Laboratuvarda EMC Ölçümleri</b> <b>DEMO: EMC Measurements</b></li> <li>• <b>EMC Standartları</b> EMC Standards and Specifications The need for standards and specifications Civil and military standards US commercial standards <b>Military EMC standards</b> European (EC) EMC standards Commercial EMC standards in Japan and Canada Product safety ESD and transients</li> <li>• <b>Bilgisayar Ortamında EMC Simülasyonları</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Detaylı olarak incelenen askeri standartlardan bazıları:</b> <b>MIL-STD-461:</b> Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Emissions and Susceptibility <b>MIL-STD-462:</b> Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics <b>MIL-STD-464:</b> Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems Detailed Requirements and Measurement Procedures <b>MIL-E-6051:</b> Electromagnetic Compatibility Requirements, Systems</li> <li>• <b>Askeri Standartlara Yönelik Ölçüm Teknikleri ve Uygulamaları</b></li> </ul>

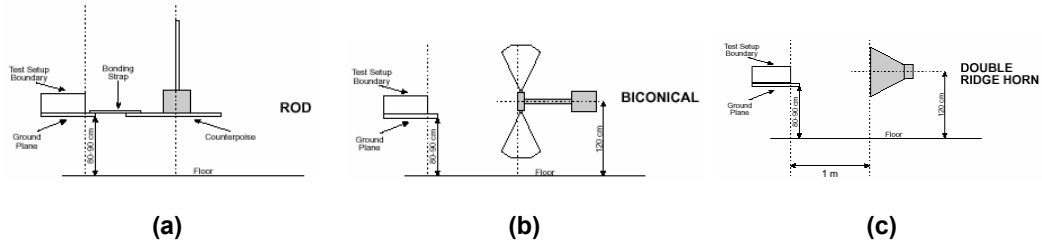
**Tablo 1. Bilkent Üniversitesi'nde verilmekte olan EMC dersinin örnek konu listesi. Konular, dersi alan grubun ihtiyaçlarına göre özel olarak belirlenmektedir.**

## 8. Askeri Standartlara Yönelik EMC Ölçümleri

Bilkent Üniversitesi'nde kurduğumuz ve geliştirme çalışmaları devam etmekte olan laboratuvarında 9 kHz-26.5 GHz geniş frekansa aralığında EMC ölçümleri yapabilmekteyiz. Örneğin, Şekil 4'te anten konfigürasyonları gösterilmiş olan "RE102: Radiated Emissions, Electric Field, 10 kHz to 18 GHz" testini MIL-STD-462'ye uygun olarak

- 10 kHz-30 MHz frekans aralığında Şekil 4(a)'da gösterilen "rod" antenle,
- 30 MHz-200 MHz frekans aralığında Şekil 4(b)'da gösterilen "biconical" antenle, ve
- 200 MHz-18 GHz frekans aralığında Şekil 4(c)'da gösterilen "horn" antenle

gerçekleştirebilmekteyiz. Bu örneğe ek olarak, "radiated emissions" ve "conducted emissions" testlerinden pek çoğunu askeri standartlara uygun olarak gerçekleştirebilmekteyiz. "Conducted susceptibility" ve "radiated susceptibility" testlerinin gerçekleştirilebilmesi için gereken geliştirme çalışmaları devam etmektedir.



Şekil 4. MIL-STD-462'ye uygun olarak yaptığımız RE102 testlerinin anten konfigürasyonları.

## Kaynakça

[1] L. Gürel, "Sayısal elektromanyetik bilimi, elektromanyetik uyumluluk ve Avrupa Topluluğu," Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, s. 645-648, Bursa, Eylül 1995.

[2] L. Gürel, "Elektromanyetik uyumluluk ve sayısal elektromanyetik bilimi," Savunma Sanayiindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu, s. 621-626, Kara Harp Okulu, Ankara, Haziran 1997.

[3] L. Gürel and İ. K. Şendur, "Computational Investigation of Radiation from Conducting Boxes with Arbitrary Apertures," International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rome, Italy, Sept. 1998.

[4] L. Gürel, "Elektromanyetik uyumluluk standartları ve bilgisayar simülasyonları," Elektromanyetik Kirlilik Etkileri Sempozyumu 1999, s. 61-64, Ankara, Kasım 1999.

[5] L. Gürel, "Savunma Sistemlerinde Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) ve EMC Eğitimi," Savunma Sanayii Sempozyumu-2000, s. 416-423, Ankara, Kasım 2000.