

29717

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HETEROSAN KİMYASAL YOLLA ÜZERİNE
ELEKTROMAGNETİK ALGALAMA YÖNTEMİNİN
İNTEGRAL DENKLEMLER YARDIMIYLA İNCELENMESİ**

Elektronik Müh. İlyas ÖZDEMİR

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik Bilim Dalında
hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
T.C. İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ**

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Cahit CANBAY

İSTANBUL, Ekim 1993

İÇİNDEKİLER:

	sayfa
GİRİŞ	
BÖLÜM-I:BIYOLOJİK YAPILARIN MODELLENMESİ	
I-1 Biyolojik yapıların tabakalar şeklinde model- lenmesi	1
I-2 Biyolojik yapıların silindirler şeklinde model- lenmesi	2
I-3 Biyolojik yapıların küresel modellenmesi	3
I-4 Biyolojik yapıların eliptik modellenmesi	4
I-5 Biyolojik yapıların küpler şeklinde modellenmesi	4
BÖLÜM-II :BIYOLOJİK YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ	
II-1 Biyolojik yapıların elektriksel özellikleri	6
II-2 Biyolojik yapıların dielektrik katsayısı ve elektriksel iletkenliklerinin frekansla değiş- iminin incelenmesi	7
II-3 Biyolojik dokuların dielektrik katsayısı ve elektriksel iletkenliğin farklı frekanslardaki değerleri	10
BÖLÜM-III :ELEKTRİK ALAN INTEGRAL DENKLEMLERİNİN ÇIKARILMASI	
III-1 Elektrik alan integral denklemlerinin çıkarılması	13
III-2 Elektrik alan integral denklemlerinin moment me- todu ile çözümü	23
BÖLÜM-IV:BIYOLOJİK YAPIDA MAKSİMUM ALANIN İNDÜKLENMESİ	
IV-1 Biyolojik yapılarda maksimum alanın indüklenmesi	32
IV-2 Biyolojik yapılarda SAR hesabı	33
BÖLÜM-V: ANTEN APLİKATÖRLERİNİN İNCELENMESİ	
V-1 Anten aplikatörlerinin incelenmesi	35
V-2 Anten tarafında yayılan elektrik alanı	36
V-3 Elektrik alan polarizasyonunun incelenmesi	41
BÖLÜM-VI:ELEKTROMANYATİK TEORİNİN BIYOLOJİK YAPILARA UYGULANMASI	
VI-1 Elektromanyetik teorinin biyolojik yapılara uygu- lanması	44
VI-2 Sonuç	65
BÖLÜM VII:KAYNAKLAR	66

GİRİŞ

Elektromanyetik alanın biyolojik dokular üzerinde olumlu etkileri olduğu kadar olumsuz etkileride olduğu kanısı yaygındır. Elektromanyetik alanın etkilerinin incelenmesi için alanın biyolojik doku içerisinde tavrının bilinmesi gereklidir. Biyolojik dokunun elektriksel iletkenliğine bağlı olarak biyolojik doku içerisinde indüklenen enerjide değişmektedir.

Biyolojik bir doku içerisinde indüklenen elektrik alanını sayısal olarak hesaplamak oldukça zor bir iştir. Elektromanyetik alanın formüle edilmesi kadar uygulanacak biyolojik dokunun modellenmeside, alınacak sonuçların hasasiyeti için önem taşımaktadır.

Araştırma konumuzda elektromanyetik alan integral denklemleri cinsinde ifade edildi. Biyolojik doku içerisinde indüklenen alanın tam olarak hesaplanması için dokunun küpler şeklinde modellenmesi seçildi. Elektromanyetik alanın doku içerisine uygulanabilmesi için çift katlı yalıtıkanda oluşan dipol anten tasarlandı.

Yirminci yüzyılın son çeyreğinde bilim dalları arasında kesin bir sınır çizmek mümkün değildir. Elektromanyetik teori ve tıp arasında da bunu benzer bir ilişki mevcuttur.

Elektromanyetik alan günümüzde kanser teşhis ve tedavisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kanserli dokuların normal dokulara oranla farklı elektriksel özellik göstermesi dolayısı ile kanserli dokuda indüklenen alan yoğunluğundan hareketle teşhisi dokuyu öldürebilecek miktarda enerji uygulamak suréti ile tedavisi mümkün olmaktadır.

Araştırma boyunca değerli katkılarından dolayı hocam Yr. Doc. Dr. CAHİT CANBAYA teşekkürlerimi bir boç bilirim.

ÖZET :

Elektromanyetik alanın uygulandığı bir biyolojik yapıda indüklenen enerjiyi hesaplamak için integral denklemleri kullanılmıştır. Integral denklemleri moment metodu kullanılarak çözüldü.

N tane küpe bölünen bir biyolojik yapı ele alınarak her küp merkezinde indüklenen alan point matching yöntemi kullanılarak çözüldü. Heterojen olarak ele alınan bir yapıda her küpün merkezinde elektriksel iletkenliğin ve dielektrik katsayısının o küp için sabit olduğu kabul edildi. Üç boyutlu ele alınan bir yapıda integral denklemleri matrislere dönüştürülerek her küpte indüklenen elektrik alan bileşenleri ve SAR değerleri ayrı ayrı hesaplandı.

Elektromanyetik alan biyolojik bir dokuya dışardan uygulanabileceği gibi aplikatörlerle doku içerisinden uygulanabilir. Biyolojik bir doku içerisine elektromanyetik bir alanın uygulanması amacı ile Bölüm V'te çift katlı bir yalıtıcıdan oluşan bir dipol anten tasarlandı.

Bölüm VI'da elektromanyetik alan küpler şeklinde modellenen insan ve insan başına uygulanarak indüklenen elektromanyetik alan bileşenleri ve SAR değerleri hesaplandı.

ABSTRACT :

Electromagnetic field integral equations have used to calculate electromagnetic field inside in any biological systems. The integral equations solved by moment methodes

A biological systems have divided into N subvolume and point matching method used for calculating fields. electrical conductivity and dielectric permittivity of divided Heterogeneous body taken as constant inside that subvolume SAR value and electromagnetic component calculated by inverting integral equations into matrix.

Electromagnetic field can be applied to any biological body at outside and inside. For applying electromagnetic an insulated applicator is designed.

A human model which divided into N subvolume designed electromagnetic field component and SAR values have calculated.



BÖLÜM - I

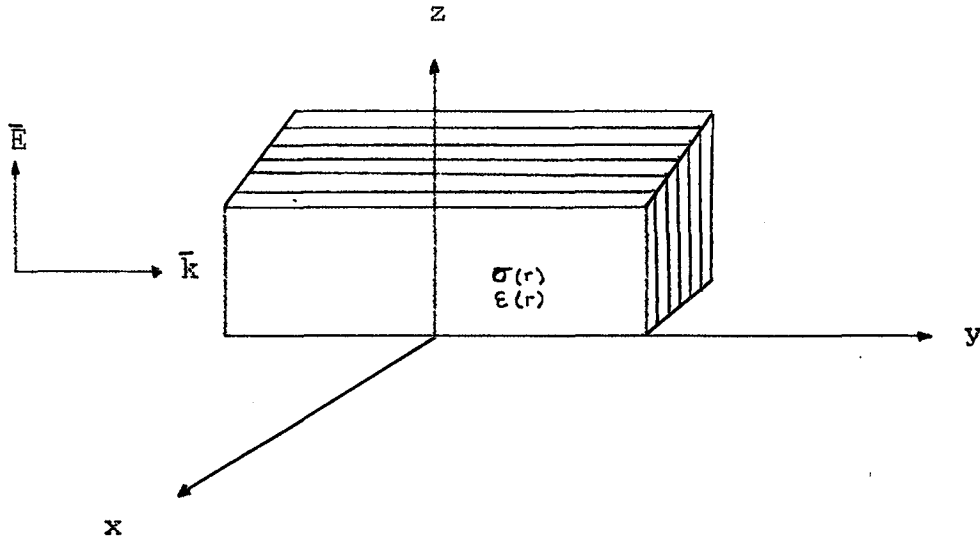
BIYOLOJİK YAPILARIN MODELLENMESİ :

Biyolojik ortamlar geometrik olarak düzenli bir şekle sahip olmadıklarından, ortam içerisinde indüklenen elektromanyetik enerjiyi tam olarak hesaplamak mümkün değildir. Biyolojik ortam geometrik olarak düzenli bir şekil olarak ele alınıp ortam içerisinde indüklenen enerji gerçek değerlerle hesaplanabilir. Seçilen geometrik şeklin Biyolojik ortama özdeş olması alınacak sonuçların gerçek değerlere daha yakın olacağı açıktır.

Biyolojik ortam içerisinde indüklenen enerjiyi hesaplamadan önce biyolojik ortam tabakalar şeklinde, silindirselsel küresel, eliptik veya küpler şeklinde modellenenebilir. Kısaca modelleme yöntemlerine baktıktan sonra araştırmamızda kullanılan küpler şeklinde modelleme ele alınacaktır.

I-1 BIYOLOJİK YAPILARIN TABAKALAR ŞEKLİNDE MODELLENMESİ :

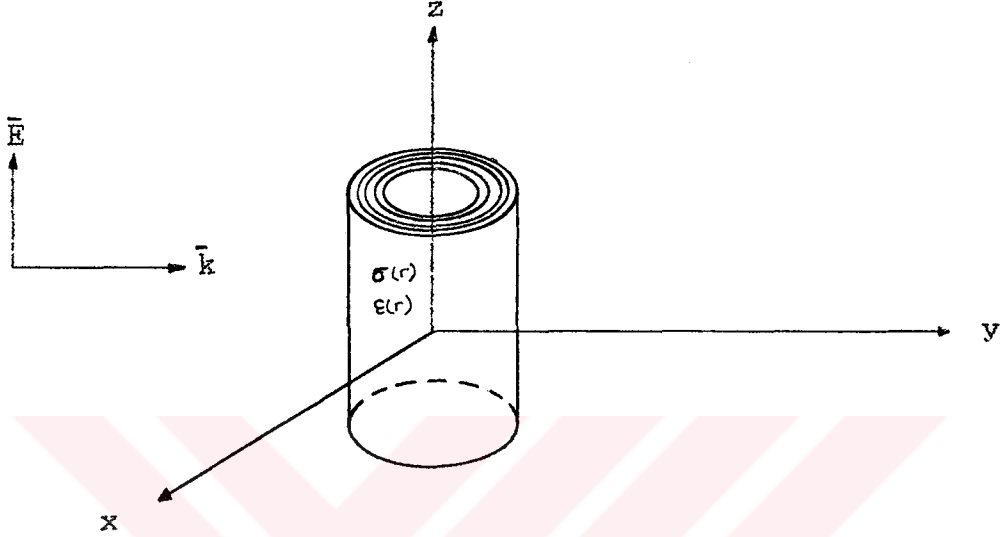
Biyolojik yapılar homojen veya heterojen yapılar olabilirler. Biyolojik yapılar Şekil I-1'de görüldüğü gibi ard arda dizilmiş homojen veya heterojen tabakalar şeklinde modellenenebilirler. Biyolojik yapılar farklı dokular içerirler. Her biyolojik doku farklı elektriksel özellikler taşıdığından modellenen tabakalar ard arda homojen tabakalar olabileceği gibi ard arda gelen homojen veya heterojen tabakalar olabilirler. Örneğin bir canlının modellendiği var sayılırsa ilk tabakanın deri ikinci tabakanın yağ dokusu üçüncü tabakanın kas dokusu dördüncü tabakanın kemik dokusu olarak ele alınması olanaklıdır. Bu tabakalar farklı kombinezonlarda ele alınabilirler.



Şekil I-1

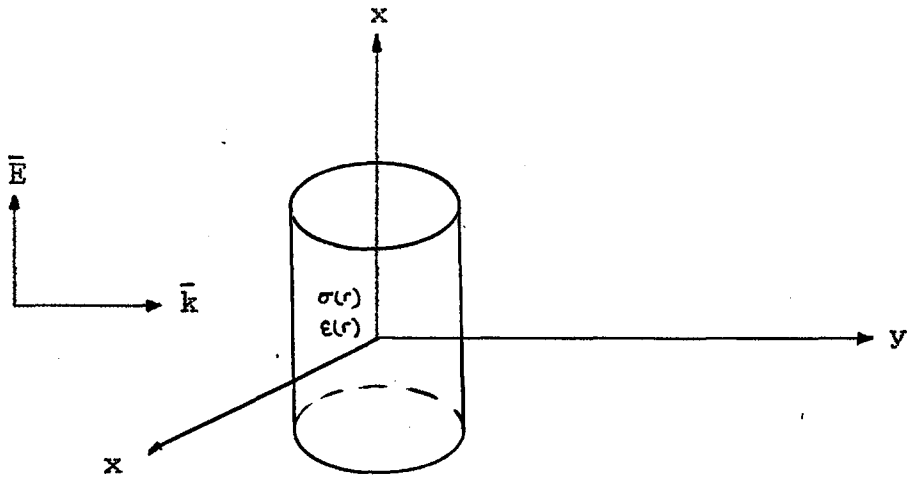
I - 2 BİYOLOJİK YAPILARIN SİLİNDİRLER ŞEKLİNDE MODELLENMESİ :

Biyolojik yapılar modellenirken Şekil I-2'de görüldüğü gibi iç içe ince silindirlere şeklinde veya Şekil I-3'te görüldüğü gibi tek bir silindir şeklinde modellenenebilir.



Şekil I-2

İç içe yapılan ince silindirlere şeklinde yapılan modellemelerde biyolojik dokular homojen dokular olabileceği gibi heterojen dokularda olabilirler. İç içe ince tabakalar şeklinde yapılan modellemelerde bir canlı modelini şu şekilde modellemek mümkündür; örneğin dört tabakalı bir canlı dokusunun birinci tabakası ince bir deri ikinci tabakası ince bir yağ dokusu üçüncü tabakası ince bir kas dokusu dördüncü tabakası ince bir kemik dokusunda oluşabilir. Bu dokular farklı kombinasyonlar şeklinde de düşünülebilir.



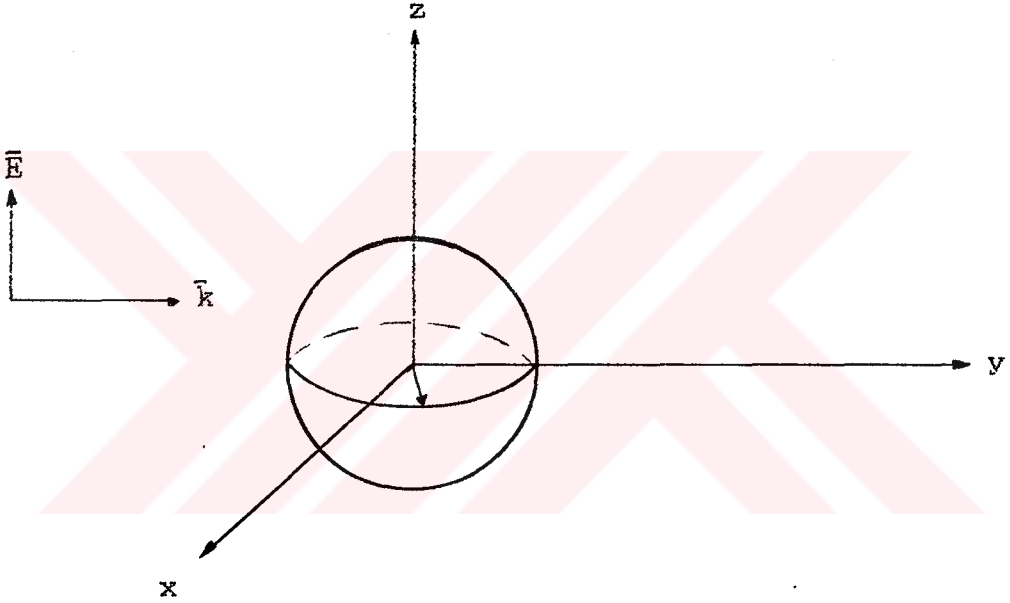
Şekil I-2

BIYOLOJİK YAPILARIN KÜRESEL MODELLENMESİ :

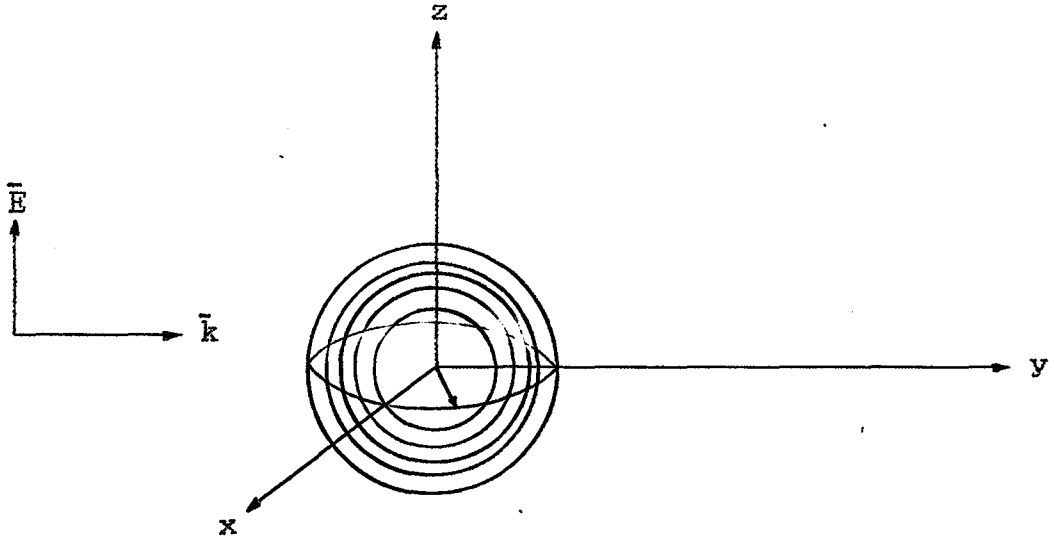
Biyolojik yapıların sıkça kullanılan bir modelleme şekli ise küresel modellemedir. Küresel özellik gösteren biyolojik yapılarörneğin insan başı oturmuş halde bulunan bir insan veya uygulanan elektromanyetik alana küresel cevap veren herhangi bir biyolojik ortam küresel olarak modellenenebilir. Küresel bir özellik taşıyan bir biyolojik ortamı küresel olarak modelleyip indüklenen enerji hesaplanırsa diğer modelleme şekillerine göre daha hassas sonuçların elde edilmesi olasıdır.

Küresel özellik taşıyan biyolojik bir yapı Şekil I-4'te görüldüğü gibi tek bir homojen küre olabileceği gibi Şekil I-4'te görüldüğü gibi iç içe ince kürelerden de oluşabilir.

Bu tür analitik yolla çözümleri kolaylaştıracak modeller kullanılması oldukça etkili ve yaygın bir yöntemdir.



Şekil I-4

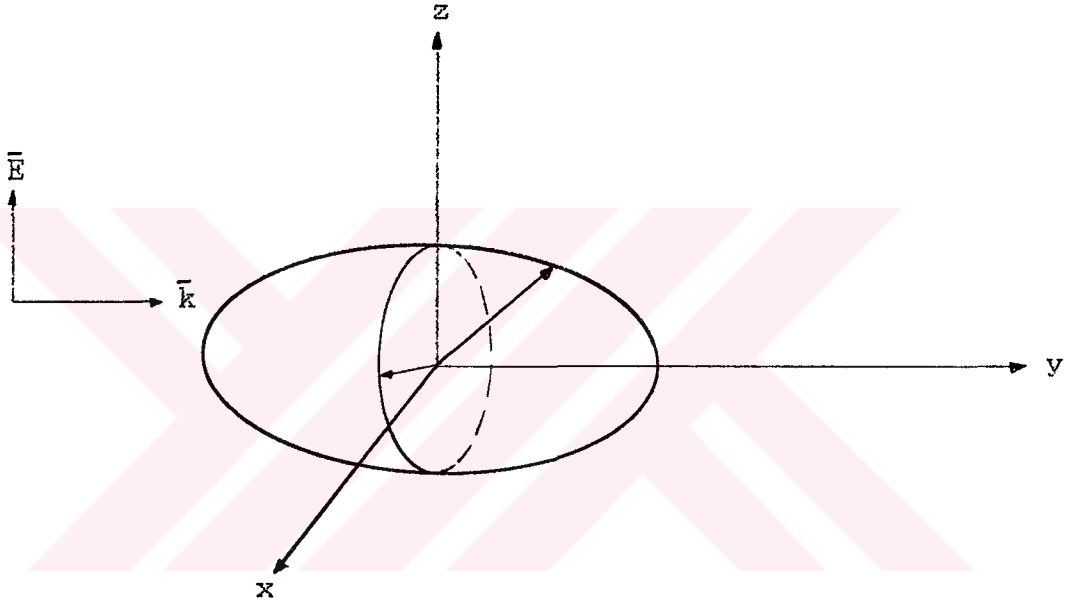


Şekil I-5

I-4 BIYOLOJİK YAPILARIN ELİPTİK MODELLENMESİ :

Biyolojik yapının şekline göre yapılan modellemelerden biride eliptik modellemedir. Elektromanyetik alana tabi tutulan birçok biyolojik yapı eliptik özellik gösterir. Silindirik ve küresel modellemelerde olduğu gibi tek bir elips olarak modellenemediği gibi iç içe ince tabakalardan oluşan elipsler şeklinde de modellenebilirler. Eliptik özellik gösteren biyolojik ortamların örneğin domuz, kuzu gibi biyolojik ortamların eliptik olarak modellenmesi daha hassas sonuçların elde edilmesine olanak sağlar ve analitik çözümleri kolaylaştırır.

Biyolojik ortamların eliptik olarak modellenmesi Şekil I-6 gösterilmiştir.

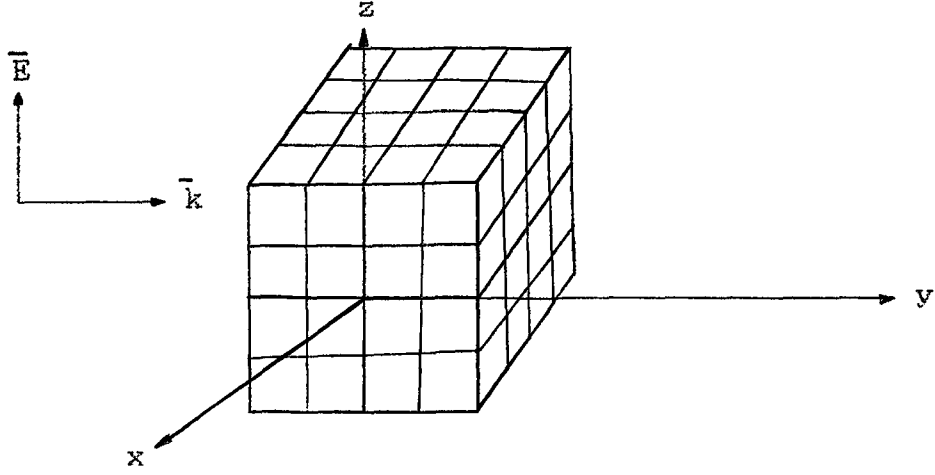


Şekil I-6

I-5 BIYOLOJİK YAPILARIN KÜPLER ŞEKLİNDE MODELLENMESİ:

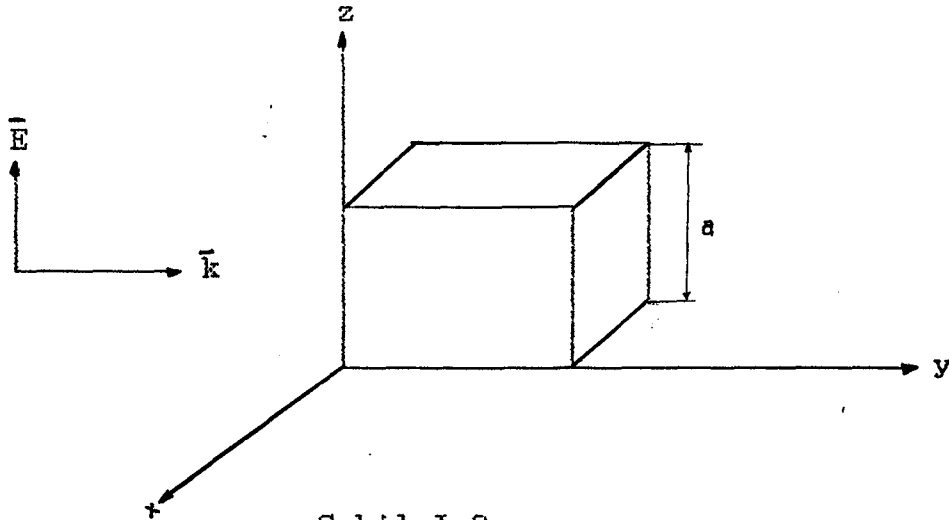
Biyolojik ortamlar düzenli geometrik bir şekle sahip olmadıklarından ortamda indüklenen enerjiyi gerçek değerlerle hesaplamak oldukça zordur dolayısı ile biyolojik yapıyı doğru bir şekilde modellemek gerekir. Herhangi bir biyolojik yapıyı modellerken biyolojik yapı içerisinde indüklenen elektromanyetik alanın biyolojik ortamın her noktasında bilinmesi istenir. Birçok modelleme tasarlanabilmesine rağmen biyolojik ortamın küpler şeklinde modellenmesi daha kolay ve daha iyi sonuçlar elde edilmesi açısından tercih edilmiştir.

Biyolojik bir ortam Şekil I-7 'de görüldüğü gibi küçük küplerden oluşan bir yapı olarak tasarlanabilir. Küplerin yeteri kadar küçük seçilmesi halinde küpler içerisinde indüklenen elektromanyetik alan gerçek değerlerde hesaplamak mümkündür.



Şekil I-7

Elektromanyetik alana tabi tutulan biyolojik bir yapı içerisinde hesaplanan elektromanyetik alanı tam değerlerde elde etmek için gözönünde bulundurulması gereken noktalardan biride; küpler şeklinde modellenen biyolojik yapının her kübün kenarının uygulanan elektromanyetik alanın dalga boyunun dörtte birinden daha küçük olmasıdır. Şekil I-8 de gösterilen her kenarı a olan küpün elektromanyetik alanın havadaki dalga boyunun dörtte birinden daha küçük seçilmiştir.



Şekil I-8
 $a \ll \lambda/4$

BÖLÜM - II

II - 1 BIYOLOJİK YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ :

Bütün biyolojik dokular kimyasal elementlerin farklı birer bileşiminden ibaret olduklarından; uygulanan herhangi bir elektromanyetik alana farklı bir iletkenlik ve dielektriksel özellik gösterirler. Biyolojik yapılar uygulanan alan altında manyetize olmadıklarında manyetik permeabilitileri havadakine eşit kabul edileceklerdir.

Herhangi bir moleküler yapı bir elektromanyetik alana tabi tutulduğunda uygulanan alanın kuvvetine bağlı olarak moleküller yapı içerisindeki atom ve elektronlar alan doğrultusunda yeni oryantasyona maruz kalırlar. Her biyolojik doku içerisinde serbest elektronlar bulunduğundan belli bir elektriksel iletkenliğe, bağlı elektronlar içerdiklerinden belli bir dielektriksel sabite sahiptirler.

Biyolojik bir yapıya elektromanyetik bir alan uygulandığında uygulanan alanın özelliğine bağlı olarak alanın bir kısmı biyolojik yapı tarafından emilir, diğer kısmı biyolojik yapı tarafından dış ortama iletilir. Biyolojik yapı tarafından emilen enerjinin bir kısmı ortamın elektriksel iletkenliğinden dolayı oluşurken diğer kısmı biyolojik yapının dielektriksel özelliğinden dolayı oluşur. Biyolojik yapıların elektriksel iletkenliğini σ ile dielektriksel permitivitesini ise ϵ ile göstereceğiz.

Biyolojik yapının dielektriksel özelliğinden dolayı kaybolan enerji biyolojik yapı içerisindeki atom veya moleküllerin uygulanan alan doğrultusunda polarize olmalarından veya biyolojik yapı içerisindeki atomların uygulanan alan doğrultusunda ileri geri doğru hareket etmelerinden dolayı olur. Dielektriksel özellikten dolayı kaybolan enerji dielektrik permitivitesinin sanal kısmının olduğunu gösterir. Dielektrik permitiviti ϵ şu şekilde ifade edilebilir.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2-1)$$

ϵ' dielektrik katsayısını ϵ'' dielektrik kayıp faktörünü göstermektedir.

Dielektrik permitivitesinin sanal kısmı olan ϵ'' frekans ve iletkenliğe bağlı olup şu şekilde ifade edilebilir.

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad (2-2)$$

2-2 Nolu eşitlikte ω frekansı ifade etmektedir. Biyolojik yapıların relativ permitivitileri şu şekilde ifade edilebilir.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

II- BİYOLOJİK YAPILARIN DİELEKTRİK KATSAYISI VE ELEKTRİKSEL İLETKENLİKLERİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ :

Elektromanyetik bir alana tabi tutulan bir biyolojik hücrede dielektrik katsayısı ϵ ve elektriksel iletkenlik σ -nun frekansa bağımlılığı hücrenin moleküler yapısı ve polarizasyonu ile ilgilidir. Biyolojik bir hücre mikrodalga frekanslarında dielektrik katsayısının ve elektriksel iletkenliğin frekansa bağlı olması moleküllerin veya moleküler gurupların rotasyonlarından dolayı Polar veya Debye relaksasyonu önem taşımaktadır.

Uygulanan elektromanyetik alan artırılmasına rağmen belli bir frekansa kadar indüklenen polarizasyonun değişmediği frekansa relaksasyon frekansı denir.

30-2000 MHz. 'lik frekans bandında bir dokudaki dielektrik katsayısı ϵ ve elektriksel iletkenlik σ 'nun frekansla değişmesinde su belirleyicidir. Suyun relaksasyon frekansı 25000 MHz. 'dir. Bununla birlikte sulu karışımların relaksasyon frekansları 100-1000 MHz. protein moleküllerinin relaksasyon frekansı ise 40-300 MHz. civarında olup hücre içerisinde önemli bir etkileri olmaktadır.

Genel olarak σ ve ϵ nun frekansa bağlı bir denklemi çıkarılamamasına rağmen Debye denklemleri birçok polarizasyon çeşidinde iyi bir sonuç vermektedir.

Verilen bir relaksasyon frekansı için frekansa bağlı σ ve ϵ denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\sigma = \sigma_l + \frac{(\epsilon_l - \epsilon_H)}{1 + (f/f_r)^2} \quad (2-3)$$

$$\epsilon = \epsilon_H + \frac{(\epsilon_l - \epsilon_H)}{1 + (f/f_r)^2} \quad (2-4)$$

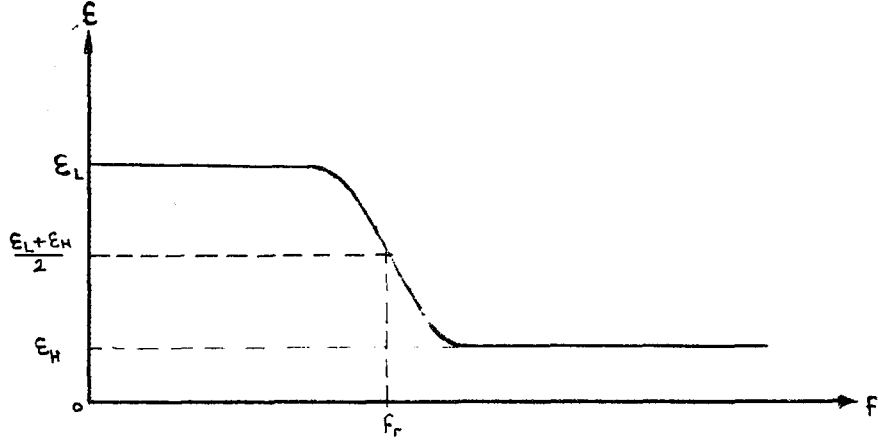
$f \gg f_r$ frekanslarda

$$\epsilon = \epsilon_H \quad \text{ve} \quad \sigma = \sigma_H$$

$f \ll f_r$ frekanslarda

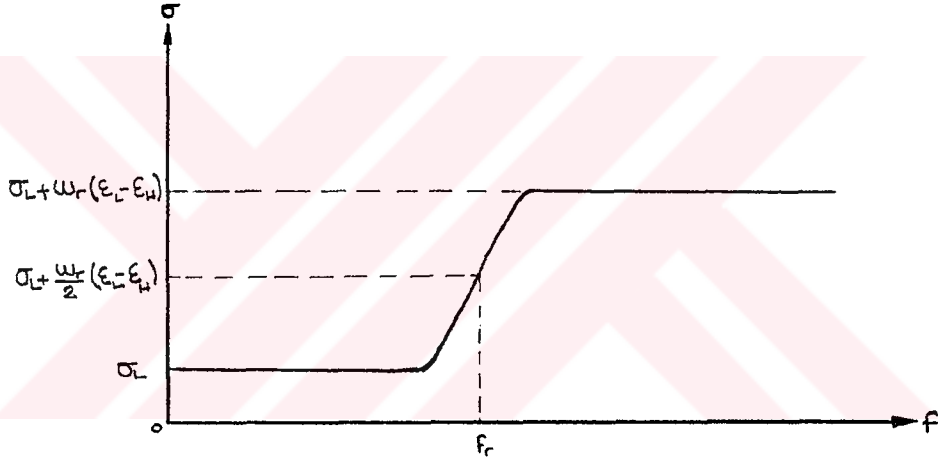
$$\epsilon = \epsilon_l \quad \text{ve} \quad \sigma = \sigma_l$$

Elektriksel iletkenliğin ve dielektrik katsayısının grafiksel gösterimi Şekil II-1 ve Şekil II-2 'de gösterilmiştir.



Şekil II-1

Şekil II-1 'de görüldüğü gibi dielektrik katsayısı relaksasyon frekansına kadar olan frekans bandında yaklaşık olarak sabit bir özellik gösterirken relaksasyon frekansından büyük frekanslarda azalmaktadır.



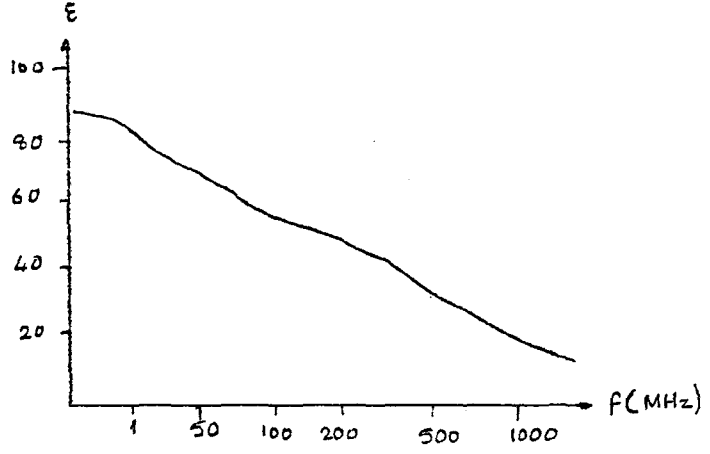
Şekil II-2

Şekil II-2 görüldüğü gibi elektriksel iletkenlik dielektrik katsayısının tersine relaksasyon frekansında düşük frekanslarda az bir değer gösterirken relaksasyon frekanslarından büyük değerlerde artmaktadır.

30-2000 MHz. frekanslarında yapılan bazı deneylerde elde edilen sonuçların Debye denklemlerine uygunlukları Şekil II-3 ve Şekil II-4 te görülmektedir.

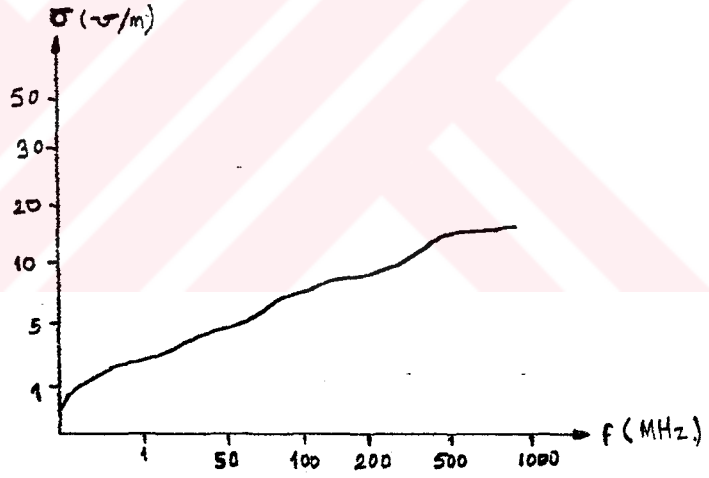
Genel olarak biyolojik dokuların dielektrik katsayıları düşük frekanslarda yüksek bir değer gösterirken, yüksek frekanslarda azaldığı gözlenmektedir. Şekil II-3 te bazı biyolojik dokuların dielektrik katsayılarının frekansla değişimi görülmektedir.

Dielektrik katsayısının frekansla değişiminin tersine elektriksel iletkenlik düşük frekanslarda düşük bir değer gösterirken yüksek frekanslarda frekans arttıkça elektriksel iletkenliğin arttığı gözlenmektedir. Bazı biyolojik dokuların elektriksel iletkenliklerinin frekansla değişimi Şekil II-4 te görülmektedir.



Sekil II-3

Sekil II-4 te görüldüğü gibi frenans artıkça biyolojik dokuların elektriksel iletkenlikleride artmaktadır. Genel olarak biyolojik dokularda frekans artıkça biyolojik dokunun elektriksel iletkenliğide artmaktadır.



Sekil II-4

II-3 BİYOLOJİK DOKULARIN DİELEKTRİK KATSAYISI VE ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞİN FARKLI FREKANSLARDAKİ DEĞERLERİ :

Her biyolojik dokunun elektriksel iletkenliği ve dielektrik katsayısının frekansla değişimi farklıdır. Biyolojik dokulardaki su miktarı biyolojik dokunun elektriksel iletkenliği ve dielektrik katsayısı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Farklı frekans değerleri için az ve çok miktarda su içeren bazı dokuların elektriksel iletkenlikleri ve dielektrik katsayıları Tablo II-1 gösterilmiştir.

Frekans(MHz)	Fazla miktarda su içeren dokular		Az miktarda su içeren dokular	
	Dielektrik katsayısı	Elektriksel iletkenlik	Dielektrik katsayısı	Elektriksel iletkenlik
1	2000	0,400		
10	160	0,625		
27.12	113	0,612	20	10,9-43,2
40.68	97,3	0,963	14,6	12,6-52,8
100	71,7	0,889	7,45	19,1-75,9
200	56,5	1,28	5,95	25,8-94,2
300	54	1,37	5-7	31,6-107
433	53	1,43	5-6	37,9-118
750	52	1,54	5-6	49,8-138
915	51	1,60	5-6	55,6-147
1500	49	1,77	5-6	70,8-171
2450	47	2,21	5-5	96,4-213
3000	46	2,26	5-5	110-234
5000	44	3,92	5-5	162-309
5800	43,3	4,73	5-5	186-338
8000	40	7,65	4-7	255-431
10000	39,9	10,3	4-5	324-549

Tablo II-1

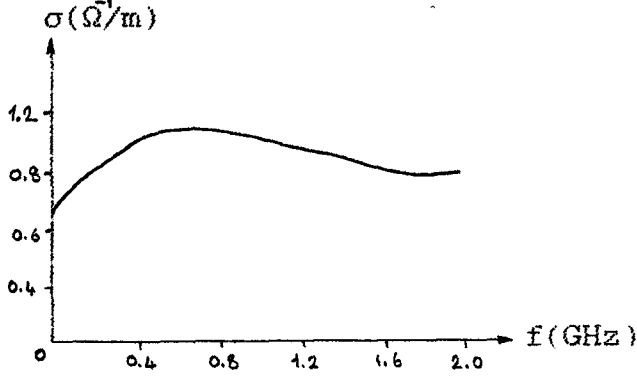
Tablo II-1 de görüldüğü gibi aynı frekans değerleri için fazla miktarda su içeren biyolojik dokuların dielektrik katsayıları az miktarda su içeren biyolojik dokuların dielektrik katsayılarından daha büyüktür. Elektriksel iletkenlik ise fazla miktarda su içeren biyolojik dokularda az miktarda su içeren biyolojik dokulara oranla daha küçüktür.

Farklı biyolojik dokuların 100-350 MHz'.de dielektrik katsayısı ve elektriksel iletkenlikleri Tablo II-2 gösterilmiştir.

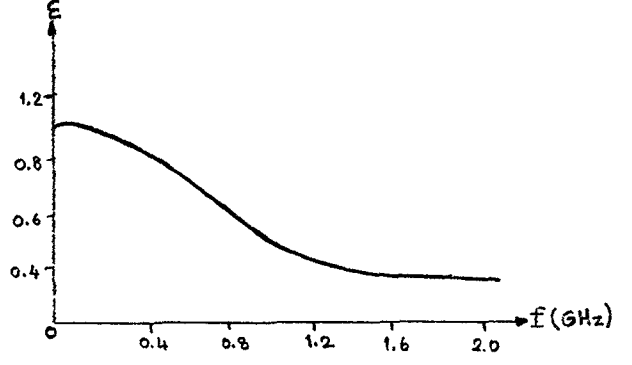
Biyolojik Doku	Dielektrik katsayısı f=100 MHz.	Elektriksel iletkenlik f=100 MHz.	Dielektrik katsayısı f=350 MHz.	Elektriksel iletkenlik f=350 MHz.
Kas	73,5	1,1	53,0	1,33
Yağ/kemik	7,5	0,067	5,7	0,072
Kan	74,0	1,1	65,0	1,2
Bağırsak	36,2	0,55	26,5	0,66
Kıkırdak	7,5	0,067	5,7	0,072
K.ciğer	77,0	0,62	50,0	0,82
Böbrek	90,0	1,01	53,0	1,16
Pankreas	90,0	1,01	53,0	1,16
Akciğer	75,0	1,03	35,0	1,1
Kalp	76,0	0,75	56,0	1,0
Sinir	82,0	0,53	60,0	0,65
Deri	24,5	0,55	17,6	0,44
Göz	85,0	1,9	80,0	1,9

Tablo II-2

Uygulanan elektromanyetik alan altında kanın dielektrik katsayısının ve elektriksel iletkenliğin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil II-5 ve Şekil II-6 da gösterilmiştir.

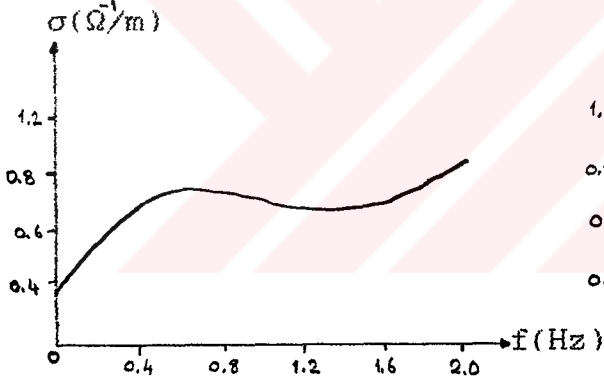


Şekil II-5 Kanın elektriksel iletkenliği

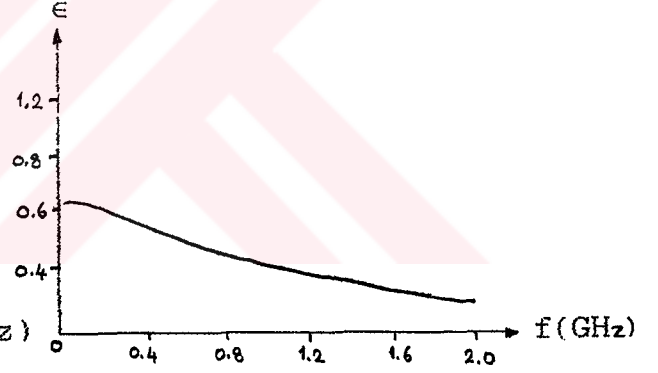


Şekil II-6 Kanın dielektrik katsayısı

Uygulanan elektromanyetik alan altında beynin dielektrik katsayısının ve elektriksel iletkenliğinin frekansa bağlı değişimi Şekil II-7 ve Şekil II-8 de gösterilmiştir.

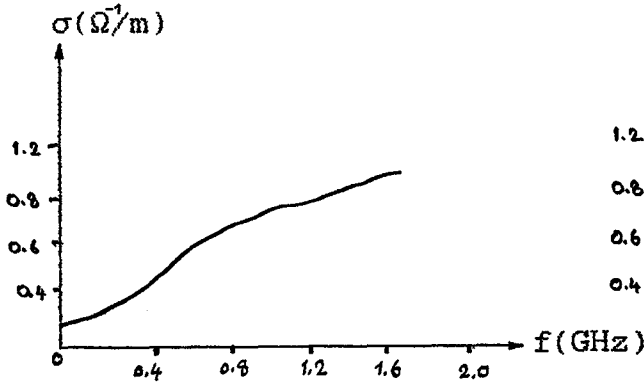


Şekil II-7 Beynin elektriksel iletkenliği

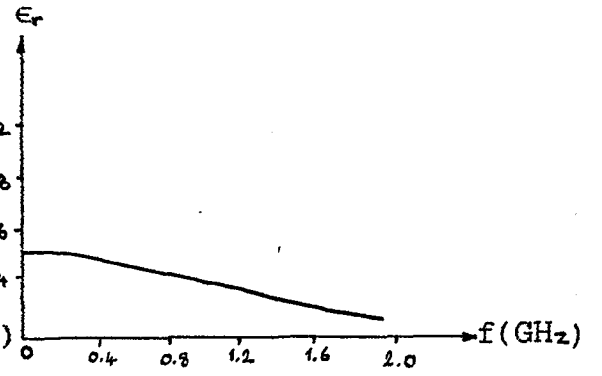


Şekil II-8 beynin dielektrik katsayısı

Kasın dielektrik katsayısı ve relativ dielektrik kayıp faktörünün frekansla değişimi Şekil II-9 ve Şekil II-10 görülmektedir.



Şekil II-9 Kasın elektriksel iletkenliği

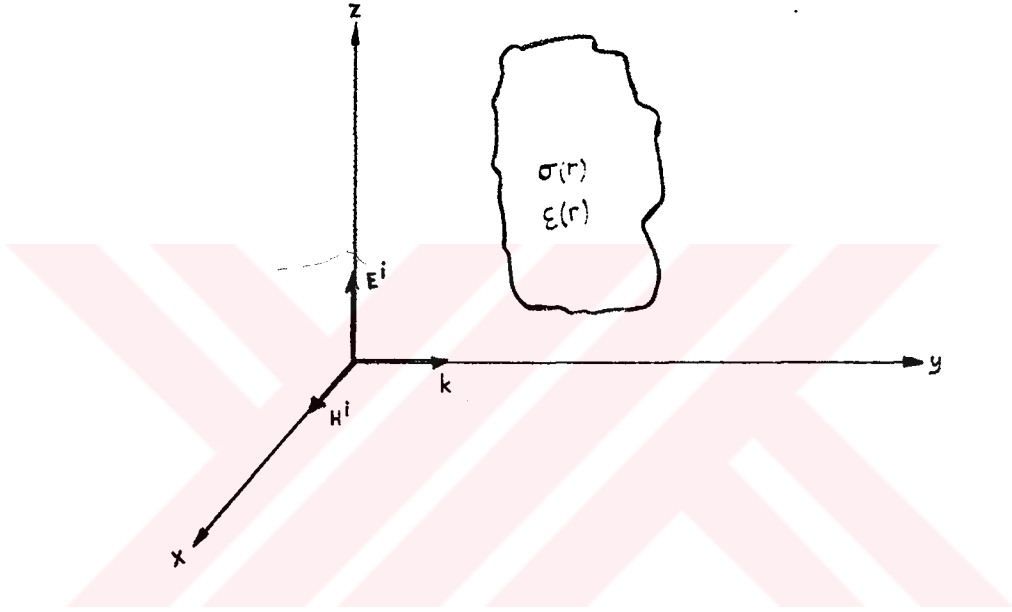


Şekil II-10 Kasın dielektrik katsayısı

BÖLÜM -III

III -1 ELEKTRİK ALAN INTEGRAL DENKLEMLERİNİN ÇIKARILMASI :

Şekil III-1 görüldüğü gibi herhangi bir biyolojik yapıyı elektromanyetik bir alana tabi tutulduğunu kabul edelim. Biyolojik yapının elektriksel iletkenliği $\sigma(r)$ dielektrik permittivitesi $\epsilon(r)$ olsun. Biyolojik ortamda indüklenen elektromanyetik alan, biyolojik ortamın saçılan bir elektrik alanı yaratmasına sebep olur.



Şekil III-1

Biyolojik yapı tarafında saçılan elektrik alanı elde etmek için biyolojik ortamı eşdeğer akım yoğunlukları cinsinde ifade edebiliriz.

$$\vec{J}_e(r) = [\sigma(r) + j\omega(\epsilon(r) - \epsilon_0)] \vec{E}(r) = \tau(r) \vec{E}(r) \quad (3-1)$$

3-1 nolu denklemdeki birinci terim kondüksiyon akımını ikinci terim ise polarizasyon akımını ifade etmektedir. ϵ_0 havanın dielektrik katsayısını ifade etmektedir. $\vec{E}(r)$ ise biyolojik ortamda indüklenen toplam elektrik alanını ifade etmektedir.

Saçılan elektrik alanı $\vec{E}^s(r)$ eşdeğer akım yoğunluğu $\vec{J}(r)$ ve Green Tensörü cinsinde ifade edilebilir. Maxwell denklemlerinden hareketle saçılan elektrik alanı bulunabilir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (3-2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{\vec{J}}{\mu_0} + \frac{j\omega}{c^2} \vec{E} \quad (3-3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3-4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3-5)$$

3-3 Nolu denklemin rotasyonelini aldığımızda şu denklemi elde ederiz.

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} + k^2 \vec{B} = -\mu_0 \vec{\nabla} \times \vec{J}$$

$$k = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (3-6)$$

3-2 Nolu denklemin rotasyonelini alıp süreklilik denklemini kullanarak yeniden düzenlersek 3-7 Nolu denklemi elde ederiz.

$$\vec{\nabla}^2 \left[\vec{E} - \frac{\vec{J}}{j\omega \epsilon_0} \right] + k^2 \left[\vec{E} - \frac{\vec{J}}{j\omega \epsilon_0} \right] = \frac{\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{J}}{j\omega \epsilon_0} \quad (3-7)$$

3-6 ve 3-7 nolu deklemlerin şu şekilde yazılabilir.

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{V_J - V_\delta} [\vec{\nabla}' \times \vec{J}(r')] \psi(r, r') dv' \quad (3-8)$$

$$\vec{E}(r) = \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon_0} \lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{V_J - V_\delta} [\vec{\nabla}' \times \vec{\nabla}' \times \vec{J}(r')] \psi(r, r') dv' \quad (3-9)$$

$\psi(r, r')$ skaler green fonksiyonunu göstermektedir. V_J bütün kaynakları içeren bir hacim olsun. V_δ $\psi(r, r')$ fonksiyonunun $r=r'$ noktasındaki tekliği içeren küçük bir hacim olsun.

3-8 ve 3-9 nolu denklemler 3-6 ve 3-7 nolu denklemlerin tek çözümleri olduklarından her durumda 3-6 ve 3-7 nolu denklemleri sağlarlar. 3-8 ve 3-9 nolu denklemler elektriksel akım yoğunluğunun türevlerinden soyutlayıp sade akım yoğunluklarını içeren integraller şekline dönüştürelim.

$$(\vec{\nabla}' \times \vec{J}) \psi = \vec{\nabla}' \times (\vec{J}\psi) - \vec{\nabla}' \psi \times \vec{J}$$

Vektörel özdeşliğini kullanarak 3-8 nolu denklem aşağıdaki şekilde yeniden düzenliyebiliriz.

$$\int_{V_J - V_\delta} (\vec{\nabla}' \times \vec{J}) \psi(r, r') dv' = \int_{V_J - V_\delta} \hat{n} \times \vec{J} \psi(r, r') ds' - \int_{V_J - V_\delta} \vec{\nabla}' \psi(r, r') \times \vec{J} dv' \quad (3-10)$$

$\hat{n}'$ vektörü V_δ hacminden dışa doğru olan birim vektör olsun. 3-10 nolu denklemin sol tarafındaki ilk integralde S_J yüzeyi kaynak bölgesi dışında seçildiğinden bu integralin sonucu sıfır olur. S_δ yüzey alanı δ sıfıra gittiğinde $\psi(r, r')$ $1/R$ nin fonksiyonu iken yüzey integrali $1/R^2$ nin fonksiyonu olduğundan integral sıfıra gidecektir. 3-10 nolu denlemi aşağıdaki şekilde yeniden düzenliyebiliriz.

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{V_\delta - V_J} (\vec{\nabla}' \times \psi(r, r') \vec{I}) \cdot \vec{J} dv' \quad (3-11)$$

$$\nabla' \psi \times \bar{J} = (\nabla' \times \psi \bar{I}) \cdot \bar{J}$$

3-11 nolu deklemden I birim diyadik olup şu özellik kullanılarak yazılmıştır. Kaynaksız ortamdaki manyetik diyadik Green fonksiyonu şu şekilde tanımlanabilir.

$$\bar{B}(r) = \mu_0 \int_{V_J - V_\delta} \bar{G}(r, r') \cdot \bar{J} dv' \quad (3-12)$$

Green fonksiyonu 3-11 nolu denklemden şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\bar{G}(r, r') = \frac{1}{4\pi} \nabla' \times (\psi(r, r') \bar{I}) \quad (3-13)$$

$$r \neq r'$$

Kaynaksız ortamdaki manyetik Green diyadik dalga denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$\nabla \times \nabla \times \bar{G} - k^2 \bar{G}(r, r') = \nabla \times [\delta(r, r') \bar{I}] \quad (3-14)$$

Vektörel özdeşliğini kullanarak kullanarak 3-9 nolu denklemi aşağıdaki şekilde düzenleyebiliriz.

$$\bar{E}(r) = - \frac{1}{j\omega\epsilon} \lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{V_J - V_\delta} \bar{G}(r, r') \cdot (\nabla \times \bar{J}) dv' \quad (3-15)$$

3-15 nolu denklemden elektrik alanı yalnızca $\bar{J}$ akım yoğunluğu cinsinde değil akım yoğunluğunun rotasyoneli cinsinde ifade edilmiştir.

$$\bar{G}(r, r') (\nabla' \times \bar{J}) = -(\nabla' \times \bar{J}) \cdot \bar{G}(r, r') = -\nabla' \cdot (\bar{J} \times \bar{G}(r, r') - \bar{J} \cdot \nabla' \times \bar{G}(r, r')) \quad (3-16)$$

Vektörel özdeşliğini ve divergent teoremini kullanarak elektrik alanını şu şekilde yeniden düzenleyebiliriz.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{V_j - V_\delta} (\vec{\nabla}' \times \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{J} \, dv' + \int_{V_j - V_\delta} (\vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{\nabla}) \vec{J} \, ds' + \vec{J} \quad (3-17)$$

3-17 nolu denklemi 3-13 nolu deklemi kullanarak şu şekilde yeniden düzenliyebiliriz.

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{S_\delta} (\vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{\nabla}) \vec{J} \, ds' = \frac{1}{4\pi} \left[\lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{S_\delta} (\vec{I} \times \vec{\nabla}' \psi(\vec{r}, \vec{r}')) \times \hat{n} \, ds' \right] + \vec{J} \quad (3-18)$$

$\psi(\vec{r}, \vec{r}')$ fonksiyonunun gradyentini şu şekilde açabiliriz.

$$\vec{\nabla}' \psi(\vec{r}, \vec{r}') = \left[jk - \frac{1}{R} \right] \hat{e} \frac{e^{jkR}}{R} \quad (3-19)$$

$\hat{e}$ birim vektörünü şu şekilde ifade edilirse.

$$\hat{e} = \vec{R}/R = (\vec{r}' - \vec{r})/|\vec{r} - \vec{r}'|$$

3-18 nolu denklemin sağ tarafı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{1}{4\pi} \left[\lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{S_\delta} \frac{(\vec{I} \times \hat{e}) \times \hat{n}}{R^2} \, ds' \right] \cdot \vec{J} \quad (3-20)$$

δ sıfıra gittiğinde jk terimi sıfıra gidecektir.

$(\vec{I} \times \hat{e}) \times \hat{n} = \hat{n} \hat{e} - (\hat{n} \cdot \hat{e}) \vec{I}$
Vektörel özdeşliğini kullanarak 3-20 nolu terimi şu şekilde düzenliyebiliriz.

$$\left[\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{4\pi} \int_{S_\delta} \frac{(\hat{n} \cdot \hat{e})}{R^2} ds' - \bar{I} \right] \cdot \bar{J} \quad (3-21)$$

3-21 nolu denklemi 3-17 nolu denklemde yerine koyarsak elektrik alanını şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\bar{E}(r) = j\omega\mu_0 \lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{V_j - V_\delta} \bar{G}(r, r') \cdot \bar{J} dv' + \bar{E}_0 \quad (3-22)$$

3-22 nolu denklemde elektrik Green diyadik fonksiyonu şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\bar{G}'(r, r') = \frac{-1}{k^2} \nabla' \times \bar{G}(r, r') = \frac{1}{k^2} \bar{\nabla} \times \bar{G}(r, r') \quad (3-23)$$

$r \neq r'$

3-13 nolu eşitliği 3-23 nolu denklemde yerine yazarsak elektrik Green diyadik fonksiyonunu şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\bar{G}'(r, r') = \frac{1}{4\pi k^2} \nabla \times \nabla \times (\psi(r, r')) \frac{1}{4\pi} \left[\bar{I} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \right] \psi(r, r') \quad (3-24)$$

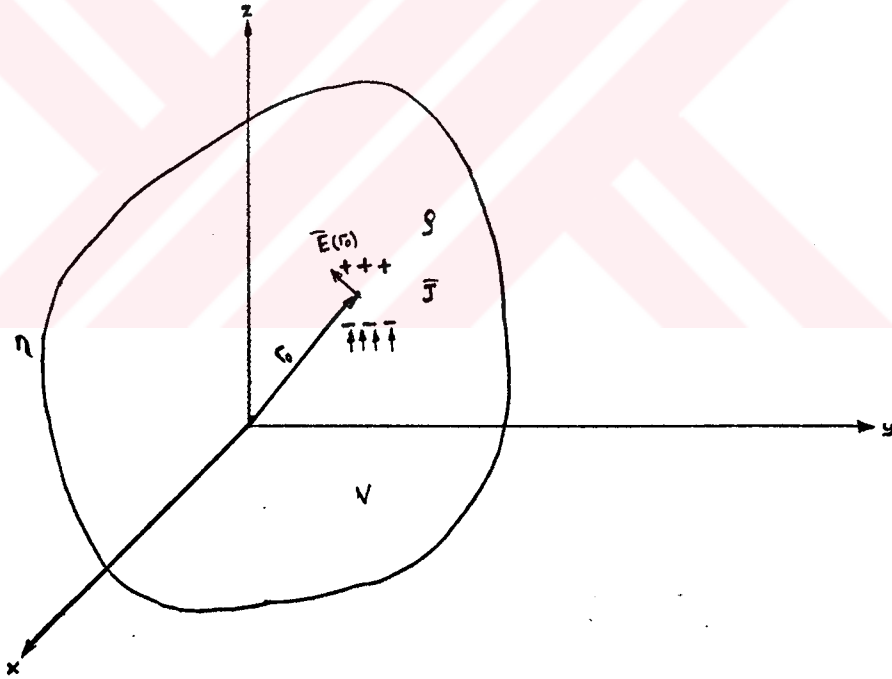
3-24 nolu Green diyadik fonksiyonu Green dalga denkleminin çözümü olup şu şekilde ifade edilebilir.

$$\bar{\nabla} \times \bar{\nabla} \times \bar{G}'(r, r') - k^2 \bar{G}'(r, r') = \delta(r, r') \quad (3-25)$$

3-22 nolu denklemde birinci terim elektrik alan ifadesinin esas değerini ifade ettiğinden bu terime esas değeri göstermesi için integral önüne ED kısaltmasını koyacağız. İkinci terim yalnızca kaynak noktasında seçilen hacmin geometrik şekline bağlıdır. 3-24 nolu denklemi yeniden düzenleyerek şu şekilde yazabiliriz.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \int_{V'} \vec{J}_{es}(\vec{r}') \cdot \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') dV' + E_o \quad (3-26)$$

Şekil III-2 de görüldüğü gibi $\vec{E}$ elektrik alanını orijine r uzaklığındaki V hacmi içerisindeki $\vec{J}$ akım yoğunluğu ve V hacminin yüzeyinde oluşan η yüzeysel yük yoğunluğunun meydana getirdiğini kabul edelim.



Şekil III-2

V hacmi içerisindeki $\vec{J}$ akım yoğunluğunu şu şekilde alalım

$$\vec{J} = \hat{r} J \quad (3-27)$$

$$\nabla \cdot \bar{J} = j\omega\rho \quad (3-28)$$

Süreklilik denkleminin her iki tarafını V hacmi üzerinde integre edip divergant teoremini kullanırsak yüzeysel yük yoğunluğunu şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\frac{Q}{\Delta S} = \frac{J \cos\theta}{j\omega} = \eta \quad (3-29)$$

V hacmi içerisindeki J akım yoğunluğunu sabit kabul edelim. V hacmi içerisindeki E_0 elektrik alanını skaler ve vektörel potansiyeller cinsinde şu şekilde ifade edebiliriz.

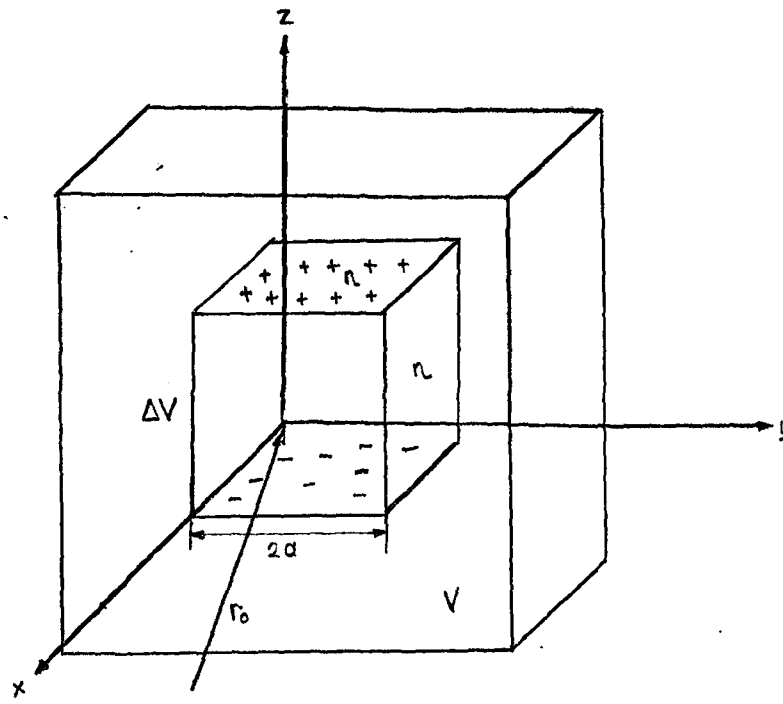
$$\bar{E}_0 = -\nabla\phi - j\omega\bar{A} \quad (3-30)$$

Eğer V hacmini çok küçük seçersek quasi-statik yaklaşımda bulunabileceğimizden ϕ skaler potansiyeli ve $\bar{A}$ vektörel potansiyeli şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Delta S} \frac{\eta}{R} ds \quad (3-31)$$

$$\bar{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Delta V} \frac{\bar{J}}{R} dv \quad (3-32)$$

R kaynak noktası ile alan noktası arasındaki uzaklığı göstermektedir. V hacmi sifıra yaklaştığı zaman $\bar{A}$ vektörel potansiyeli sifıra gidecektir. E_0 elektrik alanı küpler şeklinde modelleme seçildiği için Şekil II-3 te görüldüğü gibi şu şekilde ifade edebiliriz.



Şekil III-3

2a kübün kenar uzunluklarını η kübün yüzeysel yük yoğunluğunu r_0 merkeze olan uzaklığı J akım yoğunluğunu göstermektedir.

V hacmi içerisinde oluşan elektrik alanını kartezyen koordinatlarda şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\vec{E}_0(r) = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{-2z}{4\pi\epsilon_0} \int_{-a}^a \int_{-a}^a \frac{\eta a}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dx dy \quad (3-33)$$

3-33 nolu integrali çözersek $\vec{E}_0$ düzeltme terimini şu şekilde elde ederiz.

$$\vec{E}_0(r) = \frac{jJ}{\omega\epsilon_0} \left[\frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{ds}{(1+s^2)\sqrt{2+s^2}} \right] = \frac{jJ}{3\omega\epsilon_0} \quad (3-34)$$

3-34 nolu deklemdede elde ettiğimiz düzeltme terimini 3-26 nolu denklemdede yerine yazarsak saçılan elektrik alanını şu şekilde yazabiliriz.

$$\bar{E}^s(r) = ED \int_v \bar{J}_{es}(r) \cdot \bar{G}(r,r) dv - \frac{\bar{J}}{3j\omega\epsilon} \quad (3-35)$$

Biyolojik bir sistemde toplam elektrik alanı sisteme gelen ve sistem tarafında saçılan elektrik alanlarının toplamına eşittir. Gelen elektrik alanını E^i saçılan elektrik alanını E^s ile ifade edersek toplam elektrik alanı E şu şekilde yazabiliriz.

$$\bar{E}(r) = \bar{E}^i(r) + \bar{E}^s(r) \quad (3-36)$$

3-35 nolu denklemi 3-36 nolu denklemdede yerine yazarsak toplam elektrik alanını şu şekilde elde ederiz.

$$\bar{E}(r) = \bar{E}^i(r) + ED \int_v \tau(r) \bar{E}(r) \cdot \bar{G}(r,r) dv - \frac{\tau(r) \bar{E}(r)}{3j\omega\epsilon} \quad (3-37)$$

E^i elektrik alanı bilinen bir değer E toplam elektrik alanı ise bilinmeyen bir değeri ifade etmektedir. Bilinmeyen değerleri eşitliğin bir tarafına toplar 3-37 nolu denklemi yeniden düzenlersek şu şekilde elde ederiz.

$$\bar{E}^i(r) = \left[1 + \frac{\tau(r)}{3j\omega\epsilon} \right] \bar{E}(r) - ED \int_v \tau(r) \bar{E}(r) \cdot \bar{G}(r,r) dv \quad (3-38)$$

III- 2 ELEKTRİK ALAN INTEGRAL DENKLEMİNİN MOMENT METODU İLE ÇÖZÜMÜ :

3-38 Nolu denklem bir elektrik alan integral denklemidir. Bu elektrik alan integral denklemini üç boyutlu uzayda moment metodu ile çözeceğiz. 3-38 nolu denklemde integral altındaki ifadeyi iç çarpım özelliklerini kullanarak üç boyutlu uzayda şu şekilde yazabiliriz.

$$\vec{E}(r') \cdot \vec{G}(r, r') = \begin{bmatrix} \bar{G}_{xx}(r, r') & \bar{G}_{xy}(r, r') & \bar{G}_{xz}(r, r') \\ \bar{G}_{xy}(r, r') & \bar{G}_{yy}(r, r') & \bar{G}_{zy}(r, r') \\ \bar{G}_{zx}(r, r') & \bar{G}_{zy}(r, r') & \bar{G}_{zz}(r, r') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(r') \\ E_y(r') \\ E_z(r') \end{bmatrix} \quad (3-39)$$

$x=x^1$ $y=x^2$ $z=x^3$ alırsak matriste Green tensörünü şu şekilde düzenliyebiliriz.

$$\bar{G}_{x^p x^q}(r, r') = -j\omega\mu_0 \left[\delta_{pq} + \frac{1}{k_o^2} \frac{\partial^2}{\partial x_q \partial x_p} \right] \psi(r, r') \quad (3-40)$$

$p, q=1, 2, 3$

3-39 Nolu denklemdeki matris simetrik bir matris olduğundan 3-38 Nolu denklemdeki skaler elemanları şu şekilde yazabiliriz.

$$\left[1 + \frac{\tau(r)}{3j\omega\epsilon_0} \right] E_{x^p}(r') - \frac{1}{3j\omega\epsilon_0} \int_V \tau(r) \left[\sum_{q=1}^3 \bar{G}_{x^p x^q}(r, r') E_{x^q}(r') \right] dv = E_{x^p}^i(r') \quad (3-41)$$

3-38 Nolu denklemi moment metodu kullanarak matrisel denkleme dönüştürebiliriz.

Elektrik alanını hesaplayacağımız biyolojik sistemi N tane küçük kübe bölelim. Bu küpler içerisinde toplam elektrik alanı $\bar{E}(r')$ ve $\tau(r')$ sabit kabul edelim. m nolu kübün hacmi ile gösterelim. V_m hacminin merkezinin orijine olan uzaklığı r_m ile gösterelim. Üç boyutlu N elemanla gösterilen biyolojik sistem 3-41 nolu denkleme uyarlandığında 3-41 nolu denklem şu şekilde yeniden yazılabilir.

$$\left[1 + \frac{\tau(r'_m)}{3j\omega\epsilon_0} \right] \bar{E}_{xp}(r'_m) - \sum_{q=1}^3 \sum_{n=1}^N \left[\tau(r'_n) ED \int_V \bar{G}_{xp \times q}(r'_m, r') dv' \right] \bar{E}_{xq}(r'_n) = \bar{E}_{xp}(r'_m) \quad (3-42)$$

3-42 nolu denklemdeki integral altındaki ifadeyi olarak alalım.

$$\bar{G}'_{xp \times q}{}^{mn} = \tau(r'_n) ED \int_V \bar{G}_{xp \times q}(r'_m, r') dv' \quad (3-43)$$

3-43 nolu denklemi kullanarak 3-42 nolu denklemi şu şekilde yazabiliriz.

$$\sum_{q=1}^3 \sum_{n=1}^N \left[\bar{G}'_{xp \times q}{}^{mn} - \delta_{pq} \delta_{mn} \left[1 + \frac{\tau(r'_m)}{3j\omega\epsilon_0} \right] \right] \bar{E}_{xq}(r'_n) = - \bar{E}_{xp}(r'_m) \quad (3-44)$$

$$\begin{aligned} m &= 1, 2, 3, \dots, N \\ p &= 1, 2, 3 \end{aligned}$$

mn

$\bar{G}_{xp \times q}$ matrisini NxN elemanlı bir matris olarak alırsak

şu şekilde yeniden tanımlıyabiliriz.

$$\bar{G}_{xp \times q}{}^{mn} = \bar{G}'_{xp \times q}{}^{mn} - \delta_{pq} \delta_{mn} \left[1 + \frac{\tau(r'_m)}{3j\omega\epsilon_0} \right] \quad (3-45)$$

$[\bar{E}_{xp}]$ ve $[\bar{E}_{xp}^i]$ N boyutlu vektörler olarak şu şekilde tanımlanabilirler.

$$[\bar{E}_{xp}] = \begin{bmatrix} \bar{R}_{xp}^{(r1)} \\ \vdots \\ \bar{R}_{xp}^{(rN)} \end{bmatrix} \quad [\bar{E}_{xp}^i] = \begin{bmatrix} \bar{R}_{xp}^{(r1)} \\ \vdots \\ \bar{R}_{xp}^{(rN)} \end{bmatrix} \quad (3-46)$$

3-42 nolu denklemi m ve p 'nin bütün değerleri için 3-38 nolu denklemi matris formunda şu şekilde yazabiliriz.

$$\begin{bmatrix} [\bar{G}_{xx}] & [\bar{G}_{xy}] & [\bar{G}_{xz}] \\ [\bar{G}_{yx}] & [\bar{G}_{yy}] & [\bar{G}_{yz}] \\ [\bar{G}_{zx}] & [\bar{G}_{zy}] & [\bar{G}_{zz}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\bar{E}_x] \\ [\bar{E}_y] \\ [\bar{E}_z] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{E}_x^i] \\ [\bar{E}_y^i] \\ [\bar{E}_z^i] \end{bmatrix} \quad (3-47)$$

3-47 nolu matris denklemini kısaca şu şekilde gösterebiliriz.

$$[G][E] = -[E^i] \quad (3-48)$$

$[G]$ matrisi $3N \times 3N$ $[\bar{E}]$ ve $[\bar{E}^i]$ matrisi $3N$ boyutlu vektörlerdir. Biyolojik ortamın her bir N noktasındaki toplam elektrik alanını bulabilmek için 3-48 nolu denklemde $[G]$ matrisinin tersini alıp denklemin her iki tarafını $[G]$ matrisinin tersi ile çarpar denklem sistemini çözersek her noktadaki elektrik alanını bulabiliriz.

$[\bar{G}_{xp \times q}]$ matrisinin elemanları 3-43 ve 3-45 nolu denklemlerde tanımlanmıştır. $[\bar{G}_{xp \times q}]$ matrisini şu şekilde yazabiliriz.

$$\bar{G}_{xp xq}^{nn} = \tau(r_n) \int_{V_n} \bar{G}_{xp xq}^{(r_n r_n)} dv - \delta_{pq} \left[1 - \frac{\tau(r_n)}{3j\omega\epsilon_0} \right] \quad (3-49)$$

$[\bar{G}_{xp xq}]$ matrisinde r_m nin V_m hacminin elemanı olmadığı açıkça görülmektedir. Dolayısı ile $\bar{G}_{xp xq}^{(r_m r_m)}$ fonksiyonunun V_n içerisinde sürekli. Integral önündeki ED (esas değer) ifadesini çıkarabiliriz. Ters diagonal elemanları şu şekilde yazılabilir.

$$\bar{G}_{xp xq}^{mn} = \tau(r_n) \int_{V_n} \bar{G}_{xp xq}^{(r_m r_m)} dv' \quad m \neq n \quad (3-50)$$

Integral ifadesi altındaki dv' şu şekilde alabiliriz.

$$\int_{V_n} dv' = \Delta V_n \quad (3-51)$$

3-50 nolu ifadeyi 3-51 nolu eşitliği kullanarak şu şekilde yeniden ifade edebiliriz.

$$\bar{G}_{xp xq}^{mn} = \tau(r_n) \bar{G}_{xp xq}^{(r_m r_m)} \Delta V_n \quad m \neq n \quad (3-52)$$

3-40 nolu denklemi kullanarak $\bar{G}_{xp xq}^{(r_m r_m)}$ ifadesini açarsak şu ifadeyi elde ederiz.

$$\bar{G}_{xp xq}^{mn} = \frac{-j\omega\mu_0 \cos(\theta_{mn}) \Delta V_n \exp(-j\alpha_{mn})}{4\pi\alpha_{mn}^3} [\alpha_{mn}^2 - 1 - j\alpha_{mn}] \delta_{pq} + \cos(\theta_{xp}^{mn}) \cos(\theta_{xq}^{mn}) [3 - \alpha_{mn}^2 + 3j\alpha_{mn}] \quad (3-53)$$

Burada

$$\alpha_{mn} = k_0 R_{mn}$$

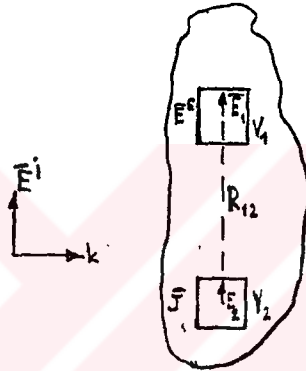
$$R_{mn} = |r_m - r_n|$$

$$\cos \theta_{x_p}^{mn} = \frac{(x_p^m - x_p^n)}{R_{mn}}$$

$$\cos \theta_{x_q}^{mn} = \frac{(x_q^m - x_q^n)}{R_{mn}}$$

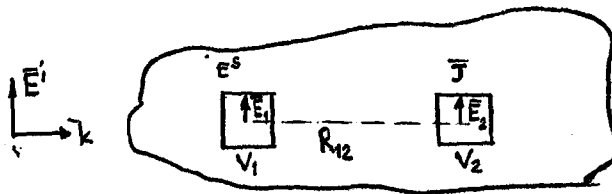
r^m ve r^n x_1, x_2, x_3 değişkenlerinin fonksiyonlarıdır. Eğer N değeri yeteri kadar büyük seçilirse 3-52 ve 3-53 nolu denklem sonuçları istenilen hassasiyette sonuç verir. Daha iyi bir sonuç elde edilmek istenirse 3-50 nolu denklemde integral uygun bir metotla nümerik olarak elde edilebilir.

Eğer elektromanyetik alana tabi tutulan biyolojik yapı elektrik alan bileşenine Şekil III-4 te görüldüğü gibi paralel bir şekilde konulursa 3-50 nolu integralde hasas bir sonuç elde edilmiş olur.



Şekil III-4

Şekil III-4 de V_2 hacminde saçılan elektrik alanı V_1 hacmindeki J elektrik akım yoğunluğunu artıran yönde etkileyeceğinden V_1 hacmindeki elektrik alanı Şekil III-5 te görülen elektrik alanının yaklaşık iki katı olacaktır.



Şekil III-5

Şekil III-5 ve Şekil III-4 te V_1 ve V_2 hacimleri arasındaki uzaklıklar eşit ve $k R_{12} < 1$ olmasına rağmen Şekil III-5 te V_1 ve V_2 hacimlerinde saçılan elektrik alanları akım yoğunluklarını kompanse etmediklerinden Şekil III-4 de nazaran daha az bir elektrik alanı oluşur.

3-49 nolu dekleme $[G_{xp \times q}]$ matrisinin diagonal elemanları için düzenlersek şu şekilde yazabiliriz.

$$\bar{G}_{xp \times q}^{nn} = \tau(r_n) ED \int_{V_n} \bar{G}_{xp \times q}(r_n, r') dv' - \delta_{pq} \left[1 - \frac{\tau(r_n)}{3j\omega\epsilon_0} \right] \quad (3-54)$$

3-54 nolu denklemi tam olarak çözebilmek için V_n hacmini r_n merkezli küresel bir hacim olarak alalım. 3-54 nolu dekleme integral altındaki ifadeyi şu şekilde tanımlıyalım.

$$\bar{I}_{x_p \times x_q}^n = ED \int_{V_n} \bar{G}_{x_p \times x_q}(r_n, r') dv' \quad (3-55)$$

r merkezli kürelerin yarı çapları a_n olsun. a_n yarıçapını V_n hacmi cinsinde şu şekilde ifade edebiliriz.

$$a_n = \left[\frac{3\Delta V_n}{4\pi} \right]^{1/3} \quad (3-56)$$

3-40 nolu denklemi kaynak bölgesi için şu şekilde yazabiliriz.

$$\bar{G}_{x_p \times x_q}(r, r') = -j\omega\mu_0 \left[\delta_{pq} + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_q \partial x_p} \right] \psi(r, r') \quad (3-57)$$

$G_{x_p x_q}(r, r')$ yalnızca $|r - r'|$ fonksiyonudur. r' ni cordinat sisteminin merkezi olarak alırsak $r = 0$ $\Psi(r, r')$ Green fonksiyonunu $\Psi(r')$ olarak alabiliriz.

$$\psi(r_n, r') = \psi(r') = \frac{e^{-jk_0 r'}}{4\pi r'} \quad (3-58)$$

Ψ fonksiyonunu ikinci difrensiyelini küresel kordinatlarda şu şekilde açabiliriz.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_q \partial x_p} = \frac{d^2 \psi}{dr^2} \frac{x_p}{r} \frac{x_q}{r} + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} \left[\delta_{pq} - \frac{x_p}{r} \frac{x_q}{r} \right] \quad (3-59)$$

$f_{x_p x_q}(\theta, \phi)$ şu şekilde tanımlarsak.

$$f_{x_p x_q}(\theta, \phi) = \frac{x_p}{r} \frac{x_q}{r} \quad (3-60)$$

3-59 ve 3-60 nolu tanımlamaları kullanarak 3-55 nolu eşitliği şu şekilde yeniden düzenliyebiliriz.

$$\begin{aligned} I_{x_p x_q}^n = & -j\omega\mu_0 \lim_{\eta \rightarrow 0} \int_{\eta}^a dr \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \left[\psi \delta_{pq} + \frac{1}{k_0^2} \left[\frac{d\psi}{dr^2} f_{x_p x_q}(\theta, \phi) \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} (\delta_{pq} - f_{x_p x_q}(\theta, \phi)) \right] \right] r^2 \sin\theta d\theta \end{aligned} \quad (3-61)$$

3-61 nolu denklemde integralleri şu şekilde yazabiliriz.

$$\begin{aligned}
 I_{x_p x_q}^n = & -j\omega\mu_0 \lim_{\eta \rightarrow 0} \int_{\eta}^{a_n} dr \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \left[\delta_{pq} \psi r^2 \sin\theta + \frac{1}{k_o^2} \left[r^2 \frac{d\psi^n}{dr} \right]_{\eta}^{\pi} \right] d\phi \int_0^{\pi} f_{x_p x_q}(\theta, \phi) \sin\theta d\theta \\
 & + \frac{1}{k^2} \int_0^{\pi} (\delta_{pq} - 3f_{x_p x_q}(\theta, \phi)) \sin\theta d\theta \int_{\eta}^{a_n} \frac{d\psi}{dr} r dr \quad (3-62)
 \end{aligned}$$

3-62 nolu denklemde eşitliğin sağ tarafındaki üçüncü terimde

$$\int_{\eta}^{a_n} \frac{d\psi}{dr} r dr$$

n sıfıra gittikçe integral sonsuza gitmektedir. Bununla birlikte 3-62 nolu deklemdaki üçüncü terim

$$\int_0^{\pi} d\phi \int_0^{\pi} (\delta_{pq} - 3f_{x_p x_q}(\theta, \phi)) \sin\theta d\theta = 0 \quad (3-63)$$

$$p, q = 1, 2, 3$$

sıfır olmaktadır. 3-62 nolu denklemin üçüncü terimi n nin bütün tanımlı değerleri için sıfır olmaktadır. n sıfıra gittiği zaman terim sıfır olmaktadır.

3-62 nolu denklemin ilk terimini integre edersek şu sonucu elde ederiz.

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} f_{x_p x_q}(\theta, \phi) \sin\theta d\theta = \frac{4\pi}{3} \delta_{pq} \quad (3-64)$$

3-62 nolu deklemi şu şekilde elde ederiz.

$$\bar{I}_{x_p x_q}^n = -j\omega\mu_0 \delta_{pq} \lim_{\eta \rightarrow 0} \left[\int_{\eta}^{a_n} dr \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \psi r^2 \sin\theta d\theta + \frac{4\pi}{3k_0^2} r^2 \frac{d\psi}{dr} \right]_{\eta}^{a_n} \quad (3-65)$$

3-65 nolu denklemde integralleri çözersek şu sonucu elde ederiz.

$$\bar{I}_{x_p x_q}^n = \frac{-2j\omega\mu_0 \delta_{pq}}{3k_0^2} \left[e^{-jk_0 a_n} (1 + jk_0 a_n) - 1 \right] \quad (3-66)$$

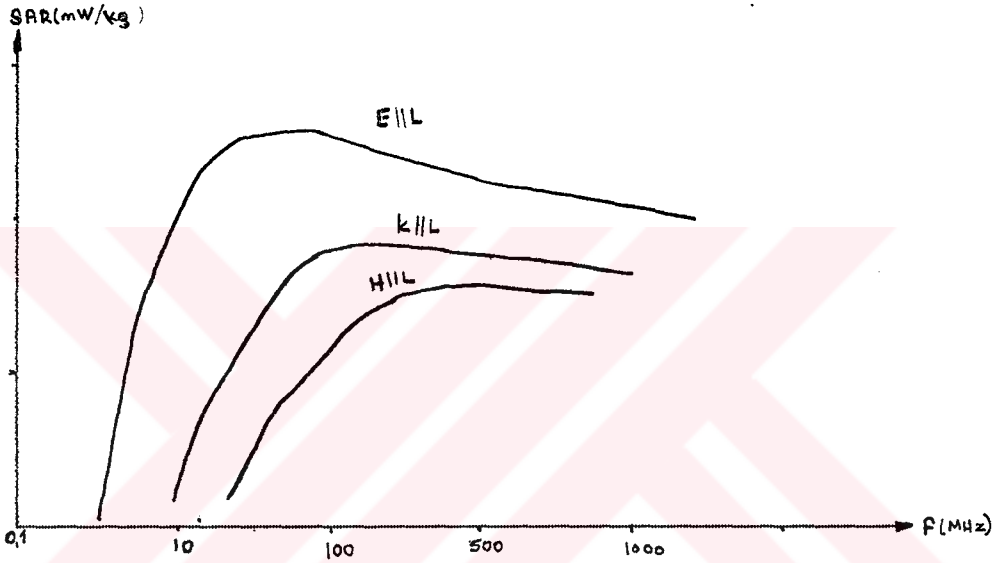
3-66 nolu denklemi 3-54 nolu denklemde yerine koyarsak şu denklemi elde ederiz.

$$\bar{G}_{x_p x_q}^{nn} = \delta_{pq} \left[\frac{-2j\omega\mu_0 \tau(rn)}{k_0^2} \exp(-jk_0 a_n) (1 + jk_0 a_n) - 1 \right] \left[1 + \frac{\tau(rn)}{3j\omega\epsilon_0} \right] \quad (3-67)$$

BÖLÜM _ IV

IV_I BİYOLOJİK YAPIDA MAKSİMUM ALANIN İNDÜKLENMESİ

Biyolojik Alan içinde maksimum alanın indüklenmesi, biyolojik yapının uygulanan elektromanyetik alana göre pozisyonuna bağlıdır. Uygulanan elektromanyetik alanın elektrik alan bileşenini "E"; manyetik alan bileşenini "H"; propagasyon vektörünü "k"; ve biyolojik yapının uzunluğunu "L" ile gösterelim. Uygulanan elektrik alan bileşeni, manyetik alan bileşeni veya propagasyon vektörünün biyolojik yapıya paralel olmaları halinde aynı şiddette uygulanan elektromanyetik alan kuvveti için, farklı şiddetlerde alanların indüklendiği yapılan deneylerle gözlenmiştir.



Şekil IV_I

Şekil IV_I de görüldüğü gibi elektromanyetik alan bileşeninin biyolojik yapı boyuna paralel olması halinde, maksimum alanın indüklendiği görülmektedir. Propagasyon vektörünün biyolojik yapının boyuna paralel olması halinde, elektrik alan bileşeninin biyolojik yapı boyuna göre paralel olmasından daha az, fakat manyetik alan bileşeninin biyolojik yapı boyuna paralel olmasından daha fazla alan indüklendiği şekilde görülmektedir.

IV_II BİYOLOJİK YAPILARDA SAR HESABI

Biyolojik yapıda indüklenen elektromanyetik alan biyolojik yapının elektriksel özelliklerine bağlıdır. Bir biyolojik yapıda indüklenen elektromanyetik enerji "Poynting" teoreminden hareketle şu şekilde hesaplanabilir:

$$W = \int_V \nabla \cdot (E \times H^*) dv \quad (4-1)$$

V hacminde indüklenen elektromanyetik enerji; ortamın elektriksel iletkenliğinden ve dielektriksel iletkenliğin kayıp faktöründen dolayı ortam içerisinde ısıya dönüşür.

Sistem içerisinde kaybolan toplam enerji şu şekilde bulunabilir:

$$W = - \int_V (H \cdot \frac{\partial B}{\partial t}) dv + \int_V E \cdot \frac{\partial D}{\partial t} dv + \int_V (E \cdot J) dv \quad (4-2)$$

Ortamda kaybolan enerjiyi şu şekilde bulabiliriz:

$$W_0 = \frac{1}{2} \int_V \frac{H^2}{\mu} dv + \int_V \epsilon |E|^2 dv + \frac{1}{2} \int_V \sigma |E|^2 dv \quad (4-3)$$

Dielektriksel iletkenlik kayıp faktörünü içerdğinde:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

$$\epsilon = \epsilon' - j \frac{\sigma}{2\pi f}$$

Sistemde toplam kaybolan enerji şu şekilde bulunur:

$$W_0 = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \int_V \epsilon_r |E|^2 dv + \frac{1}{2} \int_V \sigma |E|^2 dv \quad (4-4)$$

Düşük frekanslarda 4-4 No' lu denkleme ϵ_0 katsayısı "W" değerinden çok küçük olduğundan, enerji şu şekilde yazılabilir:

$$W_0 = \frac{1}{2} \int_V \sigma |E|^2 dv \quad (4-5)$$

Cok yüksek frekanslar için 4-4 No' lu denklem şu şekilde yazılabilir:

$$W_0 = \frac{1}{2} \omega_0 \epsilon_0 \int_V \epsilon_1'' |E|^2 dv \quad (4-6)$$

Mikrodalga frekanslarında " ϵ_0 " çok küçük olduğu için 4-4 No' lu denklemin ikinci terimi etkili olacağından, enerji hesaplamasında 4-5 No' lu denklem kullanılacaktır.

$$J = \sigma E \quad (4-7)$$

4-7 No' lu eşitlik kullanılarak 4-5 No' lu denklemi şu şekilde yazabiliriz:

$$W_0 = \frac{1}{2} \int_V \sigma \frac{I^2}{\sigma^2} dv \quad (4-8)$$

Biyolojik yapı tarafından emilen birim kütlede harcanan enerjiye SAR denir. 4-8 No' lu denklemden ortalama SAR değerini V hacminde şu şekilde yazabiliriz:

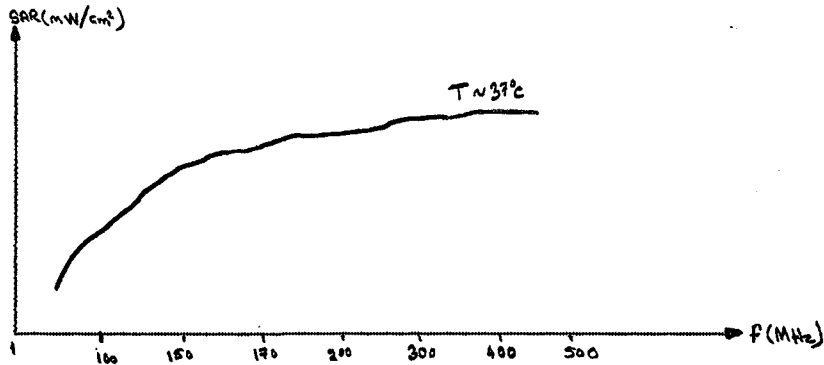
$$W_0 = \frac{1}{2} \frac{J^2}{\sigma} V \quad (4-9)$$

Ortalama SAR değerini 4-9 No' lu denklemden şu şekilde yazabiliriz:

$$SAR = \frac{1}{2\sigma} \frac{J^2}{9} \quad W/kg \quad (4-10)$$

4-10 No' lu denklemden 9 biyolojik yapının yoğunluğunu göstermektedir.

1 mW/cm² lik bir elektromanyetik alanın biyolojik yapı boyunca elektrik alan bileşenine paralel olarak yerleştirildikten sonra hesaplanan ortalama SAR değerinin frekansla değişimi Şekil IV-2 de görülmektedir.



Şekil IV - 2

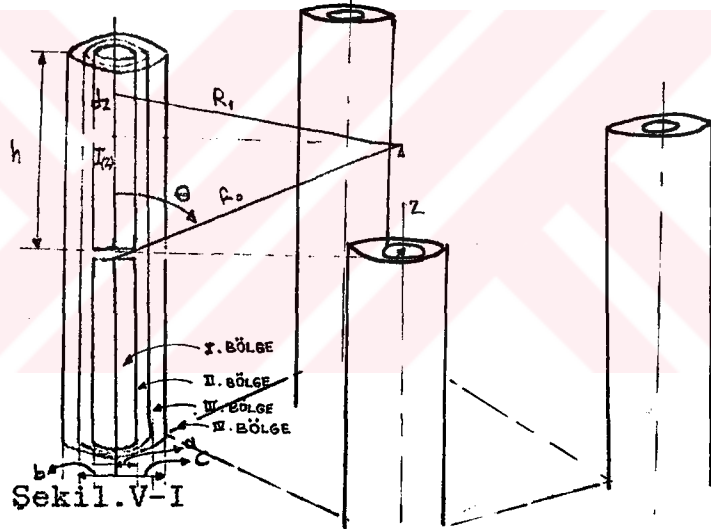
BÖLÜM -V :

V - 1 ANTEN APLİKATÖRLERİNİN İNCELENMESİ :

Elektromanyetik enerjinin bir ortama uygulanabilmesi için doğal olarak bir antene ihtiyaç vardır. Kanser teşhis ve tedavisinde microscript, helix, dipol gibi farklı antenler kullanılmaktadır. Bu araştırmada dipol anten applikatör olarak kullanılacaktır. Bölüm -III 'te bir biyolojik ortama elektromanyetik alan uygulandığında biyolojik ortamın elektromanyetik alanın saçılmasına sebep olduğunu, biyolojik ortamın elektriksel özellikleri kullanılarak eşdeğer akım yoğunluğu cinsinde ifade edilebileceği belirtilmişti.

Bir dokuya istenilen miktarda enerji verebilmek için anten applikatörlerine verilen enerjiyi değiştirmekle birlikte anten applikatörlerinin uygun bir şekilde yerleştirilmeside gereklidir.

Bir dokuda istenilen miktarda elektromanyetik enerjinin indüklenmesi amacıyla Şekil.V-I görüldüğü gibi dört anten eşit uzaklıklarda yerleştirilmiştir.



Antenler doku içerisine yerleştirilmeleri halinde ortam iletkenlikleri ve dielektriksel özellikler göz önünde bulundurularak (3-1) nolu eşitlik şu şekilde yazılabilir.

$$J_{es}(r) = \left[(\sigma(r) - \sigma_d) + j\omega\epsilon_0(\epsilon_r(r) - \epsilon_{rd}) \right] E(r) \quad (5-1)$$

Dış ortamı kayıplı bir ortam olarak düşünerek dielektriksel katsayısını şu şekilde ifade edelim.

$$\epsilon_d^* = \epsilon_0 \epsilon_{rd} + \frac{j\sigma_d}{\omega\epsilon_0} \quad (5-2)$$

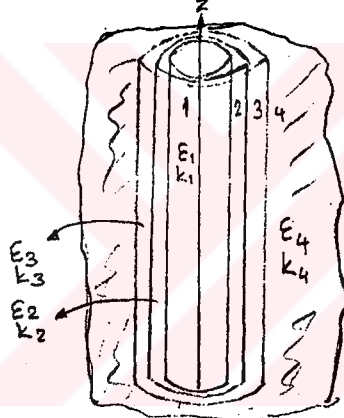
(3-38) nolu denklemi su şekilde ifade edebiliriz.

$$\vec{E}(r) = \left[1 + \frac{\tau(r)}{3j\omega\epsilon_d^*} \right] \vec{E}(r) - ED \int_V \tau(r') \vec{E}(r) \vec{G}(r, r') dv \quad (5-3)$$

V-II- ANTEN TARAFINDAN YAYILAN ELEKTRİK ALANI

Biyolojik bir doku içerisinde batırılan dipol bir anten Şekil V-II- gösterilmiştir.

Doku tarafından saçılan elektrik alanının anteni besleyen akımı etkilememesi için anten dışı iki ince tabaka şeklinde dielektrik madde ile kaplanmıştır.



Şekil V -2

Boyu $2h$ çapı $2a$ olan antenin iyi bir iletken ikinci ve üçüncü bölgede bulunan yalıtkanların ise iyi birer yalıtkan oldukları varsayılmıştır. İkinci bölgenin propogasyon katsayısı.

$$k_2 = \omega(\mu_0 \epsilon_2)^{1/2} \quad (5-4)$$

ve üçüncü bölgenin propogasyon katsayısı

$$k_3 = \omega(\mu_0 \epsilon_3)^{1/2} \quad (5-5)$$

katsayılarının sanal kısımları sıfır olduğu varsayılmıştır.

Dördüncü bölgenin propogasyon katsayısı ve dielektrik katsayısı.

$$k_4 = \beta_4 + j\alpha_4 = \omega(\mu_0 \epsilon_4^*)^{1/2} \quad (5-6)$$

$$\epsilon_4^* = \epsilon_4 + \frac{j\sigma_4}{\omega} \quad (5-7)$$

Biyolojik ortam propogasyon katsayısının dielektrik ortam katsayılarından ve anten kesitinden çok büyük olduğunu varsayalım dolayısı ile

$$\left[\frac{k_4}{k_2} \right]^2 \gg 1 \quad \text{ve} \quad \left[\frac{k_4}{k_3} \right]^2 \gg 1 \quad (5-8)$$

Anten akımının şu şekilde olduğunu kabul edelim.

$$I(z) = I(0) \frac{\sin(k(h-|z|))}{\sin(kh)} \quad (5-9)$$

$$I(0) = V_0 Y_0 = V_0 / Z_0 \quad (5-10)$$

$$Y_0 = -(j/2Z_0) \tan(kh) \quad (5-11)$$

İki katmanlı dielektrik için propogasyon katsayısı şu şekilde ifade edilebilir.

$$k = k_2 \left[\frac{\ln(c/a)^{1/2}}{\ln(b/a) + n_{23}^2 \ln(c/b)} \right] \left[\frac{\ln(c/a)^{1/2} + F}{\ln(c/a) + n_{24}^2 F} \right] \quad (5-12)$$

$$(k_2 b)^2 \ll 1 \quad \text{ve} \quad (k_3 c)^2 \ll 1 \quad (5-13)$$

burada

$$n_{23}^2 = k_2^2 / k_3^2 \quad (5-14)$$

$$n_{24}^2 = k_2^2 / k_4^2 \quad (5-15)$$

$$F = (H_0^{(4)}(k_4 c)) / (k_4 c H_1^{(4)}(k_4 c)) \quad (5-16)$$

(5-13) nolu eşitliği tek bir dielektrik olarak düşünerek yeniden şu şekilde düzenleyebiliriz.

$$k'_2 = k_2 \left[\frac{\ln(c/a)}{\ln(b/a) + n_{23}^2 \ln(c/b)} \right]^{1/2} \quad (5-17)$$

$$\epsilon'_2 = \epsilon_2 \left[\frac{\ln(c/a)}{\ln(b/a) + n_{23}^2 \ln(c/b)} \right] \quad (5-18)$$

$$k = k'_2 \left[\ln(c/a) + F \right]^{1/2} \left[\ln(c/a) + n_{24}^2 F \right]^{-1/2} \quad (5-19)$$

ve iletken empedansını şu şekilde ifade edebiliriz.

$$Z_0 = (\omega \mu_0 k / 2\pi k_2^2) [\ln(c/a) + n_{24}^2 F] \quad (5-20)$$

burada

$$n_{24}^2 = k_2^2 / k_4^2 \quad (5-21)$$

Dipolün elektriksel yük dağılımını şu şekilde ifade edebiliriz.

$$q(z) = -\frac{j}{\omega} \frac{\partial I(z)}{\partial z} = \frac{V_0}{2\omega Z_0} \frac{\text{Cosk}(h-z)}{\text{Coskh}} \quad (5-22)$$

$$0 \leq z \leq h$$

Dielektrik maddeleri yalnız bir dielektrikten oluştuğunu kabul edip elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerini şu şekilde ifade edebiliriz.

$$E_{2r}(r,z) \sim \frac{q(z)}{2\pi\epsilon_2 r} = \frac{jkI(0)}{2\pi\epsilon_2 \omega r} \frac{\text{Cosk}(h-z)}{\text{Sinkh}} \quad E_{2r} = \frac{jkI(0)}{2\pi\epsilon_2 \omega r} \frac{\text{Cosk}(h+z)}{\text{sinkh}} \quad (5-23)$$

$$0 \leq z \leq h \quad -h \leq z \leq 0$$

$$B_{2\phi}(r,z) \sim \frac{\mu_0 I(z)}{2\pi r} = \frac{\mu_0 I(0)}{2\pi r} \frac{\text{Sink}(h-|z|)}{\text{Sinkh}} \quad (5-24)$$

$$-h \leq z \leq h$$

$$\bar{E}_{2z}(r,z) = \int_a^r \left[\frac{\partial \bar{E}_{2r}(r,z)}{\partial z} - j\omega B_{2\phi}(r,z) \right] dr = -\frac{j\omega\mu_0 I(0)}{2\pi} \ln(r/a) \left[1 - \frac{k^2}{k_z^2} \right] \frac{\text{Sink}(h-|z|)}{\text{Sink}h} \quad (5-25)$$

Biyolojik doku içerisinde elektrik alan vektörünü şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\bar{E}_4(r,z) = \frac{1}{4\pi} \int_{-h}^h dz \int_{-\pi}^{\pi} r' d\phi \left[j\omega \bar{B}_4(c,z) \psi(z,z') \hat{z} - \bar{E}_{4z}(c,z') \phi \times \nabla \psi(z,z') + \bar{E}_{4r}(c,z') \nabla \psi(z,z') \right] \quad (5-26)$$

$$\psi(z,z') = \frac{e^{j\omega k_4 R}}{R} \quad (5-27)$$

$$R = \left[(z-z')^2 + r^2 - 2rr' \cos\phi + r'^2 \right]^{1/2} \Big|_{r'=c} \quad (5-28)$$

(5-26) nolu eşitlikte anteni yeteri kadar ince alırsak

$$|k_4 c|^2 \ll 1 \quad (5-29)$$

elektrik alan ifadesindeki r ve z değişkenine göre integre edersek elektrik alan bileşenlerini şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\begin{aligned} \bar{E}_{4z}(r,z) = & \frac{j\omega\mu_0 z I(0)}{4\pi \text{Sink}(kh)} \left[\int_{-h}^h \text{Sink}(h-|z|) \psi(z,z') dz' - \frac{k}{k_z^2} \left[\int_0^h \text{Cosk}(h-z') \frac{\partial \psi(z,z')}{\partial z} dz' \right. \right. \\ & \left. \left. - \int_{-h}^0 \text{Cosk}(h+z') \frac{\partial \psi(z,z')}{\partial z} dz' \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{k^2}{k_z^2} - 1 \right] c^2 \ln \frac{c}{a} \int_{-h}^h \text{Sink}(h-|z|) \frac{\partial^2 \psi(z,z')}{\partial r^2} dz \right] \quad (5-30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_{4r}(r,z) = & -\frac{j\omega\mu_0 I(0)}{4\pi \text{Sink}h} \frac{k}{k_z^2} \left[\int_0^h \text{Cosk}(h-z) \frac{\partial \psi(z,z')}{\partial r} dz' - \int_{-h}^0 \text{Cosk}(h+z') \frac{\partial \psi(z,z')}{\partial r} dz' \right] \\ & + \frac{1}{2} \left[\frac{k^2}{k_z^2} - 1 \right] c^2 \ln \frac{c}{a} \int_{-h}^h \text{Sink}(h-|z|) \frac{\partial \psi(z,z')}{\partial z \partial r} dz' \quad (5-31) \end{aligned}$$

(5-30) ve (5-31) nolu ifadelerde alıp integralleri yeniden düzenlersek elektrik alan bileşenlerini şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\begin{aligned} E_{4z}(r,z) = & \frac{j\omega\mu_0 I(0)}{4\pi \text{Sink}h} \left[1 - \frac{k^2}{k_4^2} \right] \int_0^h \text{Sink}(h-z) [\psi(z,z) + \psi(z,-z)] dz' + \frac{k}{k_4^2} [\psi(z,h) + \psi(z,-h) \\ & - 2\psi(z,0) \text{Coskh}] + \frac{1}{2} \left[\frac{k^2}{k_2^2} - 1 \right] c^2 \ln \frac{c}{a} \int_0^h \text{Sink}(h-z) \frac{\partial^2}{\partial r^2} [\psi(z,z) + \psi(z,-z)] dz' \quad (5-32) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{4r}(r,z) = & -\frac{j\omega\mu_0 I(0)}{4\pi \text{Sin}(kh)} \left[\frac{k}{k_4^2} r \int_0^h \text{Cosk}(h-z) \left[\frac{jk_4}{R_1} - \frac{1}{R_1^2} \right] \psi(z,z) - \left[\frac{jk_4}{R_2} - \frac{1}{R_2^2} \right] \psi(z,z') \right] \\ & - \frac{1}{2} \left[\frac{k^2}{k_2^2} - 1 \right] kc^2 \ln \frac{c}{a} \int_0^h \text{Cosk}(h-z') \frac{\partial}{\partial r} [\psi(z,z') - \psi(z,-z')] dz' \quad (5-33) \end{aligned}$$

Sekil V-1 de görüldüğü gibi

$$R_1 = [(z-z')^2 + r^2]^{1/2} \quad R_2 = [(z+z')^2 + r^2]^{1/2} \quad (5-34)$$

$$\psi(z,z') = e^{jk_4 R_1} / R_1 \quad , \quad \psi(z,-z') = e^{jk_4 R_2} / R_2 \quad (5-35)$$

Fonksiyonunun ikinci derecede difrensiyelini aldığımızda

$$\frac{\partial^2 \psi(z,z')}{\partial r^2} = \left[\frac{jk_4}{R_1} - \frac{1}{R_1^2} - \frac{r^2}{R_1} \left[\frac{k^2}{k_4^2} + \frac{3jk_4}{R_1} - \frac{3}{R_1^2} \right] \right] \psi(z,-z') \quad (5-36)$$

$$\frac{\partial^2 \psi(z,z')}{\partial r^2} = \left[\frac{jk_4}{R_2} - \frac{1}{R_2^2} - \frac{r^2}{R_2} \left[\frac{k^2}{k_4^2} + \frac{3jk_4}{R_2} - \frac{3}{R_2^2} \right] \right] \psi(z,-z') \quad (5-37)$$

$$|kc|^2 < |k_4 c|^2 \ll 1 \quad \text{ve} \quad (c/R_1)^2 \ll 1 \quad \text{ve} \quad (c/R_2)^2 \ll 1$$

şartları altında

$$kr^2(\partial/\partial r)[\psi(z,z')-\psi(z,-z')] \text{ ve } r^2(\partial^2/\partial r^2)[\psi(z,z')+\psi(z,-z')]$$

ifadeleri ihmal edilebilir

$R_1^2 \gg c^2$ ve $R_2^2 \gg c^2$ alırsak elektrik alan bileşenlerini şu şekilde yeniden düzenleyebiliriz.

$$\bar{E}_4(r,z) = -\frac{j\omega\mu_0 I(0)}{4\pi \text{Sinkh}} \frac{kr}{k_4^2} \int_0^h \left[\text{Cosk}(h-z) \frac{jk_4}{R_1} - \frac{1}{R_1^2} \psi(z,z') - \frac{jk_4}{R_2} - \frac{1}{R_2^2} \psi(z,-z') \right] dz' \quad (5-38)$$

$$\bar{E}_4(r,z) = \frac{j\omega\mu_0 I(0)}{4\pi \text{Sin}(kh)} \left[1 - \frac{k^2}{k_4^2} \int_0^h [\text{Sink}(h-z)[\psi(z,z')+\psi(z,-z')]] dz' + \frac{k}{k_4^2} [\psi(z,h)+\psi(z,-h) - 2\psi(z,0)\text{Cos}(kh)] \right] \quad (5-39)$$

(5-38) ve (5-39) nolu ifadeler sayısal olarak çözülebilirler.

V - 3 ELEKTRİK ALAN POLARİZASYONUNUN İNCELENMESİ :

Elektrik alan bileşenlerini ifade eden (5-32) ve (5-33) nolu ifadelerde görüldüğü gibi aynı fazda değildirler, dolayısı ile biyolojik ortam içerisindeki elektrik alan eliptik olarak polarize olur. Elektrik alan bileşenlerinden hareketle polarizasyonun belirlenmesi. Elektrik alanının bir t anındaki değerini şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\begin{aligned} \bar{E}_4(r,t,z) &= \bar{E}_4(r,z)e^{-j\omega t-\theta} \\ &= |\bar{E}_{4z}(r,z)| \hat{z} \text{Cos}(\omega t-\theta) + rK \text{Cos}(\omega t-\theta_z+\theta_K) \end{aligned} \quad (5-40)$$

burada

$$K e^{-j\theta_K} = \frac{\bar{E}_{4r}(r,z)}{\bar{E}_{4z}(r,z)} \quad K = \frac{\bar{E}_{4r}(r,z)}{\bar{E}_{4z}(r,z)} \quad -\theta_K = \arg \frac{\bar{E}_{4r}(r,z)}{\bar{E}_{4z}(r,z)} \quad \theta_z = \arg \bar{E}_{4z}(r,z) \quad (5-41)$$

elektrik alan bileşenlerini daha sade bir şekilde ifade edebiliriz.

$$E_z(t) = \bar{E}_z \cos(\omega t - \theta_z)$$

$$E_r(t) = \bar{E}_z K \cos(\omega t - \theta_z) \cos \theta_K - \sin(\omega t - \theta_z) \sin \theta_K$$

$$= K \bar{E}_z(t) \cos \theta_K - [\bar{E}_z^2 - \bar{E}_z^2(t)]^{1/2} \sin \theta_K \quad (5-42)$$

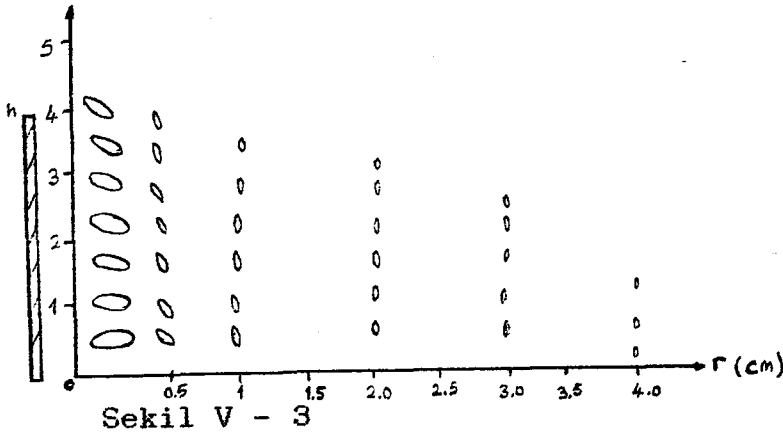
(5-42) nolu denklemi elips denklemi formunda yazarsak

$$Az^2 + Bzr + Cr^2 + F = 0 \quad (5-43)$$

burada

$$z = \bar{E}_z(t) \text{ ve } r = \bar{E}_r(t)$$

Kayıplı bir ortamda elektrik alan vektörlerinin çizdikleri elipsler Şekil V - 3 te görülmektedir



Şekil V - 1 gösterilen anten doku içerisine kolayca yerleştirilebilecek ince merkezden beslenen dipol antendir. iç iletken yarıçapı $a=0.45$ mm. $f=450$ MHz. için dipol uzunluğu $h = \lambda/2$ iç yalıtkanın dielektrik katsayısı $\epsilon_{r1}=1.6$ ve yarıçapı $b=0.60$ mm. ikinci yalıtkanın dielektrik katsayısı $\epsilon_{r2}=1.6$ ve yarıçapı $c=0.80$ mm. olup yalıtkanlar tek bir yalıtkan olarak ele

alındıklarında dielektrik katsayısı $\epsilon_r=44$ kabul edil-
mistir. Bivolojik ortamın dielektrik katsayısı $\epsilon_{r4}=45$ alınmıştır.



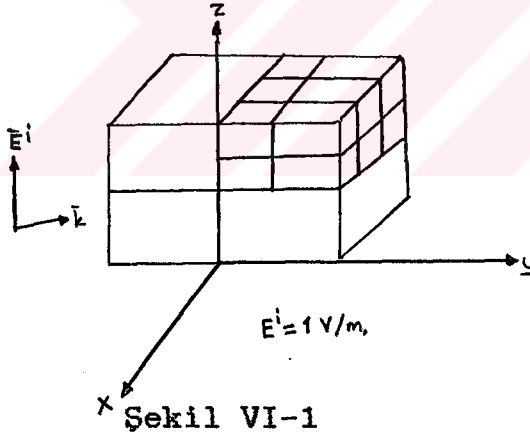
BÖLÜM VI

ELEKTROMANYETİK TEORİNİN BİYOLOJİK YAPILARA UYGULANMASI :

Bölüm 3'te elektromanyetik alana tabi tutulan bir biyolojik yapıda elektromanyetik alanın sayısal hesaplanması teorik olarak ifade edilmişti. Elektromanyetik alan doku içerisine doğrudan bir antenle veya doku dışından bir antenle uygulanabilir.

Günümüzde elektromanyetik enerji kanser teşhis ve tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. X-ışınları ve diğer tedavi yöntemlerine nazaran daha iyi sonuçlar verdiği yapılan deneylerde açık bir şekilde görülmektedir. Kanserli dokuların elektriksel iletkenlikleri normal dokulara oranla daha büyüktür dolayısı ile normal dokulara oranla daha fazla enerji indüklenir.

Şekil VI-1'de 4x4x4 cm. bir dielektrik küpe 1 volt/m elektrik alanı uygulandığında değişik frekanslar için küp merkezinde indüklenen elektrik alanları Tablo VI-1'de verilmiştir.



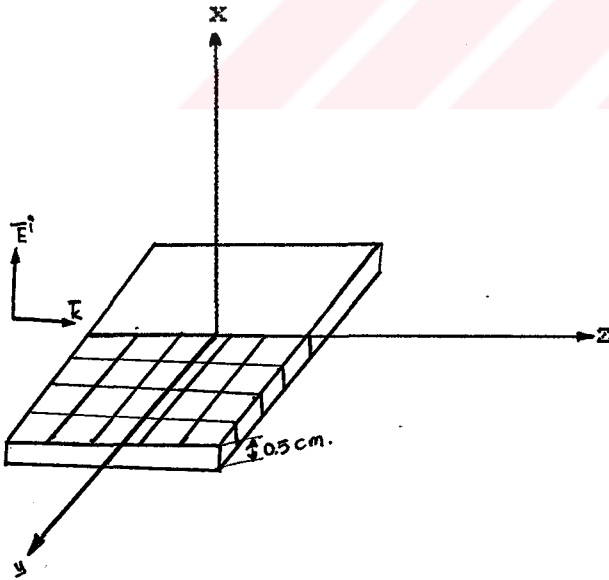
Frekans (KHz.)	dielektr.sab.()	Elektrik Alan.(v/m)
10000	5	0.417
1000	5	0.417
1	5	0.417
1	20	0.1124
1	50	0.0503

Tablo VI-1

Küp merkezinde indüklenen elektrik alanı yaklaşık olarak aynı yarıçapa sahip küre merkezinde indüklenen elektrik alanına eşittir. Dolayısı ile küre merkezinde indüklenen elektrik alanı aşağıdaki eşitlikten hareketle bulunabilir.

$$\bar{E} = \frac{3}{\epsilon + 2} \bar{E}^i \quad (6-1)$$

Şekil VI-2'de 0.5 cm. kalınlığında 4x5 cm.'lik ince bir iletken tabakaya X yönünde 300 MHz elektrik alanı uygulanmıştır. Elektrik alanının X yönünde bileşenlerinin hesaplanan değerleri Şekil VI-3'te gösterilmiştir.

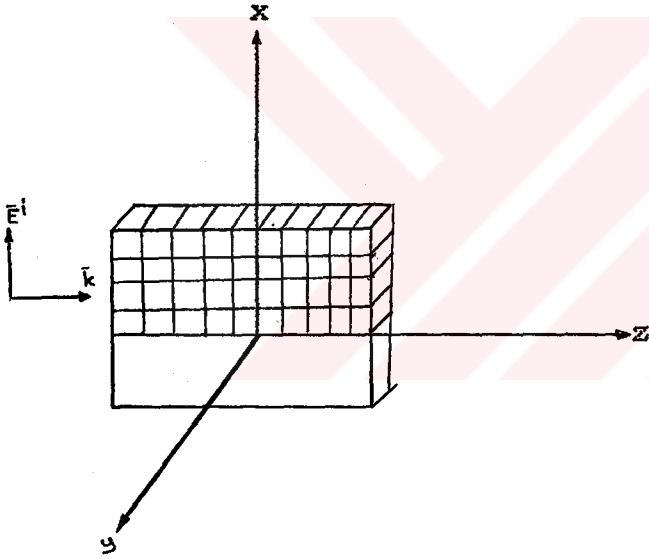


Şekil VI-2

z				E_x/E^i
0.0110	0.0110	0.0112	0.0108	
0.0115	0.0116	0.0112	0.0160	
0.0112	0.0114	0.0110	0.0158	
0.0112	0.0114	0.0110	0.0158	
0.0112	0.0114	0.0110	0.0158	
0.0112	0.0114	0.0110	0.0158	
0.0112	0.0114	0.0110	0.0158	
0.0112	0.0114	0.0110	0.0158	
0.0112	0.0114	0.0110	0.0158	
0.0115	0.0116	0.0112	0.0160	
0.0110	0.0112	0.0108	0.0155	
				y

Şekil VI-3

Şekil VI-2'de ele alınan iletken tabakalar Şekil VI-4'te görüldüğü gibi x eksenine paralel konup aynı elektromanyetik alan altında indüklenen elektromanyetik alan hesaplandığında Şekil VI-5'te görüldüğü gibi farklı sonuçlar elde edilmiştir.



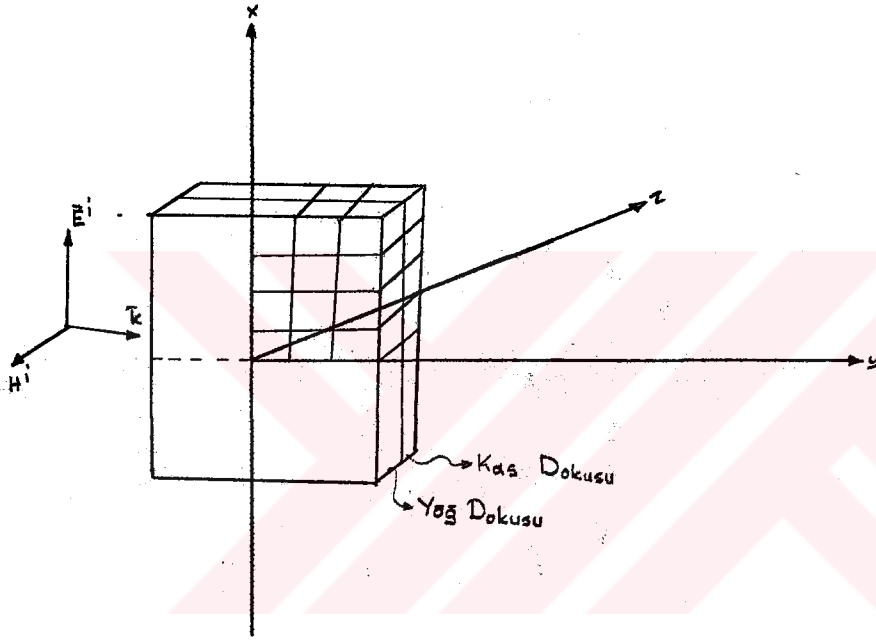
z	E_x/E_i			
	0.1770	0.1580	0.1310	0.0910
	0.1985	0.1790	0.1470	0.0970
	0.1770	0.1630	0.1340	0.0880
	0.1410	0.1350	0.1140	0.0770
	0.1150	0.1160	0.1010	0.0700
	0.1100	0.1140	0.1010	0.0690
	0.1300	0.1300	0.1130	0.7500
	0.1750	0.1670	0.1400	0.0900
	0.2200	0.2020	0.1670	0.1060
	0.2260	0.2020	0.1630	0.1050

Şekil VI-4

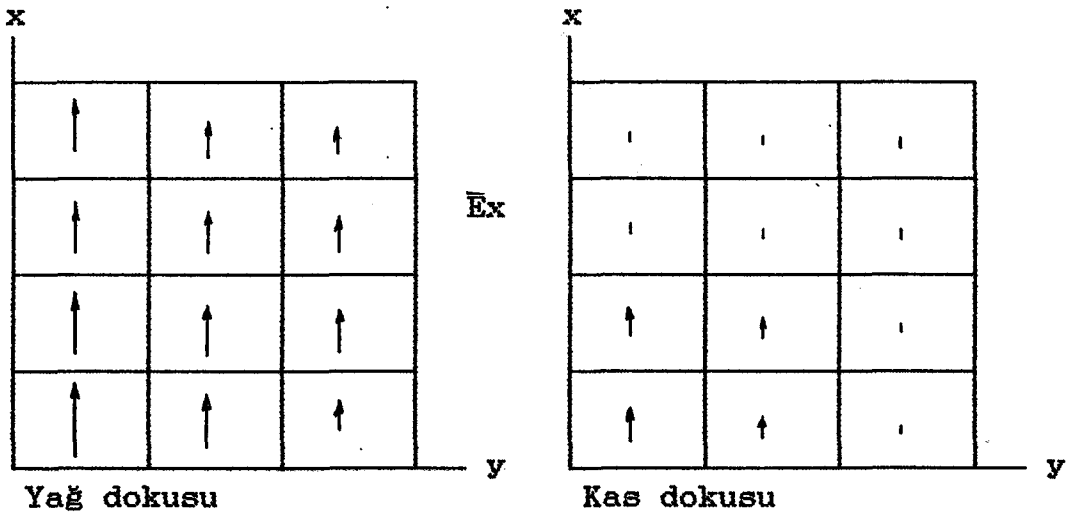
Şekil VI-5

Şekil VI-5'te görüldüğü gibi her küpte indüklenen elektrik alanı Şekil VI-2'dekine oranla daha fazladır. Bu, elektromanyetik alana tabi tutulan bir biyolojik yapının alan karşısındaki oryantasyonunun indüklenen alanı etkilediğini göstermektedir.

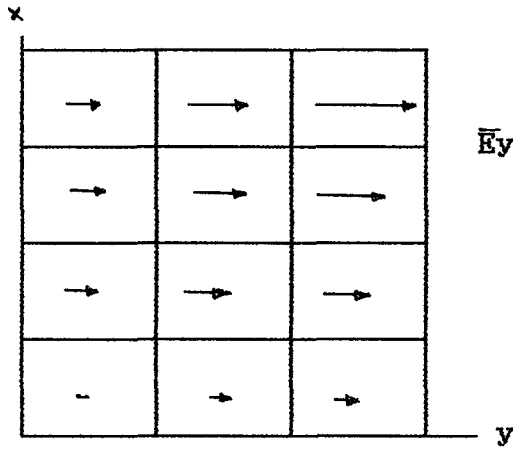
Şekil VI-6'da 4 x 12 x 16 cm. 'lik farklı biyolojik dokulardan oluşmuş 2 cm. 'lik küpler görülmektedir. Bu biyolojik dokular maksimum alan indüklenecek şekilde x eksenine paralel konmuştur. Birinci quadrantteki küpler içerisinde indüklenen elektrik alanının x, y, z bileşenleri Şekil VI-7 Şekil VI-8 ve Şekil VI-9 'da gösterilmiştir.



Şekil VI-6

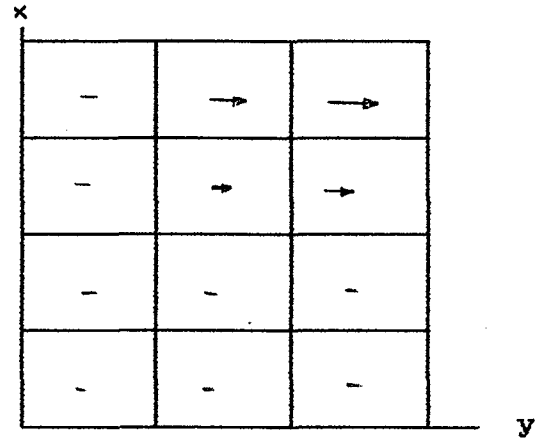


Şekil VI-7

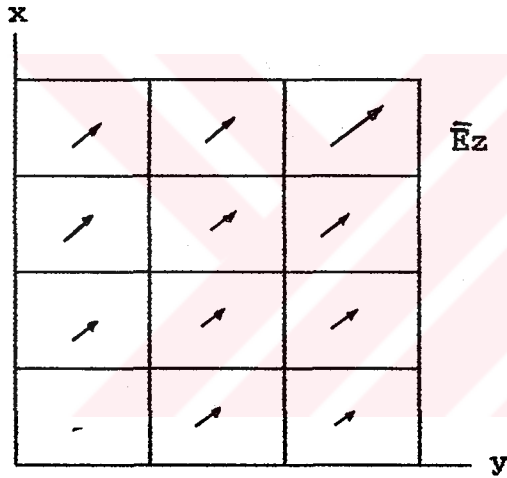


Yağ dokusu

Şekil VI-8

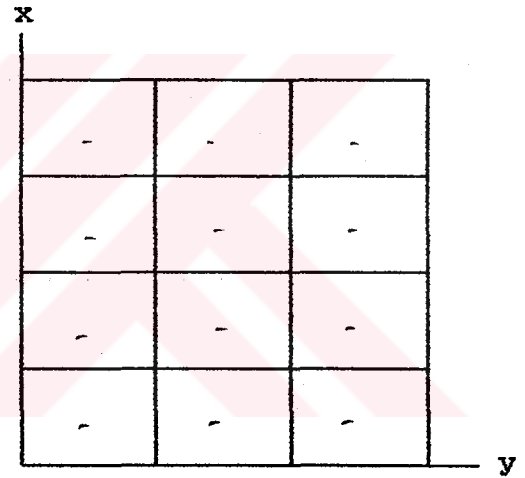


Kas dokusu



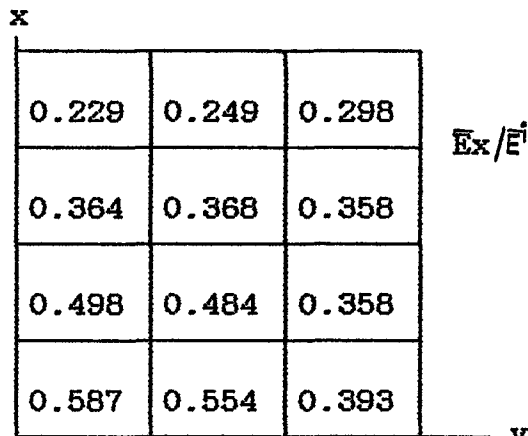
Yağ dokusu

Şekil VI-9



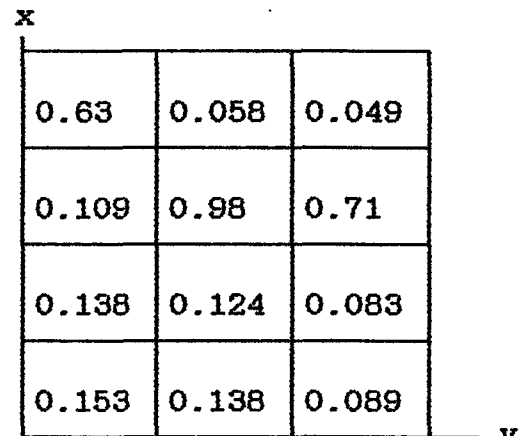
Kas dokusu

Şekil VI-7 , Şekil VI-8 ve Şekil VI-9 'da gösterilen elektrik alanlarının hesaplanan değerleri Şekil VI-10 , Şekil VI-11 ve Şekil VI-12 'de görülmektedir.

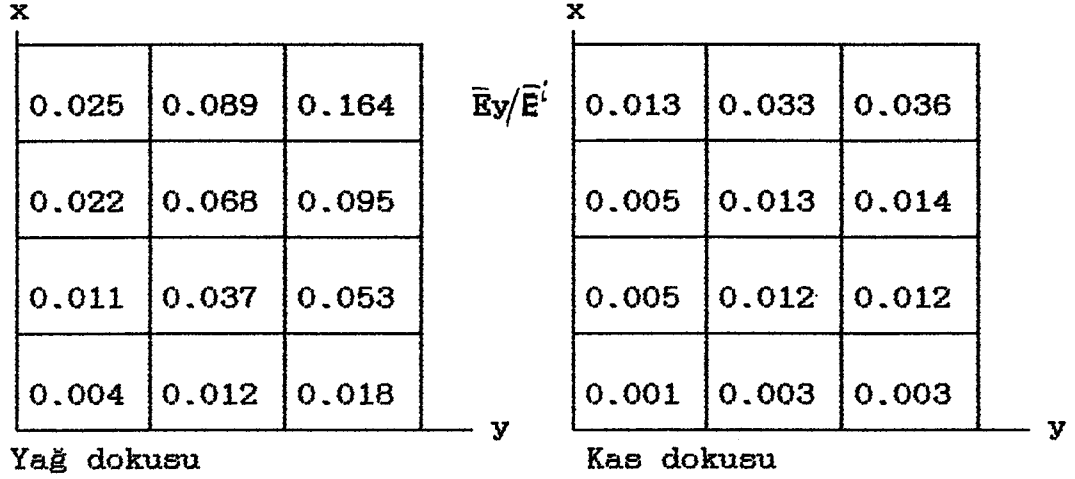


Yağ dokusu

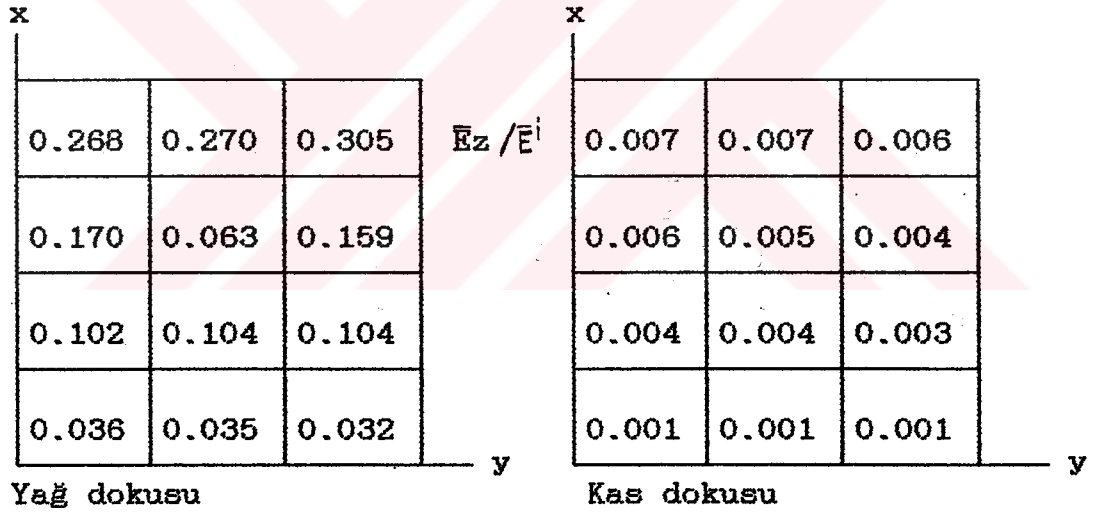
Şekil VI-10



Kas dokusu

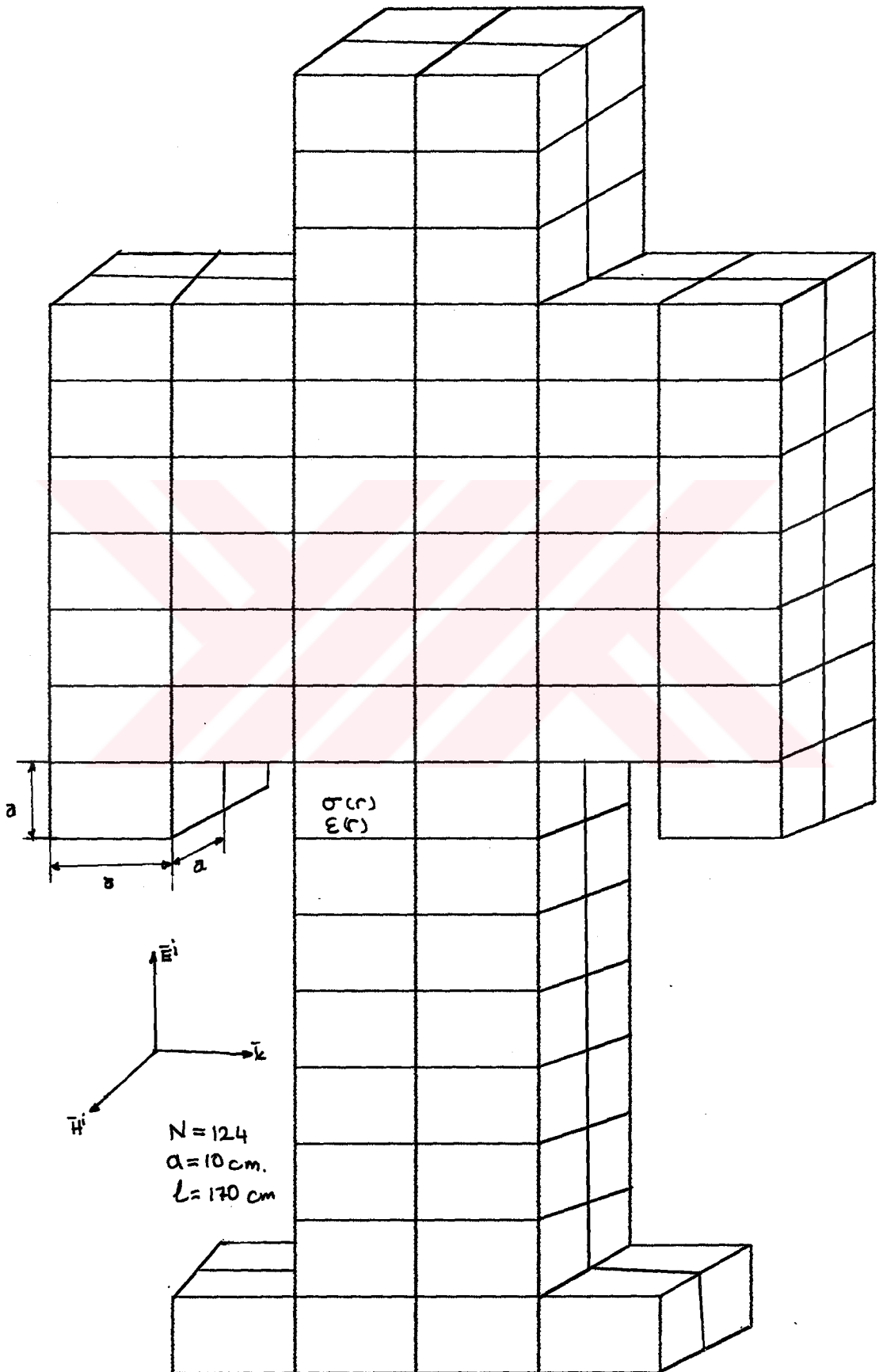


Şekil VI-11



Şekil VI-12

Şekil VI-3'te bir insan küpler şeklinde modellenmiştir. 170 cm boyundaki bir insanı 10 cm.'lik küpler şeklinde modellenirse toplam 124 küple bir insan modellemek mümkün olur. İkinci bölümde küpler şeklinde modellenen bir yapıda küp kenarlarının uzunluğunun uygulanan elektrik alanının dalga boyunun dörtte birinden daha küçük olması gerektiği vurgulanmıştı. Dolayısı ile bu modele uygulanabilecek elektrik alanının maximum frekansı 750 MHz.'dir.



Şekil VI-13

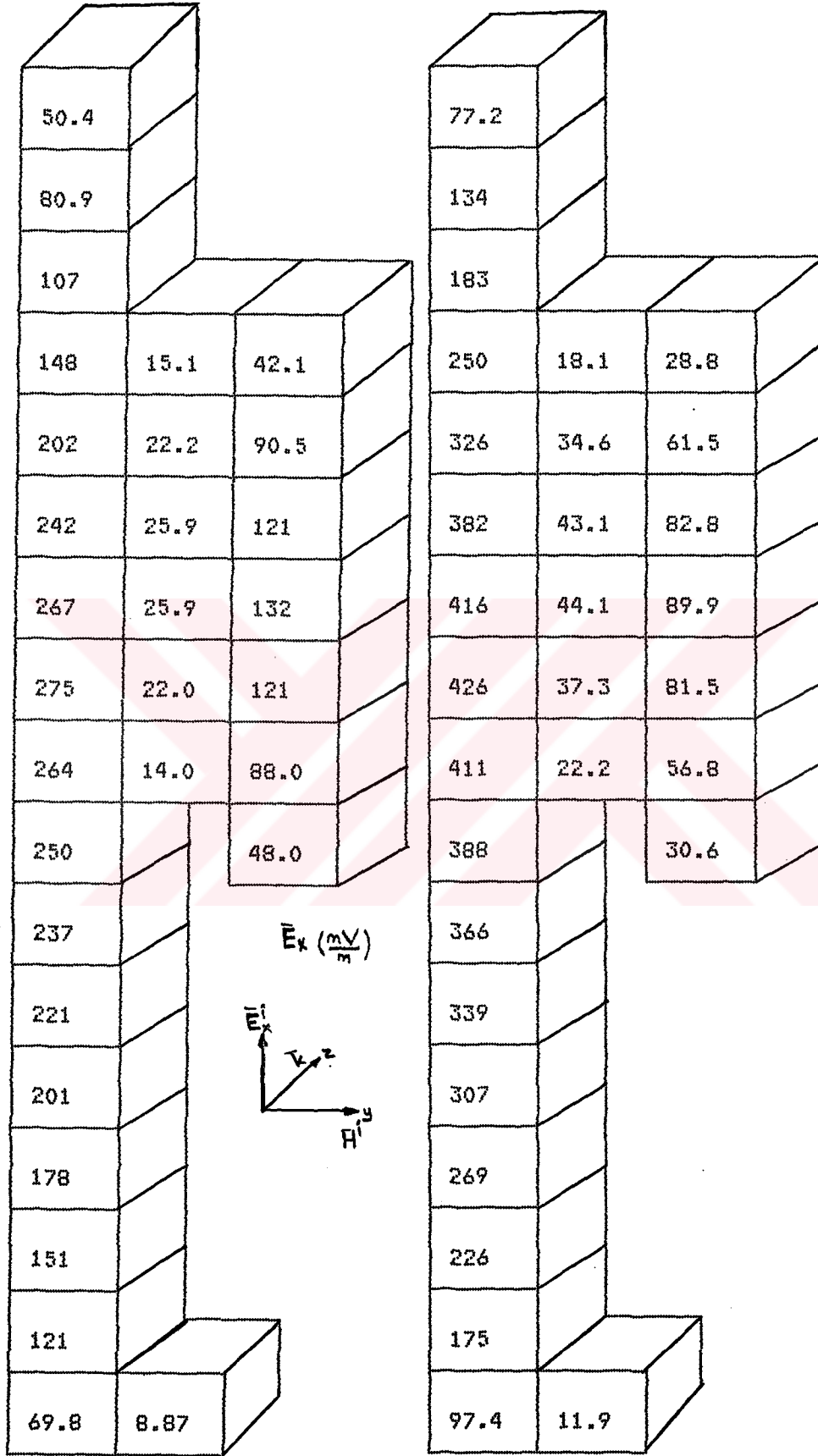
Şekil VI-13'te 10 cm. 'lik küplerden oluşan 170 cm. boyun-
daki 124 küpten oluşan bu insan modelini simetrik özellikler-
rinden yararlanarak Şekil VI-14'teki gösterebiliriz. Modelin
elektiriksel iletkenliği $\sigma=0.84$ /m dielektrik katsayısı ϵ
=80. kabul edilmiştir. 80 MHz 1 V/m 'lik bir elektrik
alanı x yönünde şekilde görüldüğü gibi bu modele uygulanmış
tır. Bölüm 3 'te formüle edilen elektrik alan ifadesi ile he-
saplanan elektrik alanının x yönünde ki bileşenleri Şekil
VI-14'te ki küpler içerisine yazılmıştır.

Şekil VI-15'te tasarlanan modelin y yönündeki bileşenle-
rinin hesaplanan değerleri herbir kübün içerisine yazılmıştır
Şekil VI-16'da aynı modelin z yönünde hesaplanan değerleri
küpler içerisine yazılmıştır.

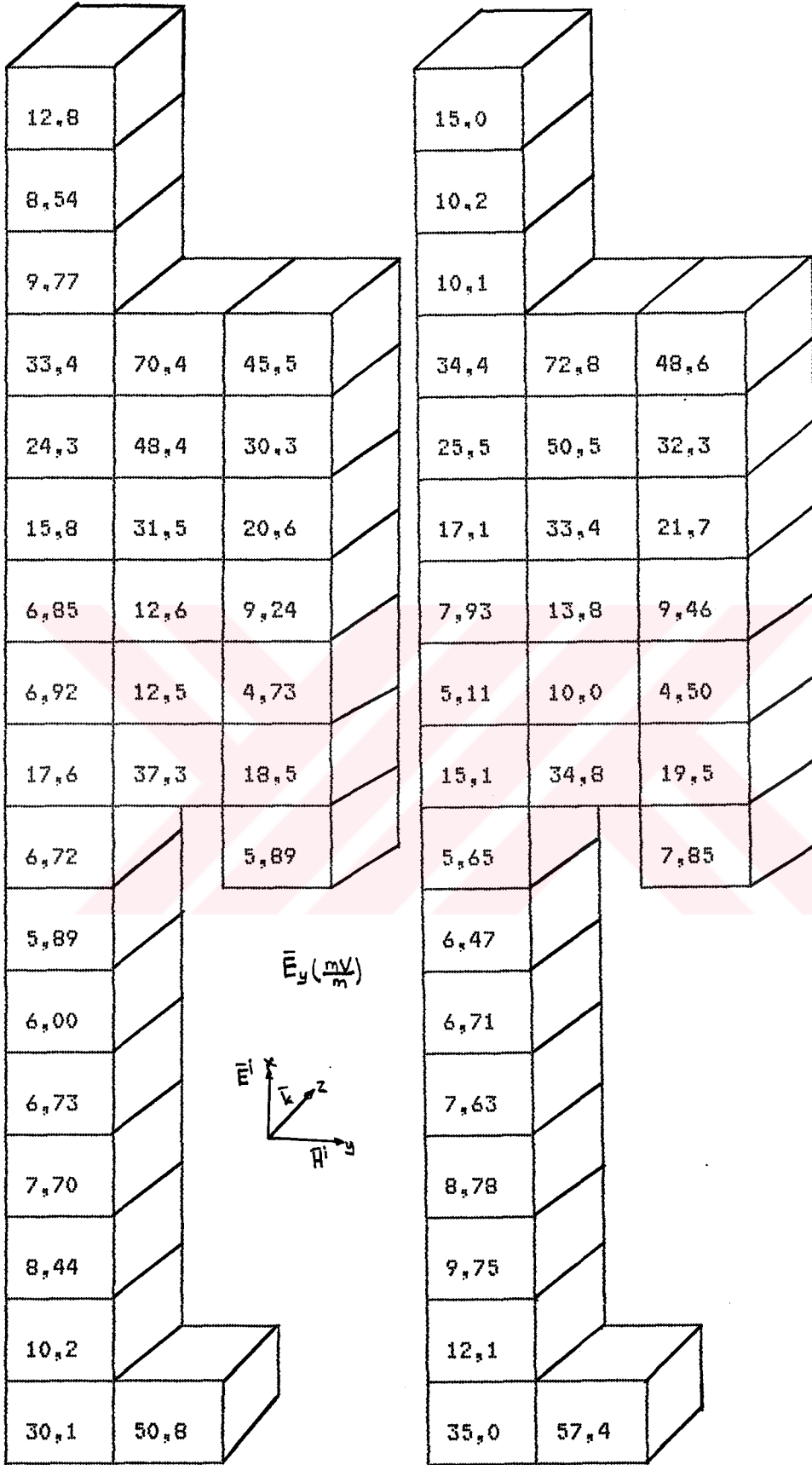
Şekil VI-13'te gösterilen modelin emdiği toplam güç yoğun-
luğu Şekil VI-17 gösterilmiştir. Model tarafından emilen
SAR değeri şu şekilde hesaplanmıştır.

$$SAR = \frac{1}{2\rho} \sigma \left[|\vec{E}_x|^2 + |\vec{E}_y|^2 + |\vec{E}_z|^2 \right] \quad (6-2)$$

Şekil VI-14'ten Şekil VI-18 'e kadar düzey polarizasyon uy-
gulanmıştır.

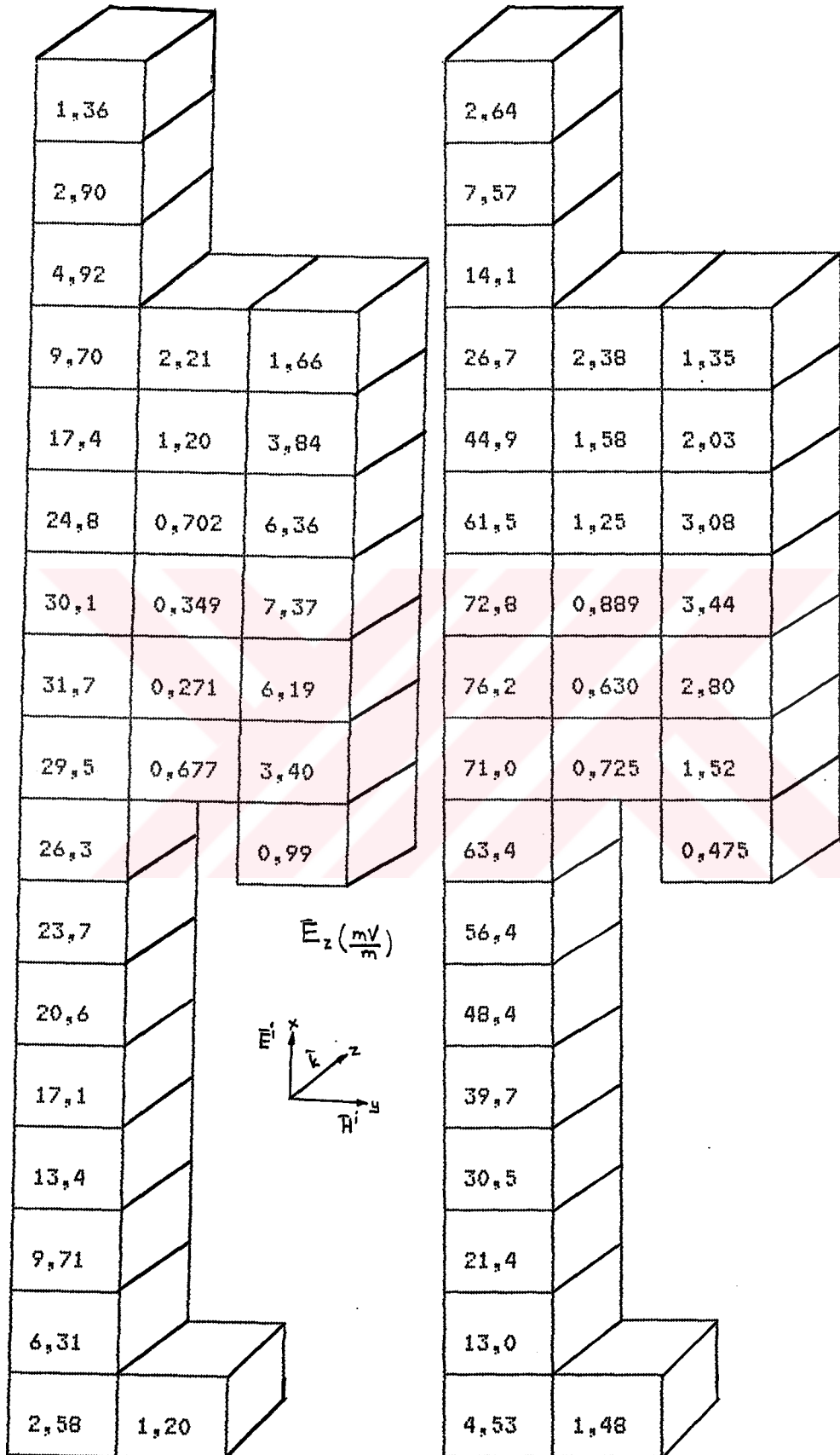


Sekil VI-14 Elektrik alanı bir ve ikinci tabakadaki x bileşeni

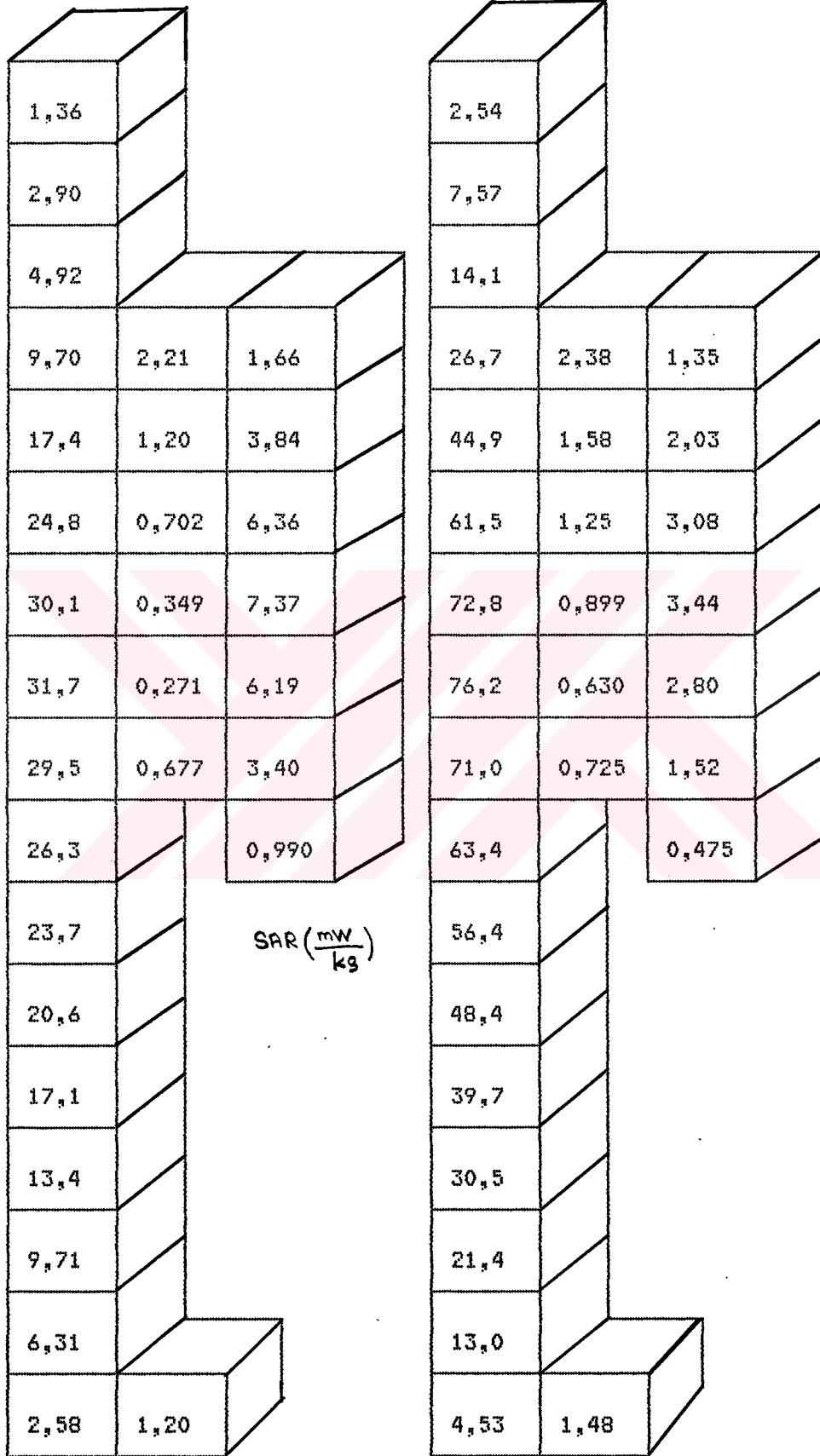


Şekil VI-15 Elektrik alanı bir
53

ikinci tabakadaki y bileşeni



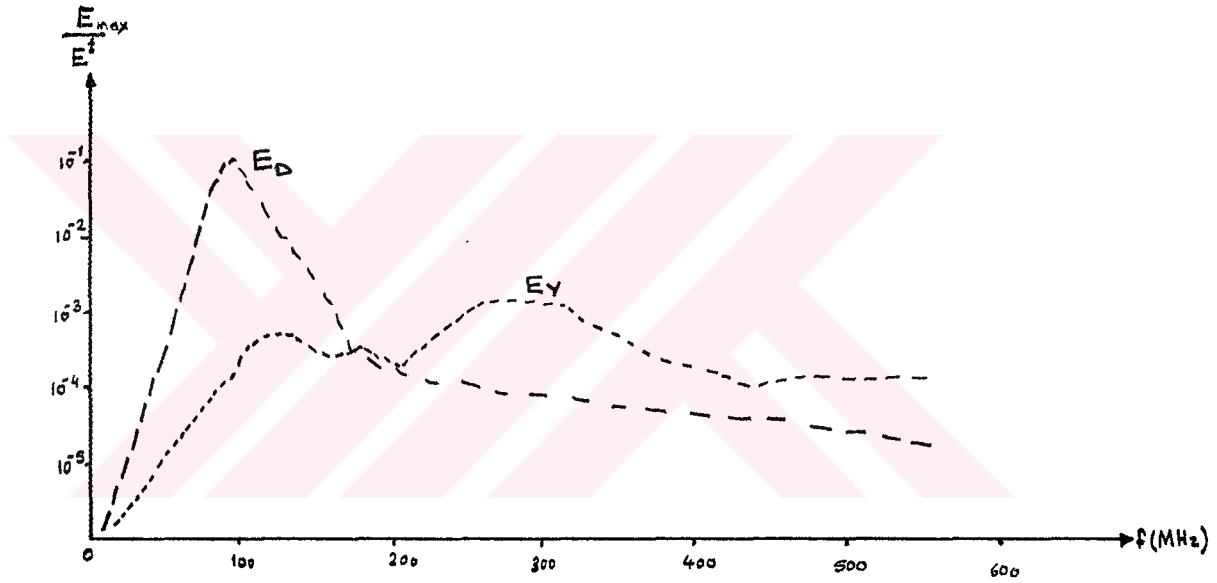
Sekil VI-16 Elektrik alanının bir ve ikinci tabakada z bileşenleri



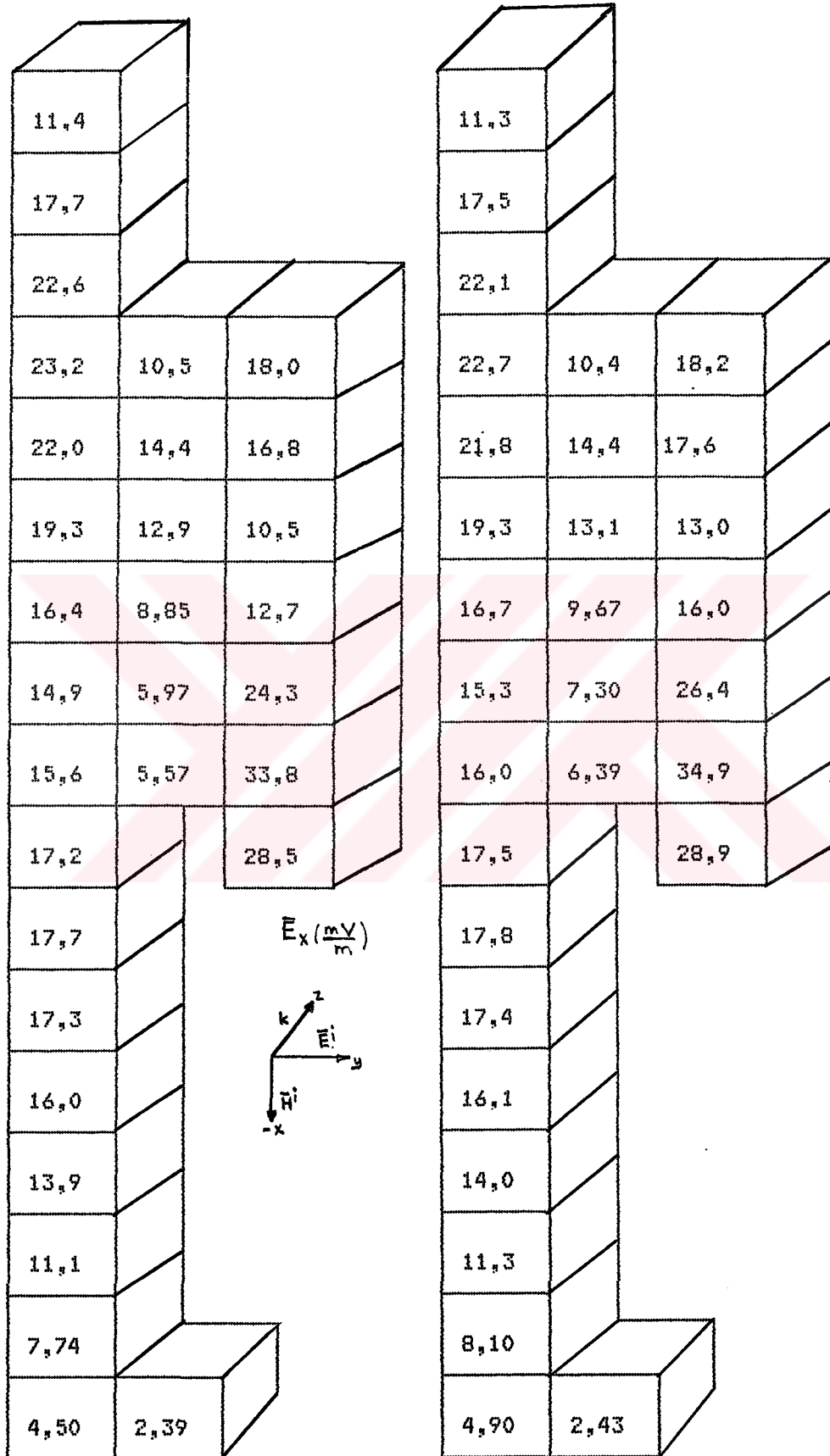
Sekil VI-17 Birinci ve

ikinci tabakadaki SAR degerleri

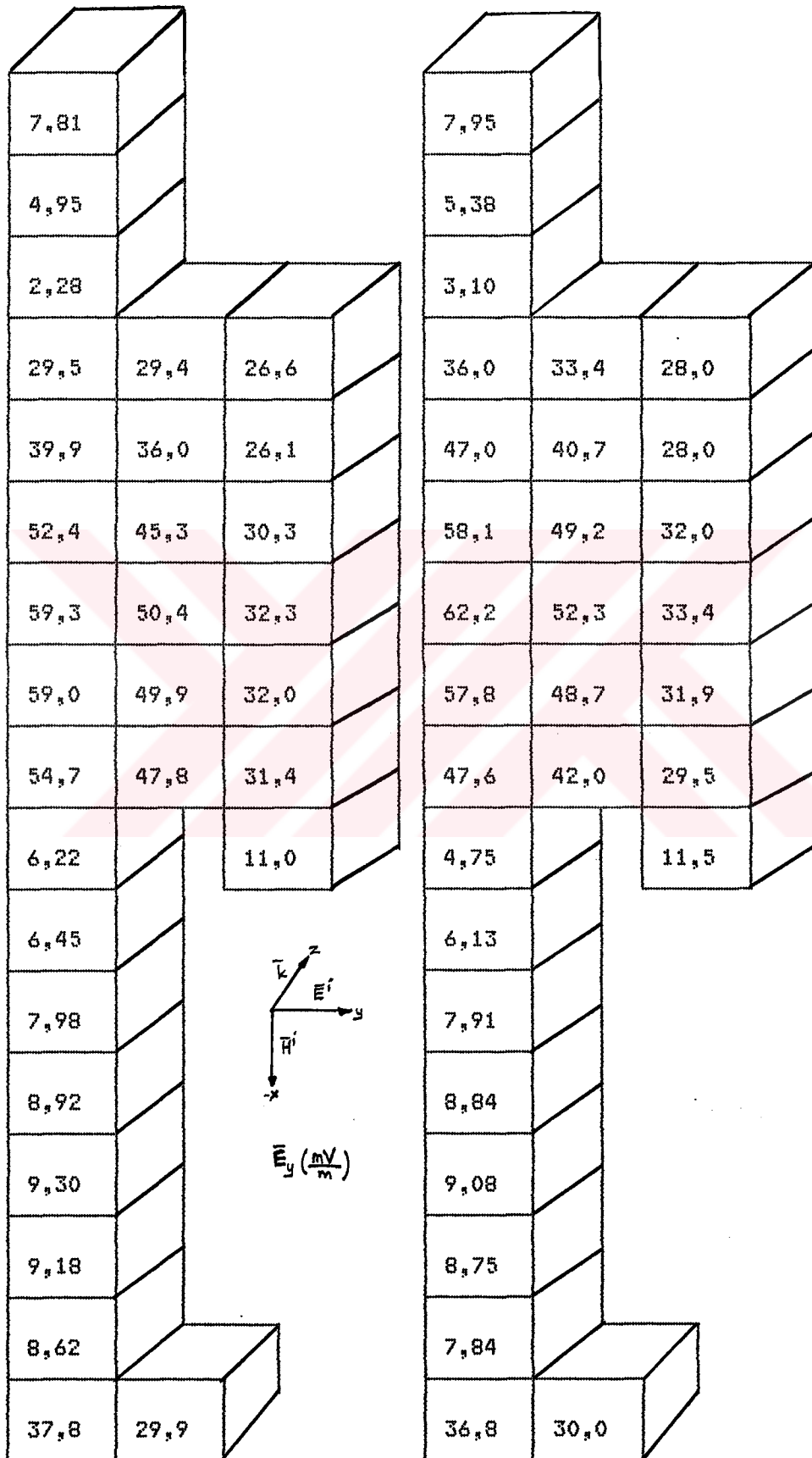
Şekil VI-14'ten Şekil VI-17 'e kadar insan modeline düşey polarizasyon uygulanmıştır. Aynı modele yatay polarizasyon uygulandığında elde edilen sonuçlar ise Şekil VI-19, Şekil VI-20 , Şekil VI-21 ve Şekil VI-22 'de görülmektedir. Düşey polarizasyonda elde edilen değerler yatay polarizasyonda elde edilen değerlere nazaran daha büyüktür. 150 MHz.'in altındaki değerler için genel olarak bu doğrudur. 200 MHz.'in üstündeki değerlerde yatay polarizasyona tabi tutulan biyolojik yapılarda düşey polarizasyona oranla daha fazla elektromanetik enerjinin indüklendiği Şekil VI-18 'de görülmektedir.



Şekil VI-18

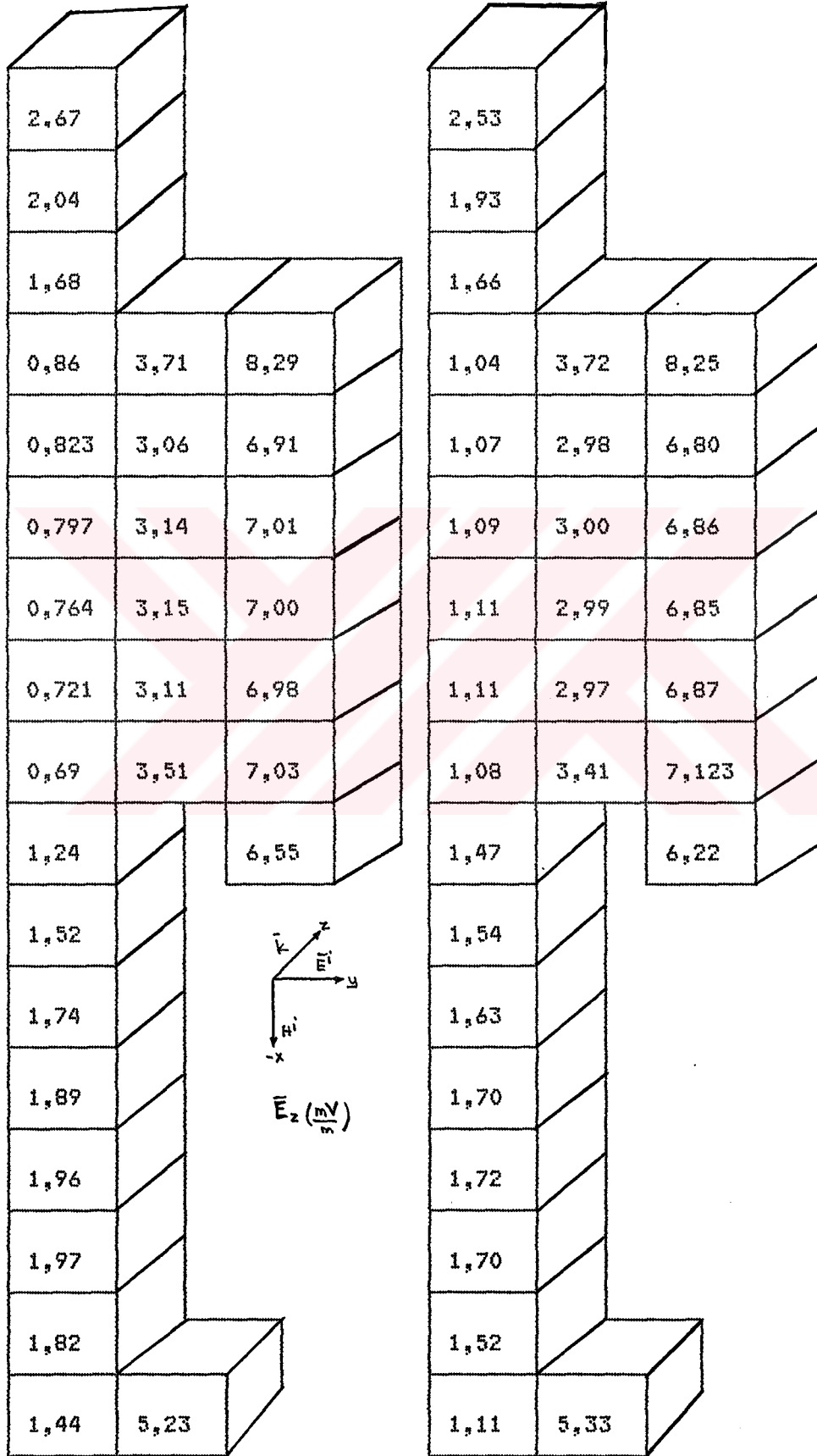


Sekil VI-19 Elektrik alanın bir ve ikinci tabakada x bileşenleri



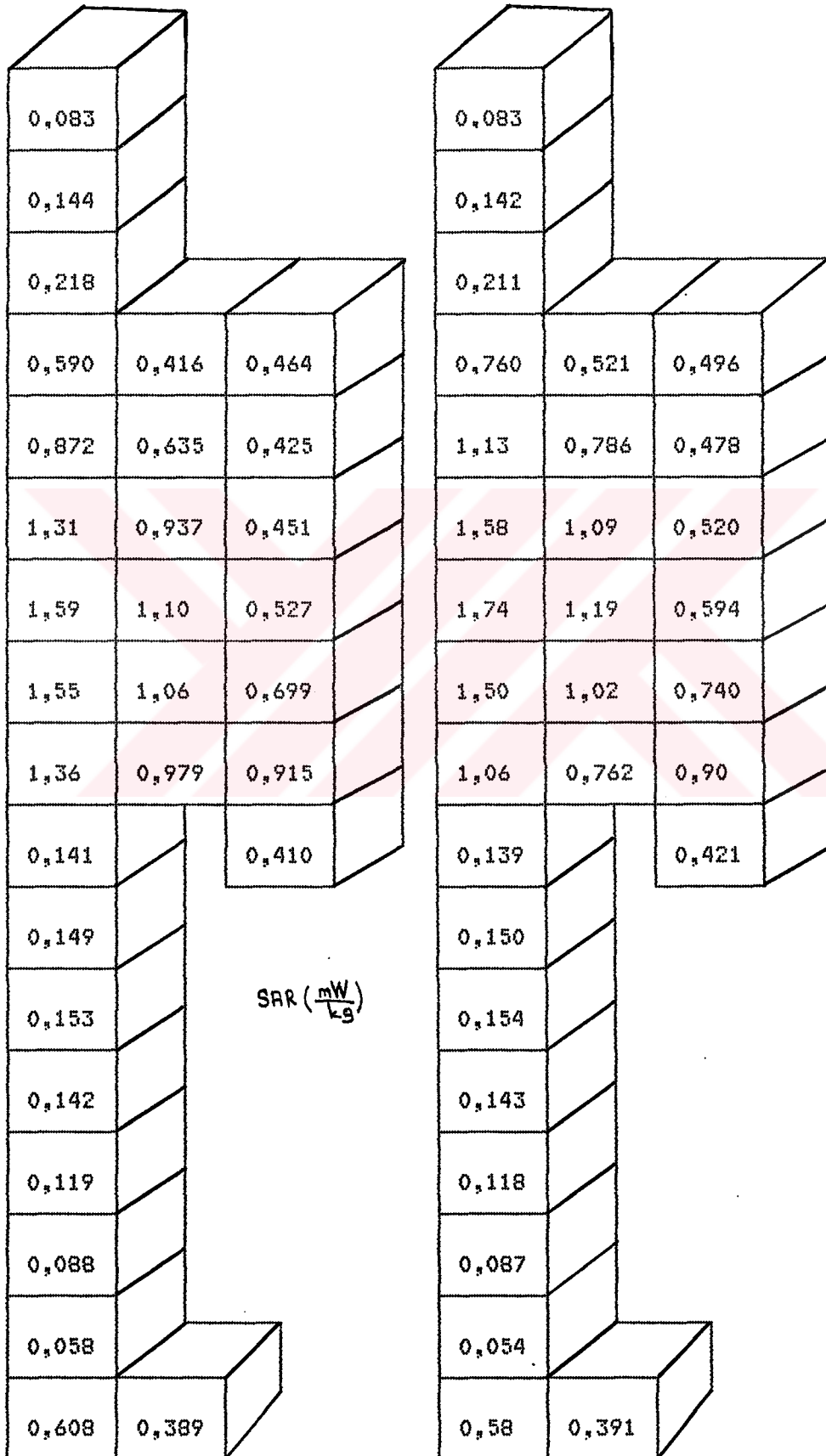
Sekil VI-20 Elektrik alanın bir ve

ikinci tabakalarda y bileşeni



Şekil VI-21 Elektrik alanı bir ve

ikinci tabakalarda z bileşeni



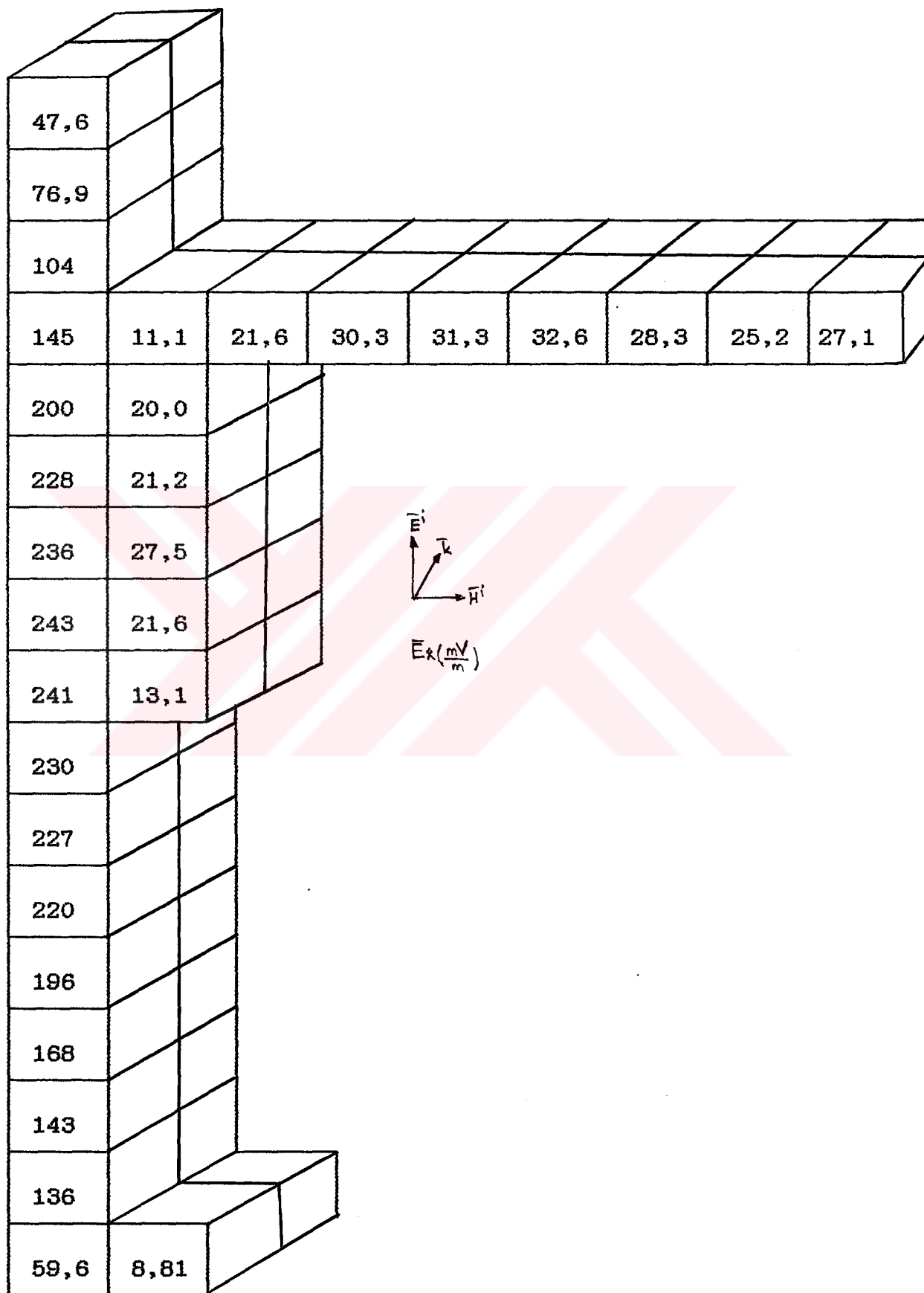
Şekil VI-22 Birinci

ikinci tabakalarda SAR değerleri

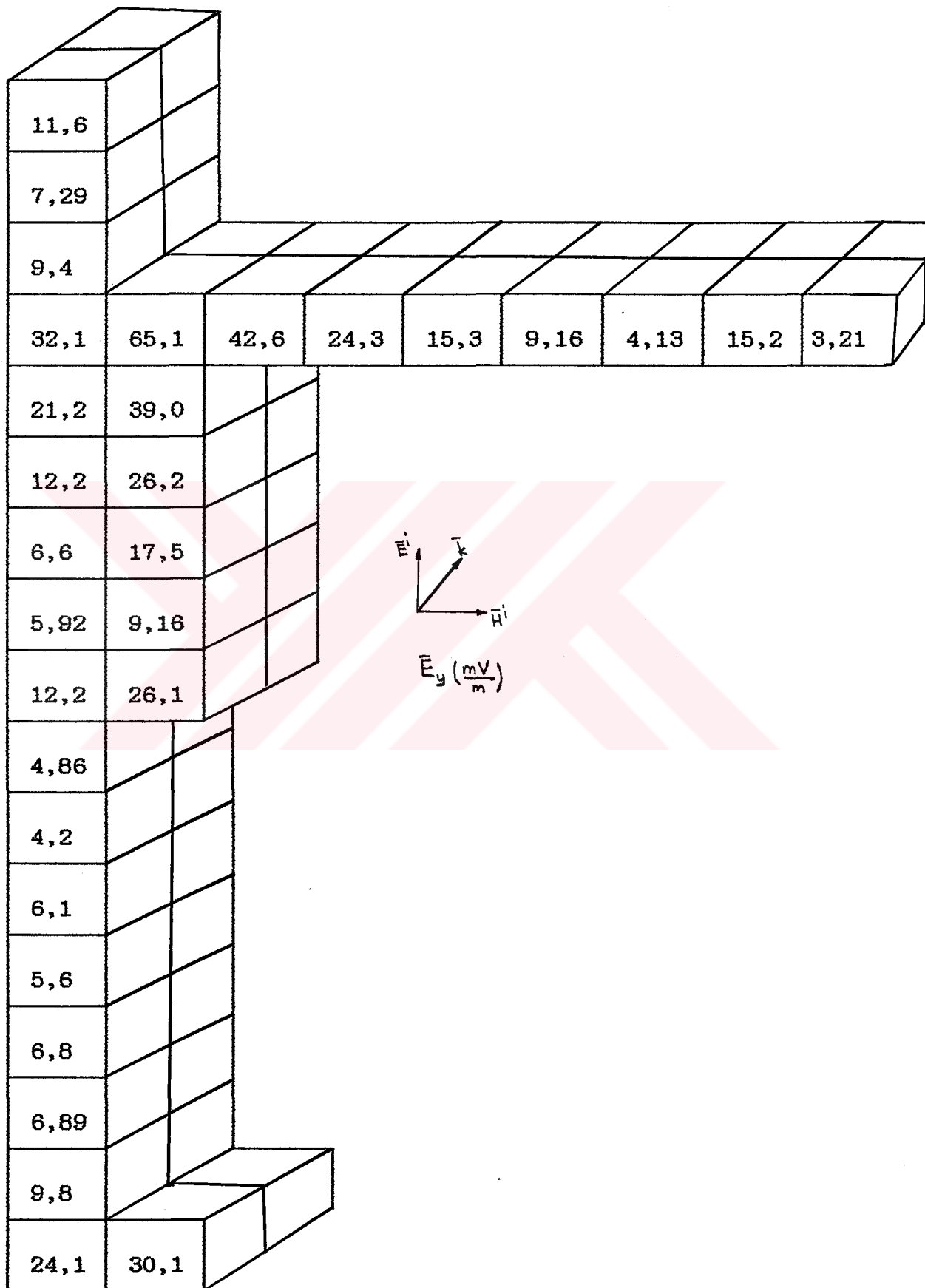
Elektromanyetik alana tabi tutulan insan modelinin duruşu değıştikçe modelde indüklenen enerji de değışmektedir. Kolları açık bir insan modeli 80 MHz. 1 V/m. 'lık elektrik alanı altında incelenmiştir. insan modelinde indüklenen elektrik alanının x ve y bileşenleri Şekil VI-23 ve Şekil VI-24 'te görölmektedir. Elektrik alan bileşeni değeri çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Şekillerde de göröldüğü gibi kolları açık insan modelinde normal duran insan modeline göre daha az bir elektrik alanı indüklenir.

Şekil VI-25'te kolları açık insan modelinde hesaplanan SAR değeri verilmiştir.

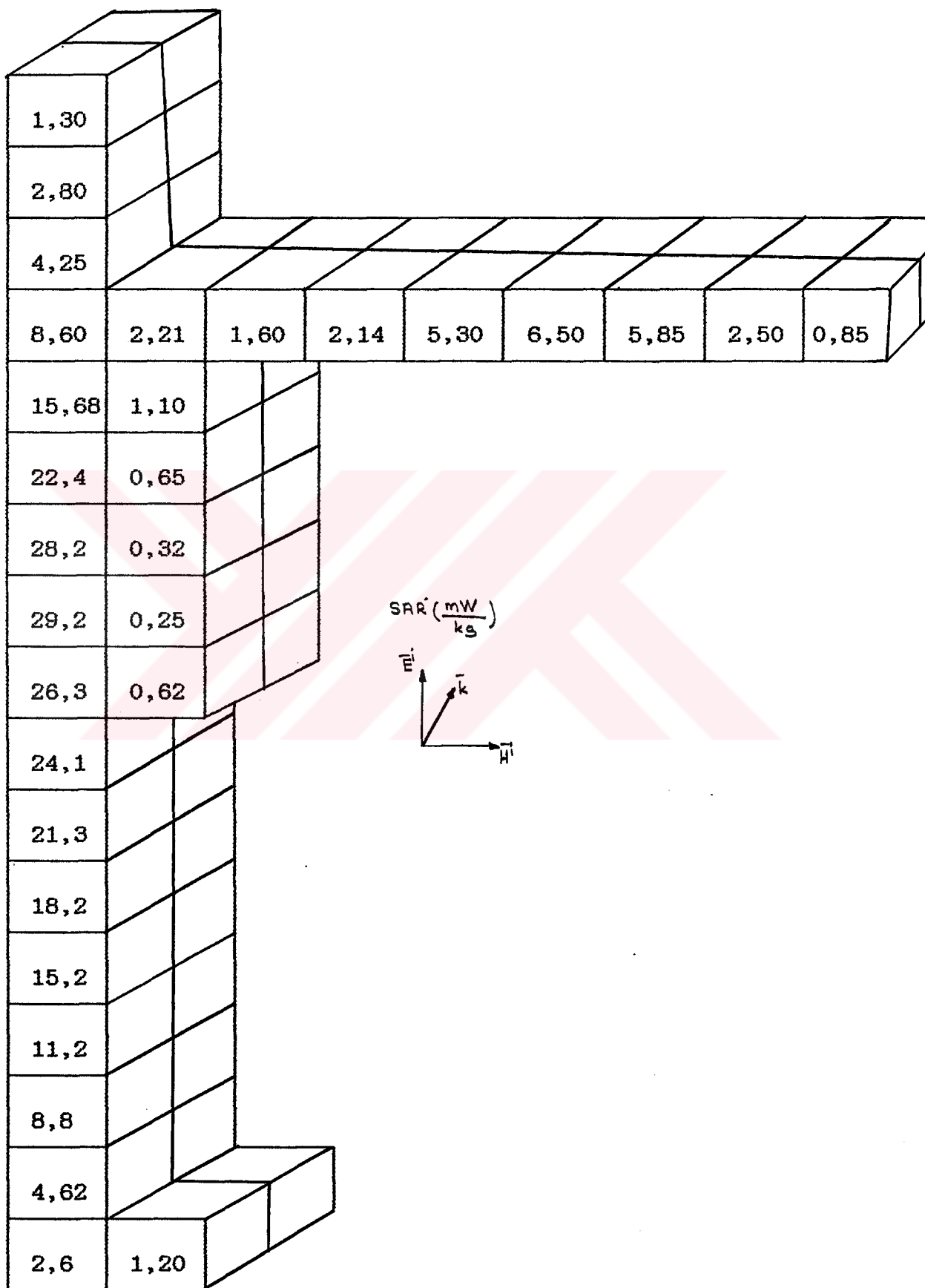




Şekil VI-23

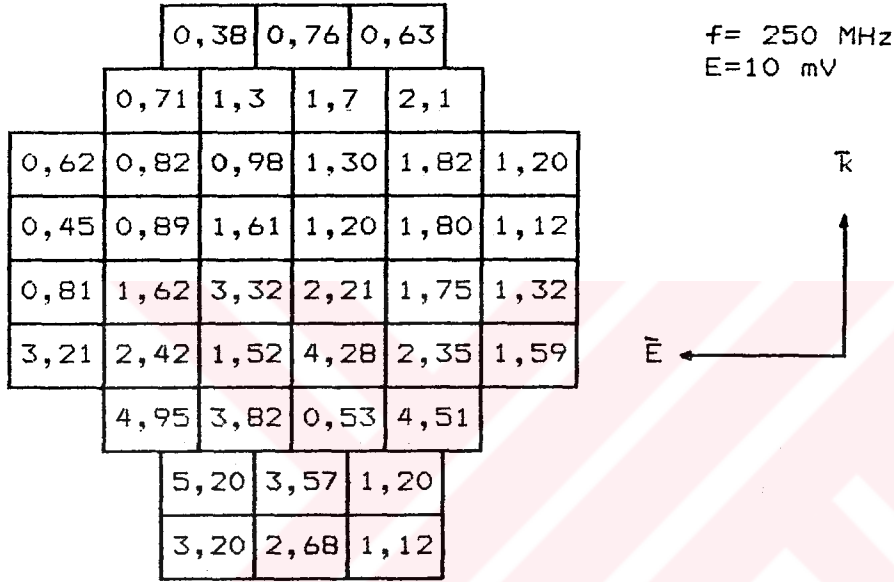


Şekil VI-24

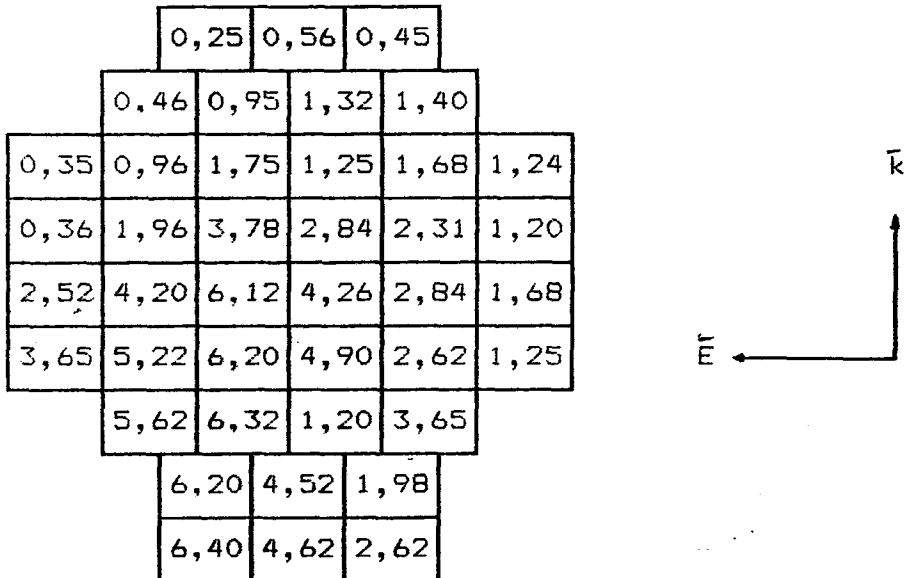


Sekil VI-25

Şekil VI-26'da bir insan başı 4 cm.'lik küpler şeklinde modellenmiştir. İkinci tabakada toplam indüklenen SAR değerleri Şekil VI-27'de verilmiştir. Elektromanyetik alan vektörü modele önden arkaya doğru uygulanmıştır. SAR değerleri moment metodu ile hesaplanmıştır.



Şekil VI- 26



Biyolojik bir yapıda indüklenen SAR değerini küpler şeklinde modellenen hücrelerin empedanslarından hareketle bulmakta mümkündür. Uzunluğu 1 olan biyolojik bir hücrede toplam akım dağılımı hücre empedanslarıyla ters orantılıdır. Herhangi bir hücrenin empedansını şu şekilde ifade edebiliriz

$$Z_i = \frac{1}{(\sigma_i + j\omega\epsilon_i) A_i} \quad (6-3)$$

Herhangi bir hücredeki akımı toplam akım ve empedans cinsinde şu şekilde ifade edebiliriz.

$$I_i = \frac{I_t \frac{1}{Z_i}}{\sum_i \frac{1}{Z_i}} = \frac{I_t (\sigma_i + j\omega\epsilon_i) A_i}{\sum_i (\sigma_i + j\omega\epsilon_i) A_i} \quad (6-4)$$

Biyolojik yapı içerisindeki elektrik alanını şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\bar{E}_i = \frac{\bar{J}_i}{\sigma_i + j\omega\epsilon_i} = \frac{I_i}{\sum_i (\sigma_i + j\omega\epsilon_i) A_i} \quad (6-5)$$

Hücre içerisindeki SAR değerini elektrik alanı cinsinde şu şekilde ifade edebiliriz.

$$SAR = \frac{\sigma_i E_i E_i^*}{\rho_i} = \frac{|I_i|^2 \sigma_i}{\rho_i \sum_i (\sigma_i^2 + \omega^2 \epsilon_i^2) A_i} \quad (6-6)$$

SONUÇ :

Integral denklemleri cinsinde ifade edilen Elektromanyetik alan iteratif yöntemlerle veya moment metoduyla çözülebilir. Bölüm III 'te elde edilen integral denklemleri moment metodu ile çözülürken gözönünde bulunması gereken noktalardan biri seçilen modelin analitik çözümü kolaylaştırması ve modelin boyutlarının uygulanan alanın dalga boyuna nazaran çok küçük seçilmesidir.

Bir biyolojik dokuda indüklenen elektomanyetik enerji uygulanan alanın polarizasyonu ile doğrudan ilgilidir. Bölüm VI 'da görüldüğü gibi aynı miktarda elektomanyetik alan uygulanmasına rağmen düşey polarizasyda yatay polarizasyona nazaran daha fazla enerji indüklendiği açıktır. Buna rağmen bunun her frekansta olduğu söylenemez.

Biyolojik bir dokuda indüklenen enerji dokunun elektriksel iletkenliğinden dolayı ısı olarak açığa çıkar. Açığa çıkan ısı enerjisi kontrol altında tutularak tıpta, kanser teşhis ve tedavisinde kullanılabilir.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum yeri : Malatya
Doğum tarihi: 1963

İlk ve orta öğrenimini Malatya'da lise öğrenimini İzmir Çınarlı Endüstrü Meslek lisesi Elektronik bölümünde tamamladı. Ortadoğu Teknik Üniversitesi Gaziantep Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Bölümünde 1990 yılında mezun oldu. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik anabilim dalı; Haberleşme bilim dalında yüksek lisans programına kayıt oldu.



BOLOM - VII :

KAYNAKLAR :

- 1) Jack h. Richmond
Scattering by a dielectric cylinder of arbitrary cross-section shape.
May 13.1965 IEEE. Tr. on Antennas & Propagation pp.334-341
- 2) Shiro Takashima
Studies on the effect of radio frequency Waves on biological macromolecules.
January 1966 IEEE Tr. on Biomedical Eng. vol:13 no:1 pp:28-31
- 3) Zdenek Krupka
The effect of the human body on radiation properties of small sized communication system.
March 1968 IEEE Tr. on Antenna & propogation vol:16 no:2 pp:154-163
- 4) Richard E. Van Doeren
An integral Equation approach to scattering by dielectric ring.
May 1969 IEEE Tr on Antenna & Propagation pp:373-374
- 5) Sol. M.Michealson
The tree service program a tribute to George M.Knauf USAF
February 1971 Tr. on Microwave transmute technic. vol:19 no:2 pp:131-146
- 6) Herman F. schwan
Interaction of microwave and radio frequency radiation with biological systems.
February 1971 IEEE Tr.on microwave tran. tec. vol:19 no:2 pp: 146-152
- 7) Allan H. Frey
Biological functions as influenced by low power modulated R.F. energy.
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans.tec. vol.19 no:2 pp:158-164
- 8) Karel Marha
Microwave radiation safety standarts in eastern europe
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans.tec. vol.19 no:2 pp:165-168
- 9) Ira T.Kaplan William Mmettay Milton M. Zaret Leo Birenuom
Absance of heart-reat effects in rabbits during low level microwave irradiation.
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19 No: 2 pp:168-173

- 10) Russel L. Cargehnter Elliot M. Livstone
Evidence for nonthermal effects of microwave radiation
abnormal development of irradiated pupae
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:173-178
- 11) Paul F. Wacker Ronald R. Bowman
Quantifying hazardous EM. fields scientific basis and
practical consideration.
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:178-187
- 12) Alan R. Sahapiro Richard F. Lutomirski Harold T: Yura
Induced field and heating within a critical structure
irradiated by an EM. plane waves.
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:187-196
- 13) Harold L. Basset Allen Ecker Richard C Johnson
New techniques for implementing microwave biological exposure system
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:197-204
- 14) Artur W Guy
Analysis of EM. fields induced in biological tissues by
thermographic studies on equivalent phantom models.
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:205-214
- 15) Arthur W. Guy
EM. fields and relative heating patterns due to a rectangular aperture source in direct contact within bilayered biological tissue
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:214-223
- 16) Henry. Ho Arthur W. Guy Rubens A. Sigelman
Microwave heating of simulated human limbs by aperture
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp: 224-231
- 17) Zorach P. Glaser Glenn M. Heimer
Determination and elimination of hazardous microwave fields aboard naval ships.
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:232-238
- 18) Robert P. Zimmer H. Allen Ecker Vojin P Popovic
Selective EM heating of tumors in animals in deep hypothermia
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:238-245

- 19) George M. Samaras Lawrence R. Murrof George E. Anderson
Prolongation of life during high intensity microwave exposures.
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:245-247
- 20) Edward E. Aslan
Electromanyetic radiation meter
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:247-250
- 21) Robert W. Weidlinger
Microwave cataract
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:250-251
- 22) R.D. Mc Afee
Analeptic effect of microwave irradiation on experimental animals.
February 1971 IEEE Tr. on microwave trans. tec.vol.19
No: 2 pp:251-252
- ~~23) Hot spots generated in conducting spears by EM. waves
and biological impliations
January 1972 IEEE Tr. on Biomedical Eng. vol:19 No:2
pp:53-58~~
- 24) Sol M. Michealson
Human exposure to nonionizing radiation energy potential hazards and safety standarts.
April 1972 IEEE Tr. on Proceeding vol:60 No:4 pp:389-421
- 25) C.C Jhonson Arthur W. Guy
Nonioniazing elektromanyetic wave effcts in biological materials and systems.
Julay 1972 IEEE Proceeding vol:60 No:6 pp:692-718
- 26) William A. Imbrialle & Paul G. Ingerson
On numerical convergance of moment solution of moderately thic wire antenas using sinusoidal basis functions
May 1973 IEEE Tr. on Antenas and propogation pp:363-366
- 27) Chen To Tai
On the eigenfuncion expresion of dyadic green function
April 1973 IEEE Tr. on Proceeding pp:480-481
- 28) Cames C. Lin Arthur W. Guy C.C Jhonson
Power deposition in a spherical model of man exposed to 1-20 MHz. EM. fields
December 1973 IEEE Tr.on Microwave tr.tec. vol:21 No:12
on:791-797

- 29) Donald E. Livesay & Kun-mu Chen
Electromagnetic field induced inside arbitrary shaped
biological body
December 1974 IEEE Tr.on Microwave tr.tec. vol:22 No:12
pp:1273-1280
- 30) William T. Joines Ronald J. Speigel
resonance absorptrion of microwave by human skulls.
January IEEE Tr. on Biomed. Eng. pp:46-48
- 31) Cristian Albertsan Jesper E. Hansen N. E Jensen
computation of radiation from wire antennas on conducting
bodies
March 1974 IEEE Tr.on Ant. & Prop. vol:22 No:2 pp:200-202
- 32) T. K. Wu L. L. Tsai
Numerical analysis of EM. fields in biological tissues
August 1974 IEEE Tr. on proceeding pp: 1167-1170
- 33) D.P Gandhi
Polarization and frequency effects on whole animals ab-
sorption of RF energy.
Agust 1974 IEEE Tr. on Proceeding pp:1171-1175
- 34) Allen G. Howard JR.
On the longitiudial component of the green function
dyadic.
December 1974 IEEE Proceeding pp:1704-1705
- 35) C.C. Jhonson C. H. Durney H. Mossadi
Long Wavelength EM power absorption in polarate spheroi-
dal models of man and animals.
September 1975 IEEE Tr. on Microwave T. T. vol:23 No:9
pp:739-747
- 36) C. H Durney C. C. Jhonson
Long wavelength analysis of plane wave irradiation of a
prolate spheroid model of man.
February 1975 IEEE Tr. on Microwave theory. tec. vol:23
No:2 pp:246-253
- 37) C. C. Jhonson & C. H. Durney H. Mossadi
Electromagnetic power absorption in anisotropic tissue
media
Julay 1975 IEEE Tr. on Microwave theory. tec. vol:23
No:2 pp:246-253
- 38) R. H. T. Bates
Analytic constrains on EM field computations
August 1975 IEEE Tr. on Microwave theory. tec. vol:23

- 39) A. Taflove Morris E. Brodwin
Numerical solution of steady state EM scattering problems
using time dependent maxwel equations.
August 1975 IEEE Tr. on Microwave theory. tec. vol:23
No:2 pp:623-630
- 40) C. M. Weil
Absorption charecteristics of multilayered sphere models
exposed to UHF/microwave radiation
November 1975 IEEE Biomedical Eng. vol:22 No:6 pp:468-476
- 41) D. P. Gandhi
Frequency and oriantation effects on whole animal absorp-
tion of EM Waves.
November 1975 IEEE Tr.on Biomedical Eng. vol:6 pp:536-542
- 42) R. Mitra C. A. Klein
The use of pivot ratios as a guide to ztability of mat-
rix equations arising in the method of moments.
May 1975 IEEE Tr. on Antenna Propogation pp:448-450
- 43) M. Kobayashi
Greens's fuction in a region with inhomogeneous isotropic
dielectric media
September 1975 IEEE Tr.on Microwave T. T. pp:760-765
- 44) A. Taflova M. E. Brodwin
Computation of the EM. fields and induced temparetures
within a model of the microvawe irradiated human eyes.
November 1975 IEEE Tr. on Microwave theory. tec. vol:23
No:2 pp:888-896
- 45) D. P. Gandhi
Condition of strongest electromagnetic power deposition
in man and animals.
December 1975 Microwave T. T. vol:23 No:12 pp:1020-1029
- 46) A.W.Guy Micheal D. Webb. Carrol C. Sorensan
Determination of power absorption in man exposed to high
frequency EM. fields by thermographic measurments on
scale models.
September IEEE TR. on Biomedical Eng. vol:23 No:5
pp:361-371

- 47) B.Hag S. H. Guru Kun MU Chen
Experimental and theoritical studies on EM fields induced
inside finite biological bodies
Julay 1976 IEEE Tr. on Microwave T.T. vol:26 No:7
pp:433-440
- 48) R. G. Spegial
ELF coupling to spherical models of man and animals
September 1976 IEEE Tr. on Biomedical Eng. vol:23 n:5
pp:387-391
- 49) R. R. Bowman
-A probe for measuring temperature in radio frequency
heated materials
January 1976 IEEE Tr. on Microwave T.T. pp:43-45
- 50) C. T. Tai Pavel Rozanfeld
Different represantation of dyadic green's functions for
a rectangular cavity
September 1976 IEEE Tr. on Microwave T.T. vol:24 No:9
pp:43-45
- 51) H. Mossadi C. H. Durney C. C. Jhonson
Long wavelength electromagnetic power absorbtion in elip-
soidal model of man and animals
January 1977 Microwave T.T. vol:25 No:1 pp:47-60
- 52) R. J. Spegial
High voltage electric field coupling to humans using mo-
ment methodtechniques
September 1977 Biomedical Eng. vol:24 No:5 pp:466-472
- 53) Kun-mu Chen B. S. Guru
Internal EM field and absorber power density in human
torsos induced by 1-500 MHz. EM. waves
September 1977 Microwave T.T. vol:25 No:9 pp:746-756
- 54) M. J. Hagman O.P. Gandhi C. H. Durney
Upper bound on cell size for moment methode solution
October 1977 Microwave T.T. vol:25 No:10 pp:831-832
- 55) Te-Kao L.L Tsai
Electromagnetic field induced inside in arbitrary cylin-
der of biological tissue
October 1977 Microwave T.T. vol:25 No:10 pp:61-65
No:2 pp:605-623

Y.G. YÖKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSTON MÜDÜRLÜĞÜ