

Aralık'11 December'11

Sayı/Number: 2 Cilt/Volume: 1
Yıl/Year: 2011
ISSN: 1309-5501

Yayın Sahibi

TMMOB Elektrik Mühendisleri
Odası adına
Cengiz GÖLTAŞ

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Erdal APAÇIK

Yayın İdare Merkezi

Ihlamur Sokak No: 10 Kat: 4
Kızılay/Ankara
Tel: (0312) 425 32 72
Faks: (0312) 417 38 18
<http://bilimseldergi.emo.org.tr>
bilimseldergi@emo.org.tr
EMO üyelerine parasız dağıtılır

Teknik Editör

E. Orhan ÖRÜCÜ

Teknik Sekreteryası

Emre METİN

Yayın Türü

Yerel süreli yayın
6 ayda bir yayınlanır

Basım Adedi

5000

Basım Tarihi

Aralık 2011

Sayfa Düzeni

PLAR

Planlama Yayıncılık Reklamcılık
Turizm İnşaat Tic. Ltd. Şti.
Yüksel Cad. No: 35/12 Yenışehir-Ankara
Tel: (0.312) 432 01 83-93
Faks: (0.312) 432 54 22
e-posta: plar1td@gmail.com

Baskı Yeri

Matttek Matbaacılık
Basım Yayın Tanıtım Tic. San. Ltd. Şti.
Adakale Sokak No: 32/27 Kızılay/Ankara
Tel: (0312) 433 23 10 • Faks: (0312) 434 03 56

EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer and
Biomedical Engineering

YAYIN KURULU

BAŞ EDITÖR/EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. A. Hamit SERBEST

Çukurova Üniversitesi

EDİTÖRLER/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Bahri ERCAN

Hacettepe Üniversitesi

Prof. Dr. Murat EYÜBOĞLU

Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. H. Altay GÜVENİR

Bilkent Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan KUNTMAN

İstanbul Teknik Üniversitesi



TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

UCTEA/Chamber of Electrical Engineers

EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer
and Biomedical Engineering

YAYIN KURULU

BAŞ EDITÖR/EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. A. Hamit SERBEST

Çukurova Üniversitesi

EDİTÖRLER/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Bahri ERCAN

Hacettepe Üniversitesi

Prof. Dr. Murat EYÜBOĞLU

Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. H. Altay GÜVENİR

Bilkent Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan KUNTMAN

İstanbul Teknik Üniversitesi

DANIŞMA KURULU

Prof.Dr. Metin AKAY	Arizona State University	Prof.Dr. Oya KALIPSIZ	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof.Dr. Mehmet AKŞİT	Twente University	Prof.Dr. İrfan KARAGÖZ	Gazi Üniversitesi
Müjdat ALTAY	Netaş	Prof.Dr. Aydın KÖKSAL	Bilişim AŞ
Prof.Dr. Ayhan ALTINTAŞ	Bilkent Üniversitesi	Fikret KÜÇÜKDEVECİ	Tepa AŞ
Prof.Dr. Volkan ATALAY	ODTÜ	Prof.Dr. Duran LEBLEBİCİ	
Serdar BOZKURT	SIEMENS	Prof.Dr. Kemal LEBLEBİCİOĞLU	ODTÜ
Prof.Dr. Alinur BÜYÜKAKSOY	GYTE	Turgay MALERİ	Gate Elektronik
Prof.Dr. Işık ÇADIRCI	Hacettepe Üniversitesi	Dr. Ahmet MEREV	Tübitak UME
Doç.Dr. Hakan ÇAĞLAR	Anel	Prof.Dr. Banu ONARAL	Drexel Üniversitesi
Dr. Semih ÇETİN	Cybersoft	Prof.Dr. Sermin ONAYGİL	İTÜ
Prof.Dr. İnci ÇİLESİZ	İTÜ	Prof.Dr. M. Bülent ÖRENCİK	Tübitak MAM Bilişim Enstitüsü
Bülent DAMAR	Pelka	Prof.Dr. Aydoğan ÖZDEMİR	İTÜ
Prof.Dr. Oğuz DİKENELLİ	Ege Üniversitesi	Prof.Dr. Erdal PANAYIRCI	Kadir Has Üniversitesi
Doç.Dr. Ali Hikmet DOĞRU	ODTÜ	Prof.Dr. Bülent SANKUR	Boğaziçi Üniversitesi
Dr. Hakan ERDOĞMUŞ	IEEE	Tarkan TEKCAN	Vestel
Prof.Dr. Muammer ERMİŞ	ODTÜ	Dr. Erkan TEKMAN	Tübitak UEKAE
Prof.Dr. Osman EROĞUL	GATA	Doç.Dr. Belgin TÜRKAY	İTÜ
Prof.Dr. H. Bülent ERTAN	ODTÜ	Ahmet Tark UZUNKAYA	Entes AŞ
Doç.Dr. H. Özcan GÜLÇÜR	Boğaziçi Üniversitesi	Prof.Dr. Yekta ÜLGEN	Boğaziçi
Prof.Dr. Yusuf Ziya İDER	Bilkent Üniversitesi	Davut YURTTAŞ	Inform AŞ
Prof.Dr. Yorgo İSTEFANAPULOS	İşık Üniversitesi		

İÇERİK/CONTENTS

- İnce Tel Yapılarından Saçılma Problemlerinde Menzilden Bağımsız Yarı-Uzay Green Fonksiyonları..... 57**
Range Independent Half-Space Green Functions in Scattering Problems for Thin Wire Grid Structures
Ömer Zor, Burak Polat
- Saha Geri Dönüş Oranını AR-GE Aşamasında İndikatör ile Tahmin Etme Yöntemi 67**
Field Return Rate Estimation in R&D Phase with an Indicator
Ali Tarkan Tekcan, Gürmen Kahramanoğlu, Mustafa Nevzat Yatur, Barbaros Kirişken, Mustafa Gündüzalp
- Hesaplanabilir AC Direnç Standardının 5 MHz'e Kadar Modellenmesi ve Üretilmesi..... 75**
Modelling and Development of Calculable AC Resistor Standard Up To 5 MHz
Mehmet Çınar, Arif Dolma, Yakup Gülmez, Handan Sakarya, Ömer Erkan, Murat Celep
- Güç Kalitesi Çalışmalarında Bilgisayar Mühendisliğinin Rolü 83**
The Role of Computer Engineering in Power Quality Studies
Dilek Küçük
- Televizyon İzleme Ölçüm Sistemi Tasarımı 89**
Television Rating Measurement System Design
Berna Özbek, Tolga Ayav, Mustafa Nevzat Yatur, Barbaros Kirişken
- Türkçe Metinden Konuşma Sentezlemede Doğallığın Artırılması İçin Öneriler 95**
Recommendations for Increasing the Naturalness in Turkish Text-to-Speech Synthesis
İ. Baran Uslu, H. Gökhan İlk, A. Egemen Yılmaz
- Doku Anomalisi İçeren Beyin MR İmgeleri Üzerinde Mumford-Shah Tabanlı Bölütleme..... 103**
Mumford-Shah Based Segmentation of Brain MR Images With Tissue Abnormalities
Alper Çevik, B. Murat Eyüboğlu

ÖNSÖZ

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası'nın yasal sahibi olduğu “**EMO Bilimsel Dergi**”nin ikinci sayısını sunmaktan büyük bir mutluluk duymaktayız. Böylece, dergimizin ilk yılı için öngördüğümüz iki sayı yayınlanmış olup sonraki yıllarda bu sayı artırılmaya çalışılacaktır.

Dergimiz yayın hayatına başladığından bu yana 43 makale gönderilmiş olup, bunlardan 14 tanesi dergide yayınlanmak üzere kabul edilmiş, 17 tanesinin dergide yayınlanması uygun bulunmamış, 12 tanesi ise halen değerlendirme sürecinde bulunmaktadır. 29 farklı Üniversite ile 8 farklı firmadan toplam 111 yazarın gönderdiği makaleler 28 farklı üniversiteden 81 hakem tarafından değerlendirilmiştir. Hakemlik yapan akademisyenlerin belirlenmesi alanlarındaki uzmanlıkları özellikle dikkate alınarak olabildiğince farklı üniversiteden yapılmasına özen gösterilmiştir.

Bilimsel makalelerin değerlendirilmesinde hakemlik görevi alan meslektaşlarımıza değerlendirdikleri her makale için TMMOB Bilirkişilik Yönetmeliği uyarınca belirlenen miktarda bilirkişilik ücreti ödenmektedir.

İlk yılında dergimiz bilimsel ve teknolojik araştırma yayın süreçlerine yaklaşık 200 meslektaşımızın katkısını almış bulunmaktadır. En az ulusal düzeyde bilimsel ve/veya teknolojik özgünlük içeren çalışmaları Türkçe yayımlayarak akademik çalışmaları sanayiye ve sanayide yapılan çalışmaları da akademik ortama taşıma hedefimize katkı yapacak meslektaşlarımızın sayısının hızla artacağına inanıyoruz.

Bilginin çoğalmasını sağlamanın en iyi yolunun “paylaşma” olduğu gerçeğinden hareketle doğru bilginin doğru biçimde paylaşılması ve derginin Türkçe olarak yayınlanması ile Türkçe'nin “bilim dili” olarak gelişmesine de katkılar sağlaması önemlidir.

Daha önce de duyurulduğu gibi; meslektaşlarımızın paylaşımını desteklemek amacıyla Danışma ve Yayın Kurullarımız yıl içinde yayımlanan “Akademik ve/veya Teknolojik Bilimsel Makale” türündeki makaleler arasından hakem değerlendirmesine göre en yüksek puanı alan makaleye o yılın “En İyi Makale Ödülü” verilmesini kararlaştırmıştır. “En İyi Makale Ödülü” alan makale yazar(lar)ına bildiri sunmak için katılacağı bir yurtdışı bilimsel toplantı için yol, konaklama ve kayıt ücretlerini karşılamak üzere en çok 3.000 TL destek verilecektir.

Dergimizin 2011 yılı içinde yayınlanan birinci ve ikinci sayılarda, hakem değerlendirmelerine göre, eşit puan alan 2 makale birlikte bu ödüle hak kazanmıştır. İlk sayıda yayınlanan “MIMO Sistemler için Gelişmiş Uzaysal Modülasyon Teknikleri” isimli makalesi ile İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Ertuğrul Başar ve ikinci sayıda yayınlanan “Doku Anomalisi İçeren Beyin MR İmgeleri Üzerinde Mumford-Shah Tabanlı Bölütleme” isimli makalesi ile Ortadoğu Teknik Üniversitesi'nden Alper Çevik'e ödül verilmiştir. Her iki makalenin yazarlarına teşekkür ediyor, başarılarının devamını diliyoruz.

Dergimizin Haziran 2012'de yayınlanacak 3. Sayısı “Elektrik Makinaları” konusunda Özel Sayı olarak hazırlanmakta ve Misafir Editörlüğü Danışma Kurulu üyemiz Sayın Prof. Dr. Bülent Ertan tarafından yapılmaktadır. Kendisine ve bu özel sayı için makale gönderen yazarlara, makaleleri değerlendirmekte olan hakemlere değerli katkıları için teşekkür ediyoruz.

Ülkemiz ve EMO topluluğu adına büyük ümitlerle çıktığımız bu yolda desteklerini esirgemeyen Danışma Kurulu üyelerimize, 41nci ve 42nci Dönem EMO Başkanları ve Yönetim Kurulu üyeleriyle tüm çalışanlarına, yazarlarımıza ve hakemlik yapan araştırmacılarımıza gönülden teşekkürlerimizi ve saygılarımızı sunarız.

Prof. Dr. A. Hamit SERBEST
Yayın Kurulu Adına

İnce Tel Yapılarından Saçılma Problemlerinde Menzilden Bağımsız Yarı-Uzay Green Fonksiyonları

Range Independent Half-Space Green Functions in Scattering Problems for Thin Wire Grid Structures

Ömer Zor¹, Burak Polat²

¹Elektronik Mühendisliği Bölümü
Uludağ Üniversitesi
omerzor@uludag.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Trakya Üniversitesi
burakpolat@trakya.edu.tr

Özet

Bu çalışmada Green fonksiyonu formülasyonu ve Moment yöntemi kullanılarak, rezonans bölgesinde ve “yüksek kırıcılık yaklaşıklığı” (YKY) altında, düzlemsel sınıra sahip kayıplı dielektrik yarı-uzay üzerinde konuşlanmış metalik ince tel ızgara yapılarına ilişkin saçılma problemleri incelenmiştir. Bu amaçla Moment yöntemindeki empedans matrisinin hesabında, literatürde ilk defa olarak, R.W.P.King’in KYK altında her uzaklık için geçerli Green fonksiyonları kullanılmıştır. Geliştirilen MATLAB™ tabanlı yazılımı doğrulama amaçlı olarak düzlem dalga uyarımı altında belirli kanonik yapılar üzerinde elde edilen akım dağılımlarının sayısal değerleri SNECTM ticari yazılımı ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Abstract

In this work we investigate electromagnetic scattering from metallic thin wire structures located over a planar lossy dielectric half-space by applying Green's function formulation and Method of Moments in the resonance region and under “high contrast approximation” (HCA). For this purpose in the calculation of the impedance matrix of the Moment system we employ the Green functions of R.W.P.King valid for arbitrary range under HCA for the first time in literature. For a verification of the developed MATLAB™ codes the current distributions obtained under plane wave illumination on certain canonical thin wire structures are compared to the same results obtained by the commercial software SNECTM.

1. Giriş

Sommerfeld problemi, genel anlamıyla, özellikleri boşluğun özelliklerinden farklı olan bir düzlemsel yarı-uzay üzerinde ışına yapan bir Hertz dipolünün ışınma alanlarının hesabıdır ve bir basit dielektrik yarı-uzay durumu için ilk olarak Sommerfeld tarafından 1909 yılında tanımlanmış ve analitik-

asimptotik olarak çözülmüştür [1]. Elektromanyetizma mühendisliğinde bu kanonik problem kümesinin son derece yaygın uygulama alanları ortaya çıktıkça problemin değişik parametre uzayları için çeşitli tekniklerle çözümleri günümüze değin sürekli artan bir ilgi ile karşılanmıştır. Günümüze kadar gelen çözüm teknikleri genel hatlarıyla fonksiyon-kuramsal, asimptotik, sayısal ve karma şeklinde sınıflandırılabilirler. Bu çalışmaların tümünün dökümünü yapabilmek imkânsızdır ancak geniş bir listesi [2] no.lu kaynakta mevcuttur. Mevcut incelememiz açısından sayısal hesaba elverişli olan çözümler ise ilk olarak 1982 yılında King tarafından bir fonksiyon-kuramsal teknikle ortaya konmuştur [3]. King'in çözümü, esas olarak bir düzlemsel sınırlı dielektrik yarı-uzayın karmaşık kırılma indisinin (kırıcılığının) mutlak karesel olarak bir'den çok büyük olması koşulu altında *her uzaklık değeri* için geçerlidir. King'in bu alandaki çalışmalarının önemli bir kısmı toplu bir şekilde kaynak noktasının, polarizasyonunun ve yeryüzünün elektriksel özelliklerinin çeşitli kombinasyonları için [4] no.lu kaynakta bir araya getirilmiştir. 1999 yılından günümüze gelen ve King'in öğrencilerinin önderliğinde başlatılmış birçok çalışmada (ör.bkz.[5-17]) King'in yaklaşımları ileri matematiksel tekniklerle geliştirilerek, özellikle küresel tabakalı yer yüzeyi durumu için sayısal analize uygun analitik Green fonksiyonları geliştirilemiştir.

İnce tel tekniği, ilk olarak, 1966 yılında Richmond [18] tarafından ortaya atılmış ve modelin geçerliliği çeşitli kanonik yapılar için ölçüm verisi ile karşılaştırmalar yapılarak sınanmıştır. Takip eden yıllarda ince tel tekniğinin geçerlilik sınırlarını iyice netleştirmek için çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan bir 1974 yılı çalışmasında [19] boşlukta bir metal plakanın ince tel modeli fizik optik referans çözüme dayanarak test edilmiştir. Bu çalışmayı hem kapalı hem de açık yüzeyler için günümüze değin yine boş uzayda çok sayıda araştırma takip etmiştir [20-27]. Bu çalışmaların tümünün ortak bulgusu, ince tel tekniği ile hem açık hem de kapalı yüzeylerin gerçek uzak ışınma alanlarının (veya radar kesit alanlarının) uygun modelleme parametreleri altında başarı ile hesaplanabildiğini göstermektedir.

Moment yöntemi, matematiksel esasları çok geçmişe uzansa da, elektromanyetizma problemlerine uyarlanması yönünden 1967 yılında Harrington [28] aracılığı ile geniş uygulama alanı kazanmış ve günümüze değin sürekli olarak artan bir ilgi ile kullanılmaktadır. Sarkar ve Harrington öncülüğünde 1970'ler boyunca, radar uygulamaları yönünden önemi nedeniyle, düzlemsel kayıplı dielektrik yeryüzü üzerinde konuşlanmış ince tel problemlerinin Moment yöntemi ile incelenmesi yönündeki ilk adımlar atılmıştır (bkz. [29] ve oradaki kaynaklar). Ancak [3] no.lu çalışmanın yayımlandığı 1982 yılı öncesine kadar sayısal hesaba elverişli tam analitik Green fonksiyonlarının henüz türetilmemiş (ve ayrıca modern bilgisayarların da henüz doğmamış) olmaları nedeniyle sayısal çözümlerde Green fonksiyonlarının sadece geometrik optik bileşenleri göz önüne alınmış ("reflection coefficient method"), yüzey dalgası bileşenleri sağlıklı bir hata kestirimi yapılamadan ihmal edilmiştir.

Bu boşluğu doldurmak üzere 1981 yılında Lawrence Livermore Laboratuvarı'nda, özellikle ince tel yapıları için elektrik alan integral denklemini Moment yöntemine dayalı olarak sinüzoidal baz fonksiyonları kullanarak ve Sommerfeld integralini ileri sayısal-asimptotik çözüm algoritmalarından yararlanarak çözen NEC-2 [30] açık yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım, başarısı özellikle düzlemsel yeryüzü halinde çok çeşitli senaryolar için defalarca doğrulanmış olması nedeniyle, literatürde bir referans olarak kabul edilir.

Bu çalışmada Green fonksiyonu formülasyonu ve Moment yöntemi kullanılarak düzlemsel sınıra sahip kayıplı dielektrik yarı-uzay üzerinde konuşlanmış metalik ince tel ızgara yapılarına ilişkin rezonans bölgesinde ve "yüksek kırıcılık yaklaşıklığı" altında saçılma problemleri incelenmiştir. Bu amaçla ilk olarak 2. Kısımda Moment yönteminde empedans matrisinin hesabında King'in düzlemsel sınırlı yer yüzeyi için her uzaklıkta geçerli Green fonksiyonlarının herhangi kaynak ve gözlem noktaları için amacımıza uygun Kartezyen tensör bileşenleri sunulmuştur. 3. Kısımda elektrik alan integral denklemini incelenmiştir. Bu amaçla ince tel yaklaşıklığı; Moment yöntemi ile elde edilen doğrusal denklem sistemi; jonksiyon koşulları; empedans matrisinin elemanları üzerindeki integrasyon işlemleri ve saçılan uzak alanın kapalı ifadesi verilmiştir. 4. Kısımda, elde edilen bazı saçılan alan değerleri sayısal olarak sunulmuştur. Geliştirilen yazılımı doğrulama amaçlı olarak düzlem dalga uyarımı altında belirli kanonik yapılar üzerinde elde edilen akım dağılımlarının sayısal değerleri NEC-2 algoritmalarını bir arayüzle birleştirmiş olan SNECTM [31] ticari yazılımı ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Geliştirilen yazılımın veriyi SNECTM için formatlanmış giriş dosyalarından okuyabilme özelliği bulunmaktadır. Bu yazılımı NEC-2 tabanlı SNECTM gibi ticari veya NEC-4 gibi sivil kullanıma kapalı yazılımlardan daha değerli kılan temel niteliği, onların düzlemsel sınırlı yer yüzeyi halinde temel (sayısal-asimptotik) algoritmalarla oluşturdukları yeteneklerin ince tel problemlerinde ilk kez uygulanan King'in her uzaklık için geçerli Green fonksiyonları ile en yalın şekilde tekrar edilebilmekle kalmayıp; yine standart NEC algoritmalarına dayalı yazılımların aksine, mevcut ürünün tam analitik tabanlı olması nedeniyle uygun Green fonksiyonları kullanılarak saçılma probleminin senaryosunun (oşinografik parametreleri, yer şekillerini, yer katmanlarını, malzeme kaplanmış saçıcıları vs. içine alacak şekilde) sürekli geliştirilebilir olmasıdır. Bu yönde elde edilen birçok ek sonuç [32] no.lu çalışmada

sunulmuş olup bu makalede verilen sonuçlar sadece NEC2 ile karşılaştırılabilir veriler ile sınırlı tutulmuştur.

2. King'in Green Fonksiyonları

I ($z > 0$) ve II ($z < 0$) bölgeleri, boş uzay ve basit kayıplı dielektrik ortamlar olup bünye sabitleri ile dalga sayıları, sırasıyla, (ϵ_0, μ_0) , $k_1 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ ve $(\epsilon_2, \mu_0, \sigma_2)$, $k_2 = \omega\sqrt{\mu_0(\epsilon_2 + i\sigma_2/\omega)}$ ile verilsin. Monokromatik alanların tanımlanmasında zamana bağıllık $\exp(-i\omega t)$ şeklinde varsayılmıştır. Yer yüzeyinin (kompleks) kırıcılığı ise $N = k_2/k_1 = \sqrt{\epsilon_r + i\sigma_2/(\omega\epsilon_0)}$ ile tanımlıdır. Burada ϵ_0 , μ_0 boş uzayın dielektrik ve manyetik geçirgenlikleridir ve $\epsilon_r = \epsilon_2/\epsilon_0$ II bölgesinin bağıl dielektrik sabitidir. Yüksek kırıcılık yaklaşıklığı (YKY) $|N|^2 \gg 1$ veya (buna denk kabul edilerek) $|N| \geq 3$ şeklinde tanımlıdır. Analitik olarak $|N|$ 'nin bir basit ortamda alacağı en küçük değer $\sqrt{\epsilon_r}$ ile sınırlıdır. Buna göre $\epsilon_r \geq 9$ koşulu sağlandıkça YKY, ortamın iletkenlik değerinden ve çalışma frekansından bağımsız olarak her zaman sağlanır.

Birim momentli bir dipolün orijine göre $\vec{r}' = (x', y', z')$, $z' > 0$ noktasında konuşlandığı varsayıldığında King formülasyonuna göre YKY altında ışıdığı elektriksel alan (Green fonksiyonu), "doğrudan" (d), "görüntü" (i) ve "yüzey dalgası" (s) bileşenlerinden oluşur ve genel ifadesi

$$\begin{aligned} \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') &= \vec{G}^d(\vec{r}, \vec{r}') + \vec{G}^i(\vec{r}, \vec{r}') + \vec{G}^s(\vec{r}, \vec{r}'), \quad (2.1) \\ \vec{G}^{(d,i,s)} &= \hat{x}\hat{x}g_x^{(d,i,s)} + \hat{y}\hat{y}g_y^{(d,i,s)} + \hat{z}\hat{z}g_z^{(d,i,s)} \\ &+ \hat{x}\hat{y}g_{xy}^{(d,i,s)} + \hat{y}\hat{x}g_{yx}^{(d,i,s)} + \hat{z}\hat{y}g_{yz}^{(d,i,s)} \\ &+ \hat{x}\hat{z}g_{xz}^{(d,i,s)} + \hat{y}\hat{z}g_{zy}^{(d,i,s)} + \hat{z}\hat{z}g_z^{(d,i,s)} \end{aligned}$$

şeklinde verilir. Burada $g_b^{a(d,i,s)}(\vec{r}; \vec{r}')$, a eksen yönünde konuşlanmış birim momentli dipolün b eksen yönünde oluşturduğu elektrik alanın, sırasıyla; "doğrudan", "görüntü" ve "yüzey dalgası" bileşenlerini temsil etmektedir. Bu halde

$$R_1(\vec{r}, \vec{r}') = |\vec{r} - \vec{r}'| = \left[(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2 \right]^{1/2},$$

$$R_2(\vec{r}, \vec{r}') = |\vec{r} + \vec{r}'| = \left[(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z + z')^2 \right]^{1/2},$$

$$P = \left[(x - x')^2 + (y - y')^2 \right]^{1/2}, \quad U = \frac{k_1 R_2}{2N^2} \left[\frac{R_2 + N(z + z')}{P} \right]^2,$$

$$\xi_1 = 1 - \frac{1}{ik_1 R_1} - \frac{1}{k_1^2 R_1^2}, \quad \xi_2 = 1 - \frac{3}{ik_1 R_1} - \frac{3}{k_1^2 R_1^2},$$

$$\eta_1 = 1 - \frac{1}{ik_1 R_2} - \frac{1}{k_1^2 R_2^2}, \quad \eta_2 = 1 - \frac{3}{ik_1 R_2} - \frac{3}{k_1^2 R_2^2},$$

$$\eta_3 = 1 - \frac{1}{ik_1 R_2}, \quad \Xi = \left(\frac{\pi}{k_1 R_2} \right)^{1/2} e^{-iU} F(U)$$

ve Norton zayıflama fonksiyonu

$$F(U) = 1 + i(\pi U)^{1/2} e^{-U} \operatorname{erfc}(-iU^{1/2})$$

olmak üzere Green tensörünün toplam 9 bileşeninin açık ifadeleri, [4] no.lu kaynaktaki bulguların amaca uygun şekilde yeniden düzenlenmesiyle, $z, z' > 0$ için aşağıda sunulmuştur:

$$g_x^x = \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \left[\xi_1 - \frac{(x-x')^2}{R_1^2} \xi_2 \right] - \frac{e^{ik_1 R_2}}{4\pi R_2} \left[\eta_1 - \frac{(x-x')^2}{R_2^2} \eta_2 \right] \\ + \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2 N} \left\{ \frac{z+z'}{R_2} \eta_3 - \frac{\eta_1}{N} + \frac{(y-y')^2}{R_2^2} \frac{\eta_2}{N} \right. \\ \left. - \frac{\Xi R_2}{N^2 P^3} \left[ik_1 R_2 (x-x')^2 + \frac{R_2^2}{P^2} (y-y')^2 \right] \right\},$$

$$g_y^x = -\frac{(x-x')(y-y')}{R_1^2} \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \xi_2 + \frac{(x-x')(y-y')}{R_2^2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{4\pi R_2} \eta_2 \\ - \frac{(x-x')(y-y')}{R_2^2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2 N^2} \left[\eta_2 + \frac{1}{N} \frac{R_2^3}{P^3} \left(ik_1 R_2 - \frac{R_2^2}{P^2} \right) \right],$$

$$g_z^x = -\frac{(x-x')(z-z')}{R_1^2} \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \xi_2 + \frac{(x-x')(z+z')}{R_2^2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{4\pi R_2} \eta_2 \\ - \frac{x-x'}{R_2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2 N} \left[\eta_3 + \frac{\Xi}{N} ik_1 R_2 \frac{R_2}{P} \right],$$

$$g_x^y = g_y^x,$$

$$g_y^y = \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \left[\xi_1 - \frac{(y-y')^2}{R_1^2} \xi_2 \right] - \frac{e^{ik_1 R_2}}{4\pi R_2} \left[\eta_1 - \frac{(y-y')^2}{R_2^2} \eta_2 \right] \\ + \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2 N} \left\{ \frac{z+z'}{R_2} \eta_3 - \frac{\eta_1}{N} + \frac{\eta_2 (x-x')^2}{N R_2^2} - \frac{\Xi R_2}{N^2 P^3} \right. \\ \left. \times \left[ik_1 R_2 (y-y')^2 + \frac{R_2^2}{P^2} (x-x')^2 \right] \right\},$$

$$g_z^y = -\frac{(y-y')(z-z')}{R_1^2} \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \xi_2 + \frac{(y-y')(z+z')}{R_2^2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{4\pi R_2} \eta_2 \\ - \frac{y-y'}{R_2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2 N} \left[\eta_3 + \frac{\Xi}{N} ik_1 R_2 \frac{R_2}{P} \right],$$

$$g_x^z = -\frac{(x-x')(z-z')}{R_1^2} \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \xi_2 - \frac{(x-x')(z+z')}{R_2^2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{4\pi R_2} \eta_2 \\ + \frac{x-x'}{R_2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2 N} \left[\eta_3 + \frac{\Xi}{N} ik_1 R_2 \frac{R_2}{P} \right],$$

$$g_y^z = -\frac{(y-y')(z-z')}{R_1^2} \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \xi_2 - \frac{(y-y')(z+z')}{R_2^2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{4\pi R_2} \eta_2 \\ + \frac{y-y'}{R_2} \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2 N} \left[\eta_3 + \frac{\Xi}{N} ik_1 R_2 \frac{R_2}{P} \right],$$

$$g_z^z = \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \left[\xi_1 - \frac{(z-z')^2}{R_1^2} \xi_2 \right] + \frac{e^{ik_1 R_2}}{4\pi R_2} \left[\eta_1 - \frac{(z+z')^2}{R_2^2} \eta_2 \right] \\ + \frac{\Xi}{N} \frac{e^{ik_1 R_2}}{ik_1 P} \frac{R_2^2}{2\pi R_2}.$$

$|N| \rightarrow \infty$ mükemmel iletken limit durumunda yüzey dalgası bileşenleri yok olmaktadır.

3. Elektrik Alan İntegral Denklemi ve Çözümü

3.1. İnce Tel Yaklaşıklığı

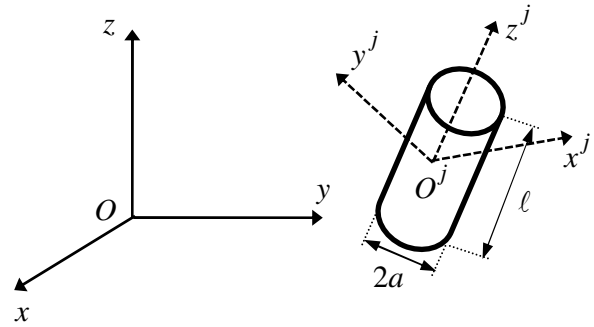
Bu teknik gereği herhangi bir metal yüzeyin ince tellerle modellenebildiği; ayrıca Moment yöntemi gereği de bu ince tel elemanlarının bölüt adımı verdiğimiz küçük parçalardan oluştuğu ve bu parçaların üzerinden sadece tel doğrultusunda ve (bu problem dahilinde) sabit genlikli akımların aktığı varsayılır. İnce tel yaklaşıklığı [18] ℓ boyunda ve a yarıçaplı bir silindirik ince mükemmel iletken tüp şeklinde tanımlanan bir bölütün

- boyunun, bölütün içinde bulunduğu ortamdaki dalga boyundan çok küçük ($\ell \ll \lambda$)
- yarıçapının, bölütün boyundan çok küçük ($a \ll \ell$) özelliklerini sağlaması halinde geçerlidir.

Buna göre, örneğin j . bölütün üzerindeki hacimsel akım yoğunluğu yerel $O^j x^j y^j z^j$ Kartezyen koordinat sistemine ilişkin (bkz. Şekil 1) (ρ^j, ϕ^j, z^j) silindirik koordinatlarında δ Dirac delta distribüsyonu ve H birim basamak fonksiyonu kullanılarak

$$\vec{J}_j(\rho^j, \phi^j, z^j) = \hat{z}^j I_j \frac{\delta(\rho^j - a)}{2\pi a} [H(z^j + \ell/2) - H(z^j - \ell/2)] \quad (3.1)$$

şeklinde verilir.



Şekil 1: j . ince tel bölüt ve yerel koordinatları

3.2. Doğrusal Moment Denklem Sistemi

j . bölütün uzayda herhangi bir noktada ışıdığı fazör elektrik alanının genel yapısı, notasyonu Şekil 1'den takip edileceği üzere, üç boyutlu uzayın bütünü üzerinden alınan

$$\vec{E}_j(\vec{r}) = i\omega\mu_0 \int \vec{G}(\vec{r}; \vec{r}^j) \cdot \vec{J}_j(\vec{r}^j) d\vartheta^j = I_j \vec{f}_j(\vec{r}) \quad (3.2)$$

konvolüsyon integrali ile verilir. M tane bölütten oluşan bir sistemin yarattığı toplam (saçılan) elektrik alan ise, süperpozisyon ilkesi gereği

$$\vec{E}(\vec{r}) = \sum_{j=1}^M \vec{E}_j(\vec{r}) = \sum_{j=1}^M I_j \vec{f}_j(\vec{r}) \quad (3.3)$$

serisi ile verilir. Buna göre uzayda herhangi bir noktada toplam elektrik alan

$$\vec{E}^{tot}(\vec{r}) = \vec{E}^{inc}(\vec{r}) + \vec{E}(\vec{r}) \quad (3.4)$$

şeklinde yazılır. İlgili sınır koşulu ise, iyi bilindiği üzere, “(mükemmel iletken) ince bölüt yüzeyleri üzerinde toplam elektrik alanın teğet bileşeni sıfırdır” şeklindedir. Bölüt yüzeyleri üzerindeki bu değişken noktalar Moment yöntemi gereği eş nokta (“collocation”) yaklaşıklığı ile bölütlerin merkez noktaları olarak seçildiğinde, (3.1) hacimsel akım yoğunluğu ifadesi (3.2) ve (3.3) içersine yerleştirilerek ilgili sınır koşulu uygulandığında

$$\sum_{j=1}^M Z_{mj} I_j = V_m, \quad m=1,2,\dots,M \quad (3.5)$$

doğrusal Moment denklem sistemine ulaşılır. Burada empedans matrisinin elemanları

$$Z_{mj} = i\omega\mu_0 \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \int_0^{2\pi} \hat{\ell}_m \cdot \hat{G}(\bar{r}_m; \bar{r}^{j'}) \cdot \hat{z}^j \Big|_{\rho^{j'}=a} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} dz^{j'} \quad (3.6)$$

bölütler üzerinden (yanal) yüzey integralleri şeklindedir. Bu integrallerin ince tel yaklaşıklığı altında ne şekilde tek kata düşürülerek sayısal olarak kolayca hesaplanabilir şekle getirildiği Kısım 3.4’te açıklanmıştır.

Potansiyel sütununun elemanları ise gelen alana bağlı olarak

$$V_m = -\bar{E}^{inc}(\bar{r}_m) \cdot \hat{\ell}_m \quad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir. $\bar{r}_m = (x_m, y_m, z_m)$, m . bölütün merkez noktasına uzanan konum vektörüdür. m . bölüt için akım yönünde seçilen (x_m^I, y_m^I, z_m^I) başlangıç ve (x_m^II, y_m^II, z_m^II) bitiş koordinatlarından faydalanarak,

$$\ell = \left[(x_m^II - x_m^I)^2 + (y_m^II - y_m^I)^2 + (z_m^II - z_m^I)^2 \right]^{1/2}, \quad \forall m$$

sabit bölüt boyu olmak üzere, m . bölütün birim teğet vektörü $\hat{\ell}_m$, $Oxyz$ referans sisteminde aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\hat{\ell}_m = \ell_{mx} \hat{x} + \ell_{my} \hat{y} + \ell_{mz} \hat{z} \\ = \left[(x_m^II - x_m^I) \hat{x} + (y_m^II - y_m^I) \hat{y} + (z_m^II - z_m^I) \hat{z} \right] / \ell$$

3.3. Jonksiyon Koşulları

Tel bölütlerinin birleştiği noktalara düğüm noktaları denir. Düğüm noktalarında, “bir düğüm giren akımların toplamı, düğümünden çıkan akımların toplamına eşittir” biçiminde ifade edilebilecek Kirchhoff Akımlar Yasası sağlanmalıdır. Bu koşulun sağlanması amacıyla empedans matrisine tel kafes yapıyı oluşturan düğüm sayısı kadar satır eklenir. Bu çalışmada olduğu gibi basamak tipi baz fonksiyonları tercih edildiğinde her düğüm noktası için bu ek satırların ilgili elemanlarına o düğümüne bağlı ve seçilen akımın yönü düğümüne doğru olan bölütler için “+1”, seçilen akımın yönü düğümünden dışarıya doğru olan bölütler için “-1” ve geriye kalanların tümü için “0” değerleri atanır. P ek satırın eklenmesiyle karesel yapısı bozulan matrisin tersi genelleştirilmiş anlamda alınmaktadır:

$$[I]_{M \times 1} = \left([Z]_{M \times (M+P)}^* \cdot [Z]_{(M+P) \times M} \right)^{-1} \cdot \left([Z]_{M \times (M+P)}^* \cdot [V]_{(M+P) \times 1} \right)$$

Burada “*” işareti genelleştirilmiş matrisin Hermitian transpozisini göstermektedir. Literatürde jonksiyon koşullarının değişik modelleri [33-35] no.lu raporlarda mevcuttur.

3.4. Empedans Matris Elemanlarının Hesabı

(2.1) Green tensörü (3.6) integraline yerleştirildiğinde empedans matrisinin elemanlarının

$$Z_{mj}^{(d,i,s)} = i\omega\mu_0 \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \int_0^{2\pi} \hat{\ell}_m \cdot \hat{G}^{(d,i,s)}(\bar{r}_m; \bar{r}^{j'}) \cdot \hat{z}^j \Big|_{\rho^{j'}=a} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} dz^{j'} \quad (3.8)$$

olmak üzere

$$Z_{mj} = Z_{mj}^d + Z_{mj}^i + Z_{mj}^s \quad (3.9)$$

şeklinde yazılabileceği görülür. Z_{mj}^d (ve Z_{mj}^i) değerleri boş uzay koşullarına karşı düştüklerinden hesaplamalarında gözlem noktalarını da j . bölütün (ve görüntüsünün) yerel koordinatlarında ifade ederek integrasyonu gerçekleştirmek takip edilebilecek en sade yoldur. Buna göre Z_{mj}^d hesabında j . bölütün merkez noktasından m . bölütün merkez noktasına uzanan konum vektörünün yerel ve dış koordinatlardaki ifadeleri

$$\bar{r}^m = (x^m, y^m, z^m) \quad \text{ve} \quad \bar{r}_m - \bar{r}^j = (x_m - x_j, y_m - y_j, z_m - z_j)$$

birbirlerine \bar{T}_j Euler dönüşüm matrisi aracılığı ile

$$\bar{r}^m = \bar{T}_j \cdot (\bar{r}_m - \bar{r}^j) \quad \text{veya} \quad \bar{r}_m - \bar{r}^j = \bar{T}_j^{TR} \cdot \bar{r}^m$$

bağıntısı ile bağlıdır. Burada

$$\bar{T}_j = \begin{bmatrix} \cos \alpha_j \cos \beta_j & \sin \alpha_j \cos \beta_j & -\sin \beta_j \\ -\sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 \\ \cos \alpha_j \sin \beta_j & \sin \alpha_j \sin \beta_j & \cos \beta_j \end{bmatrix}$$

olup diklik özelliği gereği tersi, transpozesine eşittir: $\bar{T}_j^{-1} = \bar{T}_j^{TR}$. α_j ve β_j üç boyutta dönüşüm açıları olup açık ifadeleri

$$\sin \alpha_j = (y_j^II - y_j^I) / [(x_j^II - x_j^I)^2 + (y_j^II - y_j^I)^2]^{1/2},$$

$$\cos \alpha_j = (x_j^II - x_j^I) / [(x_j^II - x_j^I)^2 + (y_j^II - y_j^I)^2]^{1/2},$$

$$\sin \beta_j = [(x_j^II - x_j^I)^2 + (y_j^II - y_j^I)^2]^{1/2} / \ell,$$

$$\cos \beta_j = (z_j^II - z_j^I) / \ell$$

şeklinde Euler dönüşümleri altında

$$R_1(\bar{r}^m; \bar{r}^{j'}) \equiv \left[(x^m)^2 + (y^m)^2 + (z^m)^2 + a^2 - 2z^m z^{j'} + (z^{j'})^2 \right]^{1/2}$$

ve \hat{z}^j yönlü dipolün Green fonksiyonları da

$$g_{x^j}^{z^j d}(\bar{r}^m, \bar{r}^{j'}) = -\frac{(x^m - x^{j'}) (z^m - z^{j'})}{R_1^2} \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \xi_2,$$

$$g_{y^j}^{z^j d}(\bar{r}^m, \bar{r}^{j'}) = -\frac{(y^m - y^{j'}) (z^m - z^{j'})}{R_1^2} \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \xi_2,$$

$$g_{z^j}^{z^j d}(\bar{r}^m, \bar{r}^{j'}) = \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \left[\xi_1 - \frac{(z^m - z^{j'})^2}{R_1^2} \xi_2 \right]$$

şekillerini alırlar. $x^{j'} = a \cos \phi^{j'}$ ve $y^{j'} = a \sin \phi^{j'}$ kutupsal dönüşümü uygulanarak (3.8) yüzey integrali $\phi^{j'}$ değişkenine göre tam çevrim integre edildiğinde,

$$t_{x^j}^{z^j d}(\bar{r}^m, \bar{r}^{j'}) = -\frac{x^m (z^m - z^{j'})}{R_1^2} \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \xi_2,$$

$$t_{y^j}^{z^j d}(\vec{r}^m, \vec{r}^{j'}) = -\frac{y^m(z^m - z^{j'})}{R_1^2} \frac{e^{ik_1 R_1}}{4\pi R_1} \xi_2 \text{ olmak üzere}$$

$$Z_{mj}^d = i\omega\mu_0 \int_{-\ell/2}^{\ell/2} [\ell^{mx} t_{x^j}^{z^j d}(\vec{r}^m, \vec{r}^{j'}) + \ell^{my} t_{y^j}^{z^j d}(\vec{r}^m, \vec{r}^{j'}) + \ell^{mz} g_{z^j}^{z^j d}(\vec{r}^m, \vec{r}^{j'})] dz^{j'} \quad (3.10)$$

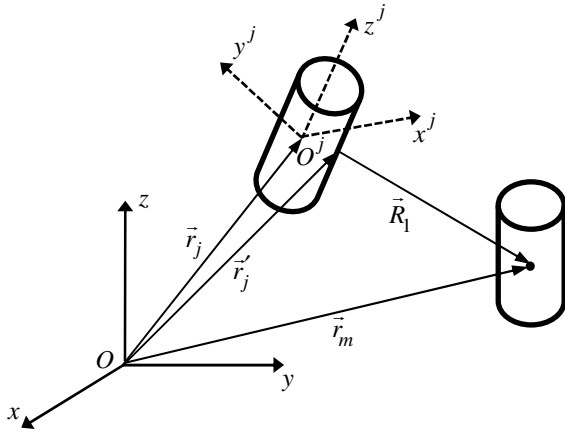
son şeklini alır. Burada

$\hat{\ell}^m = \ell^{mx} \hat{x}^j + \ell^{my} \hat{y}^j + \ell^{mz} \hat{z}^j = T_j \cdot \hat{\ell}_m$ olup, $\hat{\ell}_m$ vektörünün yerel koordinatlardaki karşılığıdır. (3.10) integrali sayısal olarak kolaylıkla hesaplanmaktadır. Z_{mj}^i teriminin hesabında da benzer yol izlenir.

Z_{mj}^s elemanlarının hesabında ise $-Z_{mj}^{d,i}$ elemanlarının hesabında takip edilen kaynak ve gözlem noktalarını yerel koordinatlarda ifade etme yönteminin aksine- kaynak noktalarını yerel, gözlem noktalarını da $Oxyz$ dış koordinatlarında ifade etmek takip edilebilecek en sade yoldur. Bu amaçla (3.8) integralinde kaynak üzerindeki herhangi bir noktayı temsil eden konum vektörünün dış ve yerel koordinatlardaki karşılıkları olan $\vec{r}_j = (x_j, y_j, z_j)$ ve $\vec{r}^{j'} = (x^{j'}, y^{j'}, z^{j'})$ arasındaki

$$\vec{r}^{j'} = T_j(\vec{r}_j - \vec{r}_j) \text{ veya } \vec{r}_j - \vec{r}_j = T_j^{-TR} \cdot \vec{r}^{j'}$$

bağıntısı (bkz. Şekil 2) 2. Kısımda verilen Green fonksiyonları içersine $\vec{r} = \vec{r}_m$, $\vec{r}' = \vec{r}_j$ için yerleştirilmiştir.



Şekil 2: j. ve m. ince tel bölüt ve ilgili konum vektörleri

Bu durumda ince tel yaklaşıklığı altında

$$R_1(\vec{r}_m; \vec{r}^{j'}) \cong \left\{ (x_m - x_j)^2 + (y_m - y_j)^2 + (z_m - z_j)^2 + a^2 + z^{j'2} - 2z^{j'}[(x_m - x_j)\cos\alpha_j \sin\beta_j + (y_m - y_j)\sin\alpha_j \sin\beta_j + (z_m - z_j)\cos\beta_j] \right\}^{1/2},$$

$$R_2(\vec{r}_m; \vec{r}^{j'}) \cong \left\{ (x_m - x_j)^2 + (y_m - y_j)^2 + (z_m + z_j)^2 + a^2 + z^{j'2} - 2z^{j'}[(x_m - x_j)\cos\alpha_j \sin\beta_j + (y_m - y_j)\sin\alpha_j \sin\beta_j - (z_m + z_j)\cos\beta_j] \right\}^{1/2},$$

$$P \cong \left\{ (x_m - x_j)^2 + (y_m - y_j)^2 - 2z^{j'} \sin\beta_j \cdot [(x_m - x_j)\cos\alpha_j + (y_m - y_j)\sin\alpha_j] + (z^{j'})^2 \sin^2\beta_j \right\}^{1/2},$$

$$U \cong \frac{k_1 R_2}{2N^2} \left(\frac{R_2 + NI_z}{P} \right)^2, \quad I_z \cong z_m + z_j = z_m + z_j + z^{j'} \cos\beta_j$$

şekillerini alır. Green fonksiyonlarının integrasyonunda

$$I_x = \int_0^{2\pi} (x_m - x_j) \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = x_m - x_j - z^{j'} \cos\alpha_j \sin\beta_j,$$

$$I_{xx} = \int_0^{2\pi} (x_m - x_j)^2 \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = (x_m - x_j - z^{j'} \cos\alpha_j \sin\beta_j)^2 + \frac{a^2}{2} (\cos^2\alpha_j \cos^2\beta_j + \sin^2\alpha_j),$$

$$I_{xy} = \int_0^{2\pi} (x_m - x_j)(y_m - y_j) \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = (x_m - x_j - z^{j'} \cos\alpha_j \sin\beta_j) \cdot (y_m - y_j - z^{j'} \sin\alpha_j \sin\beta_j) - \frac{a^2}{2} \sin\alpha_j \cos\alpha_j \sin^2\beta_j,$$

$$I_y = \int_0^{2\pi} (y_m - y_j) \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = y_m - y_j - z^{j'} \sin\alpha_j \sin\beta_j,$$

$$I_{yy} = \int_0^{2\pi} (y_m - y_j)^2 \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = (y_m - y_j - z^{j'} \sin\alpha_j \sin\beta_j)^2 + \frac{a^2}{2} (\sin^2\alpha_j \cos^2\beta_j + \cos^2\alpha_j),$$

$$t_x^{xs} = \int_0^{2\pi} g_x^{xs} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2 N} \left[\frac{I_z}{R_2} \eta_3 - \frac{\eta_1}{N} + \frac{I_{xy} \eta_2}{R_2^2 N} - \frac{\Xi}{N^2} \frac{R_2}{P^3} \left(ik_1 R_2 I_{xx} + \frac{R_2^2}{P^2} I_{yy} \right) \right],$$

$$t_y^{xs} = \int_0^{2\pi} g_y^{xs} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = -\frac{I_{xy} e^{ik_1 R_2}}{R_2^2 2\pi R_2 N^2} \left[\eta_2 + \frac{\Xi}{N} \frac{R_2^3}{P^3} \left(ik_1 R_2 - \frac{R_2^2}{P^2} \right) \right],$$

$$t_z^{xs} = \int_0^{2\pi} g_z^{xs} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = -\frac{I_x e^{ik_1 R_2}}{R_2 2\pi R_2 N} \left[\eta_3 + \frac{\Xi}{N} ik_1 R_2 \frac{R_2}{P} \right],$$

$$t_x^{ys} = t_y^{xs},$$

$$t_y^{ys} = \int_0^{2\pi} g_y^{ys} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2 N} \left[\frac{I_z}{R_2} \eta_3 - \frac{\eta_1}{N} + \frac{\eta_2 I_{xy}}{N R_2^2} - \frac{\Xi}{N^2} \frac{R_2}{P^3} \left(ik_1 R_2 I_{yy} + \frac{R_2^2}{P^2} I_{xx} \right) \right],$$

$$t_z^{ys} = \int_0^{2\pi} g_z^{ys} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = -\frac{I_y e^{ik_1 R_2}}{R_2 2\pi R_2 N} \left[\eta_3 + \frac{\Xi}{N} ik_1 R_2 \frac{R_2}{P} \right],$$

$$t_x^{zs} = \int_0^{2\pi} g_x^{zs} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = \frac{I_x e^{ik_1 R_2}}{R_2 2\pi R_2 N} \left[\eta_3 + \frac{\Xi}{N} ik_1 R_2 \frac{R_2}{P} \right],$$

$$t_y^{zs} = \int_0^{2\pi} g_y^{zs} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = \frac{I_y e^{ik_1 R_2}}{R_2 2\pi R_2 N} \left[\eta_3 + \frac{\Xi}{N} ik_1 R_2 \frac{R_2}{P} \right],$$

$$t_z^{zs} = \int_0^{2\pi} g_z^{zs} \frac{d\phi^{j'}}{2\pi} = \frac{\Xi}{N} ik_1 P \frac{e^{ik_1 R_2}}{2\pi R_2}$$

ara değişkenleri ve hesaplamaları yardımıyla sonuç ifade

$$Z_{mj}^S = i\omega\mu_0 \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \left[\ell_{mx} t_x^{xs} z_{jx} + \ell_{mx} t_x^{ys} z_{jy} + \ell_{mx} t_x^{zs} z_{jz} \right. \\ \left. + \ell_{my} t_y^{xs} z_{jx} + \ell_{my} t_y^{ys} z_{jy} + \ell_{my} t_y^{zs} z_{jz} \right. \\ \left. + \ell_{mz} t_z^{xs} z_{jx} + \ell_{mz} t_z^{ys} z_{jy} + \ell_{mz} t_z^{zs} z_{jz} \right] dz^{j'} \quad (3.11)$$

şeklinde bölüt boyunca tek katlı bir integrale indirgenmiş olur.

Burada $\hat{z}_j = z_{jx}\hat{x} + z_{jy}\hat{y} + z_{jz}\hat{z} = T_j \cdot \hat{z}^j$, \hat{z}^j vektörünün dış koordinatlardaki karşılığıdır. (3.10) ifadesi gibi (3.11) de sayısal olarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

3.5. Potansiyel Sütun Elemanlarının Hesabı

Moment yönteminde gelen elektrik alan vektörü içerisinde verici (kaynak) etmenini ve yayılım ortamının fiziksel ve geometrik özelliklerini içerisinde barındıran (3.7) potansiyel sütun elemanlarını belirlemek için gelen elektrik alanın analitik ifadesini elde edelim:

I ortamında herhangi \hat{n}_i yönünde ilerleyen bir homojen düzlemsel dalganın genel ifadesi

$$\vec{E}^i = \hat{e}_i e^{ik_0 \hat{n}_i \cdot \vec{r}} \quad (3.12)$$

ile verilsin. Arakesit düzleminin normali $\hat{n} \equiv \hat{z}$ olmak üzere dalganın geliş düzlemi \hat{n}_i ve \hat{n} vektörleri tarafından gerilir.

Geliş düzleminin normali $\hat{q} = \hat{n} \times \hat{n}_i$ ile tanımlı olsun. Buna göre (3.12) elektrik alanının doğrultu vektörü, \hat{q} vektörüne teğet ve dik bileşenleri cinsinden $\hat{e}_i = \hat{q}(\hat{q} \cdot \hat{e}_i) - \hat{q} \times (\hat{q} \times \hat{e}_i)$ olarak yazılabilir. (3.12) alanı TE ve TM polarizasyonlu bileşenleri cinsinden $\vec{E}^i = \vec{E}_{TE}^i + \vec{E}_{TM}^i$ şeklinde yazılabilir.

Burada

$$\vec{E}_{TE}^i = -\hat{q} \times (\hat{q} \times \hat{e}_i) E_0 e^{ik \cdot \vec{r}} = (\hat{q} \times \hat{e}_i) \times \hat{q} E_0 e^{ik \cdot \vec{r}},$$

$$\vec{E}_{TM}^i = \hat{q}(\hat{q} \cdot \hat{e}_i) E_0 e^{ik \cdot \vec{r}}$$

şeklinde tanımlıdır. Arakesit düzleminde yansıyan dalganın TE ve TM polarizasyonlu bileşenleri ise

$$\vec{E}_{TE}^r = (\hat{q} \times \hat{e}_i) \times \hat{q} \Gamma_{TE} E_0 e^{ik \cdot \vec{r}}, \quad \vec{E}_{TM}^r = \hat{q}(\hat{q} \cdot \hat{e}_i) \Gamma_{TM} E_0 e^{ik \cdot \vec{r}}$$

şeklinde yazılabilir. Buna göre toplam gelen alan

$$\vec{E}^{inc} = \vec{E}_{TE}^i + \vec{E}_{TE}^r + \vec{E}_{TM}^i + \vec{E}_{TM}^r \quad (3.13)$$

olarak tanımlanır. (3.13) ifadesindeki düşey ve yatay polarizasyonlu homojen düzlemsel dalgalar için tanımlanan Fresnel yansıma katsayıları

$$\Gamma_{TE} = \frac{N \cos \psi - (N - \sin^2 \psi)^{1/2}}{N \cos \psi + (N - \sin^2 \psi)^{1/2}}, \quad \Gamma_{TM} = \frac{\cos \psi - (N - \sin^2 \psi)^{1/2}}{\cos \psi + (N - \sin^2 \psi)^{1/2}}$$

şeklinde. ψ , dalganın \hat{n} ile \hat{n}_i vektörleri arasında kalan ve $[0, \pi/2)$ aralığında tanımlı olan geliş açısıdır.

3.6. Saçılan Uzak Alan İfadesi

Uzak alan hesabında bir j . bölütün ışınma alanı yerine aynı $\hat{\ell}_j$ yönlü, $p_j = I_j \ell_j$ momentli ve bölütün merkez noktasında konuşlanmış bir Hertz dipolünün ışınma alanı kullanılabilir.

Böylelikle saçıcı cismin ışıdığı toplam elektrik alan kapalı olarak

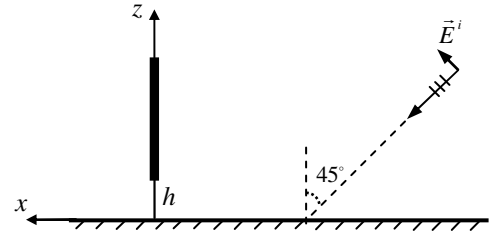
$$\vec{E}(\vec{r}) = i\omega\mu_0 \sum_{j=1}^M p_j \vec{G}(\vec{r}; \vec{r}_j) \cdot \hat{\ell}_j \quad (3.14)$$

şeklinde ifade edilebilir.

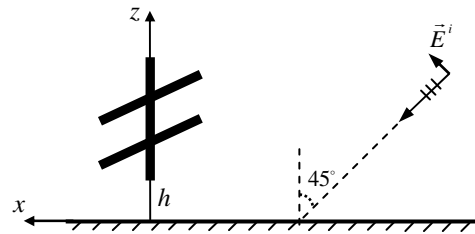
4. Sayısal Uygulamalar

Bu kısımda, analitik hesaplamaların ve geliştirilen yazılımların doğruluklarını ticari SNEC™ yazılımı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırarak test etmek üzere YF bandı içerisinde kalacak şekilde bazı sayısal sonuçlar sunulmuştur. Yüzey dalgalı ve ufuk ötesi radar uygulamaları göz önüne alınarak kaynak frekansı $f = 3 [MHz]$ ($\lambda = 100 [m]$) ve yer yüzeyinin elektriksel sabitleri okyanus suyununki ile aynı kabul edilmiştir ($\epsilon_r = 80$, $\sigma = 4 [S/m]$). Tüm uygulamalarda Moment yönteminin etkinliği açısından saçıcı cisimlerin boyutları rezonans bölgesinde çalışılacak şekilde ayarlanmıştır.

İlk olarak, Şekil 3 ile verilen ve en sade durum olarak nitelendirilebilecek olan bir düşey tel yapıdan Oxz düzleminde 45° açı ile gelen düzlemsel dalganın saçılma senaryosu; ikinci olarak da, aynı uyarım altında Şekil 4 ile verilen ve iki jonksiyon noktası barındıran geometri ele alınmıştır.



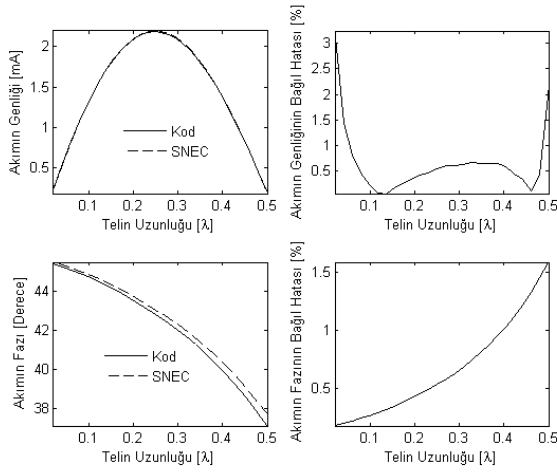
Şekil 3: Düzlemsel yer yüzeyi üzerinde homojen düzlemsel dalga ile aydınlatılmış bir ince düşey tel



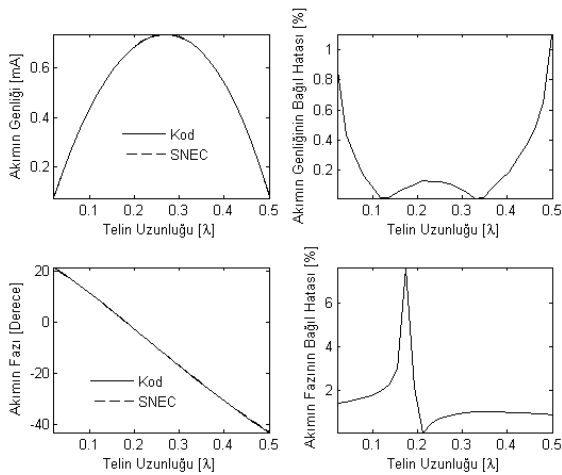
Şekil 4: Düzlemsel yer yüzeyi üzerinde homojen düzlemsel dalga ile aydınlatılmış bir dik çakışık ince tel yapı

Her iki senaryoda da hem düşey hem de yatay ince tellerin boyları, dalga boyu cinsinden, $\lambda/2$ ve düşey telin alt uç

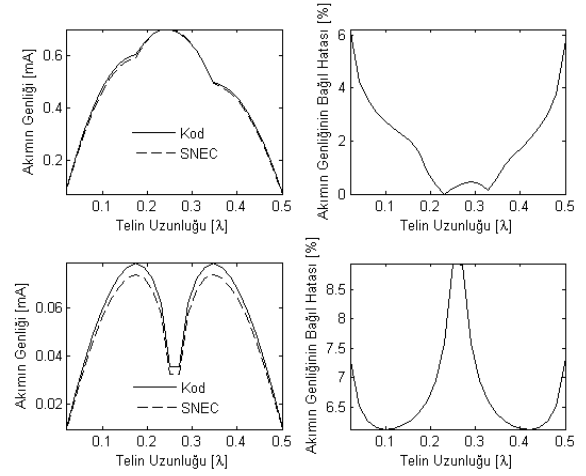
noktasının yerden yüksekliği $\lambda/20$ olarak alınmıştır. Şekil 4'teki yatay teller y eksenini boyunca uzanmakta olup düşey teli eşit üç parçaya bölmektedirler. İnce tel yaklaşıklığına uyacak şekilde tüm bölütlerin boy ve yarıçapı $\ell = \lambda/50 [m] = 2 [m]$, $a = \lambda/1000 [m] = \ell/20 = 1/10 [m]$ alınmıştır. İnce tel yaklaşıklığı sınırları içinde kaldığı sürece elde edilen sayısal sonuçlar bölütlerin seçilen boy ve yarıçap değerlerine duyarlı değildir. Her iki senaryoda da hem yarı-uzayın hem de jonksiyonların varlıklarının çözümlerin doğruluklarındaki etkilerini ortaya çıkarmaya yönelik olarak, düşey ve yatay kollar boyunca indüklenen fazör akım dağılımının genlik/faz değerlerini ve bu değerlerin SNECTM ile hesaplanan aynı değerlere göre bağlı hatalarını ($\%100|(SNEC^{TM} - KOD)/SNEC^{TM}|$) sergileyen toplam 6 set grafik sunulmuştur.



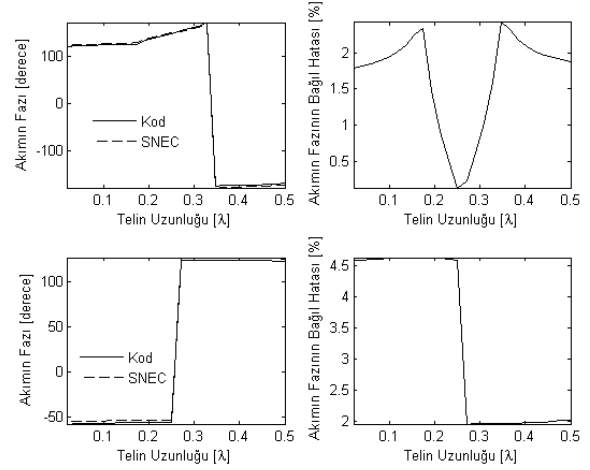
Şekil 5: Boş uzay koşullarında düşey tel boyunca indüklenen akımın genlik/faz dağılımı ve bağlı hatalar



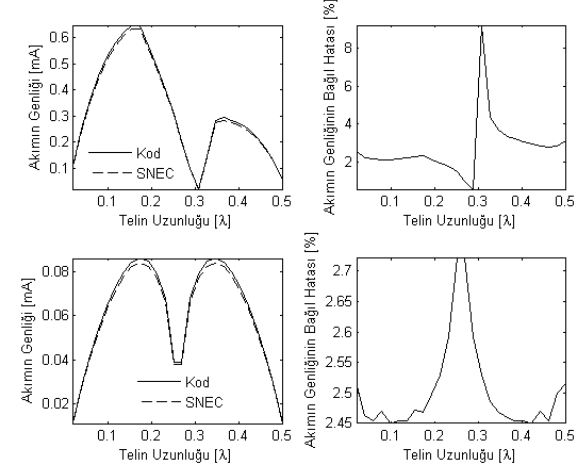
Şekil 6: Yarı uzay koşullarında düşey tel boyunca indüklenen akımın genlik/faz dağılımı ve bağlı hatalar



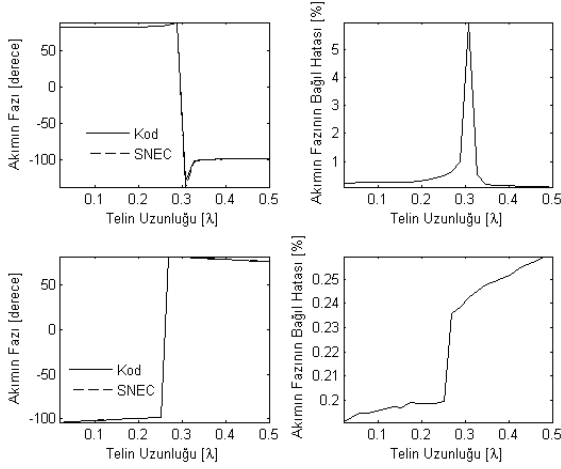
Şekil 7: Boş uzay koşullarında çakışık tel yapının düşey ve üst yatay kolları boyunca indüklenen akımın genlik dağılımı ve bağlı hatalar



Şekil 8: Boş uzay koşullarında çakışık tel yapının düşey ve üst yatay kolları boyunca indüklenen akımın faz dağılımı ve bağlı hatalar



Şekil 9: Yarı uzay koşullarında çakışık tel yapının düşey ve üst yatay kolları boyunca indüklenen akımın genlik dağılımı ve bağlı hatalar



Şekil 10: Yarı uzay koşullarında çakışık tel yapının düşey ve üst yatay kolları boyunca indüklenen akımın faz dağılımı ve bağıl hatalar

Sayısal sonuçlarda görülen ve %9 ile sınırlı kalmakla beraber tamamıyla yok edilemeyen bağıl hata değerlerinin, geliştirilen yazılımda kullanılan basamak (darbe) baz fonksiyonlarının yakınsama yeteneğinin SNEC™ yazılımında kullanılan ve fiziksel olarak çok daha uygun olan sinüzoidal baz fonksiyonlarından daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira bu iki yazılımın dayandığı matematiksel prensiplerin arasındaki tek farklı nokta baz fonksiyonlarının seçimidir. Darbe baz fonksiyonları kullanıldığında kuramsal olarak sağlanamayan önemli bir fiziksel koşul ise ince telin herhangi bir düğüme girmeyen (yani, açık) uçlarına doğru yaklaşıldığında akımın düzgün olarak sıfıra gittiğidir.

5. İleriye Yönelik Çalışmalar

Bu çalışmada geliştirilen MATLAB™ tabanlı yazılım, veriyi SNEC™ ticari yazılımı ile aynı formatta okuyabilme yeteneğine sahip iken, NEC tabanlı tüm yazılımların kullanıcılarca değiştirilemez sayısal-asimptotik algoritmalar kullanıyor olmalarının aksine, tam analitik çözümlere dayalı olması nedeniyle sürekli gelişime açık olup, bu yönüyle önemli bir avantaja sahiptir. Zira küresel yer yüzeyi halinde kritik uzaklığa yaklaştıkça anten ölçüm sonuçlarının tam analitik çözümlerle sürekli uyum halinde kalırken NEC-3,4 çözümlerinin bunlardan ciddi sapmalar gösterdikleri saptanmıştır (bkz [36, Kısım 1] ve oradaki kaynaklar. Ayrıca bkz.[37,38]).

Bu araştırma dâhilinde edinilen tecrübeler ışığında yazılımın yeteneklerini geliştirmek amacıyla ince tel kafes yapılar ile ilgili aşağıdaki çalışmaların sürdürülmesi planlanmaktadır:

- [39] çalışması gibi örnekler referans alınarak darbe baz fonksiyonlarının fiziksel açıdan en gerçekçi tercih olan sinüzoidlerle değiştirilmesi;
- deniz yüzeyi üzerinden yayılan radar darbe formlarının (ör.bkz. [40-42]) saçıcı ile etkileşimini ortaya çıkarmak üzere zaman domeni analiz yeteneğinin oluşturulması;
- empedans matrisinin, görünmezlik uygulamalarına yönelik, başlangıç olarak, empedans sınır koşulları ile modellenmiş dielektrik kaplı bölütler için geliştirilmesi;

- literatürde tabakalı ortamlar için geliştirilmiş menzilden bağımsız Green fonksiyonlarının [4-17] formülasyona dahil edilmesi;
- ticari bir ürün oluşturma aşamasında analitik hesap süresini kısaltmaya yönelik olarak MATLAB™ yazılımlarının yerine daha etkin programlama platformlarının, en etkin NEC2 ön işlemcilerinin [43] ve modelleme yöntemlerinin [44,45] araştırılması.

Teşekkür: Bu çalışma Uludağ Üniversitesi BAP Birimi F-2007/37 No.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] Sommerfeld A., "Propagation of Waves in Wireless Telegraphy", *Ann. Phys.*, 28, 665-736, 1909.
- [2] Samii Y.R., Mittra R. ve Parhami P., "Evaluation of Sommerfeld Integrals for Lossy Half-Space Problems", *Electromagnetics*, 1(1), 1-28, 1981.
- [3] King R.W.P., "New Formulas for the Electromagnetic Field of a Vertical Electric Dipole in a Dielectric or Conducting Half-Space Near its Horizontal Interface", *J. Appl. Phys.*, 53, 8476-8472, 1982. (düzeltme : 56, 3366, 1984).
- [4] King R.W.P., Owens M. ve Wu T.T., *Lateral electromagnetic waves: theory and applications to communications, geophysical exploration, and remote sensing*, Springer Verlag, 1992.
- [5] Houdzoumis V.A., "Vertical Electric Dipole Radiation over a Sphere: Character of the Waves that Propagate Through the Sphere", *J. Appl. Phys.*, 86, 3939-3942, 1999.
- [6] Houdzoumis V.A., "Two Modes of Wave Propagation Manifested in Vertical Electric Dipole Radiation over a Sphere", *Radio Sci.*, 35, 1(1), 19-29, 2000.
- [7] Margetis D. ve Wu T.T., "Exactly Calculable Field Components of Electric Dipoles in Planar Boundary", *J. Math. Phys.*, 42(2), 713-745, 2001.
- [8] Margetis D., "Radiation of Horizontal Electric Dipole on Large Dielectric Sphere", *J. Math. Phys.*, 43, 3162-3201, 2002.
- [9] Li K. ve Park S.O., "Electromagnetic Field in the Air Generated by a Horizontal Electric Dipole Located in the Spherical Electrically Earth Coated with a Dielectric Layer", *J. Electromagn. Waves Applicat.*, 17(10), 1399-1417, 2003.
- [10] Pan W.Y. ve Zhang H.Q., "Electromagnetic Field of a Vertical Electric Dipole on the Surface of a Dielectric Layer Overlay a Global Conductor", *Radio Sci.*, 38(3), 1061, 2003.
- [11] Li K., Park S.O. ve Zhang H.Q., "Electromagnetic Field in the Presence of a Three-Layered Spherical Region", *Progress In Electromagnetics Research*, 45, 103-121, 2004.
- [12] Li K., Park S.O. ve Zhang H.Q., "The Electromagnetic Field over the Spherical Earth Coated with N-Layered Dielectric", *Radio Sci.*, 39, 2004.
- [13] Zhang H.Q., Li K. ve Pan W.Y., "The Electromagnetic Field of a Vertical Dipole on the Dielectric-Coated Imperfect Conductor", *J. of Electromag. Waves and Appl.*, 18(10), 1305-1320, 2004.

- [14] Li K. ve Lu Y.L., “Electromagnetic Field from a Horizontal Electric Dipole in the Spherical Electrically Earth Covered with N-Layered Dielectrics”, *Progress In Electromagnetics Research*, 54, 221–244, 2005.
- [15] Mei J.P. ve Li K., “Electromagnetic Field from a Horizontal Electric Dipole on the Surface of a High Lossy Dielectric Coated with a Uniaxial Layer”, *Progress in Electromagnetics Research*, 73, 71-91, 2007.
- [16] Fei T., Li L.W., Yeo T.S., Wang H.L. ve Wu Q., “A Comparative Study of Radio Wave Propagation over the Earth due to a Vertical Electric Dipole”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 55(10), 2723-2732, 2007.
- [17] Liang L. ve Li K., “Radiation From a Vertical Electric Dipole in the Presence of a Three-Layered Region”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 55(12), 3469-3475, 2007.
- [18] Richmond J.H., “A Wire-Grid Model for Scattering by Conducting Bodies”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, AP-14(6), 782-786, 1966.
- [19] Lin J.L., Curtis W.L. ve Vincent, M.C., “On the Field Distribution of an Aperture”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, AP-22, 467-471, 1974.
- [20] Lee K.S.H., Martin L. ve Castillo J.P., “Limitations of Wire-Grid Modeling of a Closed Surface”, *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, 18(3), 123-129, 1976.
- [21] Ludwig A. C., “Wire Grid Modeling of Surface”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, AP-14(9), 1045-1048, 1987.
- [22] Peterson A.F., “Difficulties Encountered when Attempting to Validate thin wire Formulations for Linear Dipole Antennas”, *ACES Journal*, 4(3), 25-40, 1990.
- [23] Hubing T.H. ve Kauffman J.F., “Modeling Electrically Small, Thin Surfaces with Wire Grids”, *ACES Journal*, 5(1), 19-24, 1990.
- [24] Mayhan J.T., “Characteristic Modes and Wire Grid Modeling”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 38(4), 457-469, 1990.
- [25] Kashyap S., “Wire Grid and Surface Patch Modelling for EMP Interaction”, *IEEE Antennas Propagation Society International Symposium*, AP-S, 1990.
- [26] Paknys R.J., “The Near Field of a Wire Grid Model”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 39(7), 994-999, 1991.
- [27] Paknys R.J. ve Raschkowan, L.R., “Moment Method Surface Patch and Wire Grid Accuracy in the Computation of Near Fields”, *ACES Journal*, 12(3), 16-25, 1997.
- [28] Harrington R.F., “Moment Methods for Field Problems”, *Proc. of the IEEE*, 55(2), 136-149, 1967.
- [29] Sarkar T.K. ve Harrington R.F., “Radar Cross Sections of Conducting Bodies over a Lossy Half Space”, *Radio Science*, 15(3), 581-585, 1980.
- [30] Burke G.J. ve Poggio A.J., “Numerical Electromagnetics Code (NEC)-Method of Moments”, *Lawrence Livermore Laboratory*, Ocak 1981. (bilgi için: www.nec2.org)
- [31] SuperNec, *Poynting Software (Pty) Ltd.*, South Africa. <http://www.supernec.com/>
- [32] Zor Ö. ve Polat B., “An Implementation of King’s Green Functions in Thin Wire Scattering Problems”, *ACES Journal*, baskıda.
- [33] Crow T.T. ve Shumpert T.H., “Electromagnetic Scattering from Configurations of Thin Wire with Multiple Junctions”, *Interaction Note 99*, 1972.
- [34] King R.W.P. ve Wu T.T., “Analysis of Crossed Wires in a Plane-Wave Field”, *Interaction Note 216*, 1975.
- [35] Bretones A.R., Extrema A.S., Gómes R.M. ve Callejón J.F., “About the Study in the Time Domain of Junctions Between Thin Wires”, *ACES Journal*, 6(2), 2-20, 1991.
- [36] King R.W.P., “Electromagnetic Ground Wave Field of Vertical Antennas for Communication at 1 to 30 MHz”, *IEEE Trans. Electromag. Compatibility*, 40(4), 337-342, 1998.
- [37] Weiner M.M., “Validation of the Numerical Electromagnetics Code (NEC) for Antenna Wire Elements in Proximity to Earth”, *ACES Journal*, 8(2), 44-71, 1993.
- [38] Davidson D.B. ve Mouton H.T., “Validation of, and Limitations on, the Use of NEC-4 for Radiation from Antennas Buried within a Homogeneous Half-Space”, *ACES Journal*, 13(3), 302–309, 1998.
- [39] Newman E.H., “Simple Examples of the Method of Moments in Electromagnetics”, *IEEE Trans. Education*, 31(3), 193-200, 1988.
- [40] King R.W.P. ve Wu T.T., “The Propagation of a Radar Pulse in Sea Water”, *J. Appl. Phys.*, 73(4), 1581-1590, 1993. Erratum: *J. Appl. Phys.*, 77(7), 3586-3587, 1995.
- [41] King R.W.P., “The Propagation of a Gaussian Pulse in Sea Water and its Application to Remote Sensing”, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 31(3), 595-605, 1993.
- [42] King R.W.P., “Propagation of a Low Frequency Rectangular Pulse in Sea Water”, *Radio Science*, 28(3), 299-307, 1993.
- [43] du Toit C.F. ve Davidson D.B., “Wiregrid: a NEC2 Pre-Processor”, *ACES Journal*, 10(1), 31–39, 1995.
- [44] Trueman C.W. ve Kubina S.J., “Verifying Wire-Grid Model Integrity with Program CHECK”, *ACES Journal*, 5(2), 17–42, 1990.
- [45] Oyekanmi L.A. ve Watkins J., “Selecting Wire Radius for Grid/Mesh Models”, *ACES Journal*, 5(2), 43–57, 1990.



Saha Geri Dönüş Oranını AR-GE Aşamasında İndikatör ile Tahmin Etme Yöntemi

Field Return Rate Estimation in R&D Phase with an Indicator

Ali Tarkan Tekcan¹, Gürmen Kahramanoğlu¹, Mustafa Nevzat Yatır¹, Barbaros Kirişken¹,
Dr. Mustafa Gündüzalp²

¹Vestel AR-GE Güvenilirlik Bölümü

Vestel Elektronik San ve Tic AŞ

tarkan.tekcan@vestel.com.tr, gurmen.kahramanoglu@vestel.com.tr, mustafa.yatir@vestel.com.tr, barbaros.kirisken@vestel.com.tr

²Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi,

Yaşar Üniversitesi

mustafa.gunduzalp@yasar.edu.tr

Özet

Günümüz tüketici elektroniği şirketleri servis maliyetlerini azaltmak ve iyi bir marka saygınlığı kazanmak için daha güvenilir ürünler üretmeye çalışmaktadırlar. Bununla birlikte, daha güvenilir ürünler üretmek, üretim maliyetlerinde artış anlamına gelmektedir. Güvenilirlik ve servis maliyetleri arasındaki denge ancak AR-GE aşamasında, üretim öncesinde, yapılacak doğru bir saha geri dönüş oranı tahmini ile ayarlanabilir. Saha geri dönüş oranı tahmini için birçok uluslararası standard ve hızlandırılmış ömür testleri kullanılmasına rağmen, çoğu zaman tahmin edilen geri dönüş oranı, gerçekleşen geri dönüş oranından farklı olmaktadır. Bunun sebebi, ürünün, sadece standlarda belirtilen veya hızlandırılmış ömür testlerinde kullanılan stres faktörlerinden arızalanmamasıdır. Bu da, saha geri dönüş oranı hesaplama yönteminde yeni bir parametrenin daha oluşturulması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Bu makalede, saha geri dönüş oranını, AR-GE aşamasında, bir indikatör yardımı ile tahmin etme yöntemi anlatılmıştır. İndikatör fonksiyonu, malzeme seviyesindeki testlerden, ürün seviyesindeki testlerden ve yeni bir parametre olan olgunluk seviyesinden elde edilen 3 hata oranından oluşmaktadır. Bu tahminle birlikte, şirketler ürünlerinin güvenilirliğini iyileştirebilir ve muhtemel servis maliyetlerini azaltabilirler.¹

Anahtar kelimeler: Saha Geri Dönüş Oranı Tahmini, Parça Sayımı Güvenilirlik Tahmini, Hızlandırılmış Ömür Testi, Exponensiyel Dağılım Hata Oranı, Weibull Dağılım Hata Oranı, Hata Yapma Zamanı, Olgunluk Seviyesi

¹ Bu proje VESTEL Elektronik San. ve Tic. A.Ş. tarafından desteklenmektedir. Bu makalenin bir kısmı RAMS2010'da sunulmuştur.

Abstract

Today's consumer electronics companies try to produce more reliable products to reduce service costs and obtain a good

brand reputation. However, producing more reliable products means an increase in manufacturing costs. The balance between reliability costs and service costs can only be adjusted with an accurate estimation of field return rate, in R&D phase, before mass production. Although using lots of international standards and accelerated life tests to estimate field return rate, usually, estimated field return rate differs from real field return rate. The reason for this is, the product does not fail only because of the stress factors mentioned in standards and used in accelerated life tests. This means, an additional parameter should be created for field return rate estimation.

In this paper, field return rate estimation in R&D stage with an indicator is introduced. Indicator function consists of three failure rates which are calculated by component level testing, product level testing, and a new parameter called maturity level. With this estimation, companies can improve the reliability of their products to decrease possible service costs.²

Keywords: Field Return Rate Estimation, Parts Count Reliability Prediction, Accelerated Life Test, Failure Rate in Exponential Distribution, Failure Rate in Weibull Distribution, Mean Time to Failure, Maturity Level

² This project is supported by VESTEL Elektronik San. ve Tic. A.Ş. A Part of this paper is presented in RAMS2010.

1. Giriş

Tüketici elektroniği ürünlerinin fiyatlarındaki düşüş, tüketici elektroniği şirketleri için birincil kaygının ürettikleri ürünlerin güvenilirliği olmasına sebep olmuştur. Garanti süresi içerisinde oluşacak bir arızanın şirketlere maliyeti, elde ettikleri karın büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Örneğin; Avrupa'da 1 LCD TV'nin servise dönmesinin şirkete maliyeti, taşıma maliyetleri ile birlikte, yaklaşık 150 dolardır [1].

Bir çok şirket, ürünlerinin güvenilirliğini hesaplamak için uluslararası standartlardan yararlanmaktadır. Fakat, bu standartların çoğu, ürünü oluşturan malzemeler üzerindeki

stres (sıcaklık, gerilim, harcanan güç vb.) tabanlı hesaplama modelleriyle güvenilirlik ve hata oranı tahmini yapmaktadır [2]. Bununla beraber, Loughborough Üniversitesi'nin yaptığı bir araştırmaya göre, stres tabanlı standartlara göre yapılan güvenilirlik tahminlerinin, gerçek saha verilerinden çok farklı olduğu ortaya çıkmıştır [3]. Hatta, stres tabanlı standartların güvenilirlik tahminlerinin kendi içlerinde de farklılık gösterdikleri belirlenmiştir [3]. Standartların, gerçek saha verisiyle uyuşmayan güvenilirlik tahminleri yapması, standartların da sürekli güncellenmesini gerektirmektedir [4]. Ek olarak, hızlandırılmış ömür testleri yaygın bir şekilde kullanılmakta ve elde edilen test verilerinden ürün güvenilirliği ve hata oranı tahmin edilmektedir [5]. Hızlandırılmış ömür testlerinde, ürün, normal kullanım koşulundan daha yüksek stres seviyesinde test edilerek [6], hata yapma davranışı hızlandırılmakta ve normal kullanım koşulu ile test koşulu arasındaki ilişki belirlenerek, ürünün ömür dağılımı hakkında bilgi edinilmektedir [7]. Fakat, bu testlerde de ana stres faktörleri sıcaklık, nem, gerilim, sıcaklık çevrimleri ve titreşimdir [5]. Ayrıca, bu testlerde çoğu zaman yüksek sayıda örnek test edilememekte ve/veya test süresi içerisinde örnekler arıza yapmayarak tam veri elde edilememektedir. Bu da, az sayıda örnekle test planlama ve/veya arıza yapmayan örneklerden de yola çıkarak güvenilirlik tahminleri yapmayı gerektirmektedir [8]. Bununla beraber, yapılan tahminler çoğu zaman gerçeği yansıtmamakta ve şirketleri yanlış tahminlere ve kararlara yönlendirmektedir. Çünkü, sahada ürünlerin arızalanmasına sebep olan faktörler, yalnızca yukarıda bahsedilen stres faktörleri değildir. Bu durumda,

- Elektrostatik Boşalması
- Gerilim Varyasyonları
- Gerilim Kesilmeleri
- Gerilim Çukurları
- Yıldırım Düşmesi
- Gevşek Priz Kaynaklı Arıza
- Ürünün İlk Açılışında Oluşan Yüksek Akım
- Soğuk Ortamda Çalışma
- Sıcak Ortamda Çalışma vb.

değişik arıza sebepleri için yeni bir parametre tasarlanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu parametre “Olgunluk Seviyesi [9]” olarak adlandırılmıştır. Doğru güvenilirlik analizlerinin yapılması ve saha geri dönüş oranlarının doğru tahmin edilebilmesi ancak bu yeni parametrenin de kullanımıyla mümkündür.

Bu makalede, AR-GE aşamasındaki bir elektronik ürünün, aşağıdaki 3 parametreden oluşan, saha geri dönüş oranı tahmin etme yöntemi anlatılmıştır.

- “Parça Sayımı Güvenilirlik Tahmini” [10] tabanlı, malzeme hata oranı tahminlerinden elde edilen hata oranı
- Hızlandırılmış ömür testlerinden elde edilen verilerin “Weibull Dağılımı [11]” ile analiz edilmesiyle elde edilen hata oranı

- “Olgunluk Seviyesi [9]” çalışmalarından elde edilen hata oranı

2. Parça Sayımı Güvenilirlik Tahmini

Parça sayımı güvenilirlik tahmini [10] metoduna göre, elektronik sistemi oluşturan parçaların hata oranları toplamı, elektronik sistemin hata oranına eşittir.

$$\lambda_{sistem} = \sum_{i=1}^n \lambda_{parça_i} \quad (1)$$

λ : Birim zamandaki hata oranı,

İlk olarak, üründeki elektronik kart üzerindeki tüm elektronik malzemelerin türü, pin sayısı, sıcaklığı, çalışma gerilimi, harcanan güç değeri, varsa konektör bağlantı tipi, malzemenin çalışma çevre koşulları, kalite sınıfı vb. belirlenir. Belirlenen bu değerler ile MIL-HDBK-217F [10] standardında belirtilen hesaplama yöntemleri kullanılarak her bir malzeme için birim zamandaki hata oranı ($\lambda_{parça}$) hesaplanır. (1) no'lu denklem yardımı ile elektronik kartın birim zamandaki hata oranı hesaplanır.

Eğer, üründe birden fazla elektronik kart varsa, öncelikle yukarıda anlatılan şekilde her bir kartın birim zamandaki hata oranı hesaplanır, sonrasında “Seri Bağlı Sistem Güvenilirliği [11]” yöntemi ile sistemin hata oranı hesaplanır.

Güvenilirlik fonksiyonu;

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

R : Güvenilirlik,

λ : Birim zamandaki hata oranı,

t : Zaman

şeklinde ifade edilir. Seri bağlı sistem güvenilirliği [11] ise;

$$R(t)_{sistem} = \prod_{i=1}^n R(t)_{parça_i} \quad (3)$$

şeklinde belirtilmiştir. Bu durumda;

$$R(t)_{sistem} = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_{parça_i}\right)t} \quad (4)$$

ve sistemin birim zamandaki hata oranı (λ_{sistem}) yine (1) no'lu denklem yardımıyla, kartların birim zaman hata oranları toplamı olarak elde edilir.

Birim zamandaki hata oranının, istenilen zaman aralığı ile çarpılması durumunda, istenilen zaman aralığı için kümülatif hata oranı (F(t)) elde edilmiş olur.

$$F(t)_{sistem} = 1 - R(t)_{sistem} \quad (5)$$

F (t) : Kümülatif Hata Oranı

R(t)_{sistem} : Sistemin Güvenilirliği,

t : Zaman

(5) no'lu denklem sonucunda elde edilen hata oranı, saha geri dönüş oranı tahmininde kullanılacak olan indikatörün ilk parametresidir.

3. Hızlandırılmış Ömür Testleri

İndikatörün 2. parametresi hızlandırılmış ömür testleri sonucunda elde edilen verilerin Weibull Dağılımı [11] ile analiz edilmesiyle hesaplanan hata oranıdır.

3.1. Hızlandırılmış Ömür Testi Planlama

Hızlandırılmış ömür testlerinin amacı, ürünün normal kullanım koşullarında maruz kaldığı stres faktörü seviyesini artırarak hata yapma zamanını hızlandırmaktır. Hızlandırılmış ömür testlerinde kullanılan başlıca stres faktörleri;

- Sıcaklık
- Bağıl Nem
- Gerilim
- Sıcaklık Çevrimi
- Titreşim

dir. Bu stres faktörleri kullanılarak hızlandırılan hata yapma süresi için "Hızlandırma Faktörleri [12]" belirlenmiştir.

3.1.1. Arrhenius Modeli

Sıcaklık stres faktörünün hızlandırma faktörü hesabında Arrhenius Modeli [12] kullanılır.

$$AF = e^{-(Ea/K)(1/T_1 - 1/T_2)} \quad (6)$$

AF : Hızlandırma Faktörü,
Ea : Aktivasyon Enerjisi,
K : Boltzman Sabiti = 8.617×10^{-5} eV/K,
T₁ : Test Sıcaklığı (°K),
T₂ : Kullanım Sıcaklığı (°K)

3.1.2. Korozyon Modeli

Sıcaklık ile birlikte bağıl nem de stres faktörü olarak kullanılırsa hızlandırma faktörü Korozyon Modeli [12] ile hesaplanır.

$$AF = e^{-(Ea/K)(1/T_1 - 1/T_2)} \cdot (RH_1 / RH_2)^n \quad (7)$$

AF : Hızlandırma Faktörü,
Ea : Aktivasyon Enerjisi,
K : Boltzman Sabiti = 8.617×10^{-5} eV/K,
T₁ : Test Sıcaklığı (°K),
T₂ : Kullanım Sıcaklığı (°K),
RH₁ : Test Sırasında Bağıl Nem,
RH₂ : Kullanım Sırasında Bağıl Nem,
n : Hata Mekanizmasına Bağlı Katsayı, genellikle 2-4 arası kabul edilir.

3.1.3. Gerilim Uygulamalı Korozyon Modeli

Sıcaklık ve bağıl nem ile birlikte gerilim de stres faktörü olarak kullanılırsa hızlandırma faktörü Gerilim Uygulamalı Korozyon Modeli [12] ile hesaplanır.

$$AF = e^{-(Ea/K)(1/T_1 - 1/T_2)} \cdot (RH_1 / RH_2)^n \cdot (V_1 / V_2)^N \quad (8)$$

AF : Hızlandırma Faktörü,
Ea : Aktivasyon Enerjisi,
K : Boltzman Sabiti = 8.617×10^{-5} eV/K,
T₁ : Test Sıcaklığı (°K),
T₂ : Kullanım Sıcaklığı (°K),
RH₁ : Test Sırasında Bağıl Nem,
RH₂ : Kullanım Sırasında Bağıl Nem,
n : Hata Mekanizmasına Bağlı Katsayı, genellikle 2-4 arası kabul edilir.
V₁ : Test Gerilimi,
V₂ : Kullanım Gerilimi,
N : Teknolojiye Bağlı Katsayı, genellikle 2-4 arası kabul edilir.

3.1.4. Değiştirilmiş Coffin-Manson Modeli

Sıcaklık çevrimi stres faktörü olarak kullanılırsa, hızlandırma faktörü İyileştirilmiş Coffin-Manson Modeli [12] ile hesaplanır.

$$AF = e^{-(0.123K)(1/T_u - 1/T_s)} \cdot (f_u / f_s)^{0.3} \cdot (DT_s / DT_u)^{1.9} \quad (9)$$

AF : Hızlandırma Faktörü,
K : Boltzman Sabiti = 8.617×10^{-5} eV/K,
T_u : Maksimum Kullanım Lehim Noktası Sıcaklığı (°K),
T_s : Maksimum Test Lehim Noktası Sıcaklığı (°K),
f_u : Kullanım Sıcaklık Çevrim Frekansı,
f_s : Test Sıcaklık Çevrim Frekansı,
ΔT_u : Kullanım Anında Sıcaklık Değişimi (°C),
ΔT_s : Test Anında Sıcaklık Değişimi (°C),

3.1.5. Basquin's Modeli

Stres faktörü olarak titreşim dayanımı kullanılırsa, hızlandırma faktörü Basquin's Modeli [12] ile hesaplanır.

$$AF = (Grms_1 / Grms_2)^m \quad (10)$$

AF : Hızlandırma Faktörü,
Grms₁ : Test Titreşim Seviyesi,
Grms₂ : Kullanım Titreşim Seviyesi,
m : Materyal Türüne Bağlı Katsayı

3.2. Hızlandırılmış Ömür Testi Veri Analizi

Hızlandırılmış ömür testlerine tabi tutulan örneklerin hata yapma süreleri ve test sonunda hata yapmadıkları test süreleri kayıt edilir. Hızlandırılmış ömür testleri sonunda iki tip veri elde edilir:

- Tam Veri
- Sansürlü Veri

Tam veri : Test örneğinin arıza yaptığı süre

Sansürlü veri : Arızalanmayan örnekler için test süresi

Bu süreler, test sırasında kullanılan stres faktörlerine bağlı olarak hesaplanmış hızlandırma faktörleri ile çarpılarak normal kullanım koşullarında simüle edilen sürelere

dönüştürülür. Elde edilen veri seti Weibull Dağılımı [11] kullanılarak analiz edilir ve belirlenen süre için hata oranı hesaplanır.

Weibull Dağılımı [11] olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f(T) = \left(\frac{b}{h}\right) \left(\frac{T-g}{h}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{T-g}{h}\right)^b} \quad (11)$$

β : Şekil Parametresi

η : Skala Parametresi

γ : Lokasyon Parametresi

şeklinde ifade edilir. Dağılım parametrelerinin belirlenmesi için "Maximum Likelihood" yönteminden yararlanılır. Hata yapan örnek sayısının az olduğu durumlarda parametre tahmin metodları da buna uygun olarak seçilmelidir [13]. Güvenilirlik fonksiyonu ise;

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T-g}{h}\right)^b} \quad (12)$$

şeklinde, zamana bağlı hata yapma fonksiyonu ise;

$$I(T) = \left(\frac{b}{h}\right) \left(\frac{T-g}{h}\right)^{b-1} \quad (13)$$

biçiminde tanımlanmıştır. Kümülatif hata oranı;

$$F(T) = 1 - R(T) \quad (14)$$

yardımıyla hesaplanır.

Hesaplanan parametreler ile elde edilen fonksiyonlar sonunda, istenilen zaman aralığı için kümülatif hata oranı (14) no'lu denklem yardımıyla hesaplanır. Hesaplanan kümülatif hata oranı, saha geri dönüş oranı tahmininde kullanılacak indikatörün ikinci parametresidir.

4. Olgunluk Seviyesi

Uluslararası stres tabanlı standartlarda ve hızlandırılmış ömür testlerinde kullanılan ana stres faktörleri sıcaklık, nem, gerilim, harcanan güç, titreşimdir. Bununla beraber, daha öncede belirtildiği gibi, ürün, sahada birçok farklı sebepten arızalanabilir. Bu arıza sebepleri de sayısal ifadelerle dönüştürülmeli ve ürünün sahada arızalanma riski sayısal olarak belirlenmelidir. Bu da, olgunluk seviyesi [9] testleriyle mümkündür. Olgunluk seviyesi [9] testleri 3 ana grup altında toplanabilir. Bunlar, güvenilirlik onay testleri, erken ömür testleri ve tasarım doğrulama testleridir.

Olgunluk seviyesinin [9] hesaplanabilmesi için her bir test için test puanı belirlenir ve toplam test puanı ortaya çıkartılır. Bu puanlamalar, şirket tecrübesine ve testlerde elde edilen verilere dayanılarak yapılır. Ek olarak, testlerde tespit edilen hata durumları sınıflandırılır ve her hata sınıfı için kayıp puan katsayısı belirlenir. Olgunluk seviyesini [9] daha doğru hesaplayabilmek için, zaman içinde gerek test listesinde gerekse puanlama sisteminde değişiklikler yapılabilir. Nitekim, tablo 1,2, 3 ve 4'te verilen test listesi ve test puanları [9] no'lu referans çalışmasından sonra, tahminlerin daha

doğru sonuç vermesi için, yapılan değişiklikler sonrası oluşturulmuştur.

4.1. Güvenilirlik Onay Testleri

Güvenilirlik onay testleri, AR-GE aşamasındaki bir ürünün önemli tasarım problemlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen, elektriksel, çevresel ve mekaniksel testlerin bütünüdür. Bu testlerin 5 adet örnekle gerçekleştirilmesi yeterlidir. Güvenilirlik onay testlerinden geçmeyen bir ürün/proje üretime aktarılamaz.

Örnek olarak, bir LCD TV güvenilirlik onay testleri ve test puanları listesi tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Güvenilirlik Onay Testleri (LCD TV)

Test Türü	Test Adı	Test Puanı
Elektriksel	Akım Gerilim Stres Test	100
	Sıcaklık Stres Test	100
	Açık/Kısa Devre Testi	100
	Elektrostatik Boşalım Test	100
	Ani Yükselmelere Karşı Bağışıklık Testi	25
	Yıldırım Testi	50
	Gerilim Çukurları, Kısa Kesintiler ve Gerilim Değişimleri Testi	50
	Açma/Kapama Testi	50
	Anma Akımı Testi	75
Çevresel	Sıcakta Çalışma Testi	100
	Yüksek Sıcaklık Testi	50
	Düşük Sıcaklık Testi	50
	Yüksek Nem Ömür Testi	50
Mekaniksel	Titreşim Dayanım Testi	25
	Duvara Asma Dayanım Testi	25
	Düşme Testi	50
	Toplam	1000

4.2. Erken Ömür Testleri

Erken ömür testleri, kart bazında yapılan, malzeme ve lehimleme/üretim süreci kaynaklı problemleri tespit etmeye yarayan testlerdir. Bu testlerin, en az 20 adet kartla gerçekleştirilmesi gereklidir. Testler sonunda, ürün ömrünün ilk safhalarında ortaya çıkacak problemlerin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Örnek olarak, bir LCD TV erken ömür testleri ve test puanları listesi tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Erken Ömür Testleri (LCD TV)

Test Türü	Test Adı	Test Puanı
Çevresel	Sıcaklık Çevrim Testi	75
	Yüksek Sıcaklık Yüksek Nem Testi	50
	Sıcaklık Şok Testi	50
Mekaniksel	Rastgele Titreşim Dayanım Testi	50
Toplam		225

4.3. Tasarım Doğrulama Testleri

Tasarım doğrulama testleri, yakalanması zor, tasarım problemlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen daha uzun süreli testlerdir. Birleştirilmiş stres testleri, tasarım doğrulama testleri kapsamında gerçekleştirilir. Testlerin mümkün olan en fazla örnekle yapılması hata yakalama olasılığını arttıracaktır. Örnek olarak, bir LCD TV tasarım doğrulama testleri ve test puanları listesi tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Tasarım Doğrulama Testleri (LCD TV)

Test Türü	Test Adı	Test Puanı
Elektriksel	Enerjili/Enerjisiz Sıcaklık Çevrim Testi	100
	Kademeli Elektrostatik Boşalım Testi	50
Çevresel	Birleştirilmiş Yüksek Sıcaklık ve Yüksek Nem Testi	50
	Sıcaklık Şok Testi	75
	Kademeli Sıcaklık Testi	50
	Enerjili/Enerjisiz Yüksek/Düşük Sıcaklık ve Nem Testi	50
	Yük Nem Depo Testi	25
	Sıcaklık Devrim Testi	50
Mekaniksel	Yapısal İnceleme Testi	50
	Paketsiz Şok Test	50
	Kademeli Rastgele Titreşim Dayanım Testi	25
Toplam		575

4.4. Olgunluk Seviyesi Hesaplama Yöntemi

Testlere verilen test puanları toplamı, "toplam test puanı (TTP)" olarak adlandırılır. Testlerde tespit edilen hatalar ise hatanın önem derecesine göre sınıflandırılır. Önem derecesine göre sınıflandırılmış hatalara "hata sınıflandırma katsayısı (HSK)" verilir. Bu katsayı tecrübelerle dayanılarak tasarlanır. Testlerde tespit edilmiş hataların tasarım gruplarına çözülüp çözülmemesine dayanılarak "durum katsayısı (DK)" belirlenir. Bu katsayı, yine şirket tecrübesine dayanılarak oluşturulur. Hata sınıflandırma katsayısı, sınıflandırılmış hata sayısı ve durum katsayısıyla çarpılarak "sınıflandırılmış kayıp puan

(SKP)" elde edilir. Sınıflandırılmış kayıp puanların toplanmasıyla "toplam kayıp puan (TKP)" hesaplanır. Olgunluk seviyesi ise toplam test puanından toplam kayıp puanın çıkarılmasıyla elde edilen puanın, toplam test puanına oranlanmasıyla hesaplanır. Örnek olarak, bir LCD TV toplam test puanı, hata sınıflandırma ve sınıflandırma katsayısı ve durum katsayısı aşağıdaki tablo 4, tablo 5 ve tablo 6'da verilmiştir. Hata sınıflandırma ve önemi belirlenirken saha verileri iyi analiz edilmelidir [14].

Tablo 4: Toplam Test Puanı (LCD TV)

Test Grubu	Test Puanı
Güvenilirlik Onay Testleri	1000
Erken Ömür Testleri	225
Tasarım Doğrulama Testleri	575
Toplam Test Puanı (TTP)	1800

Tablo 5: Hata Sınıflandırma ve Hata Sınıflandırma Katsayısı (LCD TV)

Hata Sınıfı	Hata Sınıflandırma Katsayısı (HSK)
Üretim Durduran Hata	40
Yüksek Önemli Hata	8
Orta Önemli Hata	5
Düşük Önemli Hata	3

Tablo 6: Durum Katsayısı (LCD TV)

Hata Durumu	Durum Katsayısı (DK)
Açık/Çözümlememiş Hata	3
Kapalı/Çözümlemiş Hata	0
Tekrar Eden Hata	0

Hesaplama yöntemi aşağıdaki formüllerle modellenmiştir.

$$SKP = HS \cdot HSK \cdot DK \quad (15)$$

SKP : Sınıflandırılmış Kayıp Puan,

HS : Hata Sayısı,

HSK : Hata Sınıflandırma Katsayısı,

DK: Durum Katsayısı

$$TKP = \sum SKP \quad (16)$$

TKP : Toplam Kayıp Puan,

SKP : Sınıflandırılmış Kayıp Puan

$$OS = (TTP - TKP) / TTP \quad (17)$$

OS : Olgunluk Seviyesi,

TTP : Toplam Test Puan,

TKP : Toplam Kayıp Puan

Olgunluk seviyesi 0-1 arası bir değerdir. Bu değerın 1'den çıkartılmasıyla elde edilen değer, saha geri dönüş oranı tahmin metodunda kullanılan indikatörün 3. parametresidir. Bu değer, ürünün, yapılan testlerde karşılaşılan hatalarına ait, sabit kümülatif hata oranı (F) olarak değerlendirilmektedir.

$$F = 1 - OS \quad (18)$$

F : Sabit Kümülatif Hata Oranı
OS : Olgunluk Seviyesi

5. Saha Geri Dönüş Oranı Hesaplama Yöntemi

Saha geri dönüş oranı tahmininde kullanılacak olan "saha geri dönüş oranı indikatörü (SGDOI) [15]", yukarıda bahsedilen 3 hata oranının çarpılmasıyla elde edilir.

$$SGDOI(T) = F(T)_1 \cdot F(T)_2 \cdot F_3 \quad (19)$$

SGDOI : Saha Geri Dönüş Oranı İndikatörü
F(T)₁ : Parça Sayımı Güvenilirlik Tahmini [10] metoduyla elde edilen kümülatif hata oranı
F(T)₂ : Hızlandırılmış ömür testi verilerinin Weibull Dağılımı [11] ile analiz edilmesiyle elde edilen kümülatif hata oranı
F₃ : Olgunluk Seviyesi'den [9] elde edilen sabit kümülatif hata oranı
T : Belirlenen Zaman Aralığı

Analiz ve testler sonrasında hesaplanan her bir teorik kümülatif hata oranı, gerçek saha geri dönüş oranıyla 1. dereceden bir ilişki içindedir. Bu sebeple, SDGOI gerçek saha geri dönüş oranıyla 3. dereceden ilişki içerisindedir [15].

$$SGDOI(T) \gg A_1 \cdot RR(T)^3 \quad (20)$$

SGDOI(T) : Saha Geri Dönüş Oranı İndikatörü,
RR(T) : Gerçek Saha Geri Dönüş Oranı,
T : Belirlenen Zaman Aralığı
A₁: İlişki Katsayısı

Bu durumda, benzer ürünlerin/projelerin saha geri dönüş oranı indikatörlerinin birbirine oranı ile gerçek saha geri dönüş oranlarının birbirine oranının kübü arasında 1. dereceden ilişki mevcuttur [15].

$$\frac{SGDOI(T)_1}{SGDOI(T)_2} \gg A_2 \cdot \left(\frac{RR(T)_1}{RR(T)_2} \right)^3 \quad (21)$$

SGDOI (T)₁: 1. Projenin Saha Geri Dönüş Oranı İndikatörü,
SGDOI (T)₂: 2. Projenin Saha Geri Dönüş Oranı İndikatörü,
RR (T)₁: 1. Projenin Gerçek Saha Geri Dönüş Oranı,
RR (T)₂: 2. Projenin Gerçek Saha Geri Dönüş Oranı,
T : Belirlenen Zaman Aralığı
A₂: İlişki Katsayısı

Yeni bir projenin, AR-GE aşamasında, belli bir zaman aralığı kapsamında, gerçek saha geri dönüş oranını tahmin edebilmek için, en az 3 eski projenin, saha geri dönüş oranı indikatörleri

hesaplanmalı ve belirlenen zaman aralığındaki gerçek saha geri dönüş oranı bilinmelidir. Şekil 1'de verilen doğrunun çizilebilmesi ve doğru denkleminin belirlenebilmesi için en az 2 noktaya ihtiyaç vardır. En az 2 nokta bir doğru belirler. Nokta sayısı ise, eski projelerin ikili kombinasyonlarının sayısı kadardır. Çünkü, X ve Y noktaları eski projelerin indikatör ve geri dönüş oranlarının ikili kombinasyonlarının oranları şeklinde hesaplanmaktadır. İkili kombinasyon sayısı, doğru oluşturmak için gerekli asgari nokta sayısı olan, 2'ye eşit veya büyük olan en küçük sayı 3'tür. Dolayısıyla, en az 3 eski projeye ihtiyaç vardır.

A₂ ilişki katsayısı bir projenin hesaplanan tüm saha geri dönüş oranı tahminleri için farklı değerler alabilir. Bu durumun oluşmaması için, daha sonra verilecek olan, şekil 1'deki doğru ve doğru denklemi oluşturulur. Bu doğru üzerindeki noktalardan yola çıkılarak kurulan ilişkilerdeki A₂ ilişki katsayıları aynı değerleri alırlar. Bu değer, oluşturulan doğrunun eğimidir.

İndikatörler ve gerçek geri dönüş oranlarının belirlenmesinden sonra, (21) no'lu ilişki yardımıyla X-Y koordinat sistemi üzerinde örnek uzay oluşturulur. Örnek uzayın X ekseninde geri dönüş oranı indikatörünün ikili kombinasyonlarının birbirine oranı, Y ekseninde ise gerçek saha geri dönüş oranlarının ikili kombinasyonlarının birbirine oranının kübü yer almaktadır. (X,Y) noktalarının en yakınından geçen doğru denklemi ise; yeni projenin indikatörünün eski projelerin indikatörlerine oranından elde edilen X noktalarına karşı, yeni projenin tahmini saha geri dönüş oranı ile eski projelerin gerçek saha geri dönüş oranı arasındaki oranın kübünü (Y noktalarını) vermektedir. Elde edilen bu Y noktalarının küp kökü alındığında ise yeni projenin tahmini saha geri dönüş oranının eski projelerin gerçek saha geri dönüş oranına oranı bulunmuş olunur. Eski projelerin gerçek saha geri dönüş oranı bilindiği için, yeni projenin tahmini saha geri dönüş oranı kolayca hesaplanabilir.

Örnek olarak, 3 adet eski proje verileri kullanılarak 1 adet yeni projenin, belirlenen zaman aralığı için, saha geri dönüş oranı tahmin yöntemi tablo 7 ve tablo 8'de verilmiştir.

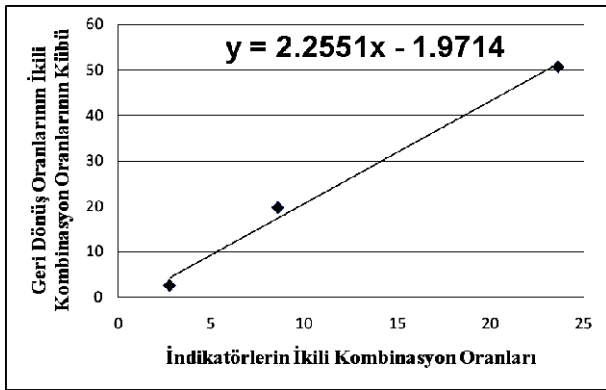
Tablo 7: Proje İndikatörleri ve Geri Dönüş Oranları

Proje	F(T) ₁ (%)	F(T) ₂ (%)	Olgunluk Seviyesi (1 - F ₃) (%)	SGDOI	Geri Dönüş Oranı (%)
1	9.78	3.10	72.84	823.44	3.70
2	7.56	2.12	81.34	299.03	2.70
3	4.15	1.12	92.50	34.86	1.00
4	5.20	2.83	88.51	169.09	RR ₄

Tablo 8: Eski Proje İndikatörlerin İkili Kombinasyonlarının Oranları ve Eski Proje Geri Dönüş Oranlarının İkili Kombinasyonlarının Oranlarının Kübü

Eski Proje İndikatörlerin İkili Kombinasyonlarının Oranları		Eski Proje Geri Dönüş Oranlarının İkili Kombinasyonlarının Oranlarının Kübü	
X_1 : SGDOI ₁ / SGDOI ₂	2.75	Y_1 : (RR ₁ / RR ₂) ³	2.57
X_2 : SGDOI ₁ / SGDOI ₃	23.62	Y_2 : (RR ₁ / RR ₃) ³	50.65
X_3 : SGDOI ₂ / SGDOI ₃	8.58	Y_3 : (RR ₂ / RR ₃) ³	19.68

Eski projelerin indikatör ve gerçek saha geri dönüş oranlarından elde edilen (X_1, Y_1), (X_2, Y_2) ve (X_3, Y_3) noktaları X-Y koordinat sisteminde işaretlenerek, bu noktalara en yakın olan doğru denklemi belirlenir (Bkz. Şekil 1).



Şekil 1: (X_1, Y_1), (X_2, Y_2) ve (X_3, Y_3)

Oluşturulan bu doğru sayesinde, denklem (20) ve (21)'de verilen A_1 ve A_2 ilişki katsayılarının, bir projenin her saha geri dönüş oranı tahmini için farklı değer almasının önüne geçilir. Aşağıdaki tabloda verilen X değerleri, şekil 1'de verilen doğru denklemde yerine konularak, tablo 9'da belirtilen Y değerlerine ulaşılır.

Tablo 9: Yeni Proje İndikatörünün Eski Proje İndikatörlerine Oranları ve Yeni Proje Tahmini Geri Dönüş Oranlarının Eski Proje Gerçek Geri Dönüş Oranlarına Oranının Kübü

İndikatör Oranları		Geri Dönüş Oranları Kübü	
X_{41} : SGDOI ₁ / SGDOI ₄	4.87	Y_{41} : (RR ₁ / RR ₄) ³	9.01
X_{42} : SGDOI ₂ / SGDOI ₄	1.77	Y_{42} : (RR ₂ / RR ₄) ³	2.02
X_{34} : SGDOI ₄ / SGDOI ₃	4.85	Y_{34} : (RR ₄ / RR ₃) ³	8.97

Y değerlerinin elde edilmesinden sonra, eski projelerin bilinen gerçek saha geri dönüş oranı yardımı ile yeni projenin saha geri dönüş oranı tahminleri elde edilir (Bkz. Tablo 10).

Tablo 10: Yeni Proje Tahmini Geri Dönüş Oranlarının Eski Proje Gerçek Geri Dönüş Oranlarına Oranı ve Yeni Proje Tahmini Geri Dönüş Oranı

İndikatör Oranları		Geri Dönüş Oranı Tahminleri	
RR ₁ / RR ₄	2.08	RR ₄	1.78
RR ₂ / RR ₄	1.26	RR ₄	2.14
RR ₄ / RR ₃	2.08	RR ₄	2.08

Sonuç olarak, yeni proje için eski proje sayısı kadar saha geri dönüş oranı tahmini elde edilir. Elde edilen 3 geri dönüş oranı tahmini şu şekilde yorumlanabilir:

- Yeni projenin saha geri dönüş oranı %1.78'den büyük ve %2.08'den küçük gerçekleşecektir.
- Yeni projenin saha geri dönüş oranı 3 tahmin değerinin ortalaması olan %2.00'a yakınsayacaktır.

6. Gerçek Çalışma Verileri

Önerilen yöntem ile hesaplanmış gerçek proje $F(T)_1$, $F(T)_2$, OS, SGDOI ve gerçek geri dönüş oranları tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11: Proje İndikatörleri ve Geri Dönüş Oranları

Proje	$F(T)_1$ (%)	$F(T)_2$ (%)	Olgunluk Seviyesi (1- F_3) (%)	SGDOI	Gerçek Geri Dönüş Oranı (%)
1	10.7	4.00	64.94	1499.2	4.19
2	7.56	1.82	82.75	237.31	2.60
3	4.85	0.26	93.60	8.07	0.87
4	5.02	2.83	89.50	149.09	RR ₄
5	5.00	0.48	91.00	21.60	RR ₅
6	3.61	0.46	88.56	18.99	RR ₆

Tablo 11'de belirtilen veriler kullanılarak ve 5. bölümde anlatılmış olan methodlar uygulanarak hesaplanmış geri dönüş oranı tahminleri ve bu projelerin gerçek saha geri dönüş oranları tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12: Yeni Proje Geri Dönüş Oranı Tahminleri ve Gerçek Saha Geri Dönüş Oranları

Geri Dönüş Oranı Tahminleri (%)			Gerçek Saha Geri Dönüş Oranları (%)	
RR ₄	1.90	Ort. 1.84	RR ₄	1.57
RR ₄	1.45			
RR ₄	2.16			
RR ₅	1.18	Ort. 1.32	RR ₅	1.19
RR ₅	1.16			
RR ₅	1.61			
RR ₆	1.13	Ort. 1.29	RR ₆	1.14
RR ₆	1.13			
RR ₆	1.59			

Tablo 12’den görülebileceği üzere, projelerin gerçek saha geri dönüş oranı, önerilen yöntemin verdiği geri dönüş oranı değerlerinin alt ve üst limitleri içerisinde. Ek olarak, gerçek saha geri dönüş oranı, önerilen yöntemin verdiği geri dönüş oranlarının ortalama değerine çok yakın gerçekleşmiştir.

Olgunluk seviyesi katsayısı eklenerek oluşturulan yöntemin getirdiği avantajlar tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13: Önerilen Metod Sonuçları ve Diğer Metod Sonuçlarının Gerçek Saha Verisi ile Karşılaştırılması

Proje	F(T) ₁ (%)	F(T) ₂ (%)	Önerilen Metod Sonuçları – Ort. (%)	Gerçek Geri Dönüş Oranı (%)
4	5.02	2.83	1.84	1.57
5	5.00	0.48	1.32	1.19
6	3.61	0.46	1.29	1.14

F(T)₁: Parça sayımı güvenilirlik tahmini metodu ile hesaplanmış 1 yıllık geri dönüş oranı

F(T)₂: Hızlandırılmış ömür testleri metodu ile hesaplanmış 1 yıllık geri dönüş oranı

Tablo 13’ten de anlaşılacağı üzere, geleneksel 2 metod sonuçları (F(T)₁ ve F(T)₂) ile gerçek saha oranı arasında fark oldukça fazla olmakla beraber, önerilen metodun sonuçlarının gerçek saha dönüş oranına oldukça yakındır.

7. Sonuçlar

Bilinen standartlar ve hızlandırılmış ömür testleri teknikleri belli stres faktörleri kullanarak hata oranı ve güvenilirlik tahminleri yaparken, ürün, sahada, daha farklı bir çok sebepten dolayı arızalanmaktadır. Bu da yapılan tahminlerin gerçek saha verisinden farklı olmasına yol açmaktadır [3]. Saha geri dönüş oranını doğru tahmin edebilmek ancak ve ancak bu farklı sebeplerden oluşan arızaları da “hata oranı” olarak ifade edebilecek yeni bir parametre ile mümkündür. Bu makalede, bu yeni parametre “olgunluk seviyesi” olarak verilmiş [9] ve bu yeni parametre kullanılarak saha geri dönüş oranı matematiksel olarak modellenmiştir.

Saha geri dönüş oranını AR-GE aşamasında bir indikatör ile tahmin etme yöntemi sayesinde, şirketler, ürünlerinin güvenilirliklerini, üretim öncesinde, kontrol edebilir ve saha geri dönüş oranlarını çok daha yüksek güvenilirlikle tahmin edebilirler. Bu da, olası yüksek servis maliyetlerinin önüne geçilmesini sağlar. Tahmin sonuçları, proje üretime girmeden elde edildiği için, üründe yapılacak değişiklik ve iyileştirmelerin maliyeti de asgari olacaktır.

Bu yöntem sonunda, AR-GE aşamasındaki yeni bir proje için, eski proje sayısı kadar tahmin elde edilir. Bu veriler 2 şekilde değerlendirilebilir.

- Yeni projenin geri dönüş oranı, en küçük tahmin değerinden büyük ve en büyük tahmin değerinden küçüktür.
- Yeni projenin geri dönüş oranı, hesaplanan tüm tahminlerin aritmetik ortalamasına yakınsar.

8. Teşekkür

Bu makale Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü doktora tezinden üretilmiştir.

9. Kaynaklar

- [1] Shaw, M., “LCD TV Reliability Testing: An Effective Approach”, *ARS, Europe: Berlin, Germany*, 2010, Sayfa 4.
- [2] Goel, A. ve Graves, R. J., “Electronic System Reliability: Collating Prediction Models”, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 6, No. 2, Sayfa 1-5, 2006.
- [3] Jones, J. ve Hayes, J., “A Comparison of Electronic-Reliability Prediction Models”, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol 48, No 2, Sayfa 1-8, 1999.
- [4] Harms, J.W., “Revision of MIL-HDBK-217, Reliability Prediction of Electronic Equipment”, *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2010, Sayfa 1-2.
- [5] Chan, H.A., “Accelerated Stress Testing for Both Hardware and Software”, *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2004, Sayfa 1-3.
- [6] Yang, G., “Accelerated Life Tests at Higher Usage Rates”, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 54, No. 1, Sayfa 1-2, 2005.
- [7] Mettas, A., “Reliability Predictions based on Customer Usage Stress Profiles”, *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2005, Sayfa 1-4.
- [8] Ma, H. ve Meeker, W.Q., “Strategy for Planning Accelerated Life Tests With Small Sample Sizes”, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 59, No.4, Sayfa 1, 2010.
- [9] Tekcan, T. ve Kiriskan, B., "Reliability test procedures for achieving highly robust electronic products," *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2010 Proceedings - Annual , vol., no., pp.1-6, 25-28 Jan., 2010, Sayfa 1-6.
- [10] Defense, U.D.o.: ‘MIL-HDBK-217F Reliability Prediction of Electronic Equipment’, (Defense, US Department of, 28 Feb 1995).
- [11] Keçecioglu, D., *Reliability Engineering Handbook*, Destech Publications, Pensilvanya, ABD, 2002.
- [12] Bayle, F. ve Mettas, A., “Acceleration Models in Reliability Prediction Standards: Justification and Improvements”, *ARS, Europe: Berlin, Germany*, 2010, Sayfa 7-13.
- [13] Enkhmunkh, N., Kim, G.W., Hwang, K. ve Hyun, S., “A Parameter Estimation of Weibull Distribution for Reliability Assessment with Limited Failure Data”, *Strategic Technology, IFOST*, 2007, Sayfa 1-3.
- [14] De Visser, I.M., Yuan, L. ve Nagappan, G., “Understanding Failure Severity in New Product Development Processes of Consumer Electronics Products”, *IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology*, 2006, Sayfa 1-5.
- [15] Kahramanoğlu, G., “Field Return Rate Estimation in R&D Stage with an Indicator”, *Accelerated Stres Testing Reliability Symposium, Denver, Colorado, ABD*, 2010, Sayfa 1-40.

Hesaplanabilir AC Direnç Standardının 5 MHz'e Kadar Modellenmesi ve Üretilmesi

Modelling and Development of Calculable AC Resistor Standard Up To 5 MHz

Mehmet ÇINAR¹, Arif DOLMA², Yakup GÜLMEZ¹, Handan SAKARYA¹, Ömer ERKAN¹,
Murat CELEP¹

¹ TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)

mehmetci@ume.tubitak.gov.tr, yakupg@ume.tubitak.gov.tr, handans@ume.tubitak.gov.tr, omer.erkan@ume.tubitak.gov.tr,
murat.celep@ume.tubitak.gov.tr

² Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Kocaeli Üniversitesi (KOÜ)

adolma@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, AC direnç kalibrasyonları için uluslararası alanda birincil seviye standart olarak kullanılan 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının üretilmesi amaçlanmıştır. 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının matematiksel modellenmesi Matlab® programı kullanılarak 5 MHz'e kadar yapılmıştır. Matematiksel modelleme kullanılarak 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin geometrik boyutları belirlenmiş ve hesaplanabilir AC direncin üretimi gerçekleştirilmiştir. Hesaplanabilir AC dirence DC akım uygulanarak direncin kararlılığına etki eden hataların belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının DC akım uygulanarak yapılan ölçümleri, TÜBİTAK UME'de kurulu Quantum-Hall sistemine izlenebilir olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen hesaplanabilir AC dirence, DC akım uygulanarak yapılan ölçümler sonucunda 1 ppm/gün kararlılık değeri elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hesaplanabilir AC direnç, İzlenebilirlik, Kararlılık, Metroloji

Abstract

In this study, it is aimed to fabricate 1000 Ω bifilar type AC calculable resistance standard used as primary level reference AC resistance standard internationally. Mathematical modeling of 1000 Ω bifilar type AC calculable resistance standard is performed in Matlab® program up to 5 MHz. Geometrical dimensions of 1000 Ω bifilar type AC calculable resistance standard is determined using the mathematical modeling and fabricated according to the geometrical dimensions defined in the mathematical modelling. Experimental studies are performed to define the parameters affecting the stability of the resistance standard by applying a DC current onto the

resistance standard. DC resistance measurements of 1000 Ω bifilar type AC calculable resistance standard are traceable to the Quantum-Hall resistance installed in TÜBİTAK UME (National Metrology Institute of Turkey). It is found that the stability of 1000 Ω bifilar type AC resistance standard is 1 ppm/day as a result of DC measurements.

Keywords: Calculable AC Resistance, Traceability, Stability, Metrology

1. Giriş

Değeri geometrik boyutları kullanılarak hesaplanabilen dirence hesaplanabilir AC direnç denir ve en basit şekilde eşitlik (1)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [1, 2].

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C} \quad (1)$$

Burada, R direnç (Ω), L indüktans (H), C kapasitans (F) ve ω açıl frekans (rad/s)'tır.

R, L ve C parametreleri frekansa bağlı parametreler olduğundan frekans yükseldikçe direncin hesaplanması zorlaşır [1, 3].

Bu çalışmada, matematiksel modelleme kullanılarak 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin 5 MHz'e kadar DC-AC farkının en az olacak şekilde tasarlanması ve üretilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilecek hesaplanabilir direncin metrolojik seviyede standart olarak kullanılması hedeflenmiştir. Bu sebeple matematiksel modelde 5 kHz'de DC-AC frekans bağımlılığı bağıl olarak 10⁻⁸ ve DC akım uygulanarak yapılan ölçümleri sonucunda ppm seviyesinde kararlılıkta bir direnç tasarlamak istenmektedir. Empedans ölçüm cihazlarının daha yüksek frekanslarda ölçüm alma kabiliyetlerinin artması nedeniyle AC direnç kalibrasyonlarında yüksek frekanslarda

ölçümlere ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Bu sebeple bu çalışma kapsamında 5 MHz'de hesaplanabilir AC direncin DC-AC frekans bağımlılığının seviyesinin belirlenmesi beklenmektedir.

1000 Ω Bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standartlarının geliştirilmesi için matematiksel modellemeden yararlanarak tasarımdan kaynaklı hatalar en az seviyede tutulur [1, 4]. Matematiksel modellemede, Maxwell denklemlerinden elde edilen eşitliklerin, Matlab® kullanılarak hesaplanması ile direncin geometrik boyutları belirlenmiştir [3, 4]. 1000 Ω Bifilar tip hesaplanabilir AC direncin geometrik boyutları belirlenirken teller arası kapasitans, manyetik-elektrik ekran ile tel arasındaki kapasitans, telin kendi indüktansı, teller arasında oluşan indüktans, toprağa kaçak iletkenlik ve kapasitans, teller arasındaki kaçak iletkenlik ve kapasitans, deri etkisi, girdap akımlarından gelen olumsuz etkilerin değerleri en az olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Direnç telinin çapı, direnç telleri arasındaki mesafe, direnç telinin boyu, manyetik-elektrik ekranın çapı, manyetik-elektrik ekranın kalınlığı, manyetik-elektrik ekran malzemesinin özgül direnci ve direnç telinin özgül direnci tasarım parametreleri olarak alınmış ve bu değerler değiştirilerek tasarım gerçekleştirilmiştir.

Hesaplanan geometrik boyutlara göre bifilar tip hesaplanabilir AC direncin üretimi gerçekleştirilmiştir. Direnç teli olarak isaohm kullanılmıştır [6]. İsaohm direnç telinin uçları manganin direnç telinin uçları ile birleştirilmesinde kontak problemleri oluşur [7, 8]. Bu çalışmada kontak problemlerine çözüm üretmek amacıyla metanol kaynağı, nokta kaynağı, direnç telinin kaplanması ve geleneksel lehimleme yöntemleri denenmiştir [7, 8]. Bu yöntemler kullanılarak direnç telleri birleştirilmiş ve numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin kontak dirençleri, ppm (milyonda bir) seviyesinde hassasiyete sahip HP3458A model bir multimetre kullanılarak ölçüldü ve kararlılıkları izlenmiştir. Bu çalışmalar sonrası nokta kaynağı sistemi kullanılarak yapılan kontaklarda en küçük kontak direnci ve yüksek kararlılık değerleri elde edilmiştir. Bu nedenle direnç tellerinin birleştirilmesinde nokta kaynağı sisteminin kullanılarak kontakların birleştirilmesi yöntemi tercih edilmiştir. 4-terminal ölçüm noktasının tanımlandığı kontak noktalarında ise manganin ve bakır telleri kalay-gümüş-bakır alaşımli lehim kullanılarak birleştirilmiştir.

Kontakların nokta kaynağı sistemi ile birleştirilmesinden önce, birleştirilecek isaohm ve manganin direnç tellerinin uçları kimyasal malzemeler kullanılarak kirlilikten arındırılmıştır [9]. Böylece, birleştirme sırasında kirliliklerin neden olduğu olumsuz durumlar bertaraf edilerek daha iyi kontak sağlanması ve direncin kararlılığının artırılması hedeflenmiştir.

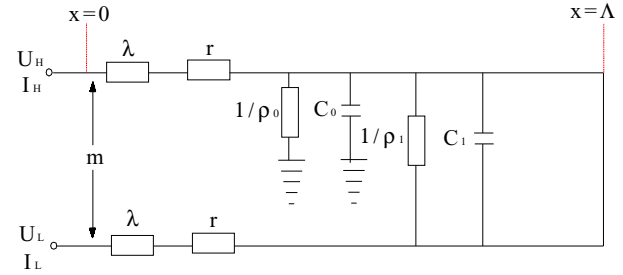
Direncin kararlılığını daha da artırmak için ısıtım işlem uygulanır. [10]. Doğru ısıtım işlem yöntemi deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir.

1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin kararlılığını belirlemek amacıyla DC akım uygulanarak ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerde 0,01 ppm seviyesinde kararlılıkla ölçüm yapabilen MI6010B otomatik direnç ölçüm köprüsü ve referans DC direnç standartları kullanılmıştır. Gerçekleştirilen ölçümler TÜBİTAK UME'de kurulu Quantum-Hall sistemine izlenebilir olarak alınmıştır [11]. Ölçümler sonucunda 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının kararlılığı belirlenmiştir.

2. 1000 Ω Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Matematiksel Modelleme ile Geometrik Boyutlarının Belirlenmesi

Hesaplanabilir AC direncin frekans bağımlılığı en az olacak şekilde matematiksel modellemesi yapılır [1, 13]. Bunun için direnç telinin çapı, direnç telleri arasındaki mesafe, direnç telinin boyu, manyetik-elektrik ekranın çapı, manyetik-elektrik ekranın kalınlığı, manyetik-elektrik ekran malzemesinin özgül direnci ve direnç telinin özgül direnci parametrelerinin değerleri değiştirilerek, hesaplanabilir AC direncin frekans bağımlılığı mümkün olan en düşük değerde olması hedeflenmiştir. Böylece teller arası kapasitans, manyetik-elektrik ekran ile tel arasındaki kapasitans, telin kendi indüktansı, teller arasında oluşan indüktans, toprağa kaçak iletkenlik ve kapasitans, teller arasındaki kaçak iletkenlik ve kapasitans, deri etkisi ve girdap akımlarından gelen etkilerin değerleri en az olması sağlanmıştır.

Bifilar tip hesaplanabilir AC direncin iletim hattı Şekil 1'de gösterilmiştir [1, 4]. İletim hattında omik direnç değerine ek olarak kapasitans, indüktans ve kayıp iletkenlik etkileri oluşmaktadır [1, 4].

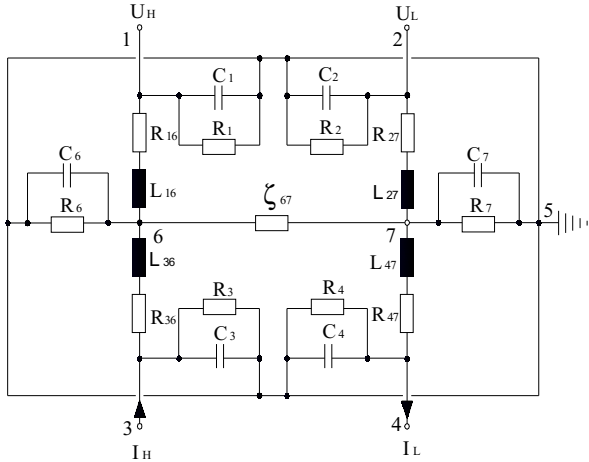


Şekil 1 : Bifilar tip hesaplanabilir AC direncin iletim hattı modeli

Şekil 1'de,

- Λ : Çift iletkenin uzunluğu
- r : DC akım direnç değeri
- λ : Direnç telinin indüktansı
- m : Tellerin arasındaki karşılıklı indüktansın değeri
- C₀ : Toprakla teller arasındaki kapasitans değeri
- C₁ : Tellerin arasındaki kapasitans değeri
- ρ₀ : Tellerin toprakla arasındaki kayıp iletkenlik değeri
- ρ₁ : Tellerin arasındaki kayıp iletkenlik değeridir.

Şekil 1'deki iletim hattı (ζ₀₇) metal bir kutu içerisine konularak manyetik-elektrik olarak ekranlanmış ve eşdeğer devresi Şekil 2'de gösterilmiştir [1, 4]. Ekranlama sonucunda Şekil 2'de gösterilen kapasitans, indüktans ve dirençler oluşmaktadır.



Şekil 2 : 4-terminal hesaplanabilir AC direncin eşdeğer devresi

Şekil 2’de gösterilen hesaplanabilir AC direncin matematiksel modellemesi Maxwell denklemlerinden elde edilen eşitliklerin kullanılması ile yapılmıştır [1, 2, 3].

Eşitlikler ile direncin gerçel ve sanal kısımlarının empedans değerleri belirlenerek, aşağıda verilen etkilerin en az olacağı modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu etkiler, direnç telleri arasındaki kapasitans, direnç telleri ile ekran arasındaki kapasitans, direnç telinin özindüktansı, direnç telleri arasındaki karşılıklı indüktans etkisi, teller arasında ve tellerin ekranla arasında oluşan kayıp iletkenlik etkileridir. Bu etkilerin değerlerini belirlemek için tablo 1’de verilen parametrelerin değerleri, fiziksel ve manyetik-elektrik durumlar gözönüne alınarak optimum seviyede belirlenmiştir.

Etkilerden gelen değerlerin hesaplanmasından sonra 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gerçel kısmın empedans değeri eşitlik (2) kullanılarak hesaplanmıştır [3, 4].

$$Re \cong \frac{R}{1 - \frac{1}{6}R(G_0 - 2G_1) - \frac{\omega^2(L - 2M)^2}{R^2} - \frac{1}{720}R^2\omega^2(15C_0^2 - (C_0 - 4C_1)^2)} \quad (2)$$

Burada,

- R : Nominal direnç değeri (Ω)
- C₀ : Ekran ile direnç teli arasında oluşan kapasitans etkisi (pF)
- C₁ : Direnç telleri arasında oluşan kapasitans etkisi (pF)
- L : Özindüktans etkisi (nH)
- M : Karşılıklı indüktans etkisi (nH)
- G₀ : Ekranla tel arasında oluşan iletkenlik (S)
- G₁ : Teller arasında oluşan iletkenlik (S)
- ω : Açısal frekanstır (rad/sn).

Eşitlik (2)’nin paydasında bulunan ve direncin değerini değiştiren kısım ΔG olarak adlandırıldı ve eşitlik (3)’de verilen ΔG’nin değeri Matlab® kullanılarak hesaplanarak, frekansa bağlı olarak grafiği oluşturulmuştur (Şekil 3 ve 4).

$$\Delta G = \frac{1}{6}R(G_0 - 2G_1) + \frac{\omega^2(L - 2M)^2}{R^2} + \frac{1}{720}R^2\omega^2(15C_0^2 - (C_0 - 4C_1)^2) \quad (3)$$

Elde edilen eğriler yardımıyla ΔG değeri en küçük olacak şekilde belirlendi ve empedansın gerçel kısmına etkisi azaltılmıştır.

Direncin değerinin değişmesine sebep olan diğer iki faktör ise deri etkisi ve girdap akımları etkisidir [4]. Yüksek frekanslarda deri etkisinden dolayı dirençten geçen akım direnç telinin yüzeyinden akmak ister. Bu durumda direnç telinin kesitide frekansa bağlı olarak değişmekte ve direncin değeri değiştirmektedir. Girdap akımlarında deri etkisine benzer olarak direncin değerinde değişime sebep olmaktadır.

Eşitlik (4) ve Eşitlik (5) kullanılarak deri etkisi ve girdap akımlarından kaynaklanan etkilerin değerleri Matlab®, de hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler frekansa bağlı eğriler şeklinde elde edildi ve bu eğriler ile deri ve girdap akımlarından gelen etkiler en az olacak şekilde direncin geometrik boyutları tekrar belirlenmiştir.

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{1}{12} \left(\frac{r_w}{4} \sqrt{\omega \mu \kappa} \right)^4 \quad (4)$$

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 1 + \frac{8 \left(\frac{\pi D \omega d}{\rho} \right) \omega \Lambda}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi D \omega d}{\rho} \right)^2} \cdot \frac{a^2}{D^2} \quad (5)$$

Burada,

- R_{AC} : Direncin AC değeri (Ω)
- R_{DC} : Direncin DC değeri (Ω)
- r_w : Direnç telinin yarıçapı (cm)
- ω : Açısal frekans (rad/sn)
- κ : Manyetik-elektrik öz direnç (Ω⁻¹.cm⁻¹)
- μ : Boşluğun manyetik geçirgenliği (VsA⁻¹.cm⁻¹)
- R : Nominal direnç değeri (Ω)
- D : Ekranın iç çapı (cm)
- ρ : Ekran malzemesinin özgül direnci (Ω.cm)
- d : Ekran kalınlığı (cm)
- Λ : Çift hattın uzunluğudur (cm).

ΔG, deri etkisi ve girdap akımları etkilerinin toplamı direncin AC değerinin DC değerinden ne kadar farklı olduğunu, yani “toplam direnç değişimi” değerini vermektedir [4, 5]. Buna göre toplam direnç değişimi Eşitlik (6) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\frac{\Delta R}{R} \text{ Toplam} = \frac{\Delta R}{R} \Delta G + \frac{\Delta R}{R} \text{ Deri Etkisi} + \frac{\Delta R}{R} \text{ Girdap Akımlar} \quad (6)$$

Tasarlanan 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının geometrik boyutları ve manyetik-elektrik parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 : 1000 Ω Bifilar tip AC direncin geometrik boyutları ve manyetik-elektrik parametreleri

Parametreler	Sembolu	Değeri
Direnç telinin boyu (cm)	Λ	11,2
Nominal direnç değeri (Ω)	R	1000
Direnç telleri arasındaki mesafe (cm)	a	0,2
Direnç telinin yarıçapı (cm)	r_w	0,0011
Ekranın iç çapı (cm)	D	8
Ekran kalınlığı (cm)	d	0,2
Ekran malzemesinin özgül direnci ($\Omega\cdot\text{cm}$)	ρ_0	$2,82\cdot 10^{-6}$
Dielektrik katsayısı (F/cm)	ϵ_0	$8,854\cdot 10^{-10}$
Boşluğun manyetik geçirgenliği ($\text{VsA}^{-1}\text{cm}^{-1}$)	μ	$4\pi\cdot 10^{-9}$
Direnç malzemesinin özgül iletkenliği ($\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)	κ	$(1/132)\cdot 10^6$

Tablo 2’de geometrik boyutlara uygun olarak hesaplanan kapasitans ve indüktans değerleri, tablo 3’de ise 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gerçel kısmının empedansı, sanal kısmının empedansı ve zaman sabitinin frekansa bağlı olarak hesaplanmış değerleri verilmiştir.

Tablo 2 : UME 1000 Ω bifilar tip AC direncin hesaplanan kapasitans ve indüktans değerleri

C_0 (pF)	C_1 (pF)	L (nH)	M (nH)
1,4	0,2	281	46

Tablo 3 : UME 1000 Ω bifilar tip AC direncin gerçel, sanal kısmın frekansa bağlı empedans ve zaman sabiti değerleri

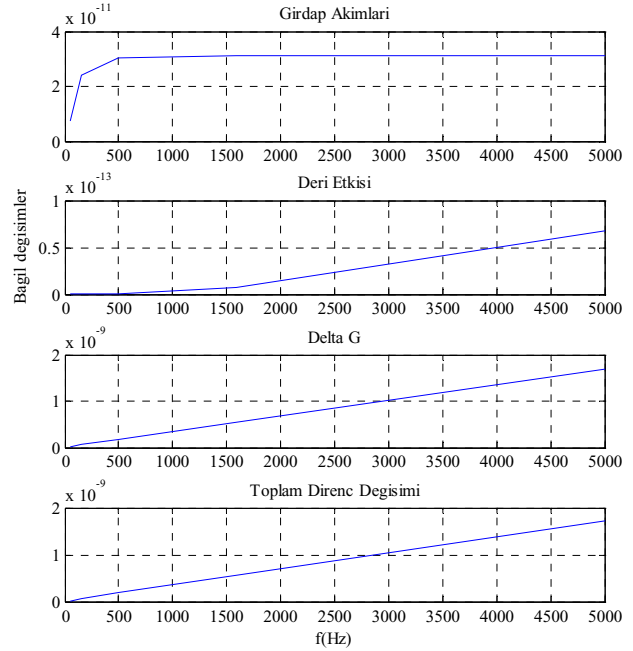
Frekans	Empedansın Gerçel kısmın değeri (Ω)	Empedansın Sanal kısmın değeri (Ω)	Zaman sabiti (s)
50 Hz	1000,00	$0,1\cdot 10^{-3}$	$0,37\cdot 10^{-9}$
159 Hz		$0,3\cdot 10^{-3}$	
500 Hz		$1,1\cdot 10^{-3}$	
1592 Hz		$3,7\cdot 10^{-3}$	
5 kHz		$11,7\cdot 10^{-3}$	
15,9 kHz		$37,2\cdot 10^{-3}$	
50 kHz		$117\cdot 10^{-3}$	
159 kHz		$234\cdot 10^{-3}$	
500 kHz		1,2	
1592 kHz		3,7	
5 MHz	1000,04	11,7	

Zaman sabiti değeri, indüktif, kapasitif etkilerden gelen hataların bir göstergesidir [8, 13, 14]. Bu etkilerden gelen hataların azaltılması tasarlanan direncin frekans bağımlılığının azaltıldığı anlamına gelir. Bu sebeple hesaplanabilir AC direnç tasarlanırken zaman sabiti değerinin en az seviyede olması istenir. Tablo 4’de UME 1000 Ω hesaplanabilir AC direnç standardının zaman sabiti değerinin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması verilmiştir. Zaman sabiti değerleri değerlendirildiğinde UME 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin DC-AC direnç değerleri arasındaki farkın azatıldığı anlaşılmıştır.

Tablo 4 : Zaman sabiti değerlerinin karşılaştırılması

	UME 1000 Ω	[8] nolu kaynak	[13] nolu kaynak
Zaman sabiti (ns)	0,37	0,9	1

Tablo 1’de verilen geometrik boyutlar ve parametrelere göre Matlab®’de hesaplanan girdap akımları etkisi, deri etkisi, ΔG ve toplam bağlı direnç değişimi değerleri 5 kHz’e kadar Şekil 3’de eğrisel olarak gösterilmiştir. Şekil 3’deki eğriler incelendiğinde ΔG ’ den gelen etkinin girdap akımları ve deri etkisine göre üst frekans değerinde 100 kat yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumda “toplam direnç değişimine” en büyük etkinin ΔG ifadesinden geldiği anlaşılmıştır.



Şekil 3 : Girdap akımları, deri etkisi, ΔG ve toplam direnç değişiminin frekansa bağlı eğrileri (5 kHz’e kadar)

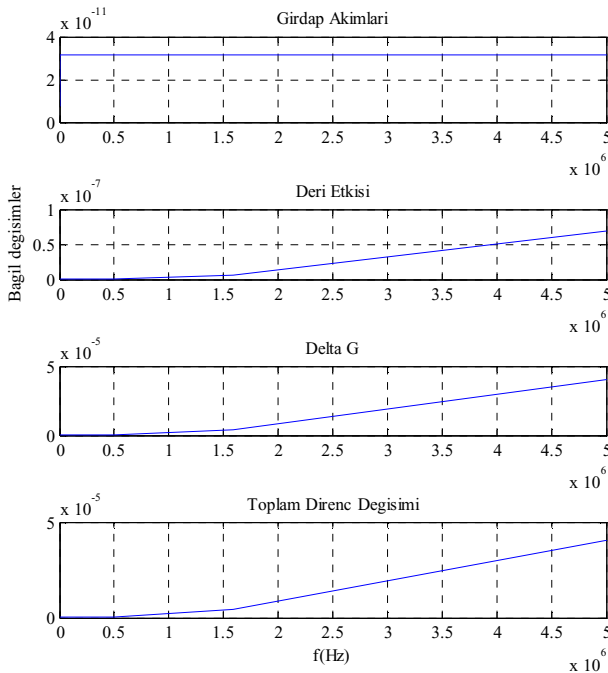
Şekil 3’deki “toplam direnç değişimi incelendiğinde 5 kHz frekans değerinde 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin değerinin DC-AC farkının bağlı olarak yaklaşık $2\cdot 10^{-9}$ olduğu yani 1000 Ω nominal değerindeki dirençte $2\cdot 10^{-6}\Omega$ ’luk DC-AC farkının oluştuğu anlaşılmıştır.

Tablo 5’deki veriler incelendiğinde literatürde yapılan çalışmalarla, elde edilen verilerin uyumlu olduğu görüldü, ayrıca hassas LCR metrelerin AC direnç kısımlarının kalibrasyonlarını yapmak [15] için performans testlerini içeren bilgiler incelendi ve (örneğin Agilent 4284A) 1 kHz frekans değerinde ppm seviyesinde AC direnç standardının kullanılması yeterli olduğu görülmüştür. Bu nedenlerle tasarlanan 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir direnç standardının metrolojik seviyede bir standart olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 5 : ΔG ve girdap akımlarından gelen etkilerin karşılaştırılması

	Frekans	UME 1000 Ω	[4] nolu kaynak
ΔG değeri	5 kHz	$2 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$
Girdap akımları etkisinin değeri		$3 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$

Tablo 1'de verilen geometrik boyutlar ve parametrelere göre Matlab®'de hesaplanan "girdap akımları" etkisi, "deri etkisi", " ΔG " ve "toplam bağıl direnç değişimi" değerleri 5 MHz'e kadar şekil 4'de eğrisel olarak gösterilmiştir. Şekil 4'deki eğriler incelendiğinde üst frekans değerlerinde ΔG 'den gelen etkinin girdap akımları ve deri etkisine göre 100 kat yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumda "toplam direnç değişimine" en büyük etkinin yine ΔG ifadesinden geldiği ve 5 MHz'de ΔG ifadesinin 5 kHz sonuçlarına göre yaklaşık 10000 kat arttığı anlaşılmıştır.



Şekil 4 : Girdap akımları, deri etkisi, ΔG ve toplam direnç değişiminin frekansa bağlı eğrileri (5 MHz'e kadar)

Şekil 4'deki "toplam direnç değişimi incelendiğinde 5 MHz frekans değerinde 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin değerinin DC-AC farkının bağıl olarak yaklaşık $5 \cdot 10^{-5}$ olduğu yani 1000 Ω nominal değerindeki dirençte 0,05 Ω 'luk DC-AC farkının oluştuğu anlaşılmaktadır. Tablo 6'da direncin 1 MHz'de DC-AC direnç değeri farkının literatür çalışmaları ile karşılaştırılması verilmiştir.. Frekans bağımlılığının logaritmik artması sebebiyle 1 MHz frekans değerinin üstündeki değerlerde en az 5 kat daha iyi sonuçların elde edildiği değerlendirilmiştir.

Tablo 6 : DC-AC direnç değeri farkının karşılaştırılması

	Frekans	UME 1000 Ω	[13] nolu kaynak	[15] nolu kaynak
Bağıl DC-AC direnç değeri farkı	1 MHz	$0,2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Elde edilen veriler değerlendirildiğinde tasarlanan hesaplanabilir AC direncin metrolojik ölçümler için yeterli olduğu görülmektedir.

3. 1000 Ω Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Üretilmesi

Tasarımı tamamlanan hesaplanabilir AC direncin üretim aşamasında en önemli problem kontak noktalarının doğru bir şekilde birleştirilmesidir [7, 8]. Bu çalışmada iletim hattı olarak Isabellenhutte firmasının ürettiği yüksek özgül dirence sahip 20 μ m çaplı isaohm teli kullanılmıştır. İsoahm direnç telinin nikel alaşımı olması nedeniyle kontak problemleri oluşmuştur [7, 8]. İsoahm direnç telinin direkt olarak 4 terminal bağlantı noktasında 2,5 mm çaplı bakır ile birleştirilmesinin zor olması nedeniyle isaohm direnç teli önce 0,5 mm çaplı manganin direnç teli ile birleştirilmiştir.. Bu iki direnç telinin birleştirilmesi için farklı yöntemler kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar metanol kaynağı, nokta kaynağı ve geleneksel lehimleme yöntemleridir [7, 8]. Bu yöntemler dışında isaohm direnç telinin bakır ile kaplanması konusunda çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda nokta kaynağı ile birleştirme işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Direnç tellerini nokta kaynağı yöntemi ile birleştirmeden önce kirliliklerden temizlemek için kimyasal bir prosedür uygulanmıştır [9]. Bunun için 20 μ m çaplı isaohm direnç teli yaklaşık 1000 Ω olacak şekilde kesildi. Kesilen isaohm direnç teli öncelikle izopropil alkol banyosunda kaba temizlik için 20 dakika bekletildi. Alkol banyosundan çıkartılan isaohm direnç teli yağ temizleyici sprey ile temizlendi. Daha sonra isaohm direnç telinin yüzeyi, daha iyi kontak için aşındırıldı. Aşındırma için isaohm direnç teli çinko klorür (agresive flux) banyosunda 10 dakika bekletildi. İsoahm direnç teli çinko klorür banyosundan çıkartıldıktan sonra krom-nikel alaşımlarda oksit tabakalarının temizlenmesi işlemi (pickling yöntemi) için kromik asit içerisinde 10 dakika bekletildi. İsoahm direnç teli kromik asit içerisinde çıkartıldıktan sonra tekrar izopropil alkol banyosuna bırakıldı. Bu şekilde isaohm direnç teli birleştirme işlemine hazır duruma getirildi. İsoahm direnç telinin birleştirileceği 0,5 mm çaplı manganin direnç telinin boyu yaklaşık 0,5 cm olacak şekilde kesildi. Manganin direnç teline de isaohm direnç teli ile aynı kimyasal prosedür uygulandı. Ancak isaohm direnç teli için kullanılan kromik asit yerine manganin direnç teli için sülfirik asit kullanıldı.

Nokta kaynağı sistemi kontak temizleyici ile temizlenerek, uygulanacak kaynak süresinin zamanı belirlenerek, kimyasal prosedür ile temizlenmiş isaohm ve manganin direnç tellerinin birleştirilmesi işlemine geçildi. Birleştirme işlemine başlanmadan önce nokta kaynağı sistemi yine kontak temizleyici ile temizlendi. 20 μ m çaplı isaohm direnç teli alta,

0,5 mm çaplı manganin direnç teli üstte olacak şekilde nokta kaynağı sistemine yerleştirildi. Daha sonra teller üstten sıkıştırılarak kaynak işlemi için kaynak makinasından 3 saniyeyi aşmayacak şekilde manyetik-elektrik darbe uygulandı.

Bu yöntemle nominal değeri yaklaşık 1000 Ω olan 3 adet direnç teli hazırlanmıştır. Hazırlanan direnç tellerine Tablo 7'de belirtildiği şekilde farklı ısıl işlem prosedürleri uygulanmıştır.. Böylece, direnç tellerinde yüksek kararlılığın elde edilmesi için gereken ısıl işlem yöntemi belirlenmiştir.

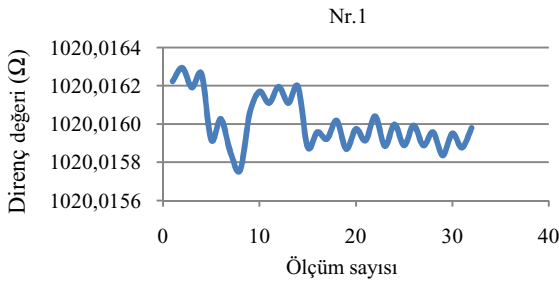
Tablo 7 : Isıl işlem yöntemleri

Tel numarası (Nr)	Uygulanan işlem
1	Hiçbir işlem yapılmamıştır.
2	175 °C sıcaklıkta fırın içerisinde 2 saat ısıtılıp 1 saat soğuk suda şoklanmıştır. Bu işlem 10 kez tekrarlanmıştır.
3	175 °C sıcaklıkta fırın içerisinde 72 saat süreyle tutulmuştur.

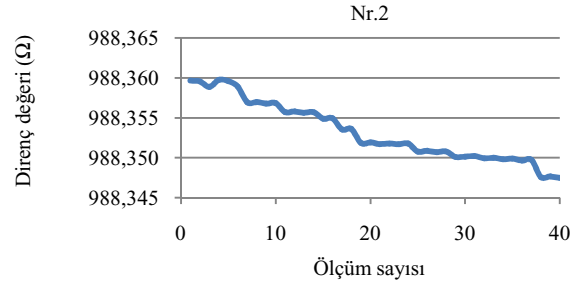
Not: 250 °C üzerinde bir sıcaklıkta isaohm direnç telinin manyetik-elektrik özelliğinin bozulması nedeniyle ısıl işlem çalışmaları 175°C'de gerçekleştirilmiştir [9].

3.1. Direnç Telinin Kararlılığı İle İlgili Deneysel Çalışmalar

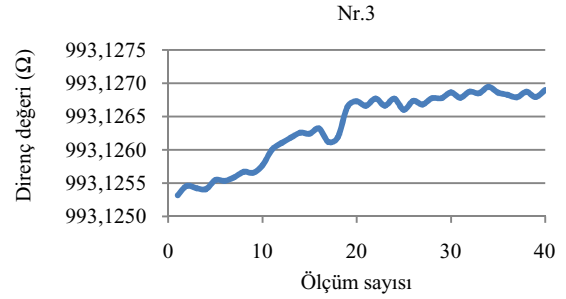
Hazırlanan 3 adet direnç tellerinin iki ucunda banana tip konektör olan bir düzenek hazırlanmıştır.. Karşılıklı iki banana konektör arasına yerleştirilen direnç telleri ısıl izolasyonlu bir dolap içerisine yerleştirilerek MI6010B model otomatik DC akım karşılaştırılmalı direnç ölçüm köprüsüne 4-terminal olarak bağlandı. MI 6010B otomatik direnç ölçüm köprüsünde yaklaşık 15 gün boyunca gerçekleştirilen ölçümler sonucunda Şekil 5'te verilen sonuçlar elde edilmiştir. Eğrilerde verilen standart sapma hesaplamalarında ilk 3 günlük veriler dikkate alınmamıştır.



Şekil 5a : Nr.1 direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 0,1 ppm)



Şekil 5b : Nr.2 direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 3 ppm)



Şekil 5c : Nr.3 direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 0,3 ppm)

Eğriler incelendiğinde 1 numaralı direnç telinin ilk 7 günlük değerlerinde kararlılığın daha düşük olduğu ancak 7.günden sonra alınan ölçümlerde kararlılığın arttığı, direnç değerinde herhangi bir kayma olmadığı (Şekil 5a), 2 numaralı direnç telinde ise kararlılığın kısa dönemde sağlandığı ancak direncin uzun dönemde kaydığı gözlemlendi (Şekil 5b). Son olarak 3 numaralı telinde ise ilk 5-6 günlük ölçümlerde direnç değerinin sürekli kaydığı ancak sonraki ölçümlerde ise kaymanın azaldığı ve kararlılığın arttığı görüldü (Şekil 5c).

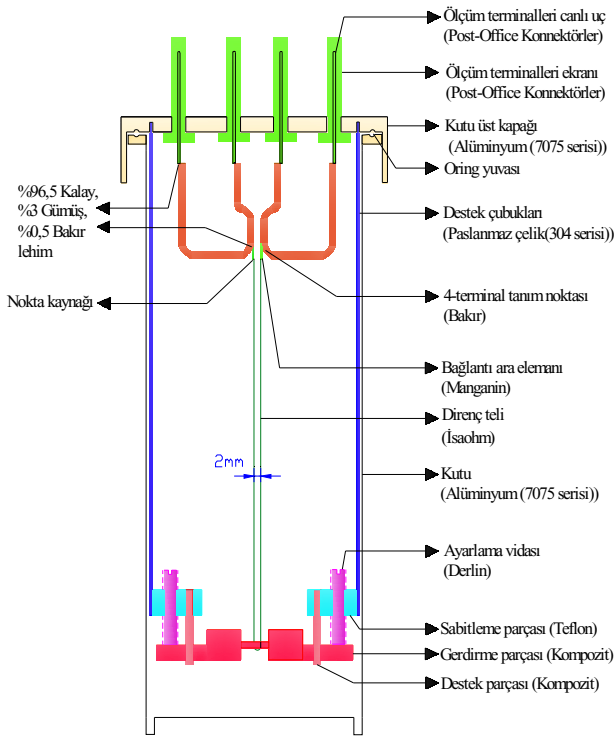
Deneysel çalışmalar sonucunda 1 numaralı direnç telinde 0,1 ppm kararlılık ve tekrarlanabilirliğin elde edilebileceği, 2 numaralı direnç telinde sürekli bir kaymanın gözlemlendiği bu sebeple ısıl işlem periyodunun ve şeklinin uygun olmadığı, 3 numaralı direnç telinde ise kararlılığın arttığı (0,3 ppm seviyesinde) ve kayma eğiminin azaldığı bu nedenle sıcaklık katsayısının daha iyi olacağı öngörülerek kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilerin beklenen seviyelerde olduğu görülmüştür.

3.2. 1000 Ω Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Üretilmesi ve Ölçümleri

Direncin kararlılığının artırılması ile ilgili deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra direnç telinin matematiksel modelde elde edilen geometrik boyutlara uygun olarak hazırlanmış olan mekanik sisteme montajı yapılmıştır. Montaj işlemi yapılırken özellikle direnç telleri arasındaki mesafenin 2 mm. olması ve merkezde olmasına dikkat edilmiştir.

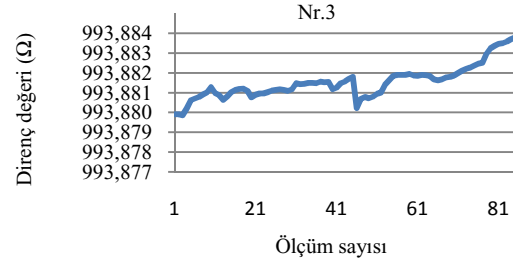
Hesaplanabilir AC direnç standardının Şekil 6'da verildiği gibi 4-terminal + ekran bağlantı tipine göre tasarlanmıştır [8 ,17].

Ölçüm uçları noktasında kontak direncini azaltmak için “post-office” tip konektör tercih edilmiştir. 4-terminal bağlantı noktasında 2,5 mm çaplı bakır tel, manyetik-elektrik direncinin yüksek olması sebebiyle ekran ile direnç teli arasında PTFE malzeme, direnç telinin gerginliğinin ayarlanmasında kompozit malzeme tercih edilmiştir. Kompozit malzemenin tercih edilmesinin iki nedeni vardır. Birincisi manyetik-elektrik direncinin PTFE kadar iyi olması diğer nedeni ise mekanik olarak daha hassas işlenebilir olmasıdır. Bu malzeme ile iki tel arasındaki 2 mm'lik mesafe sağlanabilmiştir. Standardın kutusu ise 7075 serisi alüminyum malzemeden yapılmıştır. 7075 serisi alüminyum malzeme tercih edilmesinin nedeni ise manyetik-elektrik ekran kalitesinin daha iyi ve ağırlığın düşük olmasıdır.

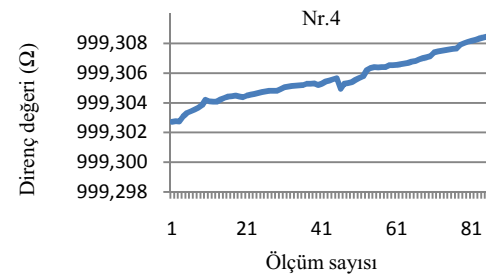


Şekil 6 : Üretimi yapılan 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gösterimi

3 numaralı direnç teli ile birlikte yine aynı ısıl işlem prosedürüne tabi tutulan ve doğruluğu %0,1'den daha iyi olan ikinci bir direnç teli hazırlanarak (Nr.4) montajlanmıştır. Bu şekilde aynı ısıl işlem prosedürü uygulanmış iki adet 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç hazırlanmıştır. Bu iki 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç ısıl izolasyonlu dolap içerisine yerleştirilmiş ve MI6010B model akım karşılaştırmalı otomatik DC direnç ölçüm köprüsü ile 15 gün boyunca ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonuçları eğrisel olarak şekil 7 ve şekil 8'de verilmiştir. 3 numaralı direnç teli kutuya montaj edildikten sonra gerdirildiği için değerinin yaklaşık 0,7 Ω arttığı görülmüştür.



Şekil 7 : Nr.3 hesaplanabilir AC direnç standardının 15 günlük kararlılığı



Şekil 8 : Nr.4 hesaplanabilir AC direnç standardının 15 günlük kararlılığı

Ölçümler sonucunda hesaplanabilir AC direnç standardının montajlanmadan önce 0,3 ppm seviyesinde kararlılıkta ve ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilirliğinin olduğunu gözlemlenmiştir. Montajlama işlemi yapıldıktan sonra direncin değerinde sürekli bir kayma gözlemlendi ve tekrarlanabilir olmayan ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Bu durumda direnç değerindeki kaymanın isaohm veya manganin direnç telinden gelmediği, manganin direnç telinin, 4 terminal ölçüm noktası olan ve lehim yolu ile bakırla birleştirilmiş kontak noktasından veya bakır tellerin post-office tip konektörlere lehimlendikleri noktadan geldiği belirlenmiştir.

1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının DC akım uygulanarak yapılan ölçümlerinde, standardın kısa dönem (1-2 gün) içerisinde izlenebilirlik aktarmak amacıyla kullanılabilceği görülmüştür.

3.3. Zaman Sabitinin Belirlenmesi

Hesaplanabilir AC dirençlerin kalibrasyonları zaman sabiti değerleri ölçülerek yapılır [8, 14, 18]. Zaman sabiti değerini doğrudan ölçebilen hassas köprülerin UME'de bulunmaması nedeniyle alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu alternatif yöntem ikincil seviye ölçümlerde kullanılır. Ancak 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin zaman sabiti değerleri ile ilgili fikir vermesi amacıyla belirtilen yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemde 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir LCR metre kullanılarak AC direncin DC direnç değeri (R) 999,24 Ω ve 1 kHz frekansında reaktans değeri (X) 0,0029 Ω olarak ölçülmüştür. Ölçülen direnç ve reaktans değeri kullanılarak zaman sabiti ($t = X / (R \cdot \omega)$) değeri $4,6 \cdot 10^{-10}$ s olarak hesaplanmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardı, DC - 5 kHz frekans aralığında literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen verilere uygun olarak metrolojik seviyede yapılan ölçümlerde standart olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Tasarımın literatürdeki çalışmalardan farkı ise DC - 5MHz frekans aralığında direnç değeri farkı en az değişecek şekilde tasarlanmış olmasıdır. Literatürde yapılan çalışmalarla ürettiğimiz standart dirençlerin değerine ait veriler (DC-AC direnç farkı ve zaman sabiti) karşılaştırıldığında 1 MHz frekans değerinde en az 5 kat daha iyi bir tasarımın elde edildiği görülmüştür. Bu durumda 5 MHz'de elde edilen verilerin literatürde yapılan hesaplanabilir AC direnç standartlarından daha düşük DC-AC direnç değeri farkına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Matematiksel modellemede 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının 5 MHz frekans değerinde DC-AC direnç değeri farkı 40 ppm olarak elde edilmiştir. Direnç telinin MI6010B model otomatik DC direnç ölçüm köprüsü ile yapılan deneysel ölçümlerinde ise 0,1 ppm kararlılık değeri elde edilmiştir. 1000 Ω Bifilar tip hesaplanabilir AC direncin üretimi yapıldıktan sonra MI6010B model otomatik DC direnç ölçüm köprüsü ile yapılan ölçümlerde ise 1 ppm/gün kararlılık değeri elde edilmiştir. Ancak direncin değerinde kayma gözlemlenmiştir. Bu nedenle tekrarlanabilir ölçümler alınamamıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin değerindeki kaymanın isaohm veya manganin direnç telinden gelmediği, manganin direnç telinin, 4 terminal ölçüm noktası olup lehim yolu ile bakırla birleştirilmiş kontak noktasından veya bakır tellerin post-office tip konektörlere lehimlendikleri noktadan geldiği anlaşılmıştır.

Üretilen 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC dirençte tek yüzeyli konektör tasarımı uygulanmıştır. Bu sayede ölçümlerde kullanılacak ekranlı kablolar arasındaki mesafe azaltılmış ve yüksek frekans uygulamalarında düşük belirsizlikte [19] ölçümler alınabilmesi sağlanmıştır. Ölçüm noktalarında post-office tipi konektör kullanılarak, kontak direnci azaltılmıştır. Ayrıca kullanılan yöntemde uygulanan kimyasal prosedür ile kontak noktalarındaki kirlilikler giderilerek direnç tellerinin birleştirilmesi sırasında daha iyi kontak elde edilmiş ve kirliliklerden gelen etkinin direncin kararlılığına etkileri ortadan kaldırılmıştır. İleride yapılacak çalışmada 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standartlarının sıcaklık katsayılarının belirlenmesi planlanmıştır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmanın her aşamasında, desteklerini esirgemeyen TÜBİTAK UME'nin çok değerli yöneticilerine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1].Gibbins D.L., "A design for resistors of calculable AC/DC resistance ratio", *IEEE Trans. Instrum.Meas.*, Vol.110, No.2, s.335-347, (1963).

[2].Haddad, R.J., "A Resistor Calculable from DC to 10⁵ rad/s.", *Msc. Thesis, School of Engineering and Applied Science, George Washington University*, (1969).

[3].Graetsh V., "Prazisionswiderstaende für Gelich und Wechselstrom", *PTB-Mitteilungen*, 90 26-30, (1980).

[4].Koller H., "Prazisionswiderstaende mit berechenbarem Frequenzeinfluss", *Elektrie* 29, s.612-615, (1975).

[5].*PTB-Report*, "Widerstaende mit berechenbarem Frequenzeinfluss", (1974).

[6].Schurr J, Wood B. M., Overney F, "Lineer frequency dependence in AC resistance measurement", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 54 512-5, (2005).

[7].Elmqvist R.E., "Calculable coaxial resistors for precision measurements", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 49 210-5, (2000).

[8].Kucera J, Vollmer E, Schurr J., Bohacek J, "Calculable resistors of coaxial design" *Meas.Sc.Technol.*, 095104, (2009).

[9].Isabellenhütte company, "Isaohm Technical information".

[10].Semyenov Y.P., "Bifilar AC-DC Resistor Using a Microwire", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol.46, No.2, (1997).

[11].Ku Y.S., Hsu C.M., Pang H.L., Hsiao J., Nakanishi "DC & AC resistance measurements center for measurements standarts", *XVII. IMEKO World Congress*, Dubrovnik, Croatia, 54 533-7, (2005).

[12].Gülmez Y., Gülmez G., Turhan E., Özkan T., Çınar M., Sözen L., "New Design of Calculable Resistor", *Precision Electromagnetic Measurements. Conference*, Page 348-349, (2002).

[13].Kim H.J., Lee R.D., Semenov Y.P., "Resistor with calculable dependencies up to 1 MHz", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol.56, No.2, (2007).

[14].Yasuhiro N., Hiroyuki F., "An analysis on the uncertainty of calculating the time constant of the quadrifilar reversed resistor", *AIST Bulletin of Metrology*, Vol.3, No.3, (2004).

[15].Bohacek J., "References resistors for calibration of wireband LCR meters", *XVIII Imeko Word Congress, Brazil*, (2006).

[16].Arnold A.H.M., Ph.D. D.Eng. Associate Member., "Nickel-Chromium-Aluminium-Copper Resistance Wire" *National Physical Laboratory*, Paper No.2084M, (1956).

[17].Çınar M., Dolma A., Gülmez Y., "Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Modellenmesi ve Geliştirilmesi", *International Union of Radio Science, KKTC*, (2010).

[18].Delahaye F., "DC and AC Techniques for Resistance and Impedance Measurements", *Metrologia*, 29 81, (1992).

[19].Baytaroğlu, Ş., Kesikoğlu, H., Özbay H.Ö., "Metrolojide Kullanılan Temel ve Genel Terimler Sözlüğü", *Ulusal Metroloji Enstitüsü*, (1994).

Güç Kalitesi Çalışmalarında Bilgisayar Mühendisliğinin Rolü

The Role of Computer Engineering in Power Quality Studies

Dilek Küçük

Güç Elektroniği Bölümü
TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü
dilek.kucuk@uzay.tubitak.gov.tr

Özet

Güç kalitesi elektrik mühendisliğinin önemli araştırma konularından biridir. Elektriksel gücün kalitesindeki bozulmaların tüketiciler üzerindeki önemli etkilerinden dolayı bu alanda yapılan çalışmalar artış göstermektedir. Elektrik sisteminin üretim, iletim ve dağıtım alt sistemlerinde güç kalitesinin uygun şekilde değerlendirilebilmesi için alt sistemlerin uygun noktalarından uygun çözünürlükte güç kalitesi verisinin elde edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, güç kalitesi verilerinin gerçek zamanlı olarak ölçülmesi, taşınması, depolanması, sunulması ve analiz edilmesi gibi bilgisayar mühendisliğiyle ilgili konular güç kalitesi çalışmalarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu makalede, güç kalitesi uygulamalarında bilgisayar mühendisliğinin rolü incelenmiştir. Konuya donanımdan ziyade yazılım yönünden yaklaşan bu makale, hem bu alanda çalışan araştırmacılar için hem de ilgili sistemler üzerindeki gerçek deneyimlere dayandığından uygulayıcılar için önemli bir rehber olması açısından anlamlıdır.

Anahtar kelimeler: güç kalitesi, güç kalitesi uygulamaları, bilgisayar mühendisliği

Abstract

Power quality is an important research topic of electrical engineering. There is a rise in the research on this topic as distortions in the quality of the electrical power have significant impact on the consumers. In order to properly assess the power quality in the generation, transmission, and distribution subsystems of the overall electrical system, power quality data with appropriate resolution should be obtained at the appropriate points of these subsystems. Therefore, topics related to computer engineering, such as real-time measurement, transfer, storage, presentation, and analysis of power quality data, constitute an important part of the power quality studies. In this paper, the role of computer engineering in power quality studies is reviewed. The paper, which approaches the topic more from the software aspects instead of the computer hardware, is significant as an important guide for researchers studying the topic as well as for practitioners since it is based on genuine experiences with related applications.

Keywords: power quality, power quality applications, computer engineering

1. Giriş

Elektriksel güç hayatımızın her alanına etki etmektedir. Elektriksel güç kalitesi, güç kalitesi parametreleri adı verilen bir seri parametre üzerinden değerlendirilmektedir [1]. Söz konusu güç kalitesi parametreleri arasında frekans, akım ve gerilim harmonikleri ve kırışma ile birlikte tepe, çukur ve kesinti gibi güç kalitesi olayları da yer almaktadır.

Tüketmekte olduğumuz gücün kalitesindeki bozulmalar, önemli elektronik aletlerin bozulmalarına veya çalışamaz duruma gelmelerine neden olmaktadır. Ayrıca kırışma parametresinin belirli sınır değerlerin üzerine çıkmasının insan psikolojisi üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Bu nedenlerle, güç kalitesi üzerine bozucu etkisi olan kaynakların tespit edilmesi için özellikle güç kalitesi izleme ve analiz uygulamalarının gerekliliği ortaya çıkmıştır. En genel ifadeyle güç kalitesi izleme ve analiz sistemleri; önceden tespit edilmiş olan ölçüm noktalarında (transformatör merkezleri, fiderler gibi) güç kalitesi parametrelerini uygun çözünürlükte hesaplayan, elde edilen güç kalitesi verilerini ilgili kullanıcılara (karar verici yetkililer gibi) sunan ve veriler üzerinde çeşitli analizler yapılmasına imkân sağlayan uygulamalardır. Literatürde çeşitli özelliklere sahip birçok güç kalitesi izleme ve analiz uygulaması raporlanmıştır ve halen raporlanmaktadır [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Güç kalitesi izleme ve analiz uygulamaları ve benzeri uygulamalar genel olarak aşağıdaki işlevleri gerçekleştirmektedirler:

- Güç ve güç kalitesi parametrelerinin hesaplanması (ölçülmesi)
- Ölçülen verilerin analiz için veri merkezine taşınması
- Verilerin merkezde depolanması ve yönetilmesi
- Verilerin ilgili kullanıcılara sunulması ve raporlanması
- Büyük boyutlara ulaşan verilerin karar verme süreçlerine katkıda bulunacak yönde değerlendirilmesi

Yukarıda sıralanan maddelerinin tümü esas olarak çeşitli bilgisayar mühendisliği konularıyla örtüşmektedir. Açık olarak ifade etmek gerekirse; ilk işlev, gerçek zamanlı veri işleme konusuyla, ikinci işlev bilgisayar ağları, üçüncü işlev veritabanı modelleme ve yönetme, dördüncü işlev veri

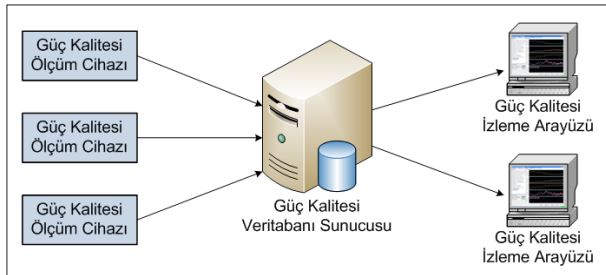
görselleştirme, son işlev de veri madenciliği, bulanık mantık ve uzman sistemler gibi konularla yakından ilişkilidir. Güç kalitesi çalışmaları ile bilgisayar mühendisliği konularının bu şekilde önemli seviyede üst üste oturmasından dolayı biz bu makalede güç kalitesi çalışmalarında bilgisayar mühendisliğinin rolünü inceledik. Ayrıca mevcut durumdaki problemlerden ve bunların olası çözümlerinden de bahsettik. Bu incelememiz sırasında güç kalitesi izleme ve analiz sistemleri gerçekleştirirken edindiğimiz deneyimlerimizden faydalandık. Dolayısıyla, bu makale hem ilgili araştırmacılar hem de uygulayıcılar için önemli bir rehber kaynak görevi görecektir. Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: 2. bölümde genel bir güç kalitesi izleme ve analiz sistemi mimarisi verdikten sonra güç kalitesi çalışmalarında bilgisayar mühendisliğinin rolünü detaylı olarak inceledik. Bu bölümde ayrıca mevcut problemlerden, bunlar için olası çözüm önerilerinden ve ileri araştırma konularından da bahsettik. 3. bölümde ise çalışmamızı özetledikten sonra çıkardığımız sonuçları sunduk.

2. Güç Kalitesinde Bilgisayar Uygulamaları

Bu bölümde, güç kalitesi çalışmalarında bilgisayar mühendisliği uygulamalarından, dolayısıyla bilgisayar mühendisliğinin bu çalışmalardaki rolünden detaylı olarak bahsedilecektir. Güç kalitesi çalışmalarında bilgisayar mühendisliğinin rolü bir önceki bölümde bahsedilen güç kalitesi izleme ve analiz sistemleri üzerinden incelenmiştir. Bu sistemler ilgili çalışmaların büyük bir bölümünü kapsamakta olduğundan inceleme genel olma özelliğini korumaktadır. Bu nedenle ilk alt bölümde çok genel bir güç kalitesi izleme ve analiz sistemi mimarisi ve işleyiş şekli temel olarak verilmiştir. İkinci alt bölümde ise bu işleyişin çeşitli aşamalarında bilgisayar mühendisliğinin rolü konusunda detaylı incelemeler sunulurken mevcut sorunlardan ve olası çözüm yollarından bahsedilmiş son alt bölümde ise konuyla ilgili ileri araştırma konuları sunulmuştur.

2.1. Genel Bir Güç Kalitesi İzleme ve Analiz Sistemi Mimarisi

Şekil 1'de genel bir güç kalitesi izleme ve analiz sistemi mimarisi verilmiştir. Sistem esas olarak güç ve güç kalitesi ölçüm cihazlarından, ilgili ölçüm verilerinin saklanacağı veritabanına ait sunucuların tutulduğu bir veri merkezi ve son olarak kullanıcılar için geliştirilmiş olan arayüz uygulamalarından oluşmaktadır.



Şekil 1: Genel bir güç kalitesi izleme ve analiz sistemi mimarisi.

Bu tip sistemler genel olarak aşağıdaki akışa uygun olarak işlemektedir:

- Güç kalitesi ölçüm cihazları ilgili ölçüm noktalarına monte edildikten sonra düzenli olarak güç ve güç kalitesi parametrelerini belirli bir çözünürlükte hesaplayarak bu verileri güç kalitesi veritabanı sunucusuna gönderir ve veriler ilgili veritabanında depolanır.
- Güç kalitesi izleme arayüzü uygulamaları vasıtasıyla da yetkili kullanıcılara ilgili güç kalitesi verileri sunulur. Bu uygulamalar vasıtasıyla sunucuda bu veriler üzerine yapılmış daha kapsamlı analiz sonuçlarına ve üretilmiş raporlara da erişilebilir.

Bir sonraki alt bölümde detaylı olarak anlatılacağı gibi bu örnek mimariden çok daha farklı birçok alternatif sistem mimarisi tasarlanabilir ve gerçekleştirilebilir. Ancak bu mimarinin ve benzerlerinin birçok çalışmada temel alınmaları nedeniyle mimari özellikle dikkate değer olduğundan işleyiş anlatmak için kullanılmıştır.

Güç kalitesinde bilgisayar mühendisliği uygulamalarının detaylarına geçmeden önce şunu vurgulamak gerekir ki, güç kalitesi izleme ve analiz sistemlerinin tasarım ve gerçekleştirimi konusu esas olarak güç elektroniği ve sayısal sinyal işleme konularında çalışan elektrik-elektronik mühendislerinin uzmanlık alanıdır. Örneğin, ilgili uluslararası standartlara [9, 10, 11, 12] ve [13, 14] gibi ilgili ulusal yönetmeliklere uygun olarak güç kalitesi ölçüm algoritmalarının ortaya çıkarılması, daha sonra ölçülen güç kalitesi verilerinin değerlendirilmesi ve yorumlanması konuları bu kapsamda yer almaktadır. Ancak bu ölçüm ve değerlendirme algoritmalarının verimli bir şekilde gerçekleştirimi ile birlikte ölçülen verilerin taşınması, depolanması, yönetilmesi ve uygun şekilde sunulması büyük ölçüde bilgisayar mühendisliğinin konularına girmektedir. Dolayısıyla büyük ölçekli güç kalitesi izleme ve analiz sistemlerinin ortaya çıkarılabilmesi için elektrik-elektronik ve bilgisayar mühendisleri birlikte çalışması yerinde olacaktır. Alt bölümlerde detaylandırılacağı üzere bu çalışmamızda, güç kalitesi izleme ve analiz sistemlerinin tasarım ve gerçekleştiriminde bilgisayar mühendisliğinin konularıyla örtüşen alanlara yer verilmiş, bu alanlar incelenmiştir.

2.2. Güç Kalitesi Çalışmalarında Bilgisayar Mühendisliği Uygulama Alanları

Güç kalitesi çalışmalarındaki birçok aşama bilgisayar mühendisliği konularıyla örtüşmektedir. Bu nedenle, ilgili aşamalarda bu konulardaki gelişmeler takip edilmeli ve uygun şekilde gerçekleştirilmekte olan sistemlere entegre edilmelidir.

Biz bu makalede, güç kalitesi çalışmalarında bilgisayar mühendisliğinin rolünü incelerken beş ana başlık üzerinde ilerledik: güç kalitesi ölçümleri, ölçüm verilerinin taşınması, verilerin depolanması/yönetilmesi ve son olarak verilerin değerlendirilmeleri. Bu konularla ilgili detaylar aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.

2.2.1. Güç Kalitesi Ölçümleri

Güç ve güç kalitesi ölçümleri, ilgili izleme ve analiz sisteminin ihtiyaçları doğrultusunda belirlenmiş olan belirli bir örnekleme oranında ölçüm noktasına ait akım ve gerilim değerlerinin sürekli olarak örnekleme ve elde edilen veri kullanılarak güç kalitesi ölçümleriyle ilgili standartlarda [9,

10, 11, 12] ve [13, 14] gibi ilgili yönetmeliklerde belirtilen şekilde güç ve güç kalitesi parametrelerinin hesaplanmasını ve güç kalitesi olaylarının tespit edilmesini kapsamaktadır.

Güç kalitesi ölçümleri çok yüksek boyuttaki verinin sınırlı bir zamanda işlenmesini gerektirdiğinden zaman anlamında kritik bir aşamadır. Bu nedenle ölçümleri gerçekleştiren cihazın işlemci hızının yüksek olması gereklidir. Eğer ölçümlerin kesinliğinin yüksek olması isteniyorsa kullanılacak ve dolayısıyla işlenecek örnek sayısı da oldukça yüksek olacaktır. Eğer bu gibi durumlarda örnek sayısı bir işlemcinin sınırlı bir zaman aralığında işleyebileceği miktardan fazla olursa, birden fazla işlemci kullanılmalı ve ölçüm uygulamasına paralel işlem yapma yeteneği kazandırılmalıdır. Örneğin değişik fazlara ait akım ve gerilim verilerine ait hesaplamalar paralel olarak gerçekleştirilebilir ve böylelikle daha yüksek kesinlikte ölçüm sonuçları elde edilebilir.

2.2.2. Verilerin Taşınması

Eğer ölçülen güç ve güç kalitesi verilerinin cihaz üzerinde tutulması planlanmıyorsa, yani veriler Şekil 1'de sunulan mimaride olduğu gibi merkezi bir veritabanında tutulacaksa, verilerin cihazlardan ilgili veritabanına taşınması da dikkate alınması gereken bir aşama olarak ortaya çıkmaktadır. Verilerin ilgili cihazlarda depolanmaları yerine merkezi bir veritabanında tutulmaları (ek bir işlem olarak veri taşınmasını gerektirmesine rağmen) özellikle aşağıdaki iki nedenden ötürü tercih edilesidir:

- Güç kalitesi ölçüm cihazları, yaygınlaştırılmalarının imkân dahilinde olabilmeleri için olabildiğince düşük maliyetli olarak üretilmeleri gereken cihazlardır. Cihazlarda ölçüm verilerinin sürekli olarak tutulması bu cihazların oldukça yüksek boyuta sahip depolama birimlerine sahip olmalarını gerektirecek, bu durum da cihazların maliyetini oldukça arttıracak ve yaygınlaştırılmalarını olumsuz yönde etkileyecektir.
- Her bir ölçüm noktasına ait verinin ayrı ayrı ilgili cihazlar üzerinde tutulmaları, tüm ölçüm noktalarına ait veriler üzerinden genel çıkarımlar yapılmasını imkânsız hale getirmese bile oldukça zorlaştıracaktır.

Veri taşınması konusuyla ilgili olarak öncelikle verinin ölçümünden hemen sonra merkezi veritabanına gönderilmesinin ne kadar kritik olduğu hesaba katılarak kullanılacak ağ altyapısı belirlenmelidir. Örneğin ölçüm verileri elektrik sisteminin kontrolünde de kullanılacaksa olabildiğince erken ve kayıpsız olarak merkeze ulaştırılmalıdır. Ayrıca, seçilecek ağ altyapısının bant genişliği de verinin taşınması sırasında kullanılacak formatı belirleyecektir. Eğer bant genişliği düşükse veriler sıkıştırılmış ve/veya ikili formatta gönderilmelidir.

Literatürde taşınacak verinin formatı konusunda önerilen COMTRADE [15] ve PQDIF [16] gibi bazı standartlar mevcuttur. Verilerin bu standartlara uyan diğer uygulamalar tarafından da işlenebilir olması için bu formatlar kullanılabilir veya ilgili verilerin veritabanında depolandıktan sonra bu formatlarda dışarı aktarılabilmesine olanak sağlanabilir.

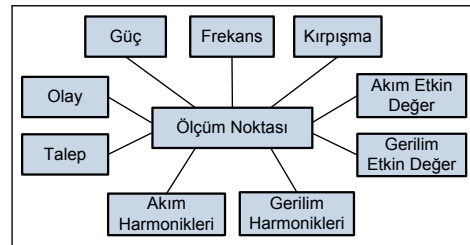
Veri taşınırken dikkat edilmesi gereken bir diğer konu da verinin güvenliğidir. Verilerin taşınması sırasında bunlara

erişilmesi ihtimaline karşılık taşıma işlemi sırasında veri şifrelenmelidir. Bunun için de uygun bir Secure Socket Layer (SSL) kütüphanesi kullanılabilir.

2.2.3. Verilerin Depolanması ve Yönetilmesi

Veri merkezine taşınan güç ve güç kalitesi verilerinin uygun bir kavramsal modelleme sonrasında oluşturulmuş güç kalitesi veritabanında depolanması ve yönetilmesi gereklidir. Bu konuda yapılmış ilk ve önemli çalışmalardan biri [2]'de anlatılmıştır. Güç kalitesi verileri ölçüm noktası bilgisinden dolayı uzaysal (spatial) ölçüm zamanı bilgisinden dolayı da zamansal (temporal) niteliktedir. Veritabanının kavramsal modeli oluşturulurken bu durum ve güç kalitesi parametrelerinin ve olaylarının birbirleri arasındaki ilişkileri dikkate alınmalıdır. Olası veritabanı sorgularının tatmin edici süreler içerisinde karşılanması için gerekli dizin yapılarının da oluşturulabilmesi için bu sorguların tipleri dikkatle incelenmelidir.

Şekil 2'de güç kalitesi verileri için kullanılacak temel bir kavramsal model bir sınıf diyagramı olarak sunulmuştur. [17] çalışmasında önerdiğimiz modelin bir benzeri olan bu modelin merkezinde tüm güç ve güç kalitesi parametre sınıflarının ilişkilendirilmiş olduğu *Ölçüm Noktası* sınıfı yer almaktadır. Modelde bu sınıf dışındaki tüm sınıflar güç kalitesiyle ilgili alana özgü bilgileri modellemek üzere eklenmişlerdir. Ayrıca şekilde gösterilmemiş olsa da tüm verilerin zaman bilgisi ilgili sınıfta modellenmektedir. Sunulan model oldukça genel olarak verilmiştir; modelde şu anda yer almayan alanla ilgili diğer bilgiler için de uygun sınıflar eklenebilir.



Şekil 2: Güç kalitesi verileri için örnek bir kavramsal veritabanı modeli.

İdeal durumda güç ve güç kalitesi verileri kesintisiz olarak insan müdahalesine gerek duymadan sürekli olarak ölçülmeli ve taşınmalıdır. İlgili standartlarla [9, 10, 11, 12] uyumlu olarak güç ve güç kalitesi verileri; 10-çevrimlik (cycle), 3 saniyelik, 10 dakikalık veya 2 saatlik ortalamalar gibi çeşitli çözünürlüklerde hesaplanmış olabilir. Eğer çözünürlüğün yüksek olması talep ediliyorsa, örneğin veriler 10-çevrim bazında ortalamalar şeklinde alınırsa, 50 Hz frekanslı olan ülkemizin elektrik sisteminde bu durumda her bir güç ve güç kalitesi parametresi için saniyede 5 adet ölçüm verisi elde edilmeye olacaktır ve bu durum uzun vadede her bir ölçüm noktası için oldukça yüksek boyutlarda verinin veritabanında saklanmasını gerektirecektir. Sahaya monte edilen ölçüm cihazı sayısı arttıkça saklanacak verinin miktarı daha da artacaktır.

Örnek olarak, Güç Kalitesi Milli Proje'sinde [18] bir ölçüm noktasında güç ve güç kalitesi parametrelerinin her biri için 10 dakikalık ortalamalar şeklinde 3 faz ölçüm yapılmaktadır.

Akım ve gerilim harmoniklerinin ve ara harmoniklerinin 40. bileşenine kadar hesaplandığı bu durumda, bir ölçüm noktası için bir güne ait tüm ilgili veri için yaklaşık 700KB depolama alanı gerekmektedir. Bu şekilde 300 ölçüm noktasına ait bir günlük verinin toplam miktarı 210MB, bir yıllık veri miktarı da yaklaşık 77GB olmaktadır. Eğer ölçümler 10 dakikalık yerine 3 saniyelik ortalamalar olarak hesaplanıp depolanmak istenirse yine 300 nokta için günlük veri miktarı 42GB, yıllık veri miktarı da 15.4TB olacaktır. Dolayısıyla, ölçümlerde kullanılacak çözünürlük hem depolama kapasitesinin belirlenmesini hem de bir önceki bölümde değinilen bant genişliği cihazı ile veri merkezi arasındaki bant genişliğini belirleyecektir. Örnek olarak 300 nokta için 3 saniyelik ortalamaların hesaplanması durumunda, cihazlar için yükleme bant genişliği en az 13Kb/sn, veri merkezi için de indirme bant genişliği en az 4Mb/sn olmalıdır.

Verilerin sorgulanması sırasında, uygun dizin yapılarının eklenmesi durumunda bile bazı sorguların uzun sürelerde karşılanması olasılığına karşılık sık sorgulanan ve sorgulanması muhtemel olan verilerin daha hızlı okuma yapılabilen (hafıza gibi) medyalarda saklanması uygun olacaktır.

2.2.4. Verilerin Sunulması ve Raporlanması

Güç kalitesi veritabanında saklanan güç ve güç kalitesi verilerinin sunumu ve raporlanması ilgili çalışmaların önemli aşamalarından biridir. Verilerin sunulması ve raporlanması için geliştirilen izleme arayüzü uygulamaları karar verici pozisyonundaki yetkililer için oldukça değerli bilgilerin istenen şekillerde gösterimine imkân sağlayarak elektrik sisteminin yönetimine ve kontrolüne katkı verebilecektir.

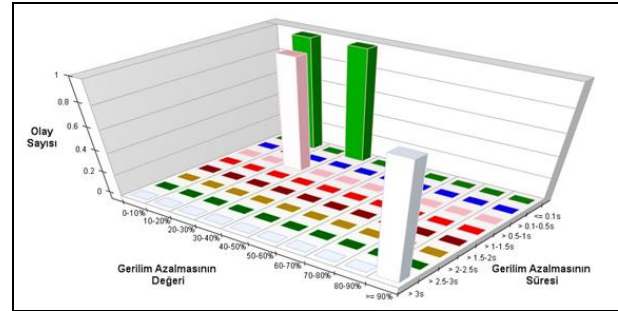


Şekil 3: Güç Kalitesi Milli Projesi - gerçek zamanlı güç kalitesi izleme arayüzü.

Güç ve güç kalitesi verileri, zamansal nitelikte oldukları için ilgili verilerin sunulmasında zaman-dizisi grafikleri sıklıkla kullanılmaktadır. Çoğunlukla, ilgili veriler statik zaman-dizisi grafikleri şeklinde veya anlık değerleri de içeren ve veriler geldikçe güncellenen dinamik zaman-dizisi grafikleriyle gösterilmektedir. Şekil 3'te bu tip bir veri sunumuna örnek olarak Güç Kalitesi Milli Projesi [18] kapsamında geliştirdiğimiz gerçek zamanlı güç kalitesi izleme arayüzünün dinamik izleme amacıyla kullanılan ekranının bir görüntüsü sunulmuştur.

Zaman dizisi grafikleri dışındaki alternatif veri sunumu olasılıkları şunlardır:

- Veriler üzerinde yapılan istatistiksel değerlendirme sonuçlarının çubuk/pasta grafikleri şeklinde gösterilmesi. Örneğin, uygun bir kümeleme (clustering) işleminden sonra oluşan kümeleri sunmada bu gösterim şekli uygun olacaktır.
- Özellikle güç kalitesi olay bilgileri (tepe, çukur, kesinti ve dengesizlik gibi) belirli zamanlarda meydana gelen olağan dışı durumları ifade ettikleri için, bu bilgilerin elektrik sisteminin haritası üzerinde gösterilmesi uygun olacaktır. Yine olay bilgilerinin birbirleriyle yer ve zaman bakımından ilişkileri, ciddiyetleri ve sistem üzerine dağılımları değişik renklendirmelerle harita üzerinde gösterilebilir. Ayrıca ilgili olaylar; türleri, süreleri, gerilim düşüş veya yükseliş miktarı gibi kriterlerin değişik kombinasyonları kullanılarak 3 boyutlu çubuk grafikler olarak sunulabilir. Şekil 4'te [8] çalışmasında anlatılmış olan yine Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında geliştirmiş olduğumuz uzaktan izleme, analiz ve raporlama arayüzünün ürettiği örnek bir olay dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 4: Güç Kalitesi Milli Projesi - uzaktan izleme, analiz ve raporlama arayüzü tarafından üretilen örnek olay dağılım grafiği.

Güç ve güç kalitesi verilerinin sunumu dışında veri üzerinde çeşitli değerlendirmeler (bir sonraki başlık altında detaylandırılacağı gibi) yapıldıktan sonra bunların sonuçlarının grafikler ve diğer gösterimler şeklinde uygun raporlar olarak otomatik bir şekilde elde edilebilmesi özelliği de ilgili güç kalitesi izleme ve analiz sistemlerine faydalı olacak özelliklerden biridir.

2.2.5. Verilerin Değerlendirilmesi

Sürekli ölçülen güç kalitesi verileri ile tespit edilen güç kalitesi olaylarından elektrik sisteminin yönetimi sırasında karar verme süreçlerinde yararlanılması amacıyla bu veriler üzerinde kapsamlı değerlendirmeler yapılmalıdır. Bu bağlamda, uzun süre kaydedilen bu veriler üzerinde yapılacak değerlendirmeler özellikle aşağıdaki problemlerin çözümüne yardımcı olacaktır:

- Güç kalitesi bozulmalarının yoğunlukta olduğu bölgelerin ve bu bozulmaların karakteristiğinin (olay tipleri, harmoniklerde ve kırışmada sınır aşımaları gibi) tespiti. Ölçüm noktalarının ve bölgelerin bu karakteristiklere göre kümelendirilmeleri ve sınıflandırılmaları.

- Karşılaşılan güç kalitesi olaylarının mevcut standartlarda belirlenen ana sınıflar dışında daha detaylı ve anlamlı alt sınıflara ayrılabilmesi. Ayrıca bir ölçüm noktasında tespit edilen bozucu etkiye sahip bir olayın bağlı olduğu hat üzerinde de benzer olaylara yol açabilmesi nedeniyle olayların elektrik sistemi içerisinde yayılma örüntülerinin (pattern) belirlenmesi.

Yukarıdaki sorunları çözüme amacıyla ilgili verilerin değerlendirilmesi sırasında çeşitli veri madenciliği teknikleri ile bulanık mantık ve uzman sistemler kullanılabilir. Örneğin, bölgelerin güç kalitesi karakteristiklerine veya olayların çeşitli özelliklerine göre gruplandırılabilmesi için veri madenciliği ve makine öğrenmesi teknikleri olarak bilinen kümeleme ve sınıflandırma algoritmaları (karar ağaçları, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar, karar destek makineleri gibi) kullanılabilir. Bulanık mantık ile bölgelerin ve olayların küme ve/veya sınıflara aitliği belirlenirken kısmi aitlik durumları bu bölge ve olaylara atanacak 0-1.0 arası değişen bulanık üyelik değerleri ile temsil edilebilir. Uzman sistemler kullanılarak ise yeni ölçüm sonuçlarının bu sistemlerin kuralları yoluyla kümelenmeleri ve sınıflandırılmaları sağlanabilir. İlgilenen okuyucular bu konu üzerinde hazırlanmış inceleme çalışmalarına [19, 20] başvurabilirler. Bu tekniklerin kullanımıyla elde edilecek kapsamlı sonuçlar elektrik sisteminin yönetiminde, sorunların önceden tahmininde ve ilgili karar verme süreçlerinde yardımcı olacaktır.

2.3. İleri Araştırma Konuları

Bu makalede incelenmiş olan güç kalitesi çalışmalarında bilgisayar mühendisliği uygulamaları konusunda aşağıda listelenmiş olan ileri araştırma konuları mevcuttur:

- Bölüm 2.2.3'te belirtildiği gibi güç kalitesi veritabanı/veritabanları çok fazla miktarda veri içerebilmektedir. Bu verilere uygun sürelerde erişilebilmesi için sıkça sorgulanan veriler dikkate alınarak verilerin yerleşimi düzenlenmelidir. Örneğin [8] çalışmasında anlattığımız üzere, geliştirdiğimiz güç kalitesi izleme sisteminde daha yeni verilerin hafızada oluşturulmuş bir veritabanında ayrıca tutulması sağlanmış, böylelikle zamansal olarak daha yeni verilerin sorgu sonuçlarının uygun sürelerde dönmesi amaçlanmıştır. Bu yöntem farklı veri yerleşimi kararları verilerek (işletim sistemlerinin hafıza yönetiminde kullandıkları önbellekleme (caching) mekanizmalarına benzer şekilde) kullanılabilir. Dolayısıyla, bu konuda kullanıcıların ihtiyaçları da dikkate alınarak daha detaylı çalışmalar yapılmalı ve optimal veri yerleşimi sağlanmalıdır. Bunun dışında, veritabanı Şekil 1'de gösterdiğimiz şekilde merkezi olabileceği gibi ilgili güç kalitesi izleme ve analiz sisteminin özelliklerine göre dağıtık da olabilir. Değişik veritabanı mimarilerinin denenip kullanıcı ihtiyaçlarına ve altyapıya en uygun olanının tespit edilip kullanılması yine önemli bir araştırma konusudur.
- Bölüm 2.2.5'te anlatılan veri değerlendirme yöntemleri uygulanırken, eğer bu uygulamalar tek bir izge (thread) üzerinden çalıştırılırsa, ilgili verilerinin miktarının fazla olması nedeniyle değerlendirme işlemleri çok uzun sürelerde tamamlanacaktır. Bu nedenle özellikle veri madenciliği uygulamaları çalıştırılırken paralel olarak

birden fazla makineden oluşan bilgisayar kümeleri (cluster) üzerinde MapReduce [21] gibi dağıtık hesaplamayı destekleyen yazılım altyapılarının kullanılması bu alandaki bir diğer önemli ileri araştırma konusudur. Ayrıca, yine verilerin değerlendirilmesi sırasında çeşitli veri madenciliği/makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılmaları ve başarımlarının kıyaslanarak en uygun yöntemlerin ilgili sistemlerde kullanılması da önemli araştırma konularından biridir.

3. Sonuçlar

Elektriksel güç kalitesi, elektrik mühendisliğinin çok çeşitli ekonomik etkileri olan önemli bir araştırma alanıdır. Bu konuda yapılmış çalışmalar incelendiğinde, özellikle güç kalitesi izleme ve analiz sistemleri ile güç kalitesi verilerinin değerlendirilmesi konuları üzerine olan çalışmaların yoğun bir şekilde bilgisayar mühendisliği konularıyla ilişkili oldukları görülmektedir. Dolayısıyla bilgisayar mühendisliği konuları ve uygulamaları, güç kalitesi çalışmaları için oldukça fazla önem arz etmektedir. Bu makalede, güç kalitesi çalışmalarında bilgisayar mühendisliğinin rolü incelenmiştir. Makalenin ana hatlarını, bu alandaki bilgisayar mühendisliğinin yoğun olarak ihtiyaç duyulduğu, güç ve güç kalitesi ölçümleri, ölçüm verilerinin taşınması, verilerin depolanması ve yönetilmesi, sunulmaları ve son olarak geniş kapsamlı bir şekilde değerlendirilmeleri konuları oluşturmaktadır. Şunu da belirtmek gerekir ki, bu inceleme bilgisayar donanımı yerine daha çok yazılım yönünden konuyu incelemektedir. İncelememiz sırasında alanda uygulama geliştirirken kendi karşılaştığımız sorunlara ve bunların çözüm yollarına da yer verdik. Son olarak da bu incelemenin üzerine ileri araştırma konusu olarak iki önemli noktaya değindik: güç kalitesi verileri için optimal veritabanı mimarilerinin uygulamanın ihtiyaçlarına göre tespit edilmesi ve ilgili verilerin etkili ve verimli bir şekilde değerlendirilebilmeleri için dağıtık hesaplama altyapılarının kullanılması. Yaptığımız inceleme bilgisayar mühendisliğinin güç kalitesi uygulamalarında çok önemli bir rolü olduğunu bir kez daha göstermiştir. Bu doğrultuda, bilgisayar mühendisliği alanındaki akademisyen ve uygulayıcıların güç kalitesi çalışmalarında daha etkin ve daha fazla yer almaları, bu çalışmaların niteliklerinin artmasına ve kapsamlarının genişletilerek karar verici yetkililere daha faydalı olmalarına imkân sağlayacaktır.

4. Kaynaklar

- [1] Bollen, M. H. J. "What is Power Quality?". *Electric Power Systems Research*, 66, 5-14, 2003.
- [2] Dabbs, W. W., Sabin, D. D., Grebe, T. E., Mehta, H., "Probing Power Quality Data". *IEEE Computer Applications in Power*, 7, 8-14, 1994.
- [3] Byman, B., Yarborough, T., Schnorr Von Carolsfeld, R., Van Gorp, J., "Using Distributed Power Quality Monitoring for Better Electrical System Management" *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36, 1481-1485, 2000.
- [4] Leou, R-C., Chang, Y-C., Teng, J-H. "A Web-based Power Quality Monitoring System", *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2001.
- [5] Divan, D., Luckjiff, G., Brumsickle, W., Freeborg, J., Bhadkamkar, A. "I-Grid: Infrastructure for Nationwide

- Real-time Power Monitoring", *IEEE IAS Annual Meeting*, 2002.
- [6] Matz, V., Radil, T., Ramos, P., Serra, A.C. "Automated Power Quality Monitoring System for On-line Detection and Classification of Disturbances," *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2007.
- [7] Chan, S-Y., Teng, J-H., Chen, C-Y., Chang, D., "Multi-functional Power Quality Monitoring and Report-back System", *Electrical Power and Energy Systems*, 32, 728-735, 2010.
- [8] Demirci, T., Kalaycıoğlu, A., Küçük, D., Salor, Ö., Güder, M., Pakhuylu, S., Atalık, T., İnan, T., Çadırcı, I., Akkaya, Y., Bilgen, S. ve Ermiş, M. "Nationwide Real-Time Monitoring System for Electrical Quantities and Power Quality of the Electricity Transmission System". *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5, 540-550, 2011.
- [9] IEC 61000-4-15, Testing and Measurement Techniques - Flickermeter - Functional and Design Specifications, 2002.
- [10] IEC 61000-4-30, Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods, 2003.
- [11] IEC 61000-4-7, Testing and Measurement Techniques - General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, 2003.
- [12] IEEE 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
- [13] Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği. <http://www.epdk.gov.tr/web/elektrik-piyasasi-dairesi/elektrik-iletim-sistemi-arz-guvenilirligi-ve-kalitesi-yonetmeliği>.
- [14] Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği. <http://www.epdk.gov.tr/web/elektrik-piyasasi-dairesi/24>.
- [15] IEEE Std C37.111-1999. IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems, 1999.
- [16] IEEE Std 1159.3-2003. IEEE Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data (PQDIF), 2003.
- [17] Küçük, D., İnan, T., Salor, Ö., Demirci, T., Akkaya, Y., Buhan, S., Boyrazoğlu, B., Ünsar, Ö., Altıntaş, E., Haliloğlu, B., Çadırcı, I. ve Ermiş, M. "An Extensible Database Architecture for Nationwide Power Quality Monitoring". *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 32, 559-570, 2010.
- [18] Güç Kalitesi Milli Projesi. <http://www.guckalitesi.gen.tr>.
- [19] Anis Ibrahim, W.R., Morcos, M.M. "Artificial Intelligence and Advanced Mathematical Tools for Power Quality Applications: A Survey". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17, 668-673, 2002.
- [20] Singh, G. K. "Power System Harmonics Research: A Survey". *European Transactions on Electrical Power*, 19, 151-172, 2009.
- [21] MapReduce - Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/MapReduce>.

Televizyon İzleme Ölçüm Sistemi Tasarımı

Television Rating Measurement System Design

Berna Özbek¹, Tolga Ayav^{2,3}, Mustafa Nevzat Yatır⁴, Barbaros Kirişken⁴

¹İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü
bernaozbek@iyte.edu.tr

²İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Bilgisayar Müh. Bölümü

³Inovel Elektronik, Makina ve Yazılım San. ve Tic. Ltd. Şti.
tolgayav@iyte.edu.tr

⁴Vestel Elektronik San.ve Tic. A.Ş.

mustafa.yatir@vestel.com.tr, barbaros.kirisken@vestel.com.tr

Özet

Televizyon izleme ölçüm sistemleri, bireylerin ölçüm verilerinin kaydedilmesini ve bu bilgilerin raporlanmasını sağlayan yakın gelecek için oldukça ilgi çekici bir üründür. Bu makalede, televizyon izleme ölçümlerinin gerçek zamanlı olarak kaydedilmesi için tasarlanan tümleşik sistem sunulacaktır. Bu tümleşik sistem, televizyon izleme ölçüm ürünü için yeni özellikler içermekte ve bu özellikleri açığa çıkaran ağ ve veri tabanı tasarımını gerçekleştirmektedir.

Anahtar kelimeler: televizyon izleme ölçümü, ağ tasarımı, veri tabanı tasarımı

Abstract

Television rating measurement systems that save and report the measurements preciously are promising products in near future. In this paper, we present an integrated system design to save the rating measurement information in real-time. This integrated system includes both the network and database design to explore new properties for television rating measurement product.

Keywords: television rating measurement, network design, database design.

1. Giriş

Televizyon kanalları, yayıncı şirketler, reklam verenler ve televizyon sektöründeki diğer tüm faktörler için programların izlenme oranları çok büyük önem taşımaktadır. Ulusal kanallarda verilen reklamların saniyelerinin bile maliyeti çok büyüktür. Bu kadar büyük maliyetle yayınlanan reklamların en çok sayıda izleyiciye ulaşması reklam verenler ve televizyon kanalları için çok kritiktir. Aynı zamanda televizyon kanallarının, programlarının ne oranda hangi bölgelerde, hangi izleyici grupları tarafından izlendiği gibi istatistiksel bilgilere hizmet kalitelerini arttırmaları için de ihtiyaçları duyulmaktadır [1]. İlaveten, televizyon kanallarının izleme ölçüm bilgilerine gerçek zamanlı ulaşarak akışlarını ya da reklamlarını bu gerçek zamanlı verilere dayanarak

değiştirmeleri de gelecek nesil televizyon sistemleri için gündemdedir. Günümüzde bu ihtiyaçların tümünü karşılayacak bir ürün gerek teknolojik yeterlilikte gerekse maliyet ve yaygınlık bakımından yoktur. Bu amaç doğrultusunda, tüm izlenme oranı ölçüm cihazlarının yerini alacak televizyonların geliştirilmesi ve bir internet ağ sunucusu ile tümleşik bir çözüm haline getirilmesi öncü bir çözüm olacaktır. Bu makalede tümleşik sistem çözümü için tasarlanan televizyon izleme ölçüm sistemleri sunulacaktır.

Öncelikle televizyon izleme ölçümü anlatılacak ve var olan bazı sistemler tanıtılacaktır. Daha sonra tasarlanan ürünün özellikleri listelenecektir. Son olarak ise, tümleşik çözüm için gerçekleştirilen ağ yapısı ve istatistiksel veriler için önerilen veritabanı sunulacaktır.

2. Televizyon İzleme Ölçümü

İzleyici ölçümünün İngilizce karşılığı Audience Measurement olup, izlenme oranı, izlenme payı ve benzer verilerin sağlanması amacıyla yapılan ölçümlerin tümüdür. İzleyici oranı (reyting) ortalama izlenme oranıdır ve bir program diliminde veya zaman diliminde her dakikaya düşen ortalama izleyici yüzdesini gösterir. İzlenme payı, bir kanalın belli bir zaman diliminde toplam izleyiciden almış olduğu payı gösterir.

Türkiye'de reyting ölçümü, Avrupa'da bir çok ülkede bu türden veriler üreten AGB Nielsen tarafından 1989 yılından bu yana gerçekleştirilmektedir. İzlenme oranlarının ölçümleri insan-metre (peoplemeter) teknolojisiyle yapılmaktadır. İzleme ölçümleri, 21 il merkezinde ve bu il merkezlerinin 20,000 nüfus üstü kent-ilçelerinde 3,636 adet insan-metre cihazı ile yapılmaktadır. Söz konusu hane sayısının bu bölgelerdeki 5 yaş üzeri 49,800,377 kişiyi temsil ettiği belirtilmektedir.

AGB Nielsen medya izleme ölçümünü insan-metre teknolojisi kullanarak yapan bir şirkettir [2]. Bu sistemde izleyici sayacı üç elektronik birimden oluşur. Frekans dedektörü televizyonun içine takılır ve hangi frekanstaki

kanalın izlendiğini belirlemeye sağlar. Frekans dedektörüne bağlı olan kayıt cihazı, bir uzaktan kumanda ile çalıştırılır. Kayıt cihazı, frekans dedektörü ile kumanda cihazından gelen bilgileri depolar. Bir ev halkının her bir üyesine kumanda üzerinde bir düğme ayrılmıştır, o kişi televizyon seyretmeye başlayınca kendi düğmesine basar. Eğer televizyon açıksa ve yeni izleyici kendini tanıtmazsa, bir ışık yanıp sönerek hatırlatma yapar. Uzaktan kumandada bulunan yedek düğmeler sayesinde misafirler de yaş, cinsiyet ve izleme statülerini girebilirler. Kayıtlar dakika dakika tutulur. Ölçümler karadan, kablolu ve dijital uydu yayınlarından toplanan veriler ile elde edilebilir. Kayıt cihazı gece saatlerinde bir gün boyunca depolamış olduğu bilgiyi telefon yoluyla araştırma merkezine iletir.

Arbitron taşınabilir insan-metre teknolojisi günümüzde geliştirilen sistemlere örnek teşkil eder [3]. Örneğin portatif insan-metre, yayınların ses kanalına eklenmiş şifreli bir sinyal aracılığıyla hangi kanalın izlenmekte olduğunu belirlemektedir. Bu cihaz kemere takılan küçük bir cihaz olduğu için gün boyunca kişinin izlediği tüm radyo veya televizyon programlarını kaydedebilmektedir.

Mediametrie teknolojisi ile analog, kablolu, dijital uydu ve ADSL TV kullanıcılarına ait izleyici ölçümlerini gerçekleştirilmektedir [4][5]. Bu sistem bireylerin izleme davranışları (örneğin sürekli kanal değiştirip değiştirmedikleri, reklamların izlenme oranı, izleyicilerin sosyo-kültürel yapıları, izleyicilerin seçici olup olmadıkları gibi bilgiler) hakkında raporlar da vermektedir.

Reyting ölçüm ürünlerinin yanısıra literatürde izleyici ölçüm sistemleri ile ilgili çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. [6]'de çeşitli televizyon ve radyo yayınları için (örneğin IP-TV, DVB-H, kablosuz telefon, internet gibi) izleyici ölçümleri platformları incelenmiştir. [7]'de mobil cihaz kullanıcılarında kullanıcı kullanım davranışları modellenmiştir. [8]'de ise görüntü işleme teknikleri ile izlenen televizyon kanalının logosunu sezinleyerek izleyici ölçüm sonuçları irdelenmiştir.

Biz bu makalede, gerçek zamanlı ve geniş bir örnekleme veri toplanmasını sağlayan, ölçüm verileri çevrim içi olarak internet üzerinden uzaktaki bir sunucuya gönderilmesini hızlı bir şekilde gerçekleştiren tümleşik bir TV reyting ölçüm sistemi sunacağız.

3. Tasarlanan Reyting TV Özellikleri

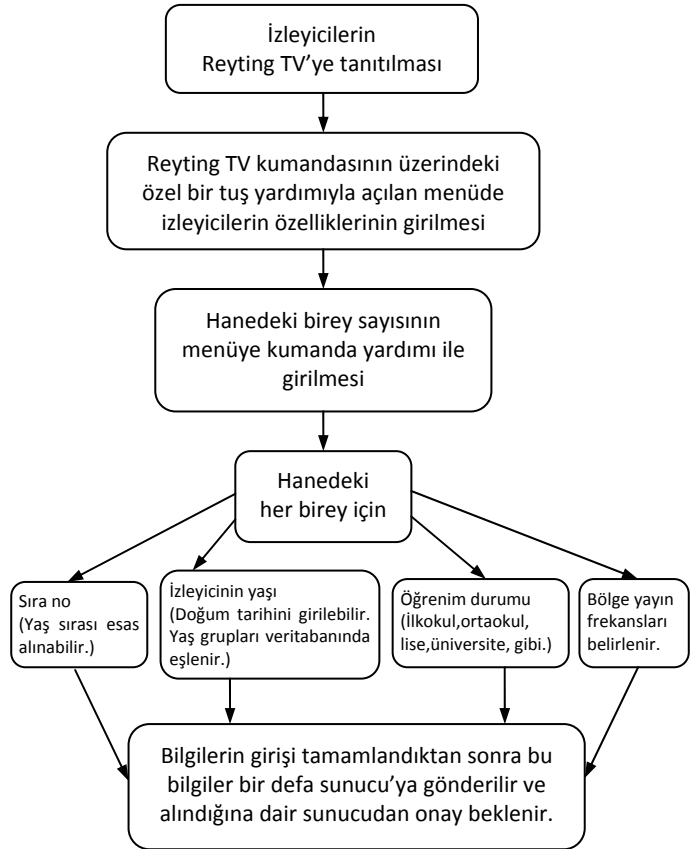
Tasarlanan Reyting TV, izleyicilerin hangi kanalları ne sürelerde izledikleri bilgisini çevrim içi olarak, izleyicinin herhangi bir çaba sarf etmesine gerek kalmadan, internet üzerinden bir sunucuya aktarılmasını sağlar. İlaveten, aktarılan bu verilerin veri tabanında toplanması ve bu veri tabanındaki verilerin yine gerçek zamanlı olarak işlenerek, o anda yayınlanan programların izlenme oranlarının hangi tip izleyiciler tarafından izlendiği gibi istatistiksel bilgilerin internet üzerinden görüntülenmesini sağlayacaktır [9][10].

3.1. Ürünün çalışma prosedürü

Reyting TV'nin izleyici ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için yapılacak kurulum prosedürü Şekil 1'deki şemada gösterilmiştir.

Reyting TV'nin ilk kurulum prosedürlerinin tamamlanmasından sonra izleyiciler TV kumandasında her bireye ait özel tuşa basarak ya da doğrudan birey sıra numarası kumanda ile belirlerler. Böylece o anda TV programını izleyen birey ile ilgili bilgilerin kaydedilmesine başlanmış olur.

İlaveten, sıra numarası girilmeyen bireylerin Reyting TV tarafından TV ekranında hatırlatılması sağlanacaktır. Belirlenecek bir süre zarfında (1-2 hafta gibi) veri alınmayan Reyting TV'ye sunucudan mesaj gönderilmesi ve izleyicinin televizyon ekranında gösterilecek bir mesaj ile uyarılması da tasarlanan ürünün özellikleri arasındadır.



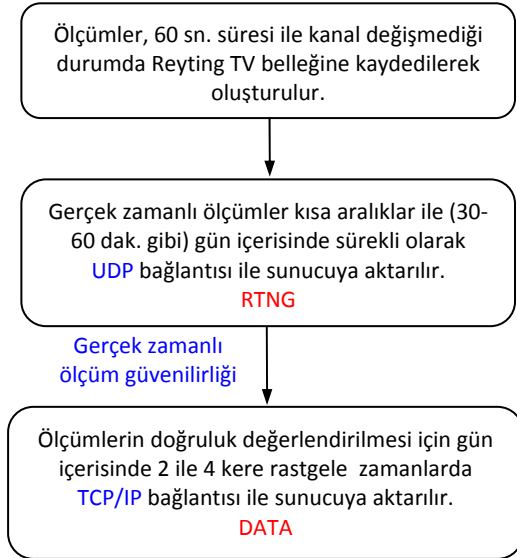
Şekil 1. Reyting TV ürün ilk kurulum prosedürü

3.2. Sunucuya veri aktarım prosedürleri

Kanal izleme süresi belli bir süreyi (örneğin 60 saniye gibi) aşar ise, Reyting TV aşağıdaki bilgileri içeren bir veri paketi oluşturur:

- Reyting TV tanımlayıcı numarası
- İzleyici birey numarası
- Kanal izleme başlangıç tarih ve saati
 - İzleme süresi sunucuda kanal değişimine göre oluşturulur.
 - Reyting TV açıldığında sunucudan saat bilgisini alınır ve bu bilgi gerçek zamanlı olarak televizyon belleğinde saklanır.
- Yayınlar: Karasal analog ve karasal digital yayınların izleme süreleri ölçülecektir.
 - Digital yayınlar için doğrudan “kanal adı” gönderilecektir.
 - Analog yayınlar için frekans bilgisi gönderilecektir. Sunucudaki bölge/frekans tablosundan bu frekans değerine (+-%5) göre kanal adı atanacaktır.

Sunucuya veri aktarılması aşamasında Reyting TV tarafından gerçekleştirilen işlemler Şekil 2’deki şemada gösterilmiştir.



Şekil 2. Reyting TV veri aktarım prosedürü

Gün içerisinde sürekli olarak belli aralıklar ile (izleme verisi büyüklüğüne ya da 30 ile 60 dakika arasında bir süre içerisinde) sunucu ile UDP iletişimi kurularak sunucuya gönderilir.

Her Reyting TV rastgele seçilen günün belli bir saatinde bir gün boyunca kaydettiği tüm veriyi TCP/IP bağlantısı

yaparak sunucuya gönderir. Tüm verinin güvenilir bir şekilde aktarılıp aktarılmadığı ise onay mesajı ile teyit edilir. Bu TCP/IP verisi daha önce sürekli UDP bağlantısı ile aktarılan veri ile karşılaştırılarak gerçek zamanlı ölçümlerin güvenilirliği tespit edilir.

Ayrıca elektrik kesintilerini algılayabilmek için her 30-60 dakika arasında bir sürede veri gönderilir.

Bu özellikler çerçevesinde oluşturulacak TCP-UDP/IP paketlerinin içeriği aşağıdaki tabloda listelenmiştir.

Tablo 1. TCP-UDP/IP Paketleri

No	Paket Adı/Tipi	Protokol	Paket içeriği											
1	ICLK	TCP/IP	<table border="1"> <tr><td>TCP/IP header</td></tr> <tr><td><ICLK></td></tr> <tr><td>TV Model No</td></tr> <tr><td>TV Seri No</td></tr> </table>	TCP/IP header	<ICLK>	TV Model No	TV Seri No							
TCP/IP header														
<ICLK>														
TV Model No														
TV Seri No														
2	ACK	TCP/IP	<table border="1"> <tr><td>TCP/IP header</td></tr> <tr><td><ACK></td></tr> <tr><td>TV Model No</td></tr> <tr><td>TV Seri No</td></tr> <tr><td>Tarih ve Saat</td></tr> </table>	TCP/IP header	<ACK>	TV Model No	TV Seri No	Tarih ve Saat						
TCP/IP header														
<ACK>														
TV Model No														
TV Seri No														
Tarih ve Saat														
3	RTNG	UDP/IP	<table border="1"> <tr><td>UDP/IP header</td></tr> <tr><td><RTNG></td></tr> <tr><td>TV Model No</td></tr> <tr><td>TV Seri No</td></tr> <tr><td>İzleyici No</td></tr> <tr><td>Tarih ve Saat</td></tr> <tr><td>Yayın Tipi</td></tr> <tr><td>Kanal Adı</td></tr> <tr><td>Frekans</td></tr> <tr><td>Bölge</td></tr> </table>	UDP/IP header	<RTNG>	TV Model No	TV Seri No	İzleyici No	Tarih ve Saat	Yayın Tipi	Kanal Adı	Frekans	Bölge	
UDP/IP header														
<RTNG>														
TV Model No														
TV Seri No														
İzleyici No														
Tarih ve Saat														
Yayın Tipi														
Kanal Adı														
Frekans														
Bölge														
4	DATA	TCP/IP	<table border="1"> <tr><td>UDP/IP header</td></tr> <tr><td><DATA></td></tr> <tr><td>TV Model No</td></tr> <tr><td>TV Seri No</td></tr> <tr><td>İzleyici No</td></tr> <tr><td>Tarih ve Saat</td></tr> <tr><td>Yayın Tipi</td></tr> <tr><td>Kanal Adı</td></tr> <tr><td>Frekans</td></tr> <tr><td>Bölge</td></tr> <tr><td>...</td></tr> </table>	UDP/IP header	<DATA>	TV Model No	TV Seri No	İzleyici No	Tarih ve Saat	Yayın Tipi	Kanal Adı	Frekans	Bölge	...
UDP/IP header														
<DATA>														
TV Model No														
TV Seri No														
İzleyici No														
Tarih ve Saat														
Yayın Tipi														
Kanal Adı														
Frekans														
Bölge														
...														
5	SHUT	TCP/IP, UDP/IP	<table border="1"> <tr><td>UDP/IP header</td></tr> <tr><td><SHUT></td></tr> <tr><td>TV Model No</td></tr> <tr><td>TV Seri No</td></tr> <tr><td>Tarih ve Saat</td></tr> </table>	UDP/IP header	<SHUT>	TV Model No	TV Seri No	Tarih ve Saat						
UDP/IP header														
<SHUT>														
TV Model No														
TV Seri No														
Tarih ve Saat														

Herbir paketin işlevi aşağıda açıklanmıştır:

Paket No 1: Reyting TV tarafından açılışa bir kere olmak üzere düzenli aralıklarla gönderilir. Amacı hem internet bağlantısı olup olmadığını kontrol etmek, hem de sunucudan gerçek zaman bilgisini almaktır.

Paket No 2: ICHK ve SHUT paketlerine sunucu ACK paketi ile karşılık verir. Bu pakette sunucu gerçek zaman bilgisini verir.

Paket No 3: Kısa aralıklar ile TV tarafından sunucuya gönderilen, "reyting" bilgisini ölçmede kullanılacak bilgiyi içeren paketlerdir.

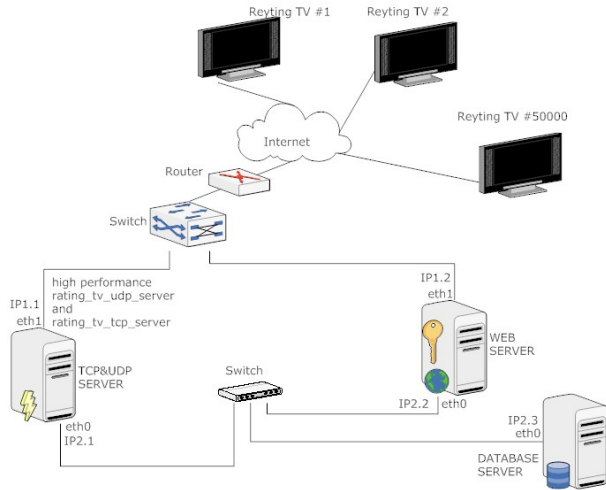
Paket No 4: TV tarafından rastgele zamanlarda veya bellek dolduğunda sunucuya gönderilen, "reyting" bilgisini ölçmede kullanılacak bilgiyi içeren paketlerdir.

Paket No 5: TV'nin kapatılmadan önce sunucuya gönderdiği son pakettir.

4. Önerilen Reyting TV Ağ Yapısı

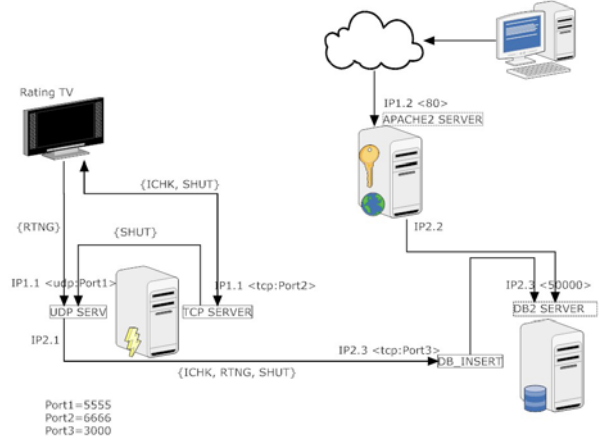
Reyting TV için tasarlanan ağ yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1'de listelenen TCP-UDP/IP paketlerinin Şekil 3'te gösterilen ağ yapısı ile bağlantı şeması Şekil 4'te ve etkileşim modeli Şekil 5'te gösterilmiştir.

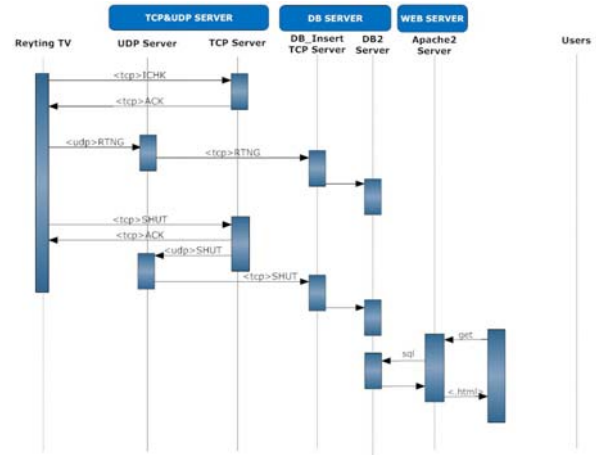


Şekil 3. Reyting TV Ağ yapısı

TCP&UDP Connections



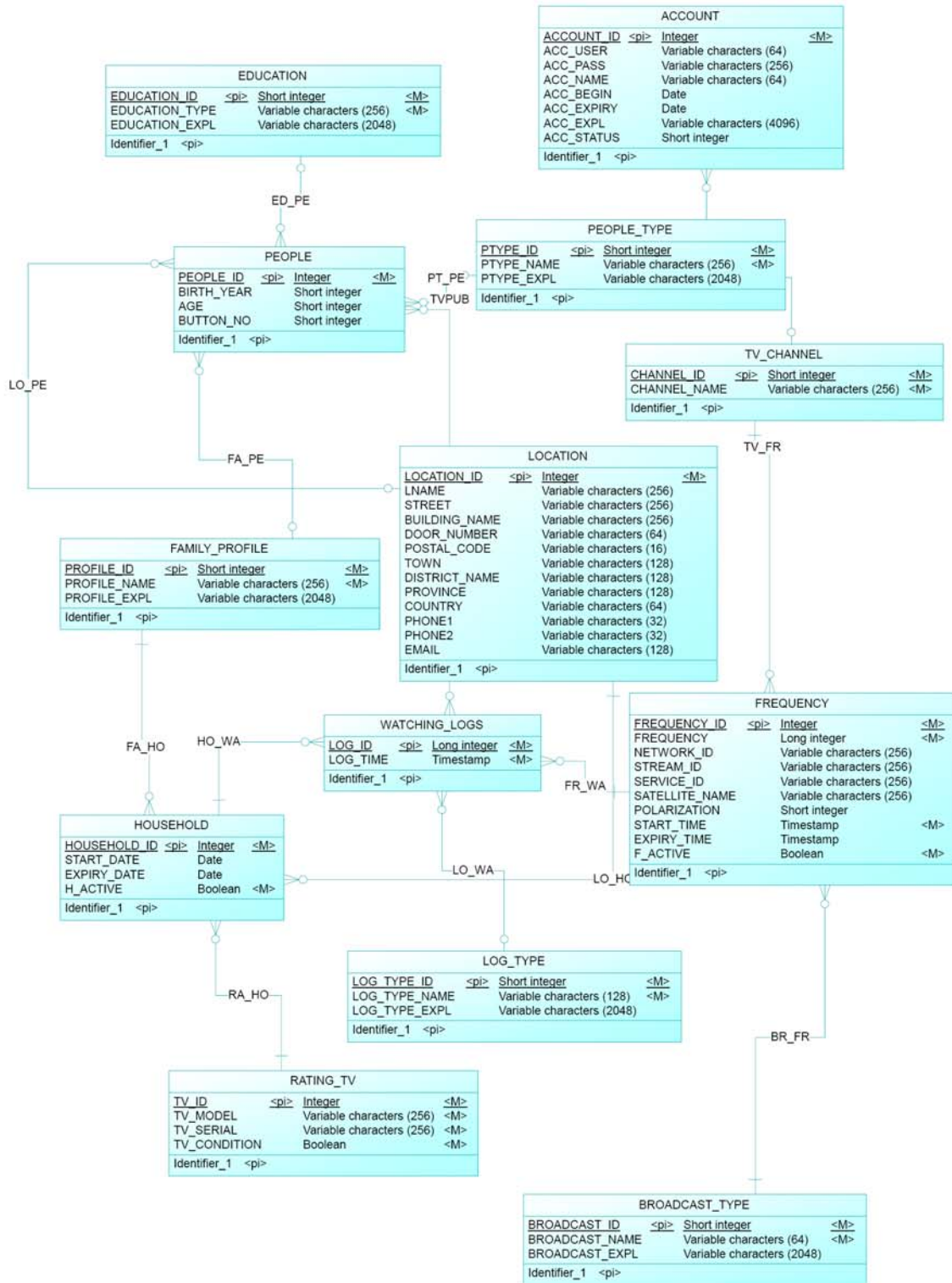
Şekil 4. Reyting TV sistemi için TCP&UDP bağlantı şeması



Şekil 5. Reyting TV sistemi etkileşim modeli

5. Veritabanı Tasarımı

Veritabanı sunucusu televizyonlardan anlık gelen verileri tutmanın yanısıra, kullanıcı hesapları, web arayüzü vb. tüm veriyi de içerecek şekilde tasarlanmıştır. Veritabanı tasarımına ilişkin Varlık İlişki Diyagramı (ERD) Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Veritabanı ERD diyagramı

6. Sonuçlar

İzlenme oranlarının geniş bir örneklem kümesi üzerinden gerçek zamanlı olarak uzaktaki sunucuda toplanması ve bu sunucudan gerekli yazılımlar ile verilerin derlenerek izlenme oranlarının gerçek zamanlı olarak sunulabilmesi Reyting TV ürününün başarı kriteridir. Tasarlanan Reyting TV sisteminin ürün özelliklerinin genişletilmesi ve daha esnek bir yapıya sahip olması için 3. nesil mobil haberleşme altyapısını kullanarak ölçüm verilerini sunucuya aktarma kapasitesinin eklenmesi sağlanabilir.

7. Teşekkür

Bu çalışma Tübitak 1501 Sanayi Ar-Ge Projeleri destekleme programı ve Vestel Elektronik San. ve Tic. A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

8. Kaynaklar

- [1] Thomas, W. L., Television audience research technology, today's systems and tomorrow's challenges, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol: 38, issue: 3, Aug. 1992.
- [2] <http://www.agbnielsen.net/products/peoplemeter.asp>
- [3] http://www.arbitron.com/portable_people_meters

- [4] <http://www.mediametrie.com/>
- [5] Pellegrini, P.A., "Listen without Prejudice", Vue, June, 2005.
- [6] Alvarez, F.; Martin, C.A.; Alliez, D.; Roc, P.T.; Steckel, P.; Menendez, J.M.; Cisneros, G.; Jones, S.T., "Audience Measurement Modeling for Convergent Broadcasting and IPTV Networks", IEEE Transactions on Broadcasting, vol.: 55, no.2, sayfa:502 – 515, June 2009.
- [7] Verkasalo, H., "Mobile Audience Measurements in User Experience Research", 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), sayfa: 1 – 6, 18-21 April 2010, Sydney, NSW.
- [8] Mukherjee, D. Chattopadhyay, T. Bhattacharya, S. Ghose, A. Misra, P., "An architecture for real time television audience measurement", 2011 IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI), sayfa: 611 – 616, 20-23 March 2011, Kuala Lumpur.
- [9] Datia, N., Moura-Pires, J., Cardoso, M. ve Pita, H., "Temporal Patterns of TV watching for Portuguese Viewers", Portuguese Conference on Artificial Intelligence, 251-258, 2005.
- [10] Shrimpton, D.H., Dobbyn, C. ve Casey, T., "Towards the convergence of interactive television and WWW", IEE Colloquium on Multimedia Services and Digital Television by Satellite (Ref. No. 1999/111), 6/1 -6/6, 1999.

Türkçe Metinden Konuşma Sentezlemede Doğallığın Artırılması İçin Öneriler

Recommendations for Increasing the Naturalness in Turkish Text-to-Speech Synthesis

İ. Baran Uslu¹, H. Gökhan İlk², A. Egemen Yılmaz²

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Başkent Üniversitesi
ibuslu@baskent.edu.tr

² Elektronik Mühendisliği Bölümü
Ankara Üniversitesi
h.gokhan.ilk@eng.ankara.edu.tr, aeyilmaz@eng.ankara.edu.tr

Özet

Metinden konuşma sentezleme; yazılı bir metnin geliştirilen sistem tarafından otomatik olarak okunmasıdır. Bu çalışmada, difon tabanlı, eklemeli bir konuşma sentezleyici tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Birleştirmede PSOLA yöntemi kullanılmaktadır. Genellikle konuşma sentezleyicilerin ezgi modeli yoktur veya eksiktir. Bu durum sentezlenen konuşmanın doğallığını olumsuz yönde etkiler. Çalışmamızda bu eksikliğin giderilmesi için yeni bir model önerilmiştir. Sentezlenen konuşmanın doğallığının artırılması için, konuşmanın ezgisi üzerinde süre ve vurgu temelli kurallar tanımlanmıştır. Bu kurallar, hazırlanan ara yüzde yapılan pek çok denemenin sonucunda bulunmuştur. Uygulanan kuralların sentezlerin doğallığındaki başarısı öznel dinleme testleriyle ölçülmüştür. Sonuç olarak, tanımlanan kuralların geliştirilen konuşma sentezleyicide uygulanması ile CMOS testi sonucunda 1,86/5,00 puanlık bir artış elde edilmiştir. Bu sonuç, ezgi modelimizin başarılı olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Metinden konuşma sentezleme, difon, PSOLA, ezgi modeli, doğallık, CMOS

Abstract

Text to speech synthesis (TTS) is the automatic reading of a text by a system. In this work, a TTS system which concatenates diphones has been designed and implemented. For concatenations, PSOLA method was used. Usually speech synthesizers lack an intonation model. This degrades the naturalness of the synthesized speech. For increasing the naturalness of the synthesized speech, duration and accent based rules were defined in this study for a proper intonation. These rules were determined after an extensive set of experiments performed in the designed testbed. In the end,

an improvement of 1.86/5.00 in the CMOS score was obtained by applying the defined rules in the developed synthesis platform. This result shows the success of our intonation model.

Keywords: Text to speech synthesis (TTS), diphone, PSOLA, intonation model, naturalness, CMOS

1. Giriş

Metinden konuşma sentezleme (MKS); pek çok dil için ortak ve önemli bir araştırma konusudur. Görme ve konuşma engelli insanlar için iletişim imkânı sağlaması [1], sesli yanıt, uyarı ve okuma sistemleri [2-4], dil ediniminde ve yabancı dil öğretiminde kolaylıklar sağlaması [5], MKS'nin uygulama alanlarından bazılarıdır. Bu alandaki temel kaynaklar [6-9]'da verilmiştir.

Bu konuda yapılan araştırmaların hedefi; insan sesi doğallığında konuşma sentezidir. Sentezlenen konuşmanın kalitesi ve doğallığı arttıkça, MKS sistemleri gündelik hayata daha çok girecektir. 1993'ten bugüne kadar Türkçe MKS sistemleri üzerinde pek çok lisansüstü çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda sinyal işleme yönteminin ve kullanılan ses parçalarının senteze olan katkısının yanı sıra, frekans değişiminin ve sürenin modellenmesi de incelenmiştir [10]. Bu makalede Türkçe metinden konuşma sentezlemede ezgi modelleri üzerinde durulmuş, önerdiğimiz yeni ezgi modeli anlatılmıştır.

Doğal bir konuşmanın sentezlenmesinin önündeki engeller arasında büyük bir konuşma parçası veritabanının (farklı uzunluk ve temel frekanslı) oluşturulması, konuşma parçalarının sürelerinin modellenmesi ve uygun ezgi kurallarının tanımlanması sayılabilir.

Türkçede vurgu ve ezgi yapıları, bazı sinyal işleme ve bilgisayar bilimleri araştırmacıları tarafından daha önce incelenmiştir [11-13]. Şaylı [11], Türkçe MKS sistemlerinde süre modelleri üzerinde çalışmış, fonem ve trifon tabanlı incelemelerin sonucu olarak ortalama süreleri rapor etmiştir. Şaylı'nın çalışmasındaki önemli sonuçlardan birisi de; cümle içinde kullanıldıklarında fonem ve trifon ortalama sürelerinin belirli oranlarda düşmesidir. Bunun sebebi, daha uzun bir konuşmanın tek nefeste söylenebilmesi için, tüm birimlerin belirli oranlarda sıkıştırılmasıdır. Öztürk [12], fonemler için süre ve F_0 : temel frekans eğrilerinin modellenmesini ele almıştır. İstatistiksel olarak metinsel özellikler (fonem türü, hece sayısı, hecenin konumu, hecenin vurgu alıp almaması vb.) incelenmiş ve regresyon analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, ortalama süre için en etkili parametreler: fonemin türü, ön ve arkadaki fonemlerin türleri ve fonemin hece içindeki yeri olarak rapor edilmiştir. Temel frekans eğrileri ise hece frekansları baz alınarak incelenmiştir. Öztürk, çalışmasının sonunda bu modellerin duyuşsal olarak değerlendirilmesini önermektedir. F_0 üzerinde yapılan bir diğer çalışmada, Oskay vd. [13], cümle bazında temel frekans eğrilerinin genelleştirilmesi üzerinde durmuşlardır. F_0 eğrileri, olumlu, olumsuz ve soru cümleleri için doğrusal ve ikinci derece fonksiyonlar ile modellenmeye çalışılmıştır. Külekçi ve Oflazer [14], metin içerisindeki söz gruplarını belirlemeye çalışmışlar, bunlara 3 kademeli (0: yok, 1: az ve 2: fazla) ezgi seviyesi atamışlardır. %85 başarıyla söz gruplarını ayırmayı ve doğru vurgu seviyesini belirlemeyi başarmışlardır da nesnel değerlendirmenin bir Türkçe MKS sistemiyle birleştirilmesi sonucunda elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Uslu ve İlk [15]'de, Fujisaki ezgi modelini, birkaç Türkçe cümleye ilk defa uygulamışlardır. Bu yöntemde cümlenin perde frekansı değişimi bir toplamsal modelle ele alınmakta, tamlama (phrase) ve vurgu (accent) olmak üzere iki bileşene ayrılmaktadır. Modelin matematiksel ifadesi Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \ln(F_0) &= \ln(F_{\min}) + P + A \\ P &= \sum_{k=1}^{N_p} A_{p,k} \cdot g_p(t - T_{p,k}) \\ A &= \sum_{k=1}^{N_a} A_{a,k} [g_a(t - T_{a1,k}) - g_a(t - T_{a2,k})] \end{aligned} \quad (1)$$

Burada $g_p(t) = \alpha^2 t \cdot e^{-(\alpha t)} u(t)$ tamlama dürtü tepkisi, $g_a(t) = \min(1 - (1 + \beta t)e^{(-\beta t)}, \gamma)$ aksan basamak tepkisidir.

$A_{p,k}$, $A_{a,k}$, $T_{p,k}$, $T_{a1,k}$, $T_{a2,k}$, α , β , γ ; model parametreleri ve F_{\min} ; taban frekansdır.

Model, beklendiği gibi konuşmanın doğallığını arttırmış, PESQ testi sonucunda 0,15/4,00 puanlık bir iyileşme elde edilmiştir. PESQ: Perceptual Evaluation of Speech Quality, telefon hatlarının kalitesini ölçmek için önerilmiş bir yöntem olup öznel dinleme testlerindeki dinleyici bulma ve dinletme zahmetlerinden kurtulmak için tercih edilen bir nesnel değerlendirme testidir (ITU-T P.862). İki konuşma parçasının birbirine olan yakınlığını, bunları hizalayıp aralarındaki özillintiden bulmaya çalışır.

Dilbilimciler bir sözcükteki vurgunun yerini tespit etmek için seslemleri (heceleri) sırayla baskın bir şekilde okurlar. Hangi

okuyuş kulağı tırmalamıyorsa vurgunun o şekilde doğru olduğuna karar verirler. Türkçede fiil çekimleri, istisnalar haricinde, kurallara bağlıdır [16]. Aydemir ve Yılmaz [16], çalışmalarında fiillerin otomatik çekimlenmesi ve vurgularının belirlenmesi üzerinde durmuşlar, Türkçedeki yaklaşık 4600 adet fiilden 1100 adedi için 5400 farklı çekimin yapıldığını ve vurgu pozisyonlarının doğru bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlar bizim de çalışmamızın temelini oluşturmaktadır. Uslu vd. [17], tasarladıkları MKS ara yüzünde fiil çekimleri için akustik özellikler (süre, perde frekansı ve enerji) ile ilgili ezgi kuralları önermişlerdir. Pek çok fiil çekimi için yapılan denemeler, web üzerinden dinleme testleri ile değerlendirilmiş ve en çok beğenilen yöntem sonuç olarak önerilmiştir.

Bu çalışmaların yanı sıra, duygusal sentez konusunda yapılan çalışmalar bulunmaktadır [18, 19]. Bu alanda, Bulut vd. [18] yaptıkları çalışmada; sesbirim düzeyinde süre, perde frekansı, enerji ve izge değişikliklerinin duygusal senteze olan etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak sesbirim düzeyinde duygu dönüştürmede, izgesel zarf değişikliklerinin yerel prozodi değişikliklerine göre daha etkili, yerel prozodi değişikliklerinde ise; süre değişiminin perde frekansı değişiminden daha başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Burkhardt vd. [19], farklı dillerde (Türkçe, Yunanca, Almanca ve Fransızca) duygusal sentezler yapıp birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Temel frekans, süre ve "jitter" parametreleriyle senteze duygu katmaya çalışmışlar; sonuçta, hem o dile özgü, hem de tüm dillerde ortak noktalar bulunduğunu belirlemişlerdir.

Bu çalışmada geliştirilen ezgi modelinde; seçilen cümlelerde sözcüklere, difon sayısına göre süre değiştirme işlemi uygulanmaktadır. Daha sonra, vurgulu hece dikkate alınarak, cümlenin fiiline ezgi verilmeye çalışılmakta ve ayrıca cümle içinde yer alan öbek vurguları için ezgi kuralları araştırılmaktadır. Tüm bu işlemler temel frekans, süre ve enerji parametrelerinin sistematik bir şekilde değiştirilmesi temeline dayanmaktadır. Farklı cümle yapıları ve öbek vurguları için adı geçen akustik parametrelerin optimum değerlerine duyuşsal değerlendirme testleri sonucunda ulaşılmaya çalışılmıştır.

Bu Giriş bölümünün ardından, çalışmanın 2. Bölümünde izlenen yöntem ve önerilen ezgi modeli ayrıntılı olarak anlatılmıştır. 3. Bölümde elde edilen bulgular verilmekte, 4. Bölümde ise sonuçlar tartışılmaktadır.

2. Önerilen Ezgi Modeli

2.1. Yöntem

Konuşma sentezlemede en çok kullanılan tekniklerden biri eklemeli sentezlemedir [6]. Önceden kaydedilen konuşma parçaları bu yöntemde, uygun süre, perde frekansı ve enerji düzenlemelerinin ardından uç uca eklenir. Çalışmamızda konuşma parçası olarak ikili sesbirim de diyebileceğimiz difonlar kullanılmaktadır. Difon; bir fonemin ortasından takip eden fonemin ortasına kadar olan ses parçası [6] olduğu için, ortalama difon süreleri, fonem sürelerinin ortalaması ile hesaplanmakta [11] ve bunlar yaygın olarak kullanılan

PSOLA (Pitch Synchronous OverLap and Add) yöntemiyle [20] birleştirilmektedir. Bu yöntemde perde işaretleri adı verilen yerler referans alınarak ses parçaları birleştirilir.

Türkçe'de yer alan 29 harf ve 44 fonem [21] Tablo 1'de verilmiştir. Sentezin doğru ve doğal olması için ilk şart, difonların doğru belirlenmesidir. Şekil 1'de, "b a1" ile "a1k2" difonlarının perde işaretleri, Şekil 2'de ise bu difonların PSOLA yöntemiyle 6 perde örtüştürülerek birleştirilmesi gösterilmiştir.

Tablo 1: Türkçedeki harf ve fonem(ses birim)ler

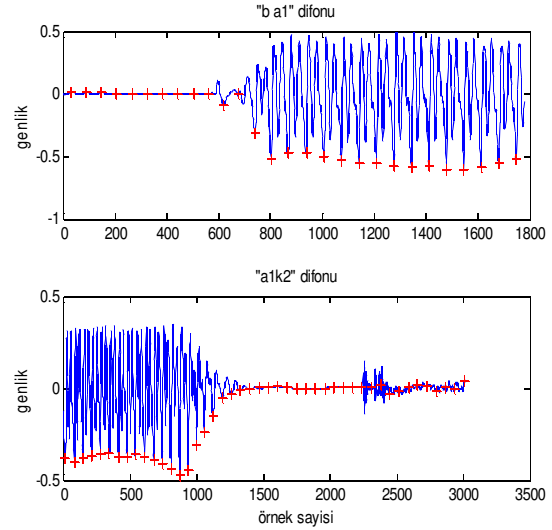
Harf	IPA*	Fonem	Örnek
a	ɑ	a1	a1nı
	a	a2	la2f
e	ɛ	e1	me1ç
	e	e2	de2vam
ı	İ	ı	ıslak
i	i	i1	i1çecek
	ı	i2	i2tibar
o	ɔ	o1	so1ru
	o	o2	o2ymak
ö	œ	ö1	ö1rtü
	ø	ö2	ö2ğren
u	ʊ	u1	ku1llak
	u	u2	u2ğrak
ü	y	ü1	ü1mit
	y	ü2	dü2ğme
b	b	b	bal
c	ç	c	cam
ç	tʃ	ç	seçim
d	d	d	demet
f	f	f	fasıl
g	ɟ	g1	g1ümüşt
	g	g2	karg2a
h	h	h	hava
j	ʒ	j	jeodezi
k	c	k1	k1edi
	k	k2	ak2ıl
l	l	l1	l1eman
	ł	l2	kul2
m	m	m	makarna
n	n	n1	an1ı
	ɲ	n2	sün2gü
p	p	p	pırasa
r	r	r1	r1af
	ʀ	r2	kar2şısı
	ʁ	r3	dar3
s	s	s	sert
ş	ʃ	ş	aşı
t	t	t	tebeşir
v	v	v1	v1ar
	ʋ	v2	tav2uk
y	j	y1	y1atak
	ɣ	y2	duy2
z	z	z1	yaz1lık
	ʒ	z2	kaz2

* IPA: International Phonetic Alphabet

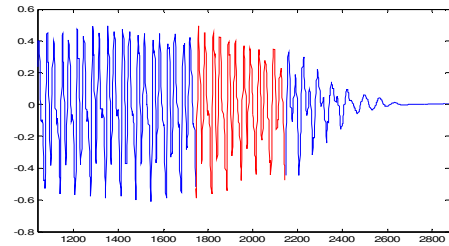
Burada yapılan işlem; birinci difonun sonundan 6 perde, ikinci difonun başından 6 perde almak, bu konuşma parçalarını Hanning penceresinin azalan (birinci difon) ve artan (ikinci difon) bölümleri ile çarpmak, örtüştürmek ve toplamaktır. Hanning pencere Eşitlik (2) ile verilmiştir (N ; pencerenin boyudur).

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (2)$$

Şekil 3'te bu işlem boyunca kullanılan örnek dalga şekilleri görülebilir.



Şekil 1: "b a1" ve "a1k2" difonlarının perde işaretleri



Şekil 2: "b a1" ve "a1k2" difonlarının PSOLA yöntemiyle birleştirilmesi

Eğer birleştirilen ses parçalarının enerjileri arasında seviye farkı varsa, bu da kalitenin düşmesine sebep olacaktır. İzgesel zarf uyumsuzluğu bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Ancak temel frekans ve enerji uyumsuzlukları çalışma kapsamında giderilmektedir.

Difonların temel frekansı; perde işaretleri arasındaki farkın (perde periyotlarının) ortalamasının tersi alınarak

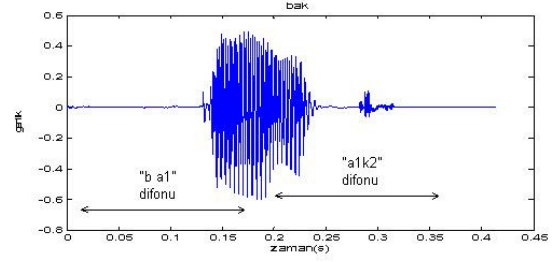
hesaplanmakta ve komşu difonların temel frekansları arada bir değerde eşitlenmeye çalışılmaktadır. Enerji uyumsuzluğu ise komşu difonların enerji oranları kullanılarak giderilmektedir. Eşitlik (3) ve (4)'te bu işlem anlatılmaktadır.

$$E_1 = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^K d_1^2(n) \quad E_2 = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L d_2^2(n) \quad (3)$$

E_1 ve E_2 ; sırasıyla 1. difonun ve 2. difonun ortalama enerjileridir. K ve L ; difonların uzunluklarıdır. 2. difon (d_2), enerji oranının karekökü olan katsayı (α) ile çarpılır ve enerjisi eşitlenen yeni difon (s_2) elde edilir (Eşitlik (4)).

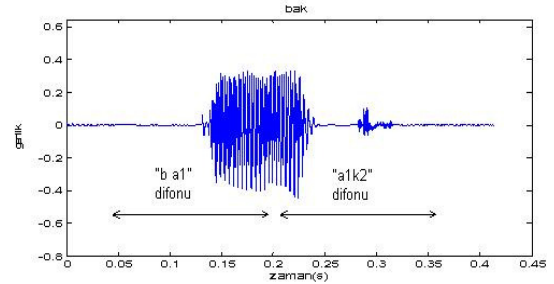
$$\alpha = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} \quad s_2 = \alpha \cdot d_2 \quad (4)$$

Şekil 4'te enerji uyumsuzluğu olan difonlarla yapılan sentez gösterilmiştir.

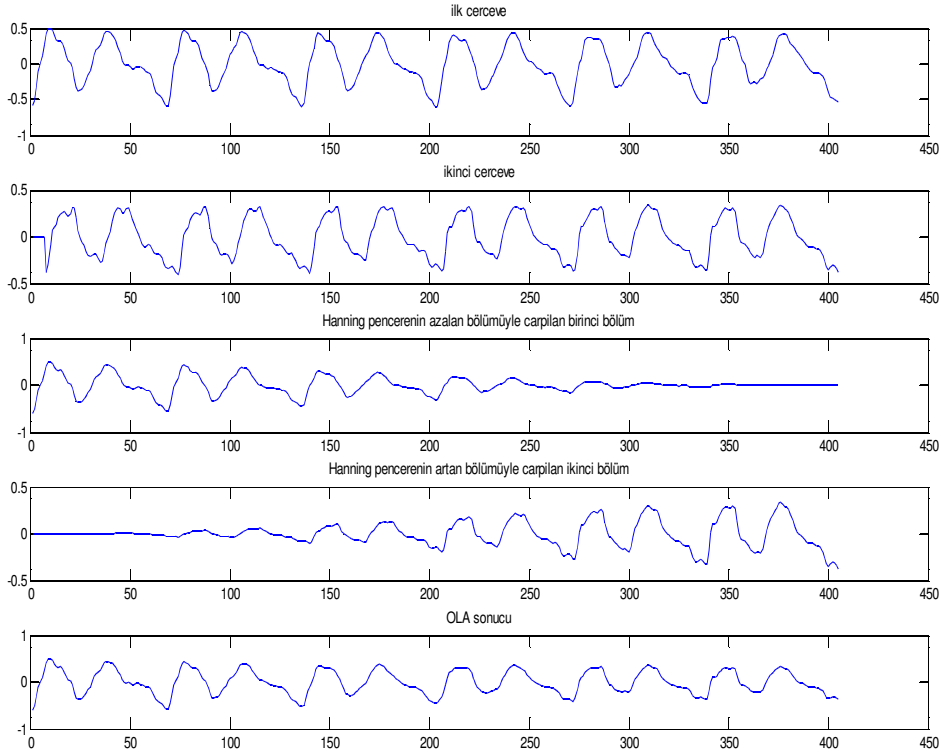


Şekil 4: Enerji eşitlenmemiş durumda sentez

Şekil 5'te ise enerjileri eşitlenmiş difonlarla yapılan sentez gösterilmiştir.



Şekil 5: Enerji eşitleme sonrası sentez



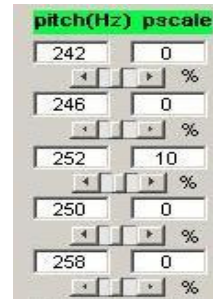
Şekil 3: PSOLA ile yapılan örtüşürüp ekleme işleminin ayrıntıları



Şekil 6: Tasarlanan ve gerçekleştirilen MKS test platformu

Çalışmada, Şekil 6'da gösterilen ara yüz tasarlanmış ve ezgi denemeleri için bir platform oluşturulmuştur. Matlab GUI® ile hazırlanan bu platformda süre, perde frekansı, enerji ve örtüştürme süreleri ayarlanabilmektedir. Süre ve perde frekansı değiştirme işlemleri yine PSOLA yöntemiyle yapılmaktadır [6].

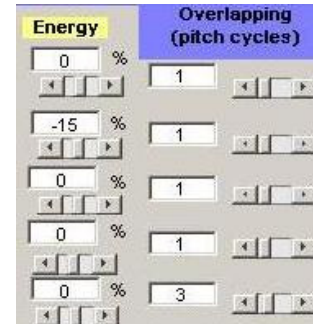
Sol üstte bulunan metin kutusuna girilen yazı, otomatik olarak sözcüklerine ve difonlarına ayrılır. Sözcükler boşluk karakterinden yararlanılarak, difonlar ise Türkçenin telaffuz kurallarına [21] göre belirlenir. Daha sonra difonlar veri tabanından çağrılır. Geliştirilen ara yüzde bulunan süre ayarı Şekil 7'de, perde frekansı ayarı Şekil 8'de, enerji ve örtüştürme süresi ayarı da Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8: Perde frekansı ayarı



Şekil 7: Difonların süre ayarı



Şekil 9: Enerji ve örtüştürme süresi ayarı

2.2. Terminoloji ve Gösterimler

Fonem, difon, ve sözcük için süre, difonlar için perde frekansı ve enerji tanımları aşağıda Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Matematiksel gösterim

$t_{ij}^{(d)}$	i . sözcükteki j . difonun süresi (d : difon)
$t_{i,j,k}^{(f)}$	i . sözcükte j . difonun k . foneminin süresi (f : fonem)
$t_i^{(s)}$	i . sözcüğün toplam süresi (s : sözcük)
$p_{ij}^{(d)}$	i . sözcükteki j . difonun orijinal perde frekansı
$(p_{ij}^{(d)})'$	i . sözcükteki j . difonun değiştirilen perde frekansı
$e_{ij}^{(d)}$	i . sözcükteki j . difonun orijinal enerjisi
$(e_{ij}^{(d)})'$	i . sözcükteki j . difonun değiştirilen enerjisi

Sentezleme için yapılan ilk işlem; metinden belirlenen difonların ortalama difon sürelerine otomatik olarak getirilmeleridir. Bunun için, fonem ortalama sürelerinin [11] ortalaması alınır.

Difon ortalama süre hesabı Eşitlik (5)’te görülmektedir.

$$t_{i,j}^{(d)} = (t_{i,j,1}^{(f)} + t_{i,j,2}^{(f)}) / 2 \quad (5)$$

Burada; $t_{i,j}^{(d)}$; i . sözcükteki j . difonun süresidir. $t_{i,j,1}^{(f)}$ ve $t_{i,j,2}^{(f)}$; i . sözcükteki j . difonun k . fonem süresidir ($k = 1$: baştaki, $k = 2$: sondaki fonem).

Sözcüklerdeki difon sayısına göre; difon süresi değiştirme parametresi: α_d , Eşitlik (6)’daki gibi uygulanır.

$$t_i^{(s)} = \alpha_d \sum_{k=1}^K t_{i,j}^{(d)} \quad (6)$$

Burada, $t_i^{(s)}$; i . sözcüğün toplam süresidir (bk. Şekil 7) ve α_d parametresinin değeri Tablo 3’te verilmiştir. Eğer sözcükteki difon sayısı 4’ten az ise bu sözcüğün difonları %20 uzatılır ($\alpha_d = 1,20$); burada amaç sentezlenen sözcüğün yutulmaması ve anlaşılabilirliğinin artırılmasıdır. Eğer sözcükteki difon sayısı 6’dan fazla ise, difonların süresi %5 azaltılır ($\alpha_d = 0,95$); burada da amaç yavaş okumanın önüne geçmektir. Eğer difon sayısı 4,5 veya 6 ise difonlar ortalama sürelerinde bırakılır ($\alpha_d = 1,00$). Bu değerlere yapılan denemelerin sonucunda karar verilmiştir.

Tablo 3: Difon süresi değiştirme parametresi (α_d)

$\alpha_d = 1,20$	Difon sayısı ≤ 3
$\alpha_d = 1,00$	$4 \leq$ Difon sayısı ≤ 6
$\alpha_d = 0,95$	Difon sayısı ≥ 7

Perde frekansı değişikliği için Eşitlik (7)’deki işlem yapılır.

$$(p_{i,j}^{(d)})' = \beta_k (p_{i,j}^{(d)}) \quad (7)$$

β_k ; perde frekansı değiştirme oranı olup, σ_k ; yüzde değiştirme miktarından $\beta_k = 1 + \sigma_k$ ile elde edilir (bk. Şekil 8).

Örnek olarak; $\sigma_k = -0,15$ için, $\beta_k = 0,85$ olacak ve k . difonun perde frekansı %15 azaltılacaktır.

Enerji ayarı için Eşitlik (8)’deki işlem yapılır.

$$(e_{i,j,k}^{(d)})' = \gamma_k (e_{i,j,k}^{(d)}) \quad (8)$$

γ_k ; enerji değiştirme oranı olup, λ_k ; yüzde değiştirme miktarından $\gamma_k = 1 + \lambda_k$ ile elde edilir (bk. Şekil 9).

Örnek olarak; $\lambda_k = +0,20$ için, $\gamma_k = 1,20$ olacak ve k . difonun enerjisi %20 artırılabilecektir. Bunun için ilgili difon $\alpha = \sqrt{\gamma_k}$ katsayısı ile çarpılır.

2.3. Süre ve Vurgunun Ayarlanması

Türkçede vurgu; zaman ve şahıs eklerinin özelliklerine göre yer değiştirebilmektedir [16]. Bazı ekler vurguyu kendinden önceki ek veya hecelere kaydırırken, bazıları da vurguyu üzerine çekmektedir. Örnek olarak: “sevmiyorum” fiilinde vurgu “-me” olumsuzluk ekinden önce yer alırken, “gittiler mi?” fiilinde vurgu -mi soru ekinden öncedir.

Vurgu incelememizde, çekimli fiillerin vurgu alan hecesi üzerinde denemeler yapılmıştır. Olumlu, olumsuz, olumlu soru ve olumsuz soru yapısındaki cümleler için vurgunun yeri, hem dilbilimsel açıdan, hem de bilgisayar destekli yazılımlarla incelenmiştir. Yapılan gözlemler ışığında, vurgu en doğru şekilde senteze kazandırılmaya çalışılmıştır. Süre ve vurgu kurallarına göre sentezlenen konuşma, olduğu gibi birleştirilen konuşmayla dinleme testine tâbi tutulmuş ve kuralların sentezin doğallığına olan katkısı değerlendirilmiştir.

İncelenen cümleler Tablo 4’te verilmektedir. 1 ve 2: olumlu, 3 ve 4: olumsuz, 5 ve 6: olumlu soru, 7 ve 8: olumsuz soru formundadır ve 9 numaralı cümle kontrol amaçlıdır. Kontrol cümlesinin ham ve kurallı halleri tıpa tıpa aynıdır ve amaç dinleyicilerin dikkatini ölçmektir. Bu cümleye +2,+1,0,-1 veya -2 dışında puan vermiş olanların test sonuçları değerlendirmeye alınmamıştır.

Tablo 4: Süre ve vurgunun birlikte incelendiği cümleler

No	Cümle
1	Her şeye rağmen zamanında geldi.
2	Çok çalıştığı için başarılı oldu.
3	Otobüsle uzun yola hiç gitmedim.
4	Yıllardır güneş yüzü görmedi.
5	Son sınava yeterince çalıştın mı?
6	Biz yokken kendine iyi baktın mı?
7	Görevini en iyi şekilde yapmadın mı?
8	Saçımı sana süpürge etmedim mi?
9	Peki, yeterince çalışmıyor musun?

Öncelikle, ortalama difon süreleriyle sentez yapılır. Birleştirmede bütün difonların perde frekansları ve enerjileri tasarlanan ara yüzün hassasiyeti ölçüsünde eşitlenir. Bu senteze *ham sentez* adı verilir. Daha sonra ham sentez üzerinde aşağıda maddeler halinde verilen kurallar uygulanır. Burada vurgunun konumunun sisteme girilmiş olduğu varsayılmaktadır.

Bir cümle okunurken, anlamda etkili olduğu için, cümlede yer alan tamlamalara özel bir vurgu katarız. Seçilen cümlelerde böyle tamlamalara (“uzun yola”, “güneş yüzü”, “en iyi şekilde” vb.) yer verilmiş ve doğru eğilendirme için yöntem araştırılmıştır. Cümlede öbek vurgusu olarak bilinen bu bölümler belirgin şekilde vurgulanmalıdır. Çalışmamızın en çok zaman alan ve en önemli bölümlerinden birisi de bu bölümdür. Öbek vurgusu için hem temel frekansın hem de enerjinin diğer vurgulara göre daha fazla artırılması önerilmektedir.

Seçilen cümlelere doğal ezgi kazandırmak için izlenen yol şu şekilde sıralanabilir:

- Difon süreleri, *Tablo 3*'teki gibi ayarlanır.
- Söz gruplarının belirlediği duraklar boşluk süresi ile ayarlanır. Buralarda boşluk difonunun süresi iki katına çıkartılır.
- Ham sentezi oluşturan tüm difonların temel frekansları ve enerjileri eşitlenmeye çalışılır.
- Orijinal kayıtlarda ortak olan vurgular senteze verilmeye çalışılır. Bunun için, öbek vurgusunun yer aldığı difonların hem perde frekansları (%30), hem de enerjileri (%70) artırılır (Şekil 6'da mavi işaretli bölüm).
- Sözcük vurgularında ise sadece temel frekans %20 artırılır (Şekil 6'da kırmızı işaretli bölüm).
- Cümlelerin fiiline vurgu katılır. Bu amaçla, fiilin vurgulu hecesindeki difonların temel frekansları %20, enerjileri %40 artırılır.
- Ayrıca cümle biten ezgi ile sonlandırılır. Bunun için, son sözcükteki difonların temel frekansları ve enerjileri kademeli olarak (sırasıyla, %10, %15, %20) azaltılır (Şekil 6'da yeşil işaretli bölüm).

Bu önerileri oluşturan perde frekansı ve enerji oranlarına, gerçekleştirilen ara yüzde yapılan pek çok denemeden sonra karar verilmiştir. Farklı değerlerle yapılan sentezler dinlenmiş ve dinleme testleri sonucunda en çok beğenilen orana karar verilmiştir. Tüm bu ayarlamalar elle yapılırsa da otomatik hale getirilebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, [22]'de oluşturulan 16 kHz ile örneklennmiş difonlar kullanılmıştır. Ayrıca yapılan tüm sentezler uzunluğu 3 örnek olan yumuşatma (smoothing) süzgecinden geçirilmiştir. Bu süzgecin amacı; tıslama ve çatırtı seslerinin etkisini azaltmaktır.

3. Bulgular

Bu bölümde, yukarıdaki bilgiler ışığında yapılan sentezler, web üzerinden CMOS (Comparative Mean Opinion Score testi, ITU-T P.800 standardı olan MOS testinin karşılaştırmalı bir türüdür) testine tâbi tutularak, belirlediğimiz ezgi kurallarının doğallığa olan etkileri ölçülmüştür. Bu amaçla [23] ile adresi verilen ağ sayfası tasarlanmıştır. Dinleyiciler

ekrana rastgele sırada gelen ham sentez ile ezgi eklenmiş sentezi dinlemiş ve birbiriyle karşılaştırmışlardır. -5 ile +5 arasında puan vererek hangisinin eğili sentez olduğunu bilmeden dereceli bir kıyaslama yapmışlardır. Bu özel teste 40 dinleyici katılmıştır. Elde edilen bulgular Tablo 5'te görülmektedir.

Bu sonuçlardan tüm eğili sentezlerin ham sentezlerden daha doğal ve başarılı bulunduğu görülmektedir. En yüksek puan; olumsuz cümlelerde (3 ve 4) elde edilmiştir (ort. 2,55/5,00). Daha sonra en yüksek puan; olumlu soru cümlelerinde (5 ve 6) elde edilmiştir (ort. 2,39/5,00). Vurgu yerleri bariz belli olmayan olumlu cümlelerde (1 ve 2) ise ortalama 1,70/5,00'lik artış sağlanmıştır. En düşük artış ise ortalama 0,80/5,00 ile olumsuz soru cümlelerinde (7 ve 8) elde edilmiştir. Tablo 4'teki 7 numaralı cümlelerin en düşük puanı almasına süre ve temel frekans değişiklikleri sonucunda, “görevini en iyi ...” bölümünde anlaşılabilirliğin azalmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Tablo 5: CMOS testi sonuçları

No	Cümle	Puan / 5,0
1	<i>Her şeye rağmen zamanında geldi.</i>	1,95
2	<i>Çok çalıştığı için başarılı oldu.</i>	1,45
3	<i>Otobüsle uzun yola hiç gitmedim.</i>	2,00
4	<i>Yıllardır güneş yüzü görmedi.</i>	3,09
5	<i>Son sınava yeterince çalıştın mı?</i>	2,32
6	<i>Biz yokken kendine iyi baktın mı?</i>	2,45
7	<i>Görevini en iyi şekilde yapmadın mı?</i>	0,32
8	<i>Saçımı sana süpürge etmedim mi?</i>	1,27
9	<i>Peki, yeterince çalışmıyor musun?</i>	0,14

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada Türkçe metinden konuşma sentezleyiciler için vurgu kuralları araştırılmış, geliştirilen ara yüzde, bir sistematik dâhilinde, ham senteze ezgi verilmeye çalışılmıştır. Dört farklı formdaki (olumlu, olumsuz, olumlu soru ve olumsuz soru) toplam sekiz adet cümle üzerinde uygulanan vurgu kuralları, sentezin doğallığını ve başarısını arttırmıştır. Tüm bu çalışmaların sonucunda elde edilen bulgular CMOS testi ile değerlendirilmiştir. Sonuçta ezgi kuralları uygulanan sentezler, ham sentezlere göre ortalama 1,86/5,00 puan daha başarılı (doğal) bulunmuştur. Belirlenen kurallar, vurgu yerleri belirli olan cümlelerin daha doğal sentezlenmesini sağlamaktadır.

Çalışmalarımız test kümesini genişletmek için devam etmektedir. Gelecek çalışma olarak; sentezleyicide difondan daha büyük konuşma parçalarının kullanılması ve örnekleme frekansının artırılarak sentezlere olan etkisinin incelenmesi önerilebilir. Bu çalışmada önerilen yöntemin otomatikleştirilmesi de bir diğer çalışma konusudur.

Teşekkür

Çalışmalarımıza sesini veren Dr. Özgül Salor'a ve dinleme testlerimize katılan herkese teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Braille Teknik Ltd. Şti.
<http://www.brailleteknik.com/jaws.html>
son erişim: 08/02/2012
- [2] Loquendo S.p.A., a Telecom Italia Group Company
<http://www.loquendo.com/en/demo-center/tts-demo/>
- [3] GVZ Ses tanıma ve sentezleme teknolojileri şirketi
<http://www.gvz.com.tr/index.html>
son erişim: 08/02/2012
- [4] DİKTE Yöndata Bilgisayar Ltd. Şti.
<http://www.dikte.com.tr/konusmatanima.php>
son erişim: 08/02/2012
- [5] Google translate
<http://translate.google.com>
son erişim: 08/02/2012
- [6] Dutoit, T., *An Introduction to Text-to-Speech Synthesis*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [7] Tatham, M. and Morton K., *Developments in Speech Synthesis*, Wiley, 2005.
- [8] Narayanan, S. and Alwan, A., *Text to Speech Synthesis, New Paradigms and Advances*, Prentice Hall, 2005.
- [9] Taylor, P., *Text-to-Speech Synthesis*, Cambridge University Press, 2009.
- [10] Uslu, İ. B., “Türkçe metinden konuşma sentezlemede bugünkü durum - 2. Bölüm”, *EMO Ankara Şubesi Haber bülteni*, 2010.3.
- [11] Şayli, Ö., “Duration analysis and modelling for Turkish text-to-speech synthesis”, yüksek lisans tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [12] Öztürk, Ö., “Modelling phoneme durations and fundamental frequency contours in Turkish speech”, doktora tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [13] Oskay, B., Salor, Ö., Özkan, Ö., Demirekler, M. ve Çiloğlu T., “Türkçe metinden konuşma sentezlemede ezgi belirlenmesi ve uygulanması”, *IEEE 9. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı SİU-2001*, 2001, s. 238–243.
- [14] Külekçi, M. O. ve Oflazer K., “An infrastructure for Turkish prosody generation in text-to-speech synthesis”, *TAINN 2006, 15th Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks*, Muğla, Haziran 2006, s. 49–57.
- [15] Uslu, İ.B. ve İlk, H.G., “Türkçe metinden konuşma sentezlemede Fujisaki ezgi modeli”, *IEEE 17. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, SİU-2009*, Antalya, Nisan 2009, s. 844–847.
- [16] Aydemir T. ve Yılmaz, A. E., “Türkçe fiil çekimlerinde vurgu konumunu belirlemek için bir yazılım kütüphanesi”, *IEEE 18. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SİU 2010)*, 22–24 Nisan 2010, Diyarbakır, Türkiye, s. 696–699.
- [17] Uslu, İ.B., Yılmaz A.E. ve İlk, H.G., “Türkçe metinden konuşma sentezlemede fiil çekimleri için yeni bir ezgi modeli”, *IEEE 19. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, SİU-2011*, Antalya, Nisan 2011, s. 638–641.
- [18] Bulut, M., Busso C., Yıldırım, S., Kazemzadeh, A., Lee, C. M., Lee S. and Narayanan S., “Investigating the role of phoneme-level modifications in emotional speech resynthesis”, *Proceedings of Interspeech*, 2005, s. 801–804.
- [19] Burkhardt, F., Audibert, N., Malatesta, L., Türk, O., Arslan, L. and Auberger, V., “Emotional prosody – does culture make a difference?”, *Speech Prosody*, Dresden Germany, paper no. 207, 2006.
- [20] Moulines, E., and Charpentier, F., “Pitch-synchronous waveform processing techniques for text-to-speech synthesis using diphones”, *Speech Communication*, volume: 9, 1990, s. 453–467.
- [21] Ergenç, İ., *Konuşma Dili ve Türkçenin Söyleyiş Sözlüğü*, Multilingual, 2002
- [22] Salor, Ö., Pellom B, Çiloğlu T. and Demirekler M., “On developing new text and audio corpora and speech recognition tools for the Turkish language”, *ICSLP-2002: Inter. Conf. On Spoken Language Processing*, Denver, Colorado USA, 16–20 Eylül 2002, s. 349–352..
- [23] <http://demo.reformo.net/baran3/index.php>
son erişim: 08/02/2012

Doku Anomalisi İçeren Beyin MR İmgeleri Üzerinde Mumford-Shah Tabanlı Bölütleme

Mumford-Shah Based Segmentation of Brain MR Images With Tissue Abnormalities

Alper Çevik¹, B. Murat Eyüboğlu²

¹ Biyomedikal Mühendisliği, Doktora Programı Öğrencisi
Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)
alper.cevik@metu.edu.tr

² Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü ve Biyomedikal Mühendisliği Lisansüstü Programı,
Öğretim Üyesi
Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)
bme@eee.metu.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada imge bölütleme problemi Mumford-Shah enerji enazlama problemi şeklinde ifade edilmiş, problemin çözümü için getirilen öneriler incelenmiş ve seçilen çözüm yöntemi uygulanıp, algoritma, doku anomalileri içeren örnek beyin manyetik rezonans (MR) imgeleri üzerinde değerlendirilmiştir. Uygulamalarda kullanılan örnek imgeler, beyin tümörüne bağlı ödem oluşumu ve multiple sclerosis (MS) lezyonları bulunduran imgeler arasından seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar her iki durum için de sayısal ve görsel olarak sunulmuş, sonuçlar niteliksel ve niceliksel anlamda değerlendirilmiştir.

Abstract

In this study, image segmentation problem is expressed in terms of Mumford-Shah energy minimization problem, several solution proposals for the problem are investigated, chosen method of solution is implemented, and the algorithm is evaluated using brain magnetic resonance (MR) images which contain tissue abnormalities. Sample images used in the experiments are chosen among the ones which contain oedema formation due to brain tumor, and multiple sclerosis (MS) lesions. Gathered results are presented in both visual and numerical forms for both cases, results are evaluated qualitatively and quantitatively.

1. Giriş

Beyin tümörleri veya MS lezyonları nedeniyle oluşmuş doku anomalileri içeren beyin MR imgelerinin analizi, radyoloji ve nöroloji uzmanlarına tanı, tedavi planı ve uygulanan tedavinin doğrulanması aşamalarında yol gösterici olduğundan büyük önem taşımaktadır. Söz konusu analizden, tümör, tümöre bağlı oluşan ödem ve lezyonların arakesit alanı, yüzey alanı, hacmi gibi niceliksel değerlerin hesaplanması amacıyla yararlanılmaktadır. Bu değerlerin hesaplanmasındaki doğruluk

oranları ve işlem süreleri, doğrudan, kullanılan imge bölütleme algoritmasına bağlıdır.

İki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) tıbbi imge verisi üzerinde bölütleme işleminin manuel olarak uygulanması, elde edilen sonuçlarda yüksek standart sapmaya, dolayısıyla güvenilirliği düşük veri elde edilmesine yol açabilmektedir. Eşikleme (*thresholding*) veya bölge büyütme (*region growing*) gibi klasik algoritmaların kullanımı ise kullanıcı girdilerine olan bağımlılıkları nedeniyle kullanım zorluğu ve tutarlılığı düşük sonuçlar doğurmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, sözü edilen klasik bölütleme algoritmalarına alternatif olarak, Mumford-Shah tabanlı bölütleme problemi [1] incelenmiş, literatürde kendisine yer bulmuş bir çözüm metodu örnek tıbbi imgeler üzerinde uygulanmış ve alınan sonuçlar bilimsel olarak değerlendirilmiştir.

Önerilen yöntem, metodolojik farklılıklar bulundurmamakla birlikte, daha önce pozitron emisyon tomografisi imgelerinin geriçatımı (PET reconstruction) [2], kan hücrelerinin bölütlenmesi [3], beyin MR imgelerinin gürültüden arındırılması ve bölütlenmesi (beyin ak madde - boz madde ayırımı) [4] ve damar imgelerinin bölütlenmesi ve skeletizasyonu [4, 5] amacıyla kullanılmıştır.

2. Mumford-Shah Tabanlı Bölütleme

Mumford ve Shah [1] imge bölütleme işlemini bir maliyet enazlama problemi şeklinde ifade etmiştir. Maliyet fonksiyoneli şu şekilde ifade edilmektedir:

$$E = \beta \iint_R (u - z)^2 + \alpha \iint_{R-B} |\nabla u|^2 + \iint_R l(B). \quad (1)$$

Denklem (1)'de u ve z sırasıyla bölütlenmiş ve orijinal imgeleri ifade etmektedir. Problem çözümünün nihai amacı, fonksiyoneli enazlayan u fonksiyonuna ulaşmaktır. İlk terim girdi ve çıktı arasındaki fark için bir ölçüt oluşturmakta; dolayısıyla çarpıldığı β sabiti, veri sadakat (*data fidelity*) katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Benzer şekilde, $\iint_{R-B} |\nabla u|^2$ terimi, bölütlenmiş altkümelerin üzerindeki

tamdeğişimi (*total variation*) ifade etmekte ve başındaki α sabiti düzenleme (*regularization*) katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Fonksiyonelin son terimi ise bölütlenmiş imge üzerindeki sınırların toplam uzunluğunu ifade etmektedir.

İmge fonksiyonunun tanımlı olduğu alan R ile bölütler arasındaki sınırları oluşturan alan ise B ile gösterilmiştir. Denklem (1)'de verilen enerji fonksiyonelinin enazlanması sağlayan u fonksiyonu, Mumford ve Shah'a göre ideal şekilde bölütlenmiş imgeyi vermektedir.

2.1. Bölütleme Problemi İçin Önerilen Çözümler

Mumford-Shah enerji fonksiyonelinin enazlanması için çok sayıda yöntem önerilmiştir [6, 7, 8, 9, 10, 11]. Referanslarda verilen yöntemler arasında; benzetimli tavlama (*simulated annealing*) yöntemi, çizge kesit (*graph cut*) algoritması, seviye kümesi (*level set*) yöntemi, dışbükey gevşeme (*convex relaxation*) yaklaşımları ve sonlu farklar ayrıklaştırması (*finite difference discretization*) sayılabilir.

Sıralanan yöntemler, pratikte kullanılan yöntemler olmasına karşın pek çok dezavantaja yol açmaktadır. Söz konusu dezavantajlara örnek olarak; yerel minimumlara yakınsama, ucu açık sınır oluşumuna imkân vermeme ve herhangi bir çözüm kistasına ulaşmak için gereken yineleme sayılarının fazlalığı sıralanabilir.

2.2. Ambrosio-Tortorelli Yaklaşımı

Ambrosio ve Tortorelli [12] Mumford-Shah enerji enazlama problemine, bölütlenmiş imge üzerinde ucu açık sınırların oluşumuna olanak veren, bu sayede enerji fonksiyonelinin doğasına görece olarak daha fazla uygunluk gösteren bir yaklaşım yöntemi önermiştir. Yöntem, fonksiyonelin son terimi olan, sınırlar toplamını (2)'de tanımlanan faz alanı enerji terimiyle değiştirmeyi önermektedir:

$$L_{v,\rho} = \iint_R \left\{ \rho |\nabla v|^2 + \frac{(1-v)^2}{4\rho} \right\} dx. \quad (2)$$

Faz alanı enerji teriminin ifadesinde kullanılan $2B$ v fonksiyonu, belirtik olarak yazılmasa da örtülü olarak:

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{1}{2} \iint \left\{ \rho |\nabla v|^2 + \frac{v^2}{\rho} \right\} = l(B), \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Denklem (1)'deki $\iint_R l(B)$ terimi, burada önerilen faz alanı enerji terimi ile değiştirilip maliyet fonksiyoneli yeniden düzenlendiğinde, enazlanması hedeflenen yeni bir enerji fonksiyoneli elde edilmektedir:

$$E_{AT} = \iint \left[\beta (u - z)^2 + \alpha |\nabla u|^2 (1 - v)^2 + \frac{1}{2} \left\{ \rho |\nabla v|^2 + \frac{v^2}{\rho} \right\} \right] dx. \quad (4)$$

Her 3 denklemde de görünen ρ sabiti, özetle sınırları ifade eden v fonksiyonunun aldığı değerler üzerinde bir düzlük (*smoothness*) ölçütü oluşturmaktadır ve sınır karmaşıklık faktörü (*edge complexity factor*) olarak adlandırılır.

Enazlanacak enerji fonksiyonelinin denklem (4) ile verilen şekilde ifade edilmesi ile problem tek bir tümevsel alana indirgenmiş ve denklemin sağ tarafı "sınırların toplam uzunluğu" gibi önceden hesaplanamayacak bir terimden arındırılmıştır. Problem bu şekliyle birden fazla yöntemle çözülebilecek duruma getirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, u

ve v fonksiyonlarının zamana göre değişimlerini ifade eden kısmi diferansiyel denklemlerin 0'a eşitlenerek, bu iki fonksiyonun alacağı değerlerin yinelemeli bir şema ile çözülmesi yöntemi kullanılmıştır.

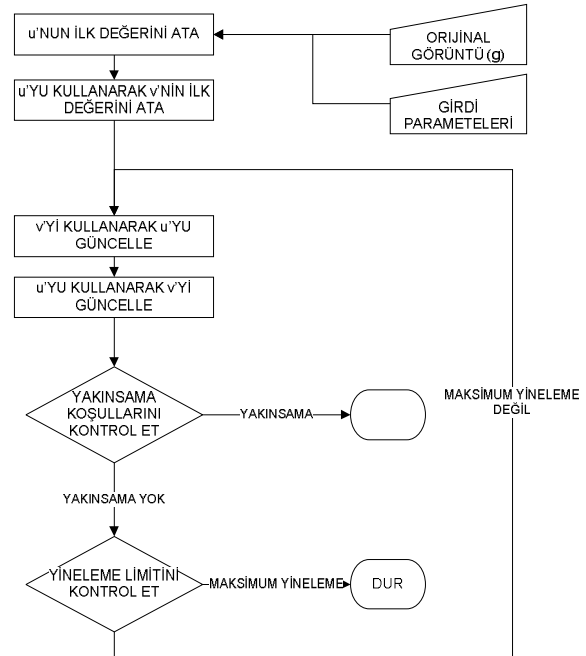
2.2.1. Uygulama

İmge bölütleme işleminin hedeflenen çıktısı olan u fonksiyonu ve yaklaşık olarak bölüt sınırlarını ifade eden v fonksiyonunun zamana göre değişimini gösteren kısmi diferansiyel denklemler (5) ve (6)'da verilmektedir. Bu denklemler *Euler-Lagrange Denklemleri* olarak da adlandırılır. Kısmi diferansiyel denklemlerin bu şekildeki ifadesine, değişimler hesabı (*Calculus of Variations*) kullanılarak ulaşılabılır.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla((1-v)^2 \nabla u) - \frac{\beta}{\alpha} (u - z), \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \nabla(\nabla v) - \left(\frac{2\alpha\rho|\nabla u|^2 + 1}{\rho^2} \right) \left(v - \frac{2\alpha|\nabla u|^2}{(2\alpha|\nabla u|^2 + 1)} \right). \quad (6)$$

Örtülü olarak ifade edilen u ve v fonksiyonlarının zamana göre değişimlerini gösteren kısmi diferansiyel denklemler 0'a eşitlenip çözüldüğünde u ve v 'nin yakınsadığı değerler hesaplanabilmektedir. Bu sebeple, kısmi diferansiyel denklemlerin $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ ve $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ için ayrıklaştırılması, yazılımsal çözüm için uygulanacak algoritma şemasını elde etmemizi sağlamaktadır. Buradan hareketle, $u_{i,j}^{k+1}$ ve $v_{i,j}^{k+1}$ için elde edilen zaman ve konumda ayrık ifadeler, [13]'te verilen referansın ek bölümünde sunulmaktadır.



Şekil 1 – Algoritma akış şeması

Şekil 1'de algoritmaya ait akış şeması verilmiştir. Başlangıç değerleri olarak,

$$u_0 = z, \quad (7)$$

ve

$$v_0 = \frac{2\alpha|\nabla u|^2}{(2\alpha|\nabla u|^2+1)} \quad (8)$$

verilmiş ve yinelemeli şema doyunluk kıstaslarından birisi sağlanana kadar uygulanmıştır.

Doygunluk kıstaslarının ilki, sabit olarak belirlenen en fazla yineleme sayısına ulaşılmasıdır. Bir diğer doyunluk kıstası ise, bir önceki yinelemede ve son yinelemede elde edilen bölütlenmiş imgelerin farkının L_1 normunun, son yinelemede elde edilen bölütlenmiş imgenin L_1 normuna oranının, önceden belirlenmiş bir ϵ değerinden küçük olması olarak açıklanabilir. İkinci kıstas matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

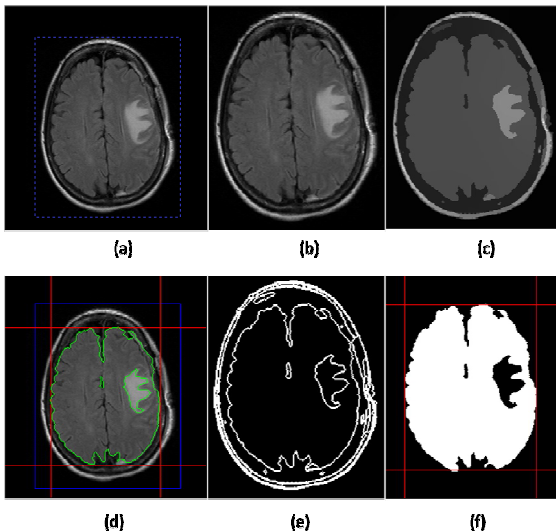
$$|u^{k+1} - u^k| < \epsilon |u^k|. \quad (9)$$

3. İmge Bölütleme Deneyleri

Bu çalışma kapsamında, 2. bölümde açıklanan imge bölütleme algoritması iki ayrı tıbbi imge üzerinde uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Birinci uygulamada beyin tümörüne bağlı ödem oluşumu bulandıran 2B beyin MR imgesi¹, ikinci uygulamada ise MS hastalığına bağlı lezyonların görüldüğü 2B bir beyin MR imgesi² kullanılmıştır.

3.1. Beyin Tümörüne Bağlı Ödem

Beyin tümörüne bağlı ödem oluşumu içeren örnek bir 2B beyin MR imgesi, Şekil 2 (a)'da gösterilmektedir. Şekil 2 (b)'de görüldüğü gibi, işlemin uygulanması amacıyla imge üzerindeki tüm anlamlı verinin kapsandığı bir ilgi alanı seçilmiştir.



Şekil 2: (a) Orijinal imge, (b) Seçilen ilgi alanı, (c) Bölütlenmiş imge (u), (d) Sınırlar ve seçili ilgi alanı, (e) Sınır haritası (v), (f) İkili imge gösterimi.

¹ PHILIPS Medical Systems. PHILIPS DICOM Görüntü Sunucusu. [Çevrimiçi]. (Son erişim tarihi: 20/01/2011). [ftp://ftp.philips.com/pub/](http://ftp.philips.com/pub/)

² Prof. Dr. Kader Karlı Oğuz, Radyoloji Anabilim Dalı, Tıp Fakültesi, Hacettepe Üniversitesi

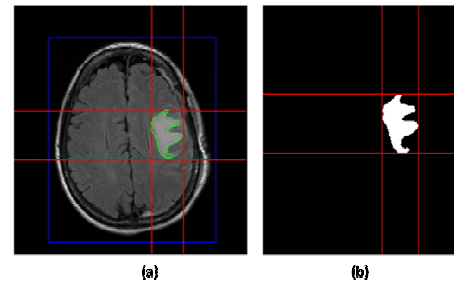
Bölütleme işlemi Tablo 1'de verilen girdi parametreleri ile uygulanmış, sonuç olarak Şekil 2 (c)'deki - gürültü ve doku (*noise & texture*) bileşenlerinden arındırılmış - imge elde edilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü gibi, imgeyi oluşturan piksel değerlerinin standart sapma ve entropi değerleri orijinal imgeye göre düşüş göstermiştir. Tablo 1 ve Tablo 3'te verilen ortalama piksel değeri, standart sapma ve entropi değerleri, imge üzerindeki tüm piksel değerleri baz alınarak hesaplanmıştır. Norm değişim oranı olarak ifade edilen değer, her bir yinelemede hesaplanan karesi alınmış farkların toplamı (SSD - Sum of Squared Differences) değerinin bir önceki yinelemede hesaplanan değere oranını göstermektedir. Bu değer, yinelemelerin sonlandırılması için yakınsama ölçütü olarak kullanılmaktadır.

Tablo 1: Beyin tümörüne bağlı ödem içeren imge için bölütleme parametreleri ve sonuç değerleri

GİRDİLER	DÜZENLEŞTİRME		
	KATSAYISI (β)	100	
	VERİ SADAKAT		
	KATSAYISI (α)	10	
ÇIKTILAR	SINIR KARMAŞIKLIK	0.05	
	FAKTÖRÜ (ρ)		
	YİNELEME SAYISI	20000	
		(b)	(c)
	NORM DEĞİŞİM ORANI	1.2365e ⁻⁰⁰³	9.6946e ⁻⁰⁰⁶
	ORTALAMA PİKSEL DEĞERİ	0.1952	0.1952
	STANDART SAPMA	0.1642	0.1563
	ENTROPİ	6.09	4.189
TOPLAM ENERJİ	2.263e ⁰⁰⁵	6.231e ⁰⁰⁴	

Buradan elde edilebilecek anlamsal çıkarım, imgede taşınan bilgi miktarının bölütleme işlemiyle birlikte azalması olarak ifade edilebilir. Bu durum bölütleme işleminin amacıyla uygunluk göstermektedir. Ek olarak imgenin taşıdığı toplam enerjinin yinelemelerle düştüğü gözlenmiştir.

Piksel değerlerinin aritmetik ortalaması yinelemeler boyunca sabit kalmaktadır. Algoritma uygulanırken Neumann Sınır Koşulu (*Neumann Boundary Condition*) [14] kullanıldığından, ortalama değerin (ortalama gri seviyenin) sabit kalması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 3: (a) Orijinal imge üzerinde işaretlenmiş ödem alanı, (b) Ödem alanının ikili imge gösterimi.

Bölütleme işlemi gerçekleştirildikten sonra, imge üzerindeki ayrıksı hale getirilmiş bölgeler farklı işaretçilerle işaretlenebilir. Hedeflenen bölge imgeden çıkarılıp, ikili imge şeklinde gösterilebilir, tek başına ele alınıp analiz ve ölçümlere tabi tutulabilir. DICOM dosya formatında imgelerle çalışılıyorsa, dosyanın içerdiği üstveri kullanılarak, uzunluk,

arakesit alanı, yüzey alanı, hacim gibi gerçek büyüklükler hesaplanabilir.

Şekil 3’de imgeden çıkarılmış ödem bölgesinin ikili gösterimi verilmektedir. Tablo 2’de sunulduğu gibi, DICOM üstverisinde bulunan üç veri alanı kullanılarak, ödem alanına ilişkin gerçek uzunluk ve alan bilgilerine erişilmiştir. Bunlara ek olarak, arakesit alanı ile MR imgesinin dilim kalınlığının çarpılmasıyla, dilim üzerindeki hacim bilgisi de otomatik olarak hesaplanmıştır.

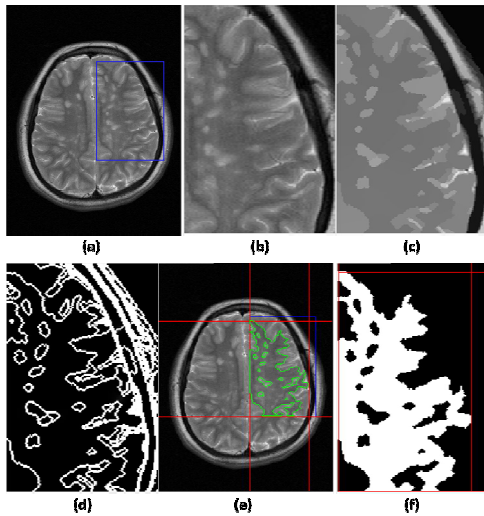
Tablo 2: Beyin tümörüne bağlı ödem bölgesi için yapılan hesaplamalar

ÜSTVERİ	PIKSEL X-BOYUTU	0.79861 mm
	PIKSEL Y-BOYUTU	0.79861 mm
	DİLİM KALINLIĞI	5 mm
HESAPLANAN DEĞERLER	X-EKSENİ BOYUNCA EN YÜKSEK UZUNLUK	40 piksel
		31.9444 mm
	Y-EKSENİ BOYUNCA EN YÜKSEK UZUNLUK	57 piksel
		45.5208 mm
	ARAKESİT ALANI	1154 piksel
		735.9978 mm ²
DİLİM ÜZERİNDEKİ HACİM	3679.9888 mm ³	

3.2. MS Lezyonları

MS hastalığına bağlı oluşan lezyonlar beyin MR imgesi üzerinde görülebilmektedir. Bu lezyonların toplam sayısı ve büyüklükleri üzerindeki değişim, hastalığın ve/veya tedavinin seyri konusunda bilgi sağlamaktadır.

MS lezyonları, Şekil 4 (c) ve (f)’de görüldüğü gibi, uygulanan bölütleme algoritması ile imge üzerinden otomatik olarak ayrıştırılabilmektedir.



Şekil 4: (a) Orijinal imge, (b) Seçilen ilgi alanı, (c) Bölütlenmiş imge (u), (d) Sınırlar ve seçili ilgi alanı, (e) Sınır haritası (v), (f) İkili imge gösterimi.

İşlemden kullanılan girdi parametreleri ve işlem sonucuna ilişkin değerler Tablo 3’te verilmektedir. İlk deneydeki gibi burada da standart sapma, entropi ve toplam enerji değerleri düşerken, ortalama değerin sabit kaldığı gözlenmiştir.

Tablo 3: MS lezyonları içeren imge için bölütleme parametreleri ve sonuç değerleri

GİRDİLER	DÜZENLEŞTİRME KATSAYISI (β)	100	
	VERİ SADAKAT KATSAYISI (α)	10	
	SINIR KARMAŞIKLIK FAKTÖRÜ (ρ)	0.05	
ÇIKTILAR	YİNELEME SAYISI	8641	
			(b)
	NORM DEĞİŞİM ORANI	8.855e ⁻⁰⁰⁴	9.4959e ⁻⁰⁰⁶
	ORTALAMA PİKSEL DEĞERİ	0.4296	0.4296
	STANDART SAPMA	0.1745	0.1589
	ENTROPİ	6.9666	5.5056
	TOPLAM ENERJİ	1.703e ⁰⁰⁵	3.746e ⁰⁰⁴

MS lezyonların içeren 2B beyin MR imgesi üzerinde uygulanan işlemin sonuçları, Şekil 4 ve Tablo 3 ile sunulmaktadır. Şekil 4 (f)’de görüldüğü gibi, MS lezyonları, ikili gösterim şeklinde ayrıştırılmış, morfolojik yöntemlerle imgeden çıkarılıp analiz amacıyla kullanılabilir duruma getirilmiştir.

4. Sonuçlar

Beyin MR imgelerini kullanarak doku anomalilerinin analiz edilmesindeki en önemli adımlardan birisi bölütlemedir. Bölütleme işleminin tam otomatikleştirilmesi, girdi parametrelerine bağımlılığı yüksek geleneksel bölütleme algoritmalarının kullanımına nazaran büyük avantajlar sağlamaktadır. Yapılan işlemlerin doğruluk payını arttırdığı gibi, geliştirilen uygulamaların teknik formasyona sahip olmayan uzmanlarca da rahatlıkla kullanılabilir olmasını sağlamaktadır.

Mumford-Shah kontrol parametrelerinin değiştirilmesi, geleneksel bölütleme yöntemlerinin aksine, bölge sınırlarının pozisyonlarını etkilememekte, sadece bölge sayısını ve sınırların toplam uzunluğunu etkilememektedir. Bu sayede işlem tutarlılığı yükselmektedir. Ayrıca işlemin imgeye ait ortalama gri seviyeyi koruyor olması, görsel analiz açısından kolaylık sağlamaktadır.

Mumford-Shah problemine Ambrosio ve Tortorelli’nin getirdiği çözümün ucu açık sınır oluşumuna olanak veriyor olması, yumuşak doku geçişleri bulunduran tıbbi imgeler üzerinde uygulanabilirliği artırmaktadır. Tüm bu nedenlerle Mumford-Shah tabanlı bölütleme algoritmasının örnek uygulamalarda başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir.

5. Teşekkür

Bu çalışma Alper Çevik'in "A Medical Image Processing and Analysis Framework (Tıbbi Görüntü İşleme ve Analiz Uygulama Çatısı)" başlıklı yüksek lisans tez çalışmasından kaynaklanmaktadır, B. Murat Eyüboğlu tez danışmanıdır.

Çalışmamıza özgün fikirleri ve sağladıkları kaynaklarla önemli katkılarda bulunan Hacettepe Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Radyoloji Anabilim dalı öğretim üyeleri Prof. Dr. Ayşenur Cila ve Prof. Dr. Kader Karlı Oğuz'a teşekkürlerimizi sunarız.

6. Kaynakça

- [1] Mumford, D. and Shah, J., "Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems," *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 42, no. 5, pp. 577--685, 1989.
- [2] Zhou, J., Shu, H., Xia, T., Luo, L., "PET Image Reconstruction Using Mumford-Shah Regularization Coupled with L¹Data Fitting," *Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005. 27th Annual International Conference of the*, vol., no., pp.1905-1908, 17-18 Jan. 2006
- [3] Lin, P., Yan, X., Zheng, C., Yang, Y., "Medical image segmentation based on Mumford-Shah model," *Communications, Circuits and Systems, 2004. ICCAS 2004. 2004 International Conference on*, vol.2, no., pp. 942- 945 Vol.2, 27-29 June 2004
- [4] Du, X., Bui, T.D., "Image segmentation based on the Mumford-Shah model and its variations," *Biomedical Imaging: From Nano to Macro, 2008. ISBI 2008. 5th IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.109-112, 14-17 May 2008
- [5] Lam, B.S.Y., Yan, H., "Blood Vessel Extraction Based on Mumford Shah Model and Skeletonization," *Machine Learning and Cybernetics, 2006 International Conference on*, vol., no., pp.4227-4232, 13-16 Aug. 2006
- [6] Geman, S. and Geman, D., "Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. PAMI-6, no. 6, pp. 721 -741, 1984.
- [7] Cremers, D., Tischhauser, F., Weickert, J. and Schnorr, C., "Diffusion snakes: introducing statistical shape knowledge into the Mumford-Shah functional," *J. OF COMPUTER VISION*, vol. 50, 2002.
- [8] Vese, L.A. and Chan, T.F., "A Multiphase Level Set Framework for Image Segmentation Using the Mumford and Shah Model," *International Journal of Computer Vision*, vol. 50, pp. 271-293, 2002.
- [9] Grady, L. and Alvino, C., *Reformulating and Optimizing the Mumford-Shah Functional on a Graph - A Faster, Lower Energy Solution.*: Springer Berlin / Heidelberg, vol. 5302, pp. 248-261, 2008.
- [10] Pock, T., Chambolle, A., Cremers, D. and Bischof, H., "A convex relaxation approach for computing minimal partitions," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on*, pp. 810 -817, June 2009.
- [11] Chambolle, A., "Finite-differences discretizations of the mumford-shah functional," *M2AN*, vol. 33, no. 2, pp. 261-288, 1999.
- [12] Tortorelli, V.M. and Ambrosio, L., "Approximation of functional depending on jumps by elliptic functional via t-convergence," *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 999-1036, p. 43, 1990.
- [13] Erdem, E., Sancar-Yilmaz, A. and Tari, S., "Mumford-Shah regularizer with spatial coherence," in *Proceedings of the 1st international conference on Scale space and variational methods in computer vision*, Berlin, Heidelberg, pp. 545--555, 2007.
- [14] Cheng, A. and Cheng D. T., "Heritage and early history of the boundary element method", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 29, 268–302. 2005.

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası
EMO BİLİMSEL HAKEMLİ DERGİ YAZIM KURALLARI YÖNERGESİ

“EMO Bilimsel Hakemli Dergi”, özgün bilimsel araştırmalar ile ilginç uygulama çalışmalarına yer veren ve bu niteliği ile hem araştırmacılara hem de uygulamadaki mühendislere seslenmeyi amaçlayan hakemli bir dergidir. İlgili alanı Elektrik Mühendisleri Odasına kayıtlı tüm mühendislik disiplinleridir. Yayın dili Türkçe olup, dergide yayınlanacak makaleler ve kısa bildirimler ile ilgili yazım kuralları aşağıda verilmektedir.

Makalelerin basıma hazır tam metni, pdf dosyası olarak <http://bilimseldergi.emo.org.tr/index.php> adresindeki derginin **Makale Yönetim Sistemi** üzerinden iletilmelidir. Makale dosyaları, ilk yazarın soyadına göre adlandırılmalı, aynı yazara ilişkin birden fazla bildiri iletilmesi durumunda verilen ada ek olarak numaralandırma da yapılmalıdır.

Bilgisayar ortamında iletilmeyen makalelerin hakemlere gönderilmesi ve değerlendirilmesi olanağı bulunmamaktadır.

Makale yazım kuralları:

- Makale sayfaları, A4 (210 mm x 297 mm) kağıt boyutunda hazırlanmalıdır.
 - Sayfa kenar boşlukları:
İlk sayfa için
üst = 3 cm, alt = 3,7 cm, sol = 2 cm, sağ = 2 cm
diğer sayfalar için
üst = 2,5 cm, alt = 3,7 cm, sol = 2 cm, sağ = 2 cm.
 - Makale herbiri 80 mm genişliğinde iki sütun halinde yazılmalıdır. Sütunlar arasında 10 mm aralık bırakılmalıdır.
 - Makale, Times New Roman yazı tipi ile tek satır aralıklı, iki yana dayalı hizalı olarak yazılmalıdır.
 - Makale başlığında, bildiri adı, yazar adları, yazarların çalıştıkları kurumların adları ve e-posta adresleri yer almalıdır.
 - Başlıktan sonra dört satır boşluk bırakılarak yazılacak Türkçe özet ve İngilizce özet (abstract) kısımları en az 100, en çok 150 kelimedenden oluşmalıdır.
 - Bölüm başlıkları, numaralandırılmalı, yalnızca baş harfleri büyük harflerle yazılmalı ve sütuna ortalanmalıdır.
- **Makalede kullanılacak yazı tipi boyut ve biçimleri:**

Başlık	14 Kalın Yalnızca baş harfleri büyük
Yazar adları	12 <i>İtalik</i>
Kurum adları	12
Özetler	9 <i>İtalik</i>
Alt ve üst simgeler	7
Başlıklar	11 Kalın
Metin	9

- Makale değerlendirme sonuçları, sisteme yüklendikten en geç 2 ay sonra e-posta ile yazarlara bildirilecektir. Aksi belirtilmedikçe yazışmalarda birinci yazarın adresi kullanılacaktır.

Tüm yazışmalar ve ilişkiler <http://bilimseldergi.emo.org.tr> web sayfasında açılacak olan alanda elektronik ortamda yapılacaktır.

Bu yazım kuralları, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu ile EMO Bilimsel Hakemli Derginin yayın kurulunca yürütülür.