



## Audio quality enhancement for ETSI TS 102 361 digital mobile radio standard compliant radios using volume optimization and better forward error correction scheme

Ali Ekşim, Hasan Yetik\*

TUBITAK Informatics and Information Security Research Center, Kocaeli, 41470, Turkey

### Highlights:

- Voice quality and intelligibility enhancement in digital mobile radios
- Performance improvement of advanced multi-band excitation speech codec
- Voice volume optimization

### Keywords:

- Digital radio
- Land mobile radio
- Forward error correction
- Advanced multi-band excitation codec

### Article Info:

Received: 01.12.2016

Accepted: 27.05.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416374

### Acknowledgement:

### Correspondence:

Author: Hasan Yetik

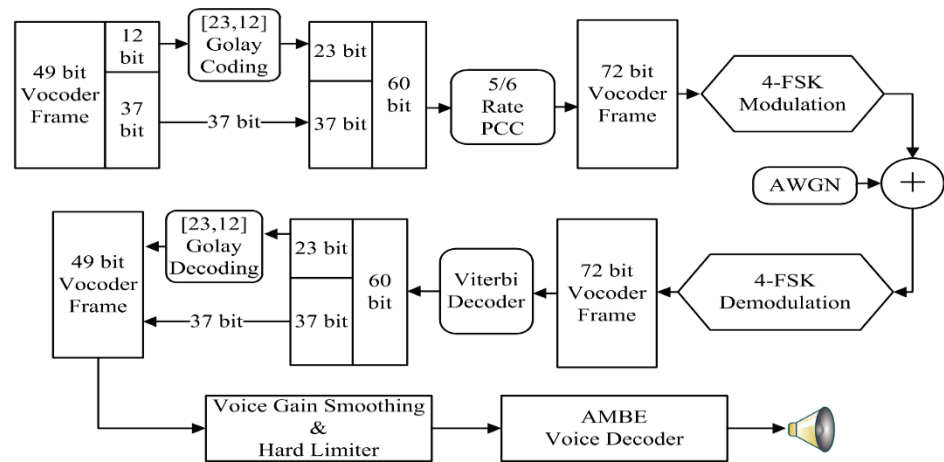
e-mail:

hasan.yetik@tubitak.gov.tr

phone: +90 262 648 1287

### Graphical Abstract

Block diagram of our work is shown below.



### Purpose:

Our purpose in this work is to enhance voice quality and provide deterministic voice quality in all conditions to increase intelligibility and clearness of the transmitted sound in digital radios.

### Theory and Methods:

We proposed and presented two different improvements that are easy to implement and are isolated from the protocol itself and mainly focused on vocoder utilized in the radios. Primary proposition is to replace the block code based forward error correction with a better error correction schemes like convolution codes. Thus, hybrid of Golay and 5/6 punctured convolution codes are utilized instead of using solely block codes. Other proposed method is based on voice volume optimization using vocoder features like gain parameters. Smoothed and hard limited voice gain parameters offer a clear and understandable voice.

### Results:

In this work, we achieved 2.95 dB coding gain with the help of proposed forward error correction. Also, smooth and clear voice reconstruction is guaranteed by volume optimization and voice gain smoothing.

### Conclusion:

Proposed volume optimization and voice gain balancing help the reconstructed voice to have better dynamic range, increased intelligibility and more natural representation of the source voice. By replacing pure block codes with the hybrid of block and convolutional code, we achieved 2.95 dB coding gain for a BER value of  $P_b=10^{-5}$  with respect to the AMBE FEC. Due to the fact that proposed improvements are vocoder oriented and isolated from protocol, they can be applied to any newer and already manufactured digital mobile radios to enhance voice quality. Not only achieved coding gain offers better communication range and voice quality but also it may extend battery life of radios.



## ETSI TS 102 361 sayısal mobil telsiz standardına uyumlu telsizlerin ses kalitesinin ses şiddeti optimizasyonu ve daha iyi ileri hata düzeltme planı kullanılarak artırılması

Ali Ekşim<sup>ID</sup>, Hasan Yetik\*<sup>ID</sup>

TÜBİTAK BİLGEM, Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, 41470 Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Sayısal mobil telsizler için ses kalitesi ve anlaşılabilirliğinin artırılması
- İleri çok bantlı uyarımlı konuşma kodlayıcı performansının iyileştirilmesi
- Ses şiddeti optimizasyonu

#### Makale Bilgileri

Geliş: 01.12.2016

Kabul: 27.05.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416374

#### Anahtar Kelimeler:

Sayısal radyo,  
karasal mobil radyo,  
ileri hata düzeltme,  
ileri çok bantlı uyarımlı  
konuşma kodlayıcı

#### ÖZET

Afet yönetim birimleri, güvenlik güçleri ve üniformalı çalışanların mobil telsiz haberleşme ihtiyaçları arttıkça, çift yönlü karasal mobil telsiz sistemleri analogdan sayısal doğru evrilmiştir. Sayısal telsizler analog telsizlere göre daha iyi ses kalitesi sunsa da konuşma kodlayıcı gerçekleştirme hataları ve yüksek çerçeve hata oranı durumlarında sesin anlaşılabilirlik ve kalitesi düşmektedir. Bu çalışmada ETSI TS 102 361 sayısal mobil telsiz standardı üzerinde çalışmalar yapılarak, sayısal mobil telsizlerin ses kalitesini artırma amacına yönelik iki optimizasyon önerilmiştir. Bunlardan ilki; bit ve çerçeve hata oranlarını düşürecek nitelikte ve AMBE 3600 bps kodlayıcıda yer alandan daha iyi bir hata düzeltme planının kullanılmasıdır. İkincil öneri ise; ses şiddeti optimizasyonudur. Ses şiddeti optimizasyonu ile kodlayıcı çerçeveleri analiz edilerek, kodlayıcı ses şiddetini doyuma ulaştırın ve bozan etkiler azaltılmış veya tamamen ortadan kaldırılmıştır. Sayısal mobil telsizler için önerilen optimizasyonlar, sadece ses kodlayıcı üzerinde uygulanmış, sayısal mobil telsiz standardında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bu sebeple, optimizasyonların uygulanabilirliği oldukça basit ve düşük maliyetlidir. Sonuç olarak, önerilen hata düzeltme planının uygulanması sayesinde 2,95 dB kodlama kazancı sağlanmıştır. Kodlama kazancı ses şiddeti optimizasyonu ile birleştirilerek iletilen sesin kalitesi ve anlaşılabilirliği artırılmıştır.

## Audio quality enhancement for ETSI TS 102 361 digital mobile radio standard compliant radios using volume optimization and better forward error correction scheme

### H I G H L I G H T S

- Voice quality and intelligibility enhancement in digital mobile radios
- Performance improvement of advanced multi-band excitation speech codec
- Voice volume optimization

#### Article Info

Received: 01.12.2016

Accepted: 27.05.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416374

#### Keywords:

Digital radio,  
land mobile radio,  
forward error correction,  
advanced multi-band  
excitation speech codec

#### ABSTRACT

As the mobile radio communication needs of security and emergency services soared, two-way land mobile radio communication systems are evolved from analog to digital. Digital radios have better communication range and noise performance compared to analog counterparts. Although, digital radios provide superior voice quality in most cases, they have hard time to maintain good voice quality and intelligibility in particular conditions, like bad voice encoder-decoder implementation flaws and high frame error rate conditions. In this work, ETSI TS 102 361 Digital Mobile Radio standard is assessed and proposed two optimizations to improve its voice quality for particular conditions in which voice quality deteriorated. First improvement is utilizing better forward error correction coding compared to already in use in AMBE 3600 bps vocoder to improve the overall bit and frame error rate performance. Second improvement is voice volume optimization. By volume control optimization, vocoder frames are evaluated and punch/click noises that saturate volume of vocoder frames are reduced or cleaned. Proposed optimizations are held in vocoder domain and does not intervene the digital mobile radio protocol standards. Due to the proposed optimizations does not interfere with digital mobile radio protocol; they are highly applicable and very cost effective. As a result, we achieved 2.95 dB coding gain using proposed forward error correction. Using proposed forward error correction along with audio volume optimization, digital mobile radio audio quality and intelligibility are enhanced.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: hasan.yetik@tubitak.gov.tr / Tel: +90 262 648 1287

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Profesyonel telsiz iletişim sistemleri geniş çaplı bir değişime uğradığı modern dünyada, analog telsiz haberleşme sistemleri gibi eski sistemler kademeli olarak terk edilmektedir [1]. Haberleşme ekipmanlarından beklenen taktik özelliklerin sayısı ve çeşidinin artmasıyla birlikte geleneksel analog telsiz sistemleri, kullanıcıların isteklerini karşılayamaz hale geldi. Bu yüzden kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayabilecek gelişmiş telsiz haberleşme sistem ve servisleri oluşturuldu [2]. Sayısal Mobil Telsiz (Digital Mobile Radio, DMR) sistemi, Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) tarafından geliştirilmiş ve artan kullanıcı ihtiyaçlarının tümüne yakını karşılayabilecek nitelikte bir sayısal telsiz sistemidir. DMR telsiz sistemleri hâlihazırda yerel güvenlik güçleri, site güvenlik birimleri, üniformalı resmi kurum çalışanları, bakım onarım işçileri gibi birçok sivil ve resmi organizasyonlarca kullanılmaktadır [3]. DMR telsiz sistemi, zaman bölmeli çoklu erişim (Time Division Multiple Access, TDMA) teknolojisini kullanmaktadır. İki zaman aralığı içeren TDMA sistemi 12,5 kHz radyo frekansı taşıyıcı bant genişliği ile analog telsizlerin yerini almaktadır [4]. TDMA teknolojisi sayesinde aynı bant genişliğine sahip olan analog eşdeğerlerine nazaran kanal kapasitesini iki katına çıkaran DMR sistemi, sayısal ses iletimi sayesinde temiz ve kaliteli bir ses haberleşmesi sağlamaktadır. DMR telsiz sistemi kısa mesaj servisi, küresel konumlama sistemi yardımıyla konum edinme servisi, anahtar dağıtımı ve benzeri veri servisleri de sunmaktadır [2]. Bu servisler kullanılarak kullanıcılar arası ses, yazılı mesaj, konum bilgisi ve benzeri bilgi iletimi yapılabilir, kullanıcıların konumları ve aktiviteleri kontrol edilebilir, gerekli durumlarda ağdaki telsizlerin engellenmesi/engelin kaldırılması gibi işlemler yapılabilir. Lin ve arkadaşları tarafından yapılan bir uygulamada belediye ait olan DMR ağına bağlı telsizler aracılığıyla DMR veri servisleri kullanılarak toplu taşıma araçlarının takip ve konumlama işlemleri yürütülebildiği raporlanmıştır [5]. Sayısal telsiz sistemlerinde yazı, konum ve benzeri sayısal verilerin iletimi, sistem haberleşme bant genişliği çok düşük olsa bile kolaydır. DMR sistemi sadece veri iletimi değil, aynı zamanda ses iletim servisleri de sunmaktadır. Sesi, sayısal işaret işleme teknikleri kullanarak işleyebilmek için sayısal olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Sayısallaştırılan ses sinyallerinin sayısal telsizler ile iletimi yüksek bant genişliği gerektirmektedir. DMR sistemi tüm sinyalleşme işlemleri dâhil tek zaman aralığı için 4800 bps veri hızına sahiptir. Bu tip düşük veri hızına sahip kanalda ses iletimi için ses sıkıştırma tekniklerinin kullanılması zorunludur. DMR telsiz standardında ses iletim soketi için 3600 bps veri bant genişliği ayrılmıştır. Ses için ayrılan bandın tipik olarak 2450 bps olan kısmı ses iletimi, geri kalan 1150 bps ise ileri hata düzeltme (Forward Error Correction, FEC) için kullanılmaktadır. DMR telsiz standardı herhangi bir ses sıkıştırma yahut konuşma kodlama (vocoder) mekanizmasının kullanımını zorunlu tutmamasına rağmen,

DMR derneği (Digital Mobile Radio Association, DMRA) Digital Voice Systems, Inc. (DVSI) şirketince sunulan AMBE 3600 bps [6] vocoder tipini tüm DMR telsizlerinin ortak çalışabilmeleri için ortak vocoder olarak seçmiştir. DMRA tarafından 2006 yılında alınan bu karar DMR ses iletim soketi ile tam uyumlu olup sistemin çalışmasında negatif yönlü bir etki yaratmamıştır [7]. DMR telsizlerinde kullanılmak üzere ileri çok bantlı uyarımlı konuşma kodlayıcı (Advanced Multi-Band Excitation, AMBE) haricinde başka vocoder tipleri de vardır. Ancak bu kodlama tipleri sınırlı sayıda marka ve modelde yer almaktadır ve yaygın olarak kullanılmamaktadır. AMBE vocoder; bir çeşit konuşma sıkıştırma ve kodlama tekniğidir. Bu kodlama tekniğinde sayısallaştırılan ses örnekleri kodlayıcı bloğu tarafından sıkıştırılmış bit dizisine çevrilir. Kod çözücü bloğu ise sıkıştırılmış bit dizilerini işleyerek sıkıştırılmış sesi geri oluşturularak sayısal ses örnekleri olarak çıktı oluşturur. Ses sıkıştırma tekniklerinde sesin tabiliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri bit oranıdır [8]. DMR telsiz standardında bir ses servisine ait zaman aralığı süresinde 60 ms uzunluğunda ses iletimi yapılması zorunludur. Bu 60 ms ses verisi üç adet 20 ms'lik vocoder çerçevelerinden ve FEC verisinden oluşmaktadır. DMR ses servisi, ses iletiminde ses süper çerçevelerini kullanarak iletim yapmaktadır. Süper çerçeve 6 adet zaman aralığından oluşan bir yapıdır ve toplamda 360 ms'lik ses iletimine olanak sağlar. 3600 bps bit oranına sahip AMBE vocoder yukarıda verilen şartlar altında sorunsuz çalışabilmektedir.

İdeal durumda sayısal telsiz sistemleri analog telsizlerden daha kaliteli ses haberleşmesi sunar. Ancak kablosuz haberleşme kanalında oluşan bozucular sebebiyle, sayısal telsizlerin ses kalitesi düşebilmektedir. AMBE 3600 bps vocoder her 49 bit uzunluğundaki sıkıştırılmış konuşma verisini 23 bitlik FEC ile korumasına karşın, alıcıdaki sinyal gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) 9,57 dB altına indiği zamanlarda iletilen veri hatalarından dolayı verimli bir şekilde geri oluşturulamaz ve bilgi kaybı yaşanabilir. Ses iletiminde SNR değerinin düşük olması, hem ses kalitesini hem de haberleşme menzili negatif yönde etkilemektedir. FEC koruması altındaki veriler gürültülü ortamlarda bozularak iletirse dahi kullanılan FEC tarafından düzeltilerek kayıplar engellenebilir [9]. Dolayısıyla FEC optimizasyonu, paket kayıplarını azaltmada ve ses kalitesini arttırmada büyük önem arz etmektedir [10, 11]. DMR telsizlerinde iletilen sesin kalitesini ve haberleşme menzili ETSI TS 102 361 standardında herhangi bir değişiklik yapmadan arttırmak için ses servisinde kullanılan FEC yapısı geliştirilmelidir. Haberleşme menzili artırma amaçlı FEC geliştirmesi harici evrimsel algoritmalar [12] ve uyarlamalı veri dizisi üretme yöntemleri [13] literatürde mevcuttur, ancak bu metotlar DMR telsiz haberleşme standardına uygulanabilir yöntemler değildir. Bu çalışmada, AMBE 3600 bps vocoder kapsamında yer alan FEC yapısından daha üstün FEC yapıları üzerinde çalışılmıştır. Literatür taraması sonucunda, FEC çalışmalarımız Turbo kodlar, katlamalı kodlar (convolutional codes) ve blok kodlar üzerinde

yoğunlaşmıştır. Yüksek gürültü yoğunluğuna sahip haberleşme kanallarında katlamalı kodlama yöntemi hata olasılığı bakımından blok kodlamadan daha iyi performans göstermektedir [14]. Turbo kodlama, katlamalı kodlardan daha fazla kodlama kazancı sağlasa da, 49 bit gibi kısa veri paketleri için kullanımı uygun değildir [15, 16]. Örneğin yüksek hızda veri paketi indirme bağlantısı (High Speed Downlink Packet Access, HSPDA) haberleşme sisteminde kısa olan kontrol mesajları katlamalı kodlar ile korunurken, uzun olan veri paketleri Turbo kodlar ile korunur [17]. Varolan FEC yapısından daha iyi SNR eşik değerine sahip, ses kalitesini ve haberleşme menziline arttıran, AMBE 3600 bps vocoder FEC yapısının yerini alabilecek nitelikte olan [23, 12] Golay kod [18, 19] ve 5/6 delikli katlamalı koddan (Punctured Convolutional Code, PCC) [20] oluşan melez bir FEC planı önerilmiştir. Önerilen FEC planı AMBE 3600 bps vocoder'da hâlihazırda kullanılan FEC planına karşın 2,95 dB kodlama kazancı sağlamıştır. Ayrıca, bazı DMR telsiz modellerinde, vocoder yazılımında yer alan gerçekleştirme hataları ve donanımsal bazı hatalar sebebiyle ses kalitesi düşebilmektedir. Bu tip hatalar daha çok üreticilerin düşük fiyatlı ürünlerinde karşılaşılmaktadır. Örneğin bir DMR telsiz modelinde yer alan vocoder sesi en şiddetli ses seviyesinden başlayarak kodlamaktadır. Diğer bir modelde ise mikrofon otomatik ses şiddeti kontrolcü birimi görevini doğru yapamayarak ses dinamik aralığını kısıtlamaktadır. Beklenmeyen anda gelen yüksek şiddetli ses çerçeveleri yahut çok hızlı ses şiddeti artışları durumunda çıktı ses örneklerinde kırpmalar oluşturmaktadır. Seste meydana gelen bu kırpmalar seste bozulmaya yok açar, ancak hızlı limitleme mekanizmaları sayesinde kırpmalar sebebiyle oluşan pop/klik gürültüleri ile birlikte diğer bozulmalar engellenebilir [21]. Ses şiddeti optimizasyonuna ek olarak, ses şiddeti profilini yumuşatmak ve ani artış ve düşüşleri engellemek amacıyla 3 elemanlı kayan ortalama filtresi önerilmiştir. Filtrelenmiş ses şiddeti profili sayesinde ses dinamik aralığı düzenlenmiş ve anlaşılabilirlik artırılmıştır. DMR telsiz sistemlerini bu hatalardan kurtarmak yahut bu tip hataların oluşması durumunda ses kalitesinden ödün vermemek için ses şiddeti optimizasyonu ve ses şiddeti filtreleme prosedürü geliştirilmiştir. Araştırma sırasında DMR telsizlerde en çok kullanılan vocoder olan AMBE 3600 bps vocoder üzerinde çalışılmıştır. Önerilen değişiklik ve eklemelerin tamamı AMBE 3600 bps vocoder ile ilintilidir. DMR standardına herhangi bir şekilde müdahale edilmemiştir. Makalenin ikinci bölümünde FEC optimizasyonu, ses şiddeti optimizasyonu ve filtreleme yöntemleri, üçüncü bölümde önerilen yöntemlerin uygulanmasından elde edilen bulgular anlatılacaktır. Son bölümde ise makalenin ortaya çıkardığı sonuçlar özetlenecektir.

## 2. YÖNTEM (METHOD)

### 2.1. FEC Optimizasyonu (FEC Optimization)

Sayısal telsizler bant kullanımını en aza indirmek için, düşük bit oranlı vocoder yöntemleri kullanılır. Sıkıştırılmış sese ait her bir bit değeri, sıkıştırılan sese ait büyük özellikleri içinde barındırmaktadır. Sıkıştırılmış ses 668

verisinde bulunan bitler örneklenmiş ham ses verisindeki bit değerlerinden daha önemlidir ve sıkıştırılmış ses verileri bit hatalarına karşı çok duyarlıdır. Bazı durumlarda sıkıştırılmış sesteki tek bir bit değerinin hatalı gelmesi bile sesin yanlış oluşturulmasına sebebiyet verebilmektedir. FEC; iyi tanımlanmış, son derece fazla araştırılmış ve geliştirilmiş bir hata sezim ve düzeltme yöntemidir. FEC kodlayıcısı mesaj verisini kullanarak, mesaj verisine ek bir FEC bit dizisi oluşturur ve mesaja ekler. FEC kod çözücüsü ise mesaja eklenen bit hatalarını bulur ve düzeltir. Farklı FEC tipleri farklı sayılarda hatalı bitleri bulup düzeltebilir. Eğer alıcı tarafından alınan veri paketinde kullanılan FEC tipinin düzeltebileceği bit sayısından fazla hata varsa, FEC kod çözücü alınan paketi doğru olarak geri oluşturamaz [8]. Bu gibi durumlar FEC performansını düşürür dolayısıyla telsiz haberleşmede ses kalitesi de kötüleşir hatta hiç ses çıktısı verilemeyebilir. AMBE 3600 bps oranına sahip vocoder, SNR değerinin yüksek olduğu, bir başka deyişle hata oranının düşük olduğu, haberleşme kanalında temiz ve kaliteli bir ses sunmaktadır. Makalede betimlenen çalışma DMR telsiz sistemlerinde ses kalitesini artırma ihtiyacından doğmuştur. DMR ağına uzak mesafede yer alan telsiz kullanıcılarının daha temiz ses haberleşmesi yapabilmesini sağlamak amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Alıcı ve verici arasındaki mesafe arttıkça gönderilen sinyal zayıflayacağı için SNR seviyesi düşmektedir. SNR probleminin çözümü için telsiz alıcının gürültü bağımsızlığı veya haberleşme menzili artırılabilir. Haberleşme menzili ve gürültü bağımsızlığı artırımı için, haberleşme alanındaki engeller kaldırılabilir, telsiz spektrumu temizlenebilir, verici çıkış gücü artırılabilir ya da daha gelişmiş bir FEC yapısı kullanılabilir. Yukarıda belirtilen önlemlerden çoğunun gerçekleştirilmesinin imkânsız veya zorlu olmasından ötürü, FEC yapısının geliştirilmesi tek uygulanabilir seçenek olarak kalmaktadır. DMR sinyalleşme protokolü ses servisindeki vocoder çerçeveleri üzerinde herhangi bir işlem yapmadan vocoder çerçevelerini çözme işiyle yükümlü donanım ya da yazılım bloğuna aktarır. Protokol ve ses servisinde yer alan vocoder arasındaki bu izolasyon FEC iyileştirme ve uygulama çalışmalarını kolaylaştırmıştır. AMBE 3600 bps vocoder sıkıştırılacak sesleri 20 ms'lik bölümlere ayırır ve sıkıştırma sonrasında her 20 ms'lik ses 49 bitten oluşan bir veri ile ifade edilir ve buna vocoder çerçevesi denir. Her vocoder çerçevesine hata düzeltme amaçlı 23 FEC biti eklenir. 23 FEC biti bir adet [24, 12] Golay kodu ve bir adet [23, 12] Golay kodundan oluşur. Bu FEC yapılandırmasında hata düzeltme işlemi sadece hataya en duyarlı olan 24 bit için uygulanır. Diğer bitler, korunan bitlere oranla daha az hata duyarlı olduğu için korunaksız olarak iletilir [8]. [23, 12] Golay kodu için en büyük olabirlikli kod çözücü kullanıldığında kod sözcüğü hata oranı (Codeword Error Rate, CWER) Eş. 1'de verilmiştir.

$$CWER = 1 - \sum_{i=0}^3 \binom{23}{i} p^i (1-p)^{23-i} \quad (1)$$

Burada  $p$ , kanalın sembol hata oranıdır ve toplanır beyaz Gauss gürültülü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) kanalda sert karar hata olasılığı Eş. 2'de verilmiştir.

$$p = Q\left(\sqrt{\frac{24E_b}{23N_0}}\right) \quad (2)$$

Burada  $E_b/N_0$ , bit başına düşen enerjinin gürültü gücü spektral yoğunluğuna oranı ve  $Q(\cdot)$  fonksiyonu standart normal dağılımın kuyruk olasılığıdır. Orta ve yüksek SNR değerleri için bit hata oranı Eş. 3'de verilmiştir.

$$P_b \approx \frac{7}{23} CWER \quad (3)$$

[24, 12] Golay kodu için orta ve yüksek SNR değerleri için bit hata oranı Eş. 4'de verildiği şekilde elde edilir.

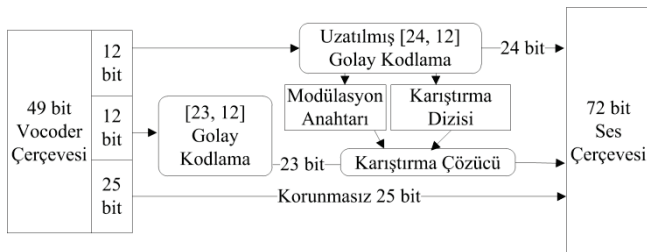
$$P_b \approx 0.26 * CWER \quad (4)$$

Kodlama oranı  $R_c$  olmak üzere ikili faz kaymalı anahtarlama (Binary Phase Shift Keying, BPSK) veya dörtlü faz kaymalı anahtarlama (Quaternary Phase Shift Keying, QPSK) modülasyona sahip katlamalı kodlara yumuşak kararlı Viterbi kod çözme uygulandığında AWGN kanalda bit hata oranı (Bit Error Rate, BER) üst sınırı Eş. 5'te verilmiştir [22].

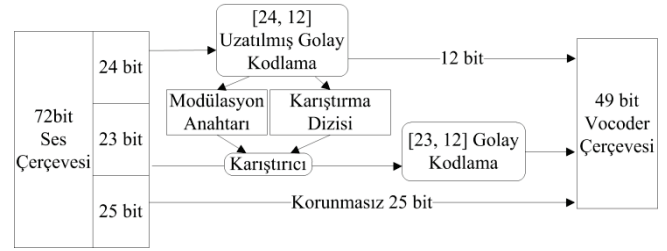
$$P_b \leq \frac{1}{2} \sum_{d=d_{free}}^{\infty} w_d Q\left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0} R_c d}\right) \quad (5)$$

Burada  $d_{free}$ , katlamalı kodun en düşük sıfır olmayan Hamming uzaklığını ve  $w_d$ , kodun trellisdeki doğru yoldan sapan tüm yolların toplamsal Hamming ağırlığını göstermektedir. Diğer modülasyonlar için Eş. 5'te verilen üst sınıra o modülasyona uygun  $E_b/N_0$  değeri yazılarak kullanılan katlamalı kodun AWGN kanallardaki hata üst sınırı elde edilir.

Kodlamalara ek olarak, AMBE 3600 bps vocoder standardı gereğince ilk Golay kodu parametreleri kullanılarak modülasyon anahtarı ve karıştırma dizisi elde edilir. Elde edilen bu anahtar ikinci Golay kodundan önce veriye uygulanır, ardından karıştırma dizisi ile bit dizisi karıştırılarak Golay kodlama yapılır ve gönderime hazır hale gelir. AMBE 3600 bps vocoder'a ait FEC kodlayıcı ve kod çözücü sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



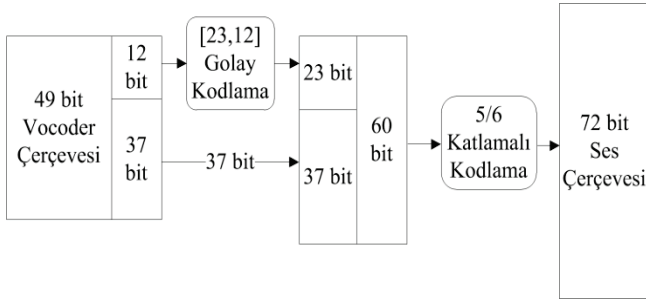
**Şekil 1.** AMBE 3600 bps vocoder'ın FEC kodlayıcı blok yapısı  
(AMBE 3600bps vocoder FEC scheme encoder block structure)



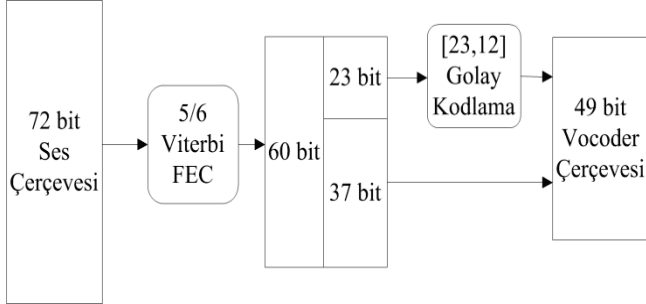
**Şekil 2.** AMBE 3600bps vocoder'ın FEC kod çözücü blok yapısı  
(AMBE 3600bps vocoder FEC scheme decoder block structure)

Vocoder'da yer alan hata düzeltme yapısında çerçevenin tamamını korumak yerine hata duyarlılık seviyelerine göre seçilmiş 24 bitten oluşan kısmı korunurken geriye kalan 25 bit herhangi bir hata sezme yahut koruma mekanizması olmadan gönderilmektedir. Sıkıştırılmış ses verisinde bulunan her bit az veya çok öneme sahiptir ancak hiç biri tamamen önemsiz değildir. Her bit geri sentezlenecek ses için kullanılacak önemli bilgiler içerir ve ses kalitesini az ya da çok etkiler. Çerçeve hata oranının (Frame Error Rate, FER) %1 altında olması durumunda ses kalitesinde ve anlaşılabilirliğinde ciddi sorunlar oluşmamaktadır. Buna karşın çerçeve hata oranı %1 değeri aşması durumunda ses kalitesi çığ etkisiyle düşmektedir. AMBE 3600 bps vocoder hata düzeltme planında da verildiği üzere hata düzeltme işleminin ikincil Golay kodu, modülasyon anahtarı ve karıştırma dizisi zinciri ile modüle edilmektedir. Zincirin ilk halkasında yer alan uzatılmış Golay kodu tarafından korunan 12 bit verinin hatalı çözülmesi durumunda ardınca gelen kod çözme halkalarına negatif yönde zincirleme etki edeceği için korunan 24 bitin tamamı kaybedilebilmektedir. Bu zincirleme etki haberleşme menziline düşürmekte ve anlaşılır bir konuşma için gerekli SNR sınırını arttırmaktadır.

Hâlihazırda kullanılan DMR telsiz sistemleri AWGN kanalda teorik olarak 9,57 dB üzerindeki SNR değerlerinde temiz bir ses haberleşmesi sunabilmektedir. Bu değer, MATLAB kullanılarak AWGN kanal modelinde dörtlü frekans kaymalı anahtarlama (4-Frequency Shift Keying, 4-FSK) modülasyon ile yapılan benzetimlerden elde edilmiştir. Önerilen FEC planında hataya en duyarlı 12 bitten oluşan kısma [23, 12] Golay kodlama uygulanarak vocoder çerçevesi 49 bitten 60 bite çıkartılmıştır. Sonrasında 5/6 delikli katlamalı kod kullanılarak vocoder çerçevesi 60 bitten 72 bite ulaşmıştır. Kullanılan delikli katlamalı kod uzunluk kısıtı 10 ve üretic polinomu [1633 1365 1117] olan 1/3 katlamalı kod kullanılarak elde edilebilir [23]. Delikli katlamalı kod üretmek için kullanılan kodun serbest uzaklığı 20'dir. Seçilen bu kod BER'in  $1 \times 10^{-5}$  değerine 3,69 dB'de ve BER'in  $1 \times 10^{-9}$  değerine de 5,126 dB değerinde ulaşır [23]. Benzetimler MATLAB kullanılarak AWGN kanal modelinde 4-FSK modülasyon ile DMR protokolünde belirtilen yönergeler, serpiştirici ve karıştırıcı gibi tüm ayrıntılara dikkat edilerek yapılmıştır. Önerilen vocoder hata düzeltme planı kodlayıcı ve kod çözücü olarak sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 3.** Önerilen FEC kodlayıcı blok yapısı  
(Proposed FEC scheme encoder block structure)

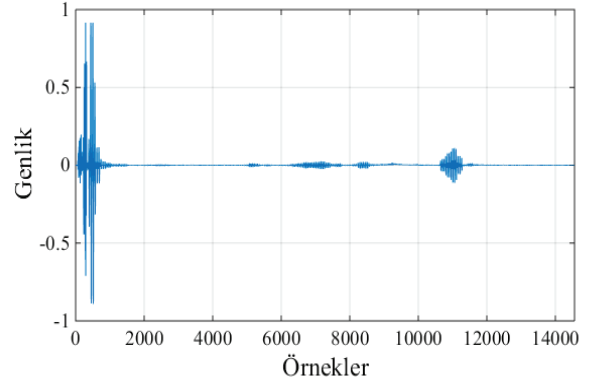


**Şekil 4.** Önerilen FEC kod çözücü blok yapısı  
(Proposed FEC scheme decoder block structure)

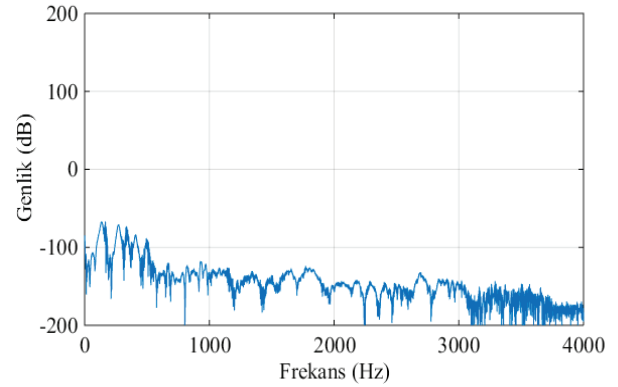
## 2.2. Ses Şiddeti Kaynaklı Problemlerin Tespiti (Audio Volume Based Problems Detection)

Farklı marka modellere ait bir takım DMR telsiz cihazlarından alınan ses verileri incelenmiş ve bazı sorunlar saptanmıştır. Hataya rastlanan ünitelerin tamamı AMBE 3600 bps vocoder kullanmaktadır ve hepsinde vocoder, yazılımsal olarak gerçekleştirilmiştir. Bu tip radyolardan alınan ve çözümlenen AMBE 3600 bps ses kayıtlarında, sese dinamik aralık sıkışması (dynamic range compression) ve gürültü problemleri ile karşılaşmıştır. Ayrıca konuşma sırasında ses şiddetinde dalgalanmanın olduğu da tespit edilmiştir. Bu problemlerin kaynağında AMBE 3600 bps vocoder gerçekleştirilmesinde hatalar ve mikrofon otomatik kazanç kontrolcüsünde (Automatic Gain Control, AGC) yapılan yazılım yahut donanımsal hataların olduğu öngörülmüştür.

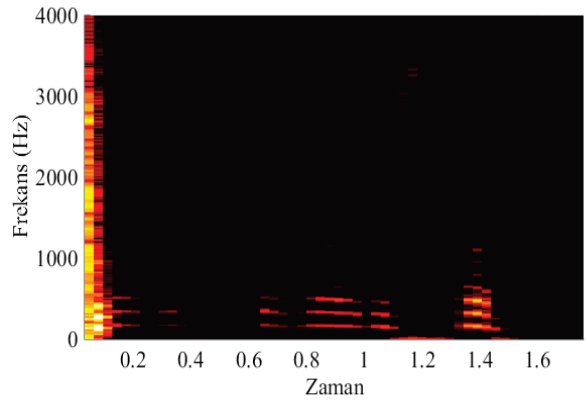
Yukarıda belirtilen hatalara çözüm bulmak amacıyla sorunlu telsizler kullanılarak örnek AMBE 3600 bps vocoder çerçeveleri alınarak üzerinde çalışılmıştır. Binlerce sorunlu telsiz konuşması üzerinde yapılan çalışma sonucunda, konuşma başlangıcında yer alan bir dizi ses çerçevesinin ses şiddeti parametresinin doyum noktasında olduğu, ardından gelen çerçevelerde ise dalgalı olarak devam ettiği bulunmuştur. Sesin geri oluşturulması sırasında doyuma ulaşmış ses şiddetine sahip çerçevelerin en başta dizi halinde yahut beklenmedik anlarda varlık göstermesi çıktı ses dosyasının dinamik aralığını sıkıştırarak bilgi kaybına yol açmaktadır. Konuşma başlangıcında yer alan doymuş ses şiddetine sahip örnek ses dalgası Şekil 5'te, güç spektrum yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) Şekil 6'da ve spektrogramı ise Şekil 7'de verilmiştir.



**Şekil 5.** Doyma ulaşmış ses şiddeti sebebiyle dinamik aralığı daralmış örnek ses dalgası  
(Example waveform of voice with a compressed dynamic range due to the saturated volume)



**Şekil 6.** Şekil 5'te verilen sesin güç spektrum yoğunluğu  
(PSD of the voice given in Figure 5)

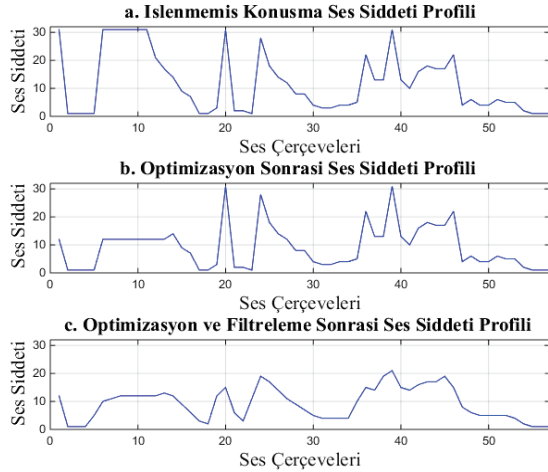


**Şekil 7.** Şekil 5'te verilen sesin spektrogramı  
(Spectrogram of the voice given in Figure 5)

## 2.3. Ses Şiddeti Optimizasyonu (Audio Volume Optimization)

Şekil 5'de görülebileceği üzere konuşmanın ilk anlarında doyuma ulaşmış olan ses şiddeti, konuşmanın devamında yer alan seslerin dinamik aralığını daraltarak duyulabilir seviyenin altına çekerek bastırmıştır. Doyum sebebiyle düzgün çalışmayan hoparlör AGC mekanizması kendini toparlayıp dinamik aralığı tekrar düzenleyene dek olan konuşmalar kaybedilmektedir.

Kullanıcı bu tip konuşmaları duymak için telsizin sesini şiddetini artırmak zorundadır, ancak hoparlör AGC, konuşmanın ses şiddetine ayak uydurabildiği durumlarda ise telsizin ses çıkış şiddeti rahatsız edici seviyelere çıkmaktadır. Telsiz kullanıcısının sürekli ses ayarı ile uğraşması onun görev ve yükümlülükleri arasında değildir. Hatayı ortadan kaldırarak kullanıcı üzerindeki yükü azaltmak üzere ses şiddeti optimizasyonu çalışması yapılmış, beklenmedik zamanlarda gelen doyuma ulaşmış ses çerçevelerinin ses şiddet değeri konuşmanın ortalama ses şiddeti değeri ile değiştirilmiştir. Optimizasyona ek olarak 3 elemanlı kayan çerçeve filtresi ile de ses şiddeti profili yumuşatılmıştır. Ses optimizasyonu ve filtreleme işlemine ilişkin önerilen algoritma Tablo 1’de verilmiştir. Ses şiddeti optimizasyonu vocoder çerçevelerinde yer alan ses kazanç parametresi kullanılarak yapılmıştır. Sorunlu örnek bir ses çerçevesine ait ses şiddeti profili Şekil 8a’da, optimizasyonu sonrası ses şiddeti profili ise Şekil 8b’de ve filtreleme sonrası ses şiddeti profili ise Şekil 8c’de verilmiştir.

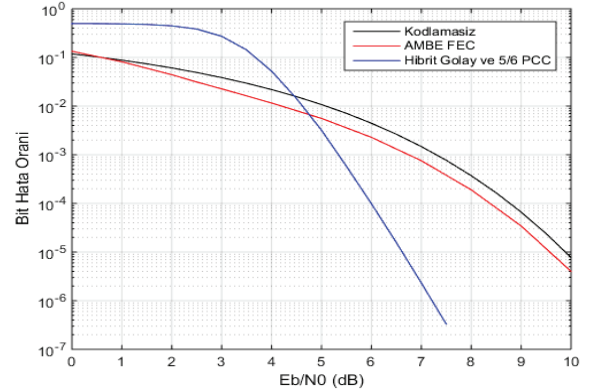


**Şekil 8.** İşlenmemiş konuşmaya ait ses şiddeti profili a), optimizasyon sonrası ses şiddeti profili b) ve optimizasyon ve filtreleme sonrası ses şiddeti profili c) (Unprocessed voice waveform(a), volume profile after volume optimization (b) and volume profile after volume optimization and filtering (c))

### 3.SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Benzetimler sonucunda önerilen FEC planı, standartta yer alan FEC planına BER’in  $P_b=10^{-5}$  değerinde üstünlük kurmaktadır. BER performans benzetim sonuçları Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 9’da görüldüğü üzere önerilen FEC planı, standart FEC planının  $P_b=10^{-5}$  kıstasında 9,57 dB SNR değerinde sergilediği performansı 6,62 dB SNR değerinde göstermektedir. Bu 2,95 dB SNR kazancı DMR sistemine ek haberleşme menzili ve artırılmış ses kalitesi olarak yansımaktadır. Ayrıca Şekil 9’da siyah eğri ile verilen grafik kodlama kullanılmadan iletim için elde edilmiş benzetim sonucudur. Şekilde de görüldüğü üzere AMBE 3600 bps FEC yapısı kaynak kodlamasının kullanılmadığı duruma göre en iyi durumda 0,32 dB

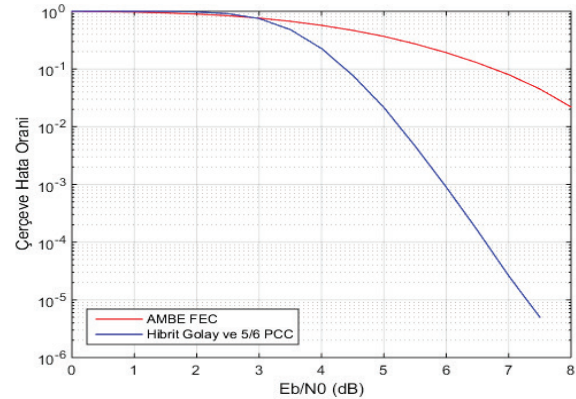
kodlama kazancı sağlayabilmiştir.  $E_b/N_0$  seviyesinin 4 dB ve altına indiği durumlarda ise AMBE 3600 bps FEC kodlama kazancı artan hızla azalır.



**Şekil 9.** Kodlamasız iletim, AMBE 3600 bps vocoder FEC planı ve önerilen FEC planının bit hata oranı performans karşılaştırması

(BER performance comparison of uncoded, AMBE 3600bps vocoder FEC and proposed FEC schemes)

Önerilen FEC yapısı BER’de olduğu gibi FER bakımından da AMBE 3600 bps FEC yapısından üstündür. FER performans benzetim sonuçları Şekil 10’da verilmiştir.



**Şekil 10.** AMBE 3600 bps vocoder FEC planı ile önerilen FEC planının çerçeve hata oranı performans karşılaştırması (FER performance comparison of AMBE 3600 bps vocoder FEC and proposed FEC schemes)

Dalga formu, güç spektrum yoğunluğu, spektrogramı ve ses şiddeti profili sırasıyla Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8a’da verilen sorunlu örnek ses dosyasının ses şiddeti optimizasyonu ve filtreleme sonrasındaki ses dalga formu, güç spektrum yoğunluğu, spektrogramı ve ses şiddeti profili sırasıyla Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 8c’de verilmiştir. Ses şiddeti üzerinde yapılan tüm optimizasyonlar, vocoder gerçekleme hatalarını engellemek amacıyla yapılmıştır. Şekil 5’te verildiği üzere bozuk ve dinamik aralığı sıkıştırılmış olarak alınan sesin şiddeti üzerinde yapılan optimizasyonlar aracılığıyla dinamik aralığı genişletilerek anlaşılır ve temiz bir ses haline getirilmiştir.

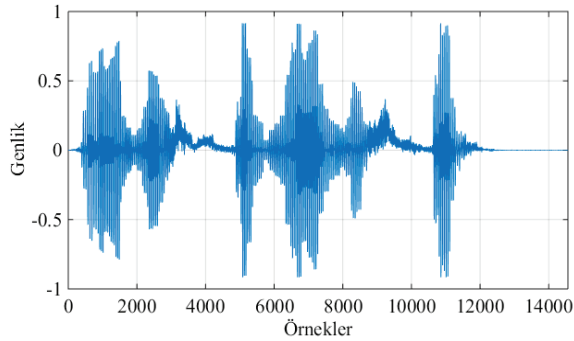
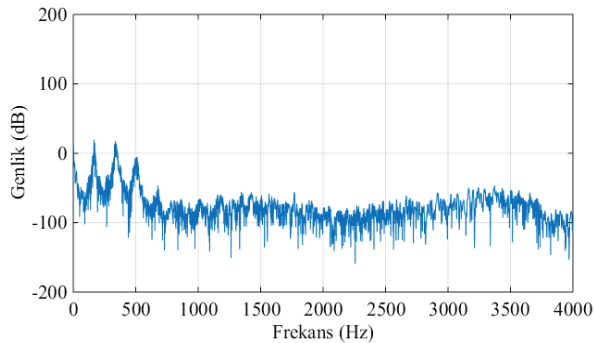
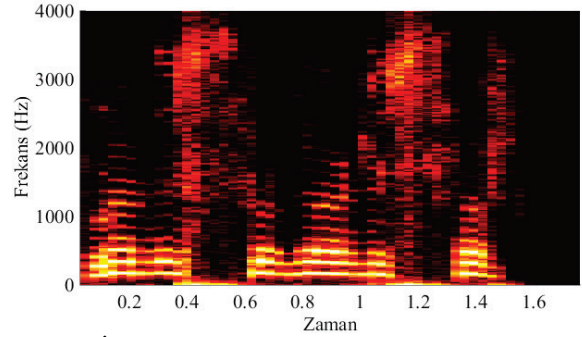
**Tablo 1.** Ses şiddeti optimizasyonu ve filtreleme algoritması (Volume gain optimization and filtering algorithm)

```

♦ Başlangıç Koşulları
çerçeve_kazancı = 0
yeni_kazanç = 0
ortalama_kazanç = 0
çerçeve_sayısı = 0
eşik_kazanç = 31
önceki_kazanç1 = 0
önceki_kazanç2 = 0

♦ Optimizasyon ve Filtreleme
if çerçeve_kazancı > eşik_kazanç
    yeni_kazanç = ortalama_kazanç
else
    if vocoder_çerçevesi != sessizlik_çerçevesi veya vocoder_çerçevesi != ton_çerçevesi
        yeni_kazanç = (önceki_kazanç2 + önceki_kazanç1 + çerçeve_kazancı) / 3
        önceki_kazanç2 = önceki_kazanç1
        önceki_kazanç1 = çerçeve_kazancı
        ortalama_kazanç = (ortalama_kazanç * çerçeve_sayısı + yeni_kazanç) /
        (çerçeve_sayısı + 1)
        çerçeve_sayısı = çerçeve_sayısı + 1
    end
end
Şu anki vocoder çerçevesinin kazanç bitlerini yeni_kazanç ile değiştir
Vocoder çerçevesini işlenmek üzere ver

```

**Şekil 11.** Optimizasyon ve filtreleme sonrası ses dalga formu  
(Voice waveform after volume optimization and filtering)**Şekil 12.** Optimizasyon ve filtreleme sonrası ses güç spektrum yoğunluğu  
(Voice PSD after volume optimization and filtering)**Şekil 13.** İyileştirme ve filtreleme sonrası ses spektrogramı  
(Voice spectrogram after volume optimization and filtering)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

DMR telsiz sistemlerinde kullanılan AMBE 3600 bps vocoder üzerinde yaptığımız çalışmamızda, ses şiddeti optimizasyonu ve filtreleme sonucunda daha dengeli bir ses şiddeti profiline sahip olan seslerin dinamik aralığı genişlemiştir. İşlenmiş seslerin işlenmemiş hallerine göre hem algısal hem de niteliksel anlamda artırılmış ses kalitesi sunduğu görülmüştür. Bu optimizasyon ile bazı telsizlerde karşılaşılan mikروفon AGC ve patlama (burst) demodülasyon kaynaklı ses kalite problemleri yazılımsal olarak çözülmüştür. Önerilen [23, 12] Golay ve 5/6 delikli katlamalı kod melezli olan bir FEC planı ile hâlihazırda standartta yer alan FEC planına kıyasla 2,95 dB'lik  $E_b/N_0$  kodlama kazancı sağlanmıştır. Önerilen FEC planı, standart FEC planına oranla gösterdiği üstün performans ile ses



bilgileri ve çerçeveleri daha iyi korunmuş, spektrumun kalabalık ve gürültülü olduğu durumlarda daha iyi ses kalitesi elde edilmiştir. Elde edilen kodlama kazancı haberleşme menzili artışını da beraberinde getirmiştir. DMR telsiz ses kalitesi artırılması için önerilen yöntemlerin tamamı standart tarafından iyi tanımlanmış ancak herhangi vocoder tipinin şart koşulmadığı ses servisi için geçerlidir. Ayrıca tüm değişiklikler vocoder bloğunda sınırlandırılarak DMR standardına aykırı düşmeden geliştirme ve düzeltme yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu yönüyle önerilen optimizasyonlar kolay uygulanabilir, yüksek işlem gücü gerektirmeyen, düşük maliyetli ses kalitesi artırma yöntemleridir. AMBE 3600 bps vocoder, DMR'a ek olarak sayısal özel mobil radyolarda (Digital Private, Mobile Radio, dPMR), MotoTRBO™ iki yönlü sayısal radyolarda, APCO-P25 telsizlerde (APCO Project 25, APCO-25) ve NXDN™ (Next Generation Digital Narrowband, NXDN) telsizlerde de kullanılmaktadır. Makalede önerilen yöntemler bu sistemlere de kolaylıkla uygulanabilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Lee W.C.Y., Mobile Communications Engineering, Mc Graw-Hill, 1997.
2. DMR voice and Generic Services and Facilities, ETSI TS 102 361-2 V1.2.6, 2007.
3. Onali T., Sole M., Giusto D. D., DMR Networks for Health Emergency Management: A Case Study, International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, İstanbul-Türkiye, 2151-2156, 4-8 Temmuz, 2011.
4. DMR Air Interface (AI) Protocol, ETSI TS 102 361-1 V1.4.5, 2007.
5. Lin S.H., Chen C.Y., Wu E.H.K., Chan C.Y., Jou E., A New e-Bus System Using Two-Way Government Radio Networks, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 8 (1), 51-60, 2016.
6. AMBE-3003™ Vocoder Chip, One IC chip-3 Vocoder Channels Kullanım Klavuzu, Mart, 2011.
7. DMR Association. Benefits and Features of DMR. [http://www.dmrassociation.org/downloads/documents/DMR-Association-White-Paper\\_Benefits-and-Features-of-DMR\\_160512.pdf](http://www.dmrassociation.org/downloads/documents/DMR-Association-White-Paper_Benefits-and-Features-of-DMR_160512.pdf). Yayın tarihi 2012. Erişim Tarihi: Haziran 22, 2016.
8. Hardwick J. C., Half-rate Vocoder, A.B.D. Patent 8 359 197 B2, Ocak 22, 2013.
9. Lizhong W., Muqing W., Lulu W., Mojia L., An Adaptive Forward Error Control Method for Voice Communication, International Conference on Networking and Digital Society, 186-189, Wenzhou-Çin, 30-31 Mayıs, 2010.
10. McLaughlin M.J., Rasky P.D., Speech and Channel Coding for Digital Land-Mobile Radio, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 6 (2), 332-345, Şubat 1988.
11. Ru-wei L., Chang-chun B., Research Advance in Packet Loss Processing Techniques for VoIP, Journal on Communications, 28 (6), 103-110, Haziran 2007.
12. Yıldırım F., Özdemir S., Improving Coverage in Wireless Sensor Networks Using Multi-objective Evolutionary Algorithms, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (2), 143-153, 2015.
13. Arslan S., Ökdem S., Adaptive Data Sequence Generator for Noisy Signals in Low Rate Wireless Personal Area Networks, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (3), 371-380, 2015.
14. Simon M.K., Hinedi S.M., Lindsey W.C., Digital Communication Techniques: Signal Design and Detection, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey A.B.D., 1995.
15. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P., Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes, IEEE International Conf. Commun., 1064-1070, Cenova-İtalya, 23-26 Mayıs, 1993.
16. Berrou C., The Ten-Year-Old Turbo Codes Are Entering Into Service, IEEE Communication Magazine, 41 (8), 110-116, Ağustos 2003.
17. 3GPP, Multiplexing and Channel Coding (FDD), 3GPP TS25.212, Versiyon 6.8.0, Haziran 2006.
18. Reviriego P., Liu S., Xiao L., Maestro J. A., An Efficient Single and Double-Adjacent Error Correcting Parallel Decoder for the (24,12) Extended Golay Code, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 24 (4), 1603-1606, Nisan 2016.
19. Peng X.H., Farrell P.G., On Construction of the (24, 12, 8) Golay Codes, IEEE Transactions on Information Theory, 52 (8), 3669-3675, Ağustos 2006.
20. Moon H., Cox D.C., Performance of Unequally Punctured Convolutional Codes, IEEE Transactions on Wireless Communications, 8 (8), 3903-3909, Ağustos 2009.
21. Gorlow S., Reiss J.D., Duru E., Restoring the Dynamics of Clipped Audio Material by Inversion of Dynamic Range Compression, 2014 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, Beijing-Çin, 1-5, 2014.
22. Daneshgaran F., Laddomada M., Mondin M., An Extensive Search for Good Punctured Rate-k/k+1 Recursive Convolutional Codes for Serially Concatenated Convolutional Codes, IEEE Transactions on Information Theory, 50 (1), 208-217, Ocak 2004.
23. Lee P., Further Results on Rate 1/N Convolutional Code Constructions with Minimum Required SNR Criterion, IEEE Transactions on Communications, 34 (4), 395-399, Nisan 1986.

