

DALGACIK DÖNÜŞÜMÜYLE EKG İŞARET KODLAMASI

K.Erbil SEZGİN¹ Gülay TOHUMOĞLU²^{1,2}Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gaziantep Üniversitesi
27310 Şahinbey, Gaziantep¹e-posta: sezgin@gantep.edu.tr²e-posta: gulay@gantep.edu.tr*Anahtar Sözcükler: Kayıplı EKG Kodlama, Dalgacık Dönüşümü, Çok Adımlı Sıfır Ağaç Dönüşüm Algoritması***ÖZET**

Elektrokardiyogram (EKG) genel olarak düşük, kısmi olarak da yüksek sıklık bileşenlerinden meydana gelen tıbbi bir işarettir. Farklı sıklık bileşenlerine sahip birçok işaret işleminde başarılı sonuçlar veren Dalgacık Dönüşümü (DD), son yıllarda EKG işaret uygulamalarında etkin şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu bildiriye, Dalgacık Dönüşümüyle Sıfır Ağaç Dönüşüm Algoritmasına (SADA) dayanan Çok Adımlı Sıfır Ağaç Dönüşüm Algoritmasının (ÇASADA) farklı dalgacık tipleri ile EKG işaretlerine uygulamaları çalışılmıştır. Özgün olarak imge kodlanması için geliştirilen SADA, Dalgacık Dönüşüm katsayılarına dayanır. Sıfır Ağaç Dönüşüm Algoritması işaretin kalıtsal olarak bulundurduğu benzerlikleri dikkate alıp, Dalgacık Dönüşüm ölçekleri arasında ilintili bilgiyi ortaya koyan etkin bir sıkıştırma algoritmasıdır. ÇASADA ise SADA da mevcut çok sayıda özyinelemenin birleştirilerek uygulanmasıdır. Çalışmada, farklı dalgacık tiplerinin etkilerini gözlemlemek için birçok dikgen, çift dikgen dalgacık tipi üç ve beş alt-bant ayırımı ile MIT-BIH Arrhythmia veritabanından seçilen işaretlerin sıkıştırılmasında kullanılmıştır. Algoritmanın başarısını ölçmek için Sıkıştırma Oranı (SO) ve Oransal Etkin Değer Farkı (OED) parametreleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre dikgen dalgacık tipleri arasında Daubechies 10 dalgacığı, çift dikgen dalgacık tipleri arasında ise Biorthogonal 3.3 dalgacığı en yüksek Sıkıştırma Oranına karşın en düşük OED değerlerini vermiştir.

1.GİRİŞ

Elektrokardiyogram (EKG) kalp rahatsızlıklarının teşhisinde kullanılan önemli bir araçtır. Kalp hastalıklarının teşhisi için çoğunlukla uzun süreli bir gözlem gerekmektedir ve bu da toplanan bilgi miktarını önemli oranda arttırmaktadır. Öyle ki 360 Hz örnekleme sıklığı ile 11 bit/örnek çözünürlüğe sahip tek kanalın bir saatlik EKG işaret kaydı 1,8 Mbyte boyutuna ulaşır [1]. Saklanması veya sayısal haberleşme ağları üzerinden iletilmesi gereken EKG işaret miktarında son yıllarda gözlenen artış, işaret boyutunun azaltılmasına, yani etkin kodlama algoritmalarına duyulan ihtiyacı belirginleştirmiştir. EKG işaretlerini sıkıştırmaya yönelik geliştirilen metotlar doğrudan ve dönüşüm tabanlı olmak olarak

üzere iki grupta toplanır. CORTES[2] ve SAPA[3] doğrudan sıkıştırma metotlarına örnek olarak verilebilirler. Dönüşüm tabanlı metotlar ise gelen işaretin doğrusal bir dönüşümden geçirilmesine ve kodlamanın bu dönüştürülmüş işaret üzerinde yapılmasına dayanır. İşaretin yeniden oluşturulması için de bir ters dönüşüm uygulanır. Karhunen-Loève, Fourier, Ayrık Kosinüs, Walsh dönüşümleri EKG sıkıştırma metotlarında kullanılmış farklı dönüşüm teknikleridir [4]. Dalgacık Dönüşümü (DD) ise, sağladığı değişken zaman-sıklık çözünürlüğü sayesinde EKG gibi fiziksel uygulama işaretlerinin sıklık tanım kümesi analizinde etkin bir araç olarak son yıllarda birçok işaret işleme uygulamasında başarılı sonuçlar vermiştir. Süzgeç öbekleriyle gerçekleştirilen Ayrık Zamanlı Dalgacık Dönüşümü (ADD), işaretin farklı ölçeklerinde mevcut sıklık bileşen bilgisini verir. Özgün olarak imge kodlaması için geliştirilen Sıfır Ağaç Dönüşüm Algoritması (SADA) [5] ise farklı ölçeklerdeki Dalgacık Dönüşüm katsayılarının önemlerine göre bir sembol kümesi kullanılarak kodlanmasına dayanır. Daha önce EKG işaret kodlamasında dikgen dalgacık tipleriyle kullanılan SADA [6] başarılı sonuçlar vermiştir. SADA'nın birden çok özyinelemesinin tek bir adımda gerçekleştirilmesine dayanan ve yine özgün olarak imge kodlamasında kullanılan Çok Adımlı Sıfır Ağaç Dönüşüm Algoritması (ÇASADA) [7,8] bu çalışmayla ilk defa EKG işaretlerinin kodlanmasında uygulanmıştır. Bu çalışmada gerek SADA da gerekse ÇASADA değişik dikgen ve çift dikgen dalgacık tipleriyle kullanılmış ve etkinlikleri karşılaştırılmıştır.

Dalgacık Dönüşümü ve Dalgacık Dönüşümünün Süzgeç Öbeği Uygulaması ikinci bölümde, SADA ve ÇASADA algoritmaları üçüncü bölümde, uygulama ise dördüncü bölümde de sunulmuş. Elde edilen ve daha önce uygulanması yapılan farklı dalgacık tiplerinin karşılaştırılması sonuç bölümünde verilmiştir.

2.DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ VE SIKIŞTIRMA ALGORİTMALARI

Birçok işaret işleme uygulaması, işaretleme mevcut ayırt edici (önemli) bilgiyi çoğunlukla o işaretin sıklık tanım kümesindeki sıklık spektrumunda arar. Bir

işaretin sıklık bilgisini incelemenin en eski ve temel yöntemi Fourier dönüşümüdür. Bu dönüşüm, işarete mevcut sıklık bileşenlerini belirler ancak bu bileşenlerin zaman bilgisini vermez. Özellikle Periyodik olmayan (değişken) işaretlerin sıklık bileşenlerinin zaman bilgisini elde edebilmek için Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) geliştirilmiş ve işaret pencereler kullanılarak incelenmeye başlanmıştır. KSFD de kullanılan pencere genişliği sıklık ve zaman çözünürlükleri konusunda sorunlara yol açmıştır. Pencere genişliğinin azaltılması sonucunda sıklık tanım kümesinde zaman çözünürlüğü artmakta, sıklık çözünürlüğü azalmaktadır. Genişliğin artırılması ise sıklık çözünürlüğü yükseltmek zaman çözünürlüğü azaltır. Heissenberg belirsizlik prensibine göre sıklık etki kümesinde zaman çözünürlüğü $\Delta\tau$ ve sıklık çözünürlüğü Δf ters orantılıdır. Bu ilişki

$$\Delta\tau\Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (1)$$

olarak ifade edilmiştir. Burada görüldüğü gibi $\Delta\tau$ ile Δf 'den birinin artırılması diğerinin azalmasına yol açmaktadır. Kısa Süreli Fourier Dönüşümünde ki sabit pencere genişliğinin yol açtığı çözünürlük sorunlarını aşabilmenin yolu, işaretin değişken pencere genişliği kullanılarak incelenmesidir. Çok Çözünürlüklü Analiz (ÇÇA) [9] olarak adlandırılan bu yöntem de işarete ki yüksek sıklık bileşenleri yüksek zaman çözünürlüğü ile, düşük sıklık bileşenlerinin yüksek sıklık çözünürlüğü ile incelenir. ÇÇA'ya dayanan dalgacıklar yapısında genel olarak azalan sıklık bileşenlerini, kısmi olarak da artan sıklık bileşenleri bulunduran EKG gibi işaretlerin zaman-sıklık analizini yapmak için çok uygundur. $X(\tau,s)$ dönüştürülmüş işaret, $x(t)$ zaman etki kümesinde tanımlı işaret ve Ψ dalgacık fonksiyonu olmak üzere Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD)

$$X(\tau,s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int x(t) \Psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (2)$$

şeklinde tanımlıdır. Sürekli Dalgacık Dönüşümü, Kısa Süreli Fourier Dönüşümü'nden farklı olarak değişken pencere genişliklerine sahiptir. Burada verilen τ öteleme, s ölçek parametresidir. Temel Dalgacık fonksiyonu Ψ , sıkıştırılıp açılarak, işaretin farklı çözünürlüklerde analizini sağlayan alçak ve yüksek sıklık dalgacıkları elde edilir. Ters Dalgacık Dönüşümü (TDD) nün gerçekleştirilebilir olması için dalgacık fonksiyonunun Onanırılık Koşulunu sağlaması gerekir. Buna koşul dalgacığın ortalama

değerinin $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0$ eşitliğine göre sıfır olmasını

öngörür. SDD de mevcut sürekli ölçek ve öteleme parametreleri ayrık hale getirilerek, Dalgacık Dönüşümünün sadece belirli ölçek ve öteleme değerleri için hesaplanması sağlanabilir. Bu durumda Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) uygulanmış işaret

$$X_{j,k}(\tau,s) = s_0^{j/2} \int x(t) \Psi^* \left(s_0^j t - k\tau_0 \right) dt \quad (3)$$

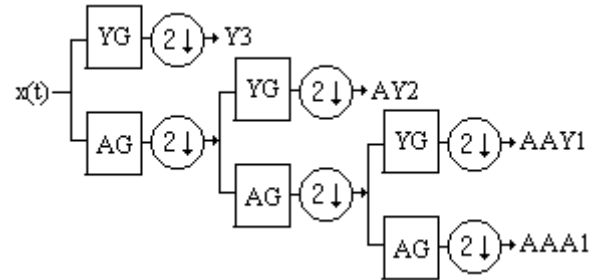
şeklinde ifade edilir. Genellikle s_0 ve τ_0 sırasıyla 2 ve 1 değerlerini alır ve ADD diyadik olur. ADD kümesi tamamlandığı zaman, $x(t)$ işaretinin Dalgacık Dönüşümü Gösterimi ise

$$x(t) = \sum_j \sum_k X_{j,k}(\tau,s) \Psi_{j,k}(t) \quad (4)$$

olur. Burada $x(t)$ nin tam gösterimi sonsuz sayıda $\Psi_{j,k}(t)$ gerektirir. Buradaki dalgacık fonksiyonları bant geçiren süzgeç karakteristiğine sahiptir. Böyle bir hesaplama yerine belli j değerinden daha küçük tüm dalgacıklar ölçek fonksiyonu içinde ifade edilebilir. Ölçek fonksiyonu alçak geçiren süzgeç yapısına sahiptir. Buna bağlı olarak $x(t)$ işareti, dalgacık ve ölçek fonksiyonlarıyla şu şekilde gösterilir:

$$x(t) = \sum_k X_{j_0,k} \varphi_{j_0,k}(t) + \sum_k \sum_{j=j_0}^j X_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (5)$$

ÇÇA'yı süzgeç öbekleriyle gerçekleştirmek mümkün olduğundan Ayrık Zamanlı Dalgacık Dönüşümü (AZDD) geliştirilmiştir. Tek ölçekli dönüşüm için işaret yarım bant alçak geçiren ve yüksek geçiren süzgeçlerden oluşan süzgeç öbeğinden geçirilerek alt örneklenir. İşaretin birden çok ölçeğini elde etmek için alçak geçiren süzgecin çıkış katsayıları tekrar süzgeç öbeğinden geçirilir ve alt örneklenir. Bu işlem elde edilmek istenen ölçek sayısı kadar tekrarlanır. Örnek olarak 3 ölçekli bir AZDD Şekil 1 de verilmiştir.



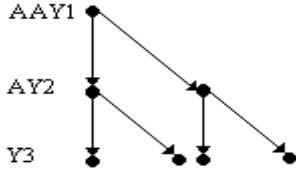
Şekil 1 Üç Alt Bant Dalgacık Dönüşüm Analizi

Burada alçak geçiren süzgeç AG, yüksek geçiren süzgeçte YG ile belirtilmiştir. Süzgeç çıkışlarında ki harfler ise işaretin sırasıyla hangi süzgeçlerden geçtiğini gösterir. AG süzgeçlerin çıkışındaki katsayılar işaretin genel görünümünü verirken, yüksek geçiren süzgeçlerin çıkış katsayıları işaretin ayrıntı bilgisini verir.

3.KODLAMA ALGORİTMASI

Bu çalışmaya temel olan Sıfır Ağaç Dönüşüm Algoritması ve Çok Adımlı Sıfır Ağaç Dönüşüm Algoritması süzgeç öbekleri ile elde edilen Ayrık Zaman Dalgacık Dönüşümü katsayılarına dayanır. Amaç dalgacık katsayıları arasındaki önem ilişkisini belirlemektir. Katsayıların önem derecesi, daha önceden belirlenen bir eşik değerine göre kodlanır. Bu kodlama yapılırken ölçekler arasındaki mevcut benzerlikler kullanılır. Eşik seviyesine göre daha düşük olan değerler önemsiz kabul edilir ve kodlanmaz. Ölçekler veya alt bantlar arasındaki geçişi gösteren dalgacık katsayılarının sıradüzensel ağaç

gösterimi Şekil 2 de verilmiştir.



Şekil 2 Sıradüzensel Katsayı Ağacı

Bu ağacın en üst noktasını son ölçekteki ayrıntı katsayıları oluştururken, alt seviyede bir önceki ölçekteki ayrıntı katsayıları yer alır. Her seviyede ki katsayının konumu bir alt daldaki iki katsayı ile ilintilidir ve bu ilişki ebeveyn çocuk ilişkisine benzetilebilir. Tüm katsayıların önem yada önemsizlik ilişkisi eşik değerine bağlıdır. Eşik değeri

$$E = 2^n \quad n = \log_2 |c_i| \quad (6)$$

n bir alt tamsayıya yuvarlanarak hesaplanır. Burada c_i maksimum AZDD katsayısını gösterir.

Shapiro'nun SADA algoritması [5] iki farklı temel kodlama listesi oluşturur. Kodlanan katsayılar birinci listede, kodlananların büyüklükleri ise ikinci listede bulunur. Sıradüzensel ağacın en üstündeki katsayı önemli bulunursa artı değerler için (AR), eksi değerler için (EK) kodlanır. Eğer bu katsayı eşik değerinden küçük ise o katsayının altındaki, yani ebeveyn çocuk ilişkisine göre çocukları ve onların uzantıları eşik değeri ile karşılaştırılır. Eğer yukarıdan aşağıya doğru tüm katsayılar eşik değerinden küçükse, o daldaki tüm katsayılar Sıfır Ağaç Kökü (SA) olarak kodlanır. Ebeveyn çocuk ilişkisine göre çocuk konumunda bulunan katsayılarından en az bir tanesi eşik değerinden büyükse, ağacın en üst noktasındaki katsayı Yalıtılmış Sıfır (YS) olarak kodlanır. YS olarak kodlanan daldaki diğer tüm katsayılar ayrı ayrı kodlanır. Yeni özyineleme için eşik değeri yarılanır ve tüm işlemler yeni eşik değeri için tekrarlanır. Bu algoritmada Sıfır Ağaç Kökü kodlanmış değerler işaretin boyutunu önemli miktarda düşürmektedir. Kodlama için kullanılan toplam dört farklı sembol vardır ve her sembol iki bit ile ifade edilebilir.

Çok Adımlı Sıfır Ağaç Kodlama Algoritması, Shapiro'nun algoritmasının modifikasyonu olup, iki yada daha fazla sayıda özyinelemeyi birleştirerek, katsayıları aynı özyinelemede farklı eşik değerleriyle kıyaslamaya dayanır. Bu çalışmada biri diğerinin iki katı olan (E1>E2) iki eşik değeri kullanılır. SADA da kullanılan SA ve YS sembolleri E2'den küçük değerleri kodlamak için kullanılır. Katsayıları ve uzantılarını, E1 ve E2 eşik değerlerine göre alabilecekleri olası durumları kodlamak için ARYS1, ARSA1, EKYS1, EKSA1, ARYS2, ARSA2, EKYS2 ve EKSA2 sembolleri kullanılır. Toplam on farklı sembol vardır ve bu semboller dört bit ile ifade edilebilir. E1 den büyük katsayıları kodlamak için kullanılan ARYS1 ve ARSA1, EKYS1 ve EKSA sembolleri birleştirilerek toplam sembol sayısı sekize düşürülür. ÇASADA da kullanılan sembol sayısının

SADA ya göre artmasına rağmen, SADA daki iki özyineleme tek adıma indirilmesi nedeniyle aynı performansa daha az sayıda özyineleme ile ulaşılır. ÇASADA'nın diğer bir avantajı ise aynı özyineleme sayısı ile daha iyi kodlama performansı elde edilmesidir. Dolayısıyla ÇASADA da aynı özyineleme ile elde edilen toplam bit sayısı daha az olmaktadır. Bu çalışmada kodlama sonucunda daha sık kullanılan sembollerin daha az bit sayısı ile ifade edilmelerini sağlayabilmek, ve sonuçta kodlanan toplam bit sayısını düşürmek için, gerek SADA da gerekse ÇASADA da Huffman aritmetik kodlama kullanılmıştır.

4.UYGULAMA

Dalgacık Dönüşüm ayrışma dereceleri kodlama performansında önemli olup burada üç ve beş seviye olarak seçilmiştir. Farklı dalgacık tiplerinin etkinliklerini gözlemleyebilmek için Ayrık Zamanlı Dalgacık Dönüşümünde Symlet 4,8,10 Daubechies 6,10,12 dikgen dalgacıkları ve Biorthogonal 2.2,2.4 ve 3.3 çift dikgen dalgacıkları kullanılmıştır. Algoritmaların performansları ölçmek için Oransal Etkin Değer (OED)

$$OED = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x(i) - \hat{x}(i))^2}{\sum_{i=1}^n x(i)^2}} \quad (7)$$

ve Sıkıştırma Oranı (SO)

$$SO = \frac{\text{Özgün işareti ifade eden toplam bit sayısı}}{\text{Sıkıştırılmış işareti ifade eden toplam bit sayısı}} \quad (8)$$

parametreleri kullanılmıştır.

5.SONUÇ

Uygulamada EKG işaretleri MIT-BIH veritabanından (101,102,103 gibi) alınmıştır. MIT-BIH 101 ve MIT-BIH 103 işaretlerinin farklı dalgacık tipleriyle, ÇASADA ve SADA kodlama sonuçları Tablo1,2,3 ve 4 de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre algoritmalar kendi içlerinde incelendiğinde, ikisinin de genel olarak çift dikgen dalgacık tipleriyle, dikgen dalgacık tiplerine oranla daha yüksek Sıkıştırma Oranı ve daha düşük OED verdiği görülmektedir. Ayrıca dikgen dalgacıklardan Daub 10 ve çift dikgen dalgacıklardan Bior.3.3 en başarılı kodlama sonuçlarını vermiştir. Alt bant ayrışım seviyeleri göz önüne alındığında ise 5 bant ayrışım uygulanan kodlamaların, 3 bant uygulananlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülür. İki algoritma birbiri ile karşılaştırılırsa, ÇASADA da daha az sayıda özyineleme ile daha yüksek SO ve daha düşük OED nin elde edildiği gözlemlenir. En iyi sonuçları veren Daub. 10 ve Bior. 3.3 kullanılarak, 3 ve 5 alt bant ayrışımı uygulanan ÇASADA ve SADA performansları Şekil 3 ve 4 de sunulmuştur. Hilton'un çalışmasında SADA [6] da, ortalama dikgen dalgacık performansı 10 Sıkıştırma Oranı için %5 OED'dir. ÇASADA da elde edilen Sıkıştırma oranları daha yüksek, OED değerleri daha düşüktür. Sonuç olarak ÇASADA'nın, SADA'dan daha başarılı bir performans gösterdiği açıktır.

Tablo1 MIT-BIH 101 İşareti ÇASADA Kodlama Sonuçları

MIT-BIH 101	3 alt bant ÇASADA		5 alt bant ÇASADA	
	SO	OED	SO	OED
Symlet 4	5,88	2,61	8,06	2,63
Symlet 8	6,11	2,51	8,37	2,53
Symlet 10	6,23	2,46	8,54	2,48
Daub 6	6,26	2,45	8,58	2,47
Daub 10	6,66	2,30	9,13	2,32
Daub 12	6,52	2,35	8,94	2,37
Bior.2.2	6,38	2,33	8,75	2,47
Bior 2.4	6,45	2,30	8,83	2,45
Bior 3.3	6,76	2,20	9,26	2,33

Tablo2 MIT-BIH 101 İşareti SADA Kodlama Sonuçları

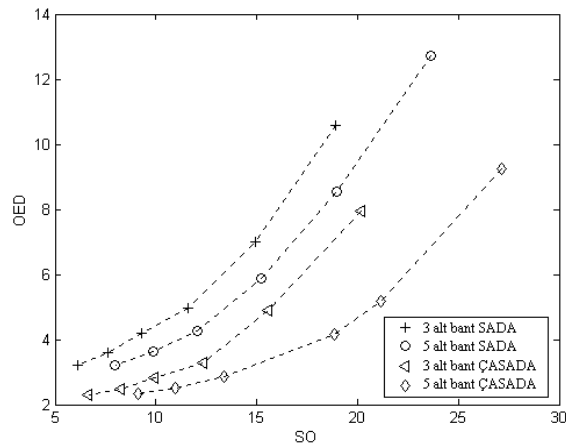
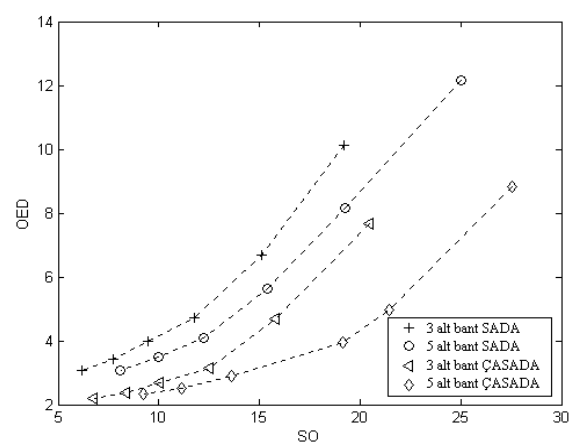
MIT-BIH 101	3 alt bant SADA		5 alt bant SADA	
	SO	OED	SO	OED
Symlet 4	5,38	3,63	7,05	3,65
Symlet 8	5,59	3,49	7,32	3,51
Symlet 10	5,70	3,42	7,47	3,44
Daub 6	5,73	3,40	7,50	3,43
Daub 10	6,09	3,20	7,98	3,22
Daub 12	5,97	3,27	7,82	3,29
Bior.2.2	5,84	3,23	7,65	3,25
Bior 2.4	5,90	3,20	7,73	3,22
Bior 3.3	6,18	3,05	8,09	3,07

Tablo3 MIT-BIH 103 İşareti ÇASADA Kodlama Sonuçları

MIT-BIH 103	3 alt bant ÇASADA		5 alt bant ÇASADA	
	SO	OED	SO	OED
Symlet 4	5,51	2,62	7,55	2,64
Symlet 8	5,72	2,52	7,84	2,54
Symlet10	5,84	2,47	7,99	2,49
Daub 6	5,86	2,46	8,04	2,48
Daub 10	6,24	2,31	8,55	2,33
Daub 12	6,11	2,36	8,37	2,38
Bior.2.2	5,98	2,34	8,19	2,48
Bior 2.4	6,04	2,31	8,28	2,46
Bior 3.3	6,33	2,21	8,67	2,34

Tablo4 MIT-BIH 103 İşareti SADA Kodlama Sonuçları

MIT-BIH 103	3 alt bant SADA		5 alt bant SADA	
	SO	OED	SO	OED
Symlet 4	5,04	3,64	6,60	3,66
Symlet 8	5,24	3,51	6,86	3,53
Symlet10	5,33	3,44	6,99	3,46
Daub 6	5,37	3,42	7,03	3,44
Daub 10	5,71	3,21	7,48	3,23
Daub 12	5,59	3,28	7,32	3,30
Bior.2.2	5,47	3,25	7,17	3,27
Bior 2.4	5,53	3,21	7,24	3,23
Bior 3.3	5,79	3,06	7,58	3,09

**Şekil 3** OED karşılık SO (MIT101-Daub.10)**Şekil 4** OED karşılık SO (MIT101-Bior.3.3)**KAYNAKLAR**

- [1] Jalaleddine S., Hutchens C., Strattan R. and Coberly W., ECG data compression techniques, a unified approach, IEEE TRANS. ON BIOMEDICAL ENG., Vol. 37, No. 4, pp. 329-343, 1990
- [2] Abenstein J.P., Tompkins W.J., A new data reduction algorithm for real time ECG analysis. IEEE TRANS. ON BIOMEDICAL ENG., Vol. 29, No. 1, pp. 43-48, 1982
- [3] Ishijima M., Shin S.B., Hostetter G.H., Sklansky J., Scan along polygonal approximation for data compression of Electrocardiograms, IEEE TRANS. ON BIO.ENG., Vol. 30, No. 11, pp. 723-729, 1983
- [4] Çetin A.E., Köymen H., Aydın M.C., Multichannel ECG data compression by multirate signal processing and transform domain coding techniques, IEEE TRANS. ON BIOMEDICAL ENG., Vol. 40, No. 5, pp. 495-499, 1993
- [5] Shapiro J.M., Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients, IEEE TRANS. ON SIGNAL PROCESSING, Vol. 41, No. 12, pp. 3445-3462, 1993
- [6] Hilton M.L., Wavelet and wavelet packet compression of Electrocardiograms. IEEE TRANS. ON BIOMEDICAL ENGINEERING, Vol. 44, pp. 394-402, 1997
- [7] Losada M.A., Tohumoğlu G., Fraile D., Artés A., Multi-iteration wavelet zero coding for image compression. EUROPEAN J. EURASIP SIGNAL PROCESSING, Vol. 44, pp. 1281-1287, 2000
- [8] Tohumoğlu G., Wavelets and their usage on the medical image compression with a new algorithm, IEEE EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, Antalya, TURKEY 20-23 June 1999.
- [9] Vetterli M., Kovačević J., Wavelets and subband coding, Prentice Hall PTR, 1995