

# EN KÜÇÜK ENTROPİ TERS EVRİŞİMİ ÖZELLİKLERİNİN İRDELENMESİ

## Minimum Entropy Deconvolution and Investigation of Its Properties

Uğur YARAMANCI\*

Abdullah KARAMAN†

### ÖZET

Son yıllarda geliştirilen en etkin tersevrışim yöntemlerinden biri ilk kez Wiggins (1977, 1978) tarafından sunulan "Enküçük Entropi Tersevrışimi, (MED, Minimum Entropy Deconvolution)" dir. MED süzgeci sinyal basitliğinin ölçütü "varimax"ı enbüyükleyerek tasarlanır. Sinyal basitliğini enbüyüklemek entropiyi yani sinyaldeki rastgeleliği enküçüklemeye eşdeğerdir. En basit sinyal limit durumunda bir iğneciktir. MED süzgeç katsayıları doğrusal olmayan bir denklem sistemini dürlü biçimde çözerek bulunur.

MED yönteminin uygulama özellikleri yapay verilerle incelenmiştir. Yapay veriler sırası ile tek dalgacık, çift dalgacık, çok kanallı kamalanma ve çok kanallı gürültülü kamalanmadan oluşmaktadır. İrdelenenler MED yönteminin artan süzgeç boyu ile daha iyi sonuç verdiğini, ancak aşırı uzun süzgeç kullanımında önemli bilgilerin kaybolduğunu, çok kanallı uygulamanın tek kanallı uygulamaya yeğlenmesi gerektiğini göstermektedir. MED yöntemi ile yüksek gürültülü veriler içinde dahi sinyal bileşenleri ayrıştırılabilmektedir. Artan gürültü oranı ile MED süzgeci yüksek frekansları bastırmaktadır.

### ABSTRACT

One of the most efficient deconvolution methods in last years in presented by Wiggins (1977, 1978) and is called "Minimum Entropy Deconvolution, MED". MED filter is designed by maximizing the "varimax" norm which is the measure of simplicity. Maximizing simplicity is equivalent to minimizing the entropy of the signal. In limiting case the most simple signal form is a spike. Calculation of MED filter coefficients is performed by solving a system of non-linear equations in iterative manner.

Properties of MED are investigated using artificial data. These data are a single wavelet, double wavelet, multichannel discordance model and multichannel discordance model with noise. It is shown that performance of MED is improved with increasing length of the filter, but too long filters cause loss of information. Multichannel use of MED should be preferred to single channel use. In case of high noise level MED performs well but with increasing noise level high frequencies are eliminated.

## 1- GİRİŞ

Çeşitli dallarda ve özellikle jeofizikte karşılaşılan önemli sinyal analizi problemlerinden biri de evrişim (convolution) nedeni ile bozulmuş bilgilerin olabildiğince iyi geri elde edilmesidir. Jeofizikte çoğu problem bir doğrusal dizge problemi olarak tanımlanabilir. Yorumlanması istenen gözlemsel veri, doğrusal dizge çıkışı olarak düşünüldüğünde, bir giriş verisinin dizge fonksiyonu ile evrişimi olarak modellenir. Bu modelleri gerçekçi kılmak için modellere tüm yanılı kaynaklarını ve açıklanamayan sinyal bileşenlerini siğgeleyen gürültü eklenir.

Jeofizik problemin türüne göre girdi ve/veya dizge fonksiyonunun bulunması genelde tersevrışim (deconvolution) yöntemleri ile sağlanır. Gürültünün az olduğu durumlarda bilinen girdiyi kullanarak dizge fonksiyonunun bulunması veya bilinen dizge fonksiyonunu kullanarak girişin bulunması fazla sorun yaratmaz. Bu tür bir problem evrişim

işleminin frekans ortamında basit bir çarpım işlemine dönüşmesi özelliğinden yararlanılarak kolayca frekans ortamı yardımı ile de çözülebilir. Kimi problemde hem girdi hem de dizge fonksiyonu bilinmemektedir. Bu tür durumlarda jeofizik gerçeklere uyumlu varsayımlar yapmak zorunludur. Bu tür varsayımlar genellikle girdi ve/veya dizge fonksiyonunun rastgeleliği ve rastgelelik türü, geçicilik ve geçicilik türü, biçim özellikleri, spektral özellikleri vb. konulardadır.

Tersevrışim yöntemleri enyogan yansıma sismiği veri işleminde kullanılır. Yansıma sismiğinde algılanan bir sismik iz en basit biçimde

$$x_t = \sum_{i=0}^N b_i r_{t-i} + n_t \quad (1)$$

\* İTÜ Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü

† TÜBİTAK, Temel Bilimler Araştırma Enstitüsü, Yer Bilimler Bölümü

$b_i \cong$  kaynak dalgacık

$r_t \cong$  yansımaya katsayıları

$n_t \cong$  gürültü

ile modellenir ve amaç akustik direşim farklarından oluşan, yeraltının elastik özelliklerinin, yani sismik hızların ve dolayısı ile jeolojik yapının göstergesi olan yansımaya katsayılarının bulunmasıdır. Gerçi (1) ile tanımlanan evrişimsel sismik iz modeli içerdiği varsayımlar nedeni ile oldukça basittir, ancak yine de çok kullanışlıdır (Robinson ve Treitel, 1980, Yaramancı 1984).

Yansımaya izlerinin tersevrşimi yani yansımaya katsayılarının bulunması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin önkestirme tersevrşimi (predictive devonvolution) yoğun kullanılan yöntemlerden biridir (Robinson, 1957, Peacock ve Treitel, 1969). Bu yöntemde dolaylı olarak yansımaya katsayılarının koşulsuz rastgele yani beyaz gürültü özelliğinden olduğu ve kaynak dalgacığının enküçük gecikmeli olduğu varsayılır. Diğer önemli yöntemlerden biri Homomorfik Tersevrşimdir (Oppenheim ve Schafer, 1976). Bu yöntemin uygulanabilmesi için dalgacık spektrumunun sismik iz spektrumundan ayıklanabilir olması gerekir. Genelde kaynak dalgacığının bilindiği durumlarda gürültü düzeyi yüksek bile olsa enküçük kareler veya Wiener tasarımı ile elde edilen kaynak dalgacığı tersi yeterince sağlıklıdır. Kaynak dalgacığı tersinin gözlemsel veri ile evriştirilmesi doğrudan yansımaya katsayılarını verir. Kaynak dalgacığı ile ilgili bilgi bulunmaması durumunda başarı uygulanan yöntemin içerdiği varsayımların ne ölçüde gerçekleştiğine bağlıdır.

Dizge fonksiyonu veya yansımaya katsayılarının kestirimi için alışılmış dışı ancak çok başarılı bir yöntem Wiggins (1977, 1978) tarafından önerilmiş ve çeşitli araştırmacılarca ele alınmıştır (Ulyrch ve Walker 1982, Ooe ve Ulyrch 1979, Cabrelli 1985). "Enküçük Entropi Tersevrşimi, (Minimum Entropy Deconvolution, MED)" adı ile bilinen bu yöntemde ana ilke gözlenen veriye iğnecik karakteri kazandıran süzgecin tasarlanması ve uygulanmasıdır.

## 2- ENKÜÇÜK ENTROPİ TERSEVRŞİMİ (MED)

### 2.1. Kuramsal Türetim

Bir veriye iğnecik karakteri kazandırılması bu verinin basitleştirilmesi anlamına gelir. Bir verinin basitlik derecesi için çeşitli ölçütler bulunmakla birlikte Wiggins (1977)

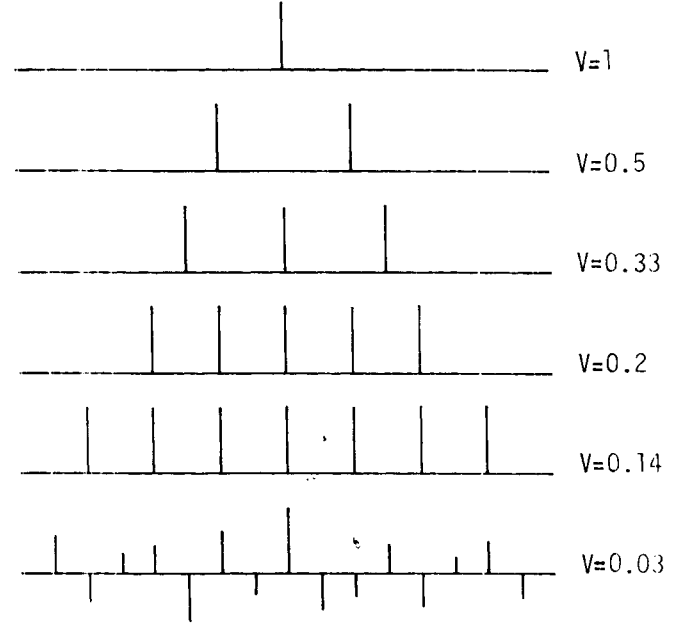
$$V = \frac{\sum_t y_t^4}{(\sum_t y_t^2)^2} \quad (2)$$

bağıntısı ile verilen "varimax" ölçütünü kullanmaktadır.

Şekil 1'den de kolayca görüldüğü gibi tek başına bir iğnecikten oluşan verinin varimax değeri enbüyüktür ve 1'e eşittir. İğneciklerin çoğalması, verinin giderek tek iğnecik karakterini yitmesi ile varimax değeri küçülür, yani veri basitliğini kaybederek giderek karmaşıklaşır. Limit durumunda stokastik yani rastgele veriler karmaşıklıkla enyüksek, iğnecikliliği endüşük, yani varimax ölçütü hemen hemen sıfır olan veri grubunu oluşturur.

Sinyal analizinde bir verinin karmaşıklığı, rastgeleliği veya diğer bir deyişle bilirsizliği, dolayısı ile verinin taşıdığı bilgi miktarının yüksekliği "entropi" ölçütü ile ölçülür. Entropi kavramı son yıllarda jeofizik sinyal analizinde sıkça kullanılır olmuştur (Örneğin Burg 1975, Ulyrch ve Bishop,

1975). Entropi ölçütü karmaşıklığın göstergesi olduğundan varimax ölçütü ile ters orantılıdır. Basitliğin, yani varimax ölçütünün en yüksek olduğu durumda entropi ölçütü enküçük değerini alır. Bu nedenle Wiggins önerdiği yöntemle enküçük entropi tersevrşim adını vermiştir.



Şekil 1 - Basit iğnecik verisinden karmaşık beyaz gürültü verisine doğru "varimax" ölçütünün değişimi.

Enküçük entropi tersevrşim yönteminde yansımaya katsayıları dizisinin aslında iğneciklerden oluşan basit bir sinyal olduğundan hareket edilir. Gerçekten de (1) denklemi ile verilen yansımaya izi modelindeki yansımaya katsayıları dizisi katman sınırlarına karşılık gelen yüksek değerli birkaç iğnecik ve katman içi türdeşlik bozukluklarından kaynaklanan küçük ve rastgele dağılımlı değerlerden oluşur. Bu nedenle gözlenen bir  $x_t$  yansımaya izinin basitleştirilmesi  $x_t$  deki dalgacık etkisinin giderilmesi ve yansımaya katsayılarının tekrar elde edilmesi anlamına gelir.

Bu işlemin matematik gerçekleşmesi  $x_t$ ye uygulandı-ğında enbüyük varimaxlı yani en basit görünümüyle veya en çok iğnecik karakterli çıkış  $y_t$ yi sağlayan süzgecin tasarımı ile olur:

$$y_t = \sum_{\tau} s_{\tau} x_{t-\tau}, \quad V = \text{enbüyük!} \quad (3)$$

(2) denklemi ile verilen varimax (3)teki  $y_t$  ile yazılıp V'nin enbüyüklenmesi için klasik

$$\frac{\partial V}{\partial s_{\tau}} = 0 \quad (4)$$

koşulu uygulandığında çeşitli basit düzenlemelerden sonra

$$\frac{\partial V}{\partial s_{\tau}} = 4 \frac{V}{u} \sum_t y_t \frac{\partial y_t}{\partial s_{\tau}} - 4 \frac{1}{u^2} \sum_t y_t^3 \frac{\partial y_t}{\partial s_{\tau}} = 0 \quad (5)$$

elde edilir. Burada  $u = \sum y_t^2$  ile  $y_t$  çıktısının değışintisi simgelenmiştir. (5) denkleminde  $y_t$ 'nin  $s_\tau$ 'ya göre türevleri için

$$y_t = \sum_\tau s_\tau x_{t-\tau}, \quad \frac{\partial y_t}{\partial s_\tau} = x_{t-\tau} \quad (6)$$

yerleştirildiğinde

$$\frac{V}{u} \sum_t y_{t-\tau} x_{t-\tau} = \frac{1}{u^2} \sum_t y_t^3 x_{t-\tau}$$

$$\frac{V}{u} \sum_t \left( \sum_n s_n x_{t-n} \right) x_{t-\tau} = \frac{1}{u^2} \sum_t \left( \sum_n s_n x_{t-n} \right)^3 x_{t-\tau} \quad (7)$$

elde edilir. (7) denklemini matris yazılımı kullanılarak

$$\underline{C} \bar{S} = \bar{g} \quad (8)$$

biçiminde kısaltılabilir. Burada  $\underline{C}$  girdi verisi  $x_t$ 'nin özilişki değerlerini içermektedir, çünkü (7) denkleminde sol taraf

$$\begin{aligned} \sum_t \left( \sum_n s_n x_{t-n} \right) x_{t-\tau} &= \sum_n s_n \sum_t x_{t-n} x_{t-\tau} \\ &= \sum_n s_n \sum_t x_t' x_{t'+n-\tau} \\ &= \sum_n s_n c_{n-\tau} \end{aligned} \quad (9)$$

den görüldüğü gibi süzgeç ile girdi özilişkisinin evrişimine eşittir. Bu yönü ile (7) denklemini Wiener eniyi süzgeç tasarımımda kullanılan Wiener-Hopf denklemlerine çok benzemektedir. Ancak denklemin sağ tarafından süzgeç çıkıntısının üçüncü kuvveti  $y_t^3$  ile süzgeç girdisinin çapraz ilişkisi yer almaktadır (g). Bu nedenle denklem sisteminde S ile gösterilen süzgeç katsayıları yanı sıra sağ tarafta  $y_t^3$  nedeni ile süzgeç katsayılarının üçüncü kuvveti bulunmaktadır. (8) denklem sistemi doğrusal değildir ve çözümü dürül (iterative) bir yaklaşımı gerektirir (Wiggins, 1977). (8) denklemini özilişki matrisinin tersi (inverse) bulunarak

$$\bar{S} = \underline{C}^{-1} \bar{g} \quad (10)$$

biçiminde açılır. Süzgeç katsayıları için bir kestirim yapılarak (3) denklemini ile  $y_t$  ve (7) denkleminin sağ tarafı ile g hesaplanır. (10) denklemine göre  $\underline{C}^{-1} g$  hesaplanarak  $\bar{S}$  bulunur. Süzgeç için yapılan kestirimin doğru olması durumunda (10) denklemini ile bulunan süzgeç katsayıları  $\bar{S}$ , kestirilen süzgeç katsayılarına eşit olur. Eşit olmama durumunda bulunan süzgeç katsayıları yeni kestirim olarak kullanılır ve işlem tekrarlanır. İleriki örneklerde de gösterildiği gibi genellikle 5 ~ 6 kerelik tekrarlama (iterasyon) ile bulunan ve kestirilen süzgeç katsayıları eşit sayılabilecek derecede yakımlaşırlar. Bu tekrarlama işlemi sırasında her yeni süzgeç kestirimi için (2) denklemini ile varimax değeri de hesaplanır. Yeni ileriki örneklerde gösterildiği gibi varimax değeri de 5 ~ 6 kerelik tekrarlardan sonra bir enbüyük değere ulasır ve yeni tekrarlamalarda kayda değer bir değişim göstermez.

Yukarıda tanıtilan varimax ölçütü kuşkusuz sinyal basitliğinin tek ölçüsü değildir. Nitekim varimax ölçütünün istel dönüşümü Ooe ve Ulyrch (1979) tarafından "D ölçütü" adı verilen bir diğer ölçüt Cabrelli (1985) tarafından başarı

ile tersevrifim süzgeç tasarımında kullanılmıştır. Özellikle Cabrelli (1985) tarafından önerilen D ölçütü iteratif olmayan bir algoritmayla süzgeç tasarımına olanak verdiğinden ilginçtir, ancak yönetimin bazı özellikleri yeterince snanmamıştır.

## 2.2- Tersevrifim Süzgecinin Özellikleri

Genelde tersevrifim süzgecinin ve özeld enküçük entropi tersevrifim süzgecinin önemli özellikleri süzgecin (1) denklemini ile verilen basit yansıma izi modeline uygulanması ile kolayca gösterilebilir. (1) denklemindeki yansıma izi modeli sembolik yazılımla (\* = evrişim)

$$x_t = b_t * r_t + n_t \quad (11)$$

biçiminde verilir. Tersevrifim süzgeci  $s_t$ 'nin  $x_t$ 'ye uygulanması ile çıkış verisi  $y_t$  elde edilir:

$$y_t = s_t * x_t \quad (12)$$

Bu işlemden beklenen,  $y_t$  verisinin olabildiğince iyi biçimde yansıma katsayıları  $r_t$ 'ye yaklaşmasıdır. Bu yaklaşma her zaman bir yanılığ  $e_t$  içerecek ve  $r_t$  yerine  $\hat{r}_t$  yaklaşığını verecektir:

$$\hat{r}_t = y_t + e_t \quad (13)$$

(11) ve (12) denklemleri ile  $\hat{r}_t$  kestirimi

$$\begin{aligned} \hat{r}_t &= s_t * x_t + e_t \\ \hat{r}_t &= s_t * (b_t * r_t + n_t) + e_t \\ \hat{r}_t &= s_t * b_t * r_t + s_t * n_t + e_t \end{aligned} \quad (14)$$

biçimini alır.  $\hat{r}_t$  kestiriminin gerçekte  $r_t$  yansıma katsayılarına yaklaşması için (14) denkleminde

$$\begin{aligned} e_t &\rightarrow 0 \\ s_t * n_t &\rightarrow 0 \\ s_t * b_t &\rightarrow \delta_t \end{aligned} \quad (15)$$

olmalıdır. Bu koşullar yorumlandığında iyi bir tersevrifim süzgecinin yanılığ  $e_t$ 'yi en aza indirgediği, sinyaldeki gürültüyü bastırđıęı ve kaynak dalgacığı  $b_t$ 'nin tersine yaklaşığı görülmür.

$s_t$ 'nin saptanması için kullanılan en önemli yöntemlerden biri olan enküçük kareler yönteminde  $b_t$  dalgacığının enküçük fazlı ve yansıma katsayısı dizisi  $r_t$ 'nin beyaz gürültü özelliğinde olduğu varsayımlarının yapıldığı bilinmektedir (Peacock ve Treitel, 1969). Özellikle  $b_t$  için yapılan varsayım ciddi bir sınırlamadır. Enküçük entropi tersevrifim yönteminde bu varsayımın yapılmadığı ve yöntemin en karışık dalgacık biçimlerinde bile başarılı olduğu Wiggins (1977) ve Ooe ve Ulyrch (1979) tarafından örneklerle gösterilmiştir.

## 2.3- Çok Kanallı Enküçük Entropi Tersevrifimi

Çoğu tersevrifim yönteminde olduğu gibi enküçük ent-

ropi tersevrşimi yönteminde de çok kanallı veri kullanımı özellikle gürültü bastırılması ve izlerdeki benzer olayların belirginleştirilmesi açısından yararlar sağlamaktadır. Kanal sayacı  $k$ , bireysel kanal girdisi  $x_{kt}$  ve çıkışı  $y_{kt}$  ile enküçük entropi tersevrşim süzgeci  $s_r$  nun uygulaması (3) denklemlerine koşt olarak

$$y_{kt} = \sum_t s_r x_{k,t-\tau} \quad (16)$$

denklemleri ile tanımlanır.  $k$  kanalı için varimax ölçütü (2) denklemlerine göre

$$V_k = \sum_k y_{kt}^4 / (\sum_t y_{kt}^2)^2 \quad (17)$$

dir. Toplam varimax ölçütü bireysel kanalların varimax ölçütlerinin normalleştirilmiş toplamından oluşur:

$$V = \frac{1}{K} \sum_k v_k \quad (18)$$

Varimax ölçütünün enbüyüklenmesi ile (8) denklemlerine benzer biçimde

$$\underline{C} \bar{S} = \bar{g} \quad (19)$$

denklemler sistemi elde edilir. Ancak bu kez özilişki matrisi  $V_k/u_k$  ile çarpılarak ağırlıklandırılmış bireysel kanalların özilişkilerinin toplamından oluşmaktadır. Benzer biçimde  $\bar{g}$  vektörü de bu kez  $1/u_k$  ile ağırlıklandırılmış bireysel kanalların üçüncü kuvveti ile girdi evrişimlerinin toplamından oluşmaktadır (Wiggins, 1977). Matematik olarak çok kanallı duruma ait koşt denklemleri (7) denklemlerinde  $x_t$ ,  $V$  ve  $u$  değişkenlerine  $k$  sayacı eklenmesi ve  $k$  üzerinde toplama alınması ile bulunur.

Çoğu çok kanallı tersevrşim uygulamasında genelde herbir girdiyi herbir çıktıya bağlayan ayrı bir süzgeç bulunur. Diğer bir deyişle herbir çıktı kanalı çeşitli süzgeçlerle işlenmiş girdi kanallarına ait çıktıların toplamından oluşur. Bu yönü ile örneğin  $N$  girdi ve  $M$  çıktı kanallı bir düzenlemede  $N \times M$  sayıda süzgeç fonksiyonu tasarımı gereklidir. Enküçük entropi tersevrşimde tüm kanallar için tek bir süzgeç fonksiyonu tasarlanır ve uygulanır.

### 3- YAPAY ÖRNEKLER

MED yöntemi sismik prospeksiyon veri işleme için birkaç yıldır rutin olarak kullanılmasına karşın, yöntemin özelliklerinin yeterince incelenmediği bir gerçektir. Bu nedenle yöntemden gereğince yararlanılmamaktadır.

MED için mevcut rutin piyasa programları araştırma amacı ile kullanılacak derecede esnek ve çok yönlü değildir. Bu nedenle Wiggins'in (1977) matematik formülasyonuna dayanan (16) ~ (19) denklemleri, çok amaçlı, özellikle süzgeç boyu seçimi için gerekli bilgileri de üreten ve dökümleyen yeni bir bilgisayar programı yazılmıştır.

Bir yöntemin özelliklerinin incelenmesinde yapay veri kullanımı en elverişli yoldur. Yapay veri kullanıldığında yöntemin erişmesi gereken ideal sonuç bilindiğinden saptanan özelliklerin yorumlanması çok daha sağlıklı olur. Bu yazıdaki incelemede de yöntemin çeşitli özelliklerinin incelenmesine yönelik oluşturulan özel yapay veriler kullanılmıştır. Yapay verilerle yapılan analizlerin ayrıntısından önce tüm analizler için geçerli olan ve özellikle süzgeçle ilgili

özellikleri sunmak yerinde olacaktır.

Süzgeçle ilgili önemli işlemlerden biri başlangıç süzgecinin kestirimidir, çünkü bilindiği gibi çoğu dürül (iteratif) yöntemde başlangıç değerlerinin kestirimi sonucu etkiler. Yapılan çok sayıda irdeleme ve Wiggins (1977) tarafından önerilen iğnecik biçimli başlangıç kestiriminin yeterince iyi olduğu saptanmıştır. Bu irdelemeler ile MED çıkışlarında olduğu bilinen zaman kaymasının (Wiggins, 1977) iğnecik biçimli başlangıç süzgeci ile ilgili olduğu anlaşılmıştır. Başlangıç süzgecinde iğneciğin tam süzgeç ortasında olması durumunda çıkışta elde edilen yaklaşık iğnecik giriş dalgacığının enerjisinin enbüyük olduğu zamandır. İğneciğin tam süzgeç ortasında olması tek sayıda süzgeç boyu kullanımı ile sağlanır. Başlangıç süzgecindeki iğneciğin konumu ile kayma miktarı ayarlanabilir ve uygun kayma kullanılarak çıkıştaki kaymalar önlenir. Diğer yandan MED çıktıların ters polariteli olduğu bilinmektedir. Bunu önlemek için çıkışlarda işaret terslemesi veya daha ekonomik olan işareti terslenmiş süzgecin uygulanması yeterlidir.

#### 3.1- Yapay Veri I: Tek Dalgacık

Yöntem irdelemelerinde kullanılan en basit yapay veri tek bir dalgacıktır. Bu veri gürültü içermeyişinden MED süzgecinin dalgacığının tersine (inverse) eşit olması gerekir. Ancak bilindiği üzere dalgacık gibi sınırlı boyda bir verinin tersi sonlu enerjili olmasına karşın tek yanlı sonsuz boydadır. Bu özellik üstelik dalgacığının gecikme özelliğinden (enküçük gecikmeli, enbüyük gecikmeli veya karışık gecikmeli) bağımsızdır. Dalgacık tersi tek yanlı sonsuz boyda ve sonlu enerji olduğu için değerleri asimtotik olarak sifıra yaklaşır. Bu yaklaşma hızlı veya yavaş olabilir ve yaklaşma hızı dalgacığının kök değerlerine bağlıdır.

Uygulamada dalgacığı iğnecik yapacak süzgecin boyu sonlu olmaya zorunludur, yani ideal süzgeci bulmak olanaklı değildir. Ancak özellikle hızla sifıra yaklaşan dalgacık tersi durumunda süzgecin sınırlı boyda olması fazla sorun yaratmaz. Yine de tek dalgacık gibi yalın bir veriyi iğnecikleştirecek süzgeç tasarımı dahi sorunsuz değildir, süzgeç boyu önemli bir değıştirgendir.

Süzgeç boyu etkisi Şekil 2'de bir örnek üzerinde sergilenmiştir. Şekil 2a'daki dalgacığın tersevrşimi sonucu oluşan çıkışlarda (Şekil 2b) süzgeç boyu artırdıkça gürültü düzeyinin azaldığı ve iğneciğin giderek ideal iğneciğe yaklaştığı görülmektedir. Buna bağlı olarak varimax ölçütü de giderek 1 değerine yaklaşmaktadır (Şekil 3).

Genelde tersevrşim işleminin süzgeç boyu artırdıkça daha sağlıklı sonuçlar verdiği, ancak belli bir boyun üzerine çıkıldığında çıkışların bozulduğu bilinmektedir. Çünkü süzgeç katsayılarının belirlenmesinde (hemen hemen tüm tersevrşim yöntemlerinde) süzgeç uzunluğu kadar özilişki fonksiyonu kullanılır ve özilişki fonksiyonu yüksek kaymalarda giderek sağlıklı değerler alır. Bu olgu yüksek düzeyde gürültü ve/veya dar frekans bantlı (geniş özilişki fonksiyonlu) gürültü bulunduğunda daha da belirgindir. Ancak burada kullandığımız yapay veri gürültü içermeyişinden sonlu dalgacığının özilişki fonksiyonu da sonludur ve özilişki fonksiyonun yüksek kaymalarda giderek sağlıklı değerler alması sözkonusu değildir. Bu nedenle genelde süzgeç boyunun çok uzatılması sonucu çıkışlarda oluşan bozulmayı bu örnekte gözlemek olanaklı değildir.

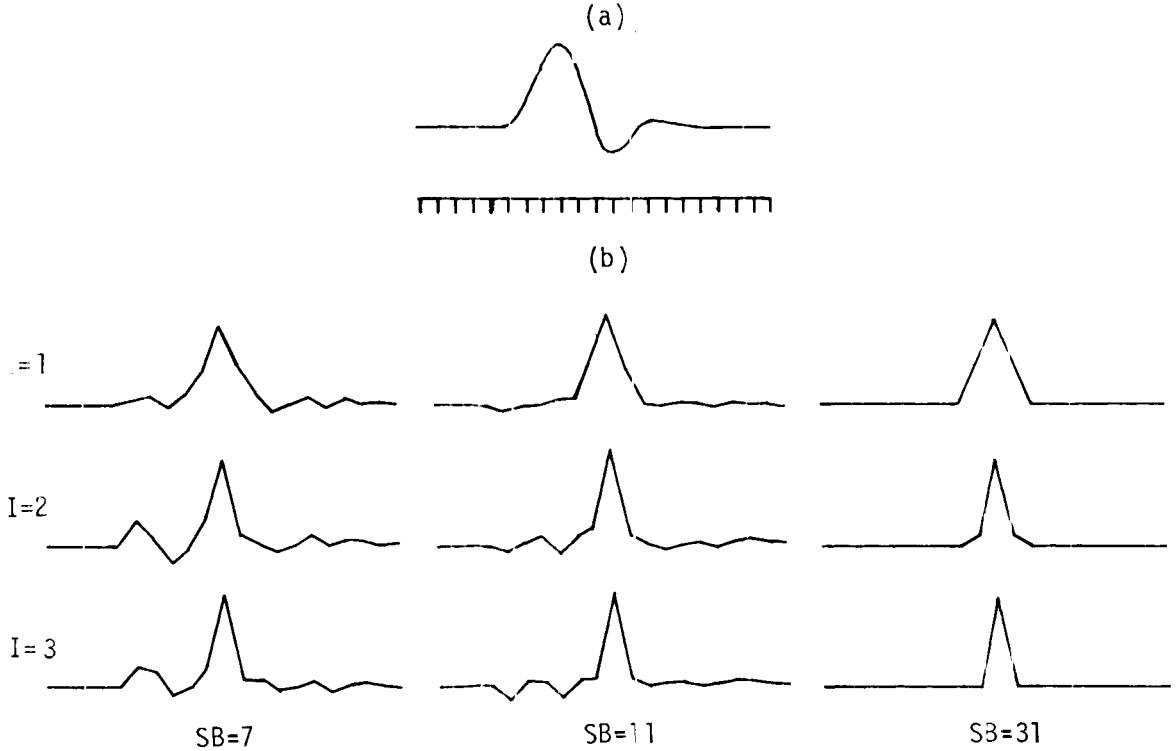
Bu çalışmada MED uygulanan çok sayıda yapay veride sonuca ulaşmak için az sayıda iterasyonun yeterli olduğu görülmüştür. Şekil 2 ve Şekil 3'ten de anlaşılacağı gibi he-

saplamalar 3. iterasyonda kesilebilir. Bu bulgu tüm tek kanallı gürültüsüz yapay veriler için geçerlidir. Yapay veriler çok kanallı ve/veya gürültülü olduğunda veya gerçek veri kullanıldığında genellikle 5 ~ 7 iterasyon gerekmektedir.

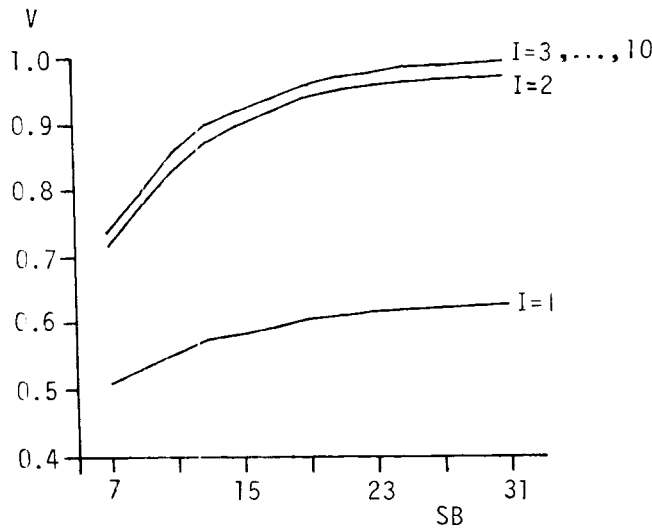
Tek dalgacık girişi ile yapılan irdeleme kuramsal olarak bilinen ve çoğu tersevrşim yönteminde de gözlenen süzgeç uzaması ile oluşan düzelmeyi MED kullanıldığında da geçerli olduğunu göstermiştir. Bu sanıldığı kadar doğal değildir, çünkü MED tümüyle alışılmışı bir mantık üzerine kurulmuştur ve aslında bir tersevrşim yöntemi değil bir sinyal basitleştirme yöntemidir. Nitekim bir sonraki örnek MED yönteminin ilginç bir davranışını sergilemektedir.

### 3.2. Yapay Veri II: Çift Dalgacık

Şekil 2a'da görülen yapay veri aynı biçimli ancak farklı genlikli iki dalgacıktan oluşmaktadır. Şekil 2b'de görülen farklı boylardaki süzgeç çıkışları beklenenin tersine bir davranış sergilemektedir: Uzun boydaki süzgeç çıkışında (SB = 49, I = 3) ikinci dalgacık hemen hemen kaybolmuştur. Bu durum uzun süzgeç boylarında oluşan sağlıksız özilişki fonksiyonu kullanımı ile açıklanamaz çünkü yapay veri gürültü içermemekte, dolayısı ile özilişki fonksiyonunda yüksek kaymalarda herhangi bir bozulma olmamaktadır.



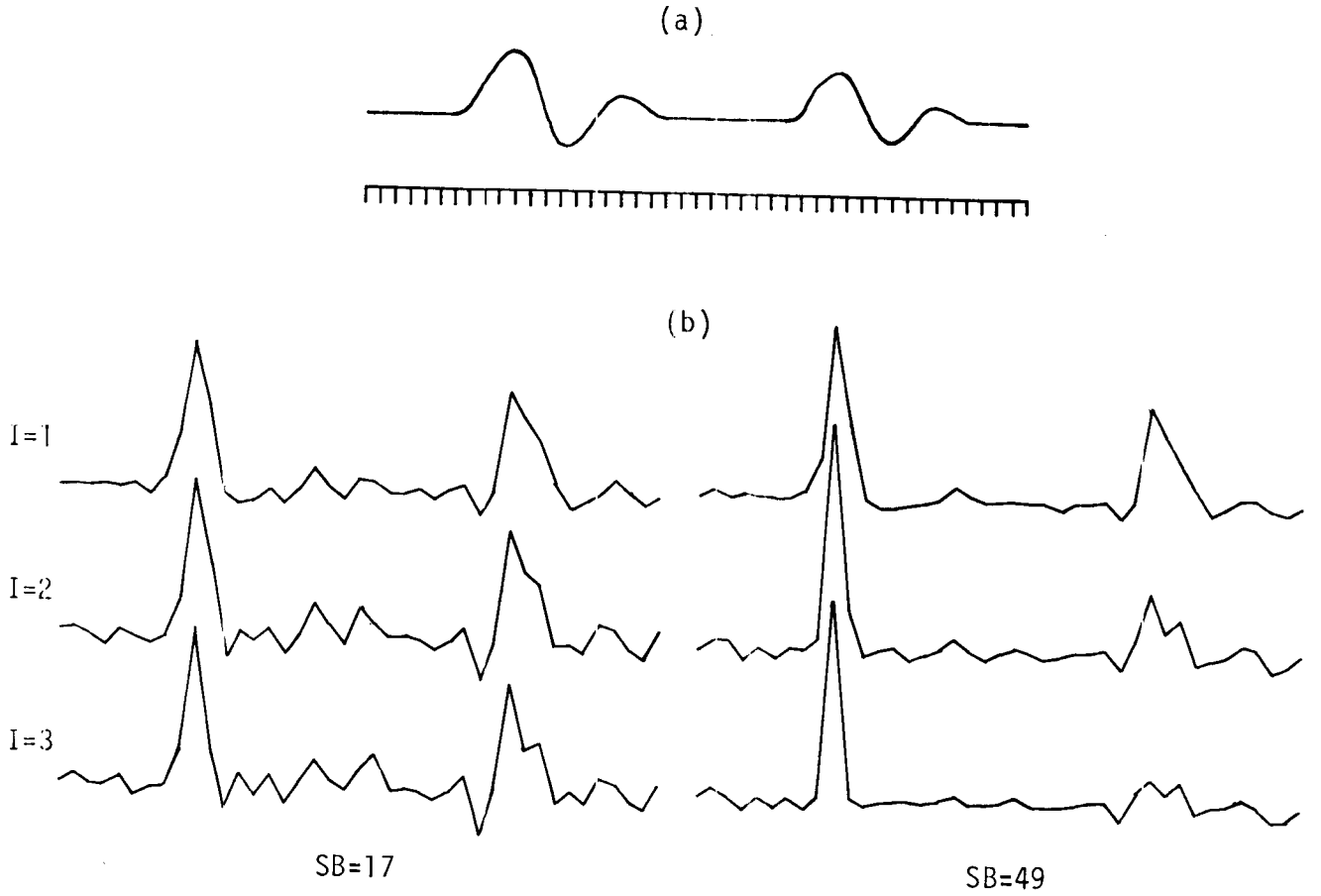
Şekil 2- Tek bir dalgacığın (a) farklı süzgeç boyları (SB) ve iterasyonlar (I) için en küçük entropi tersevrşimini (b)



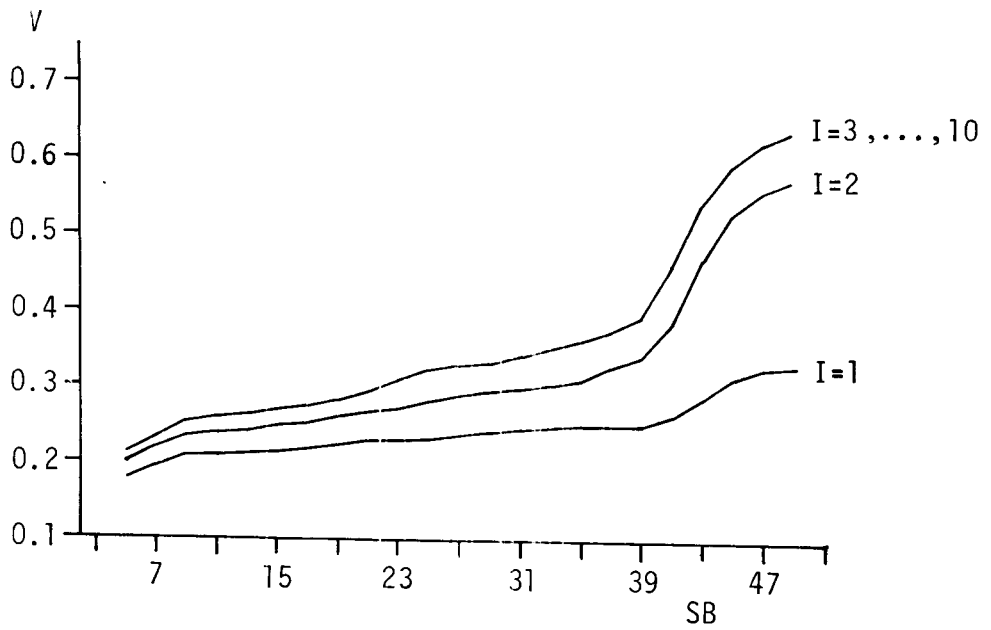
Şekil 3- Tek bir dalgacığın en küçük entropi tersevrşiminde "varimax" ölçütü (V), süzgeç boyu (SB) ve iterasyon (I) ilişkisi.

Bir tersevrşim yöntemi için ikinci dalgacığın kaybolması endişe verici olmakla birlikte, MED'in dayandığı ölçüt açısından tutarlıdır. MED'in amacı varimax'ı artırmak (entropiyi azaltmak) yani sinyali basitleştirmektir. Uzun boylu bir süzgeçle (SB = 49) ve artan iterasyonla bu amaca erişilmekte, çıkış en basit veri türü olan tek iğneciğe yakınsamaktadır. Buna koşut olarak varimax da artmaktadır (Şekil 5). Sinyal basitleştirme açısından kısa süzgeç (SB = 17) çıkışı yetersizdir: Çıkış iki iğnecik içermektedir ve bunlar üstelik oldukça geniştir. Tersevrşim açısından kabul edilebilir sonuç kısa süzgeçle elde edilmektedir.

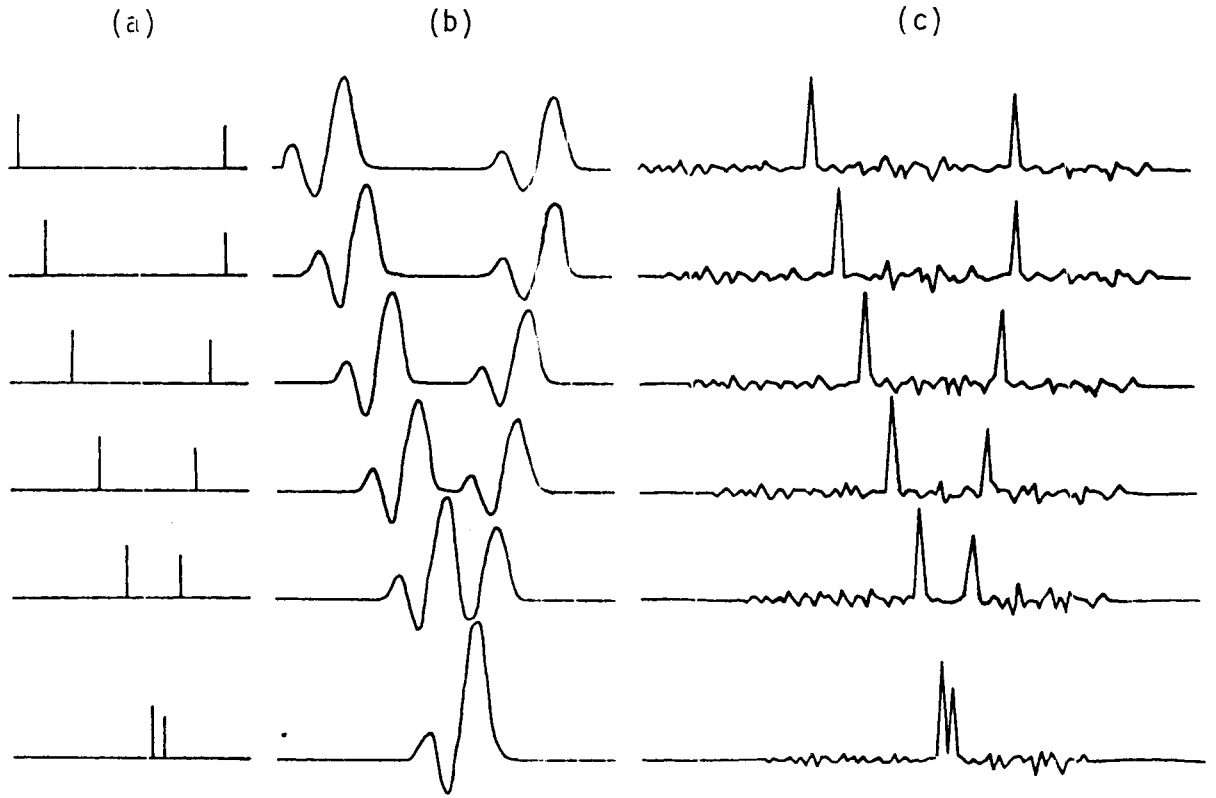
Genelde süzgeç boyunun aşırı uzaması ile çoğu tersevrşim yönteminin çıkışlarında görülen bozulma MED çıkışlarında da görülmekte, ancak farklı bir nedenden kaynaklanmaktadır. Uzayan süzgeç boyu ile MED amacı gereği sinyali basitleştirmekte, hatta jeofizik yorumlamada sakınca yaratacak derecede aşırı basitleştirmektedir. Her tersevrşim yönteminde olduğu gibi MED yönteminde de kullanıcı süzgeç boyu ile çıkışların doğruluğu arasında (orantılı olmayan) ilişkiyi gözönünde tutmak zorundadır. En iyi süzgeç boyunun bulunması bilinçli bir irdelemeyi gerektirir. Bilinçli bir irdeleme bozulma nedenlerini bilmekle olanaklıdır.



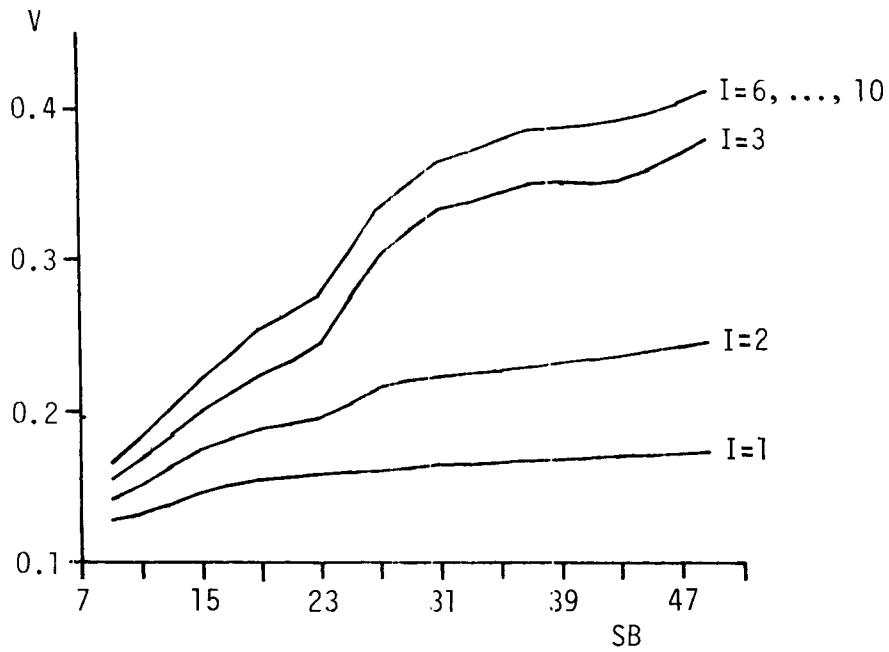
Şekil 4- Çift dalgacıklı veri modelinin (a) farklı süzgeç boyları (SB) ve iterasyonlar (I) için en küçük entropi tersevişimi (b)



Şekil 5- Çift dalgacıklı veri modelinin en küçük entropi tersevişiminde "varimax" ölçütü (V), süzgeç boyu (SB) ve iterasyon (I) ilişkisi.



Şekil 6- Kamalanma modeli yansıma katsayılarının (a) dalgacıkla evrişimi ile oluşan yapay verinin (b) en küçük entropi tersevişimi (c).



Şekil 7- Şekil 6b'deki verinin en küçük entropi tersevişimindeki "varimax" ölçütü (V), süzgeç boyu (SB) ve iterasyon (I) ilişkisi.

### 3.3- Yapay Veri III: Çok Kanallı Gürültüsüz Kamalanma

MED süzgeci çok kanallı veriler kullanılarak tasarlandığında daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Bunu örnekle sergilemek amacı ile Şekil 6a'da jeolojik olarak bir kamalanmayı simgeleyen yansıma katsayıları dalgacık ile evriştirilerek Şekil 6b'deki yapay veri oluşturulmuştur.

Şekil 6c'de görülen MED çıkışı sonuçlar ( $SB = 49$ ,  $I = 7$ ) alışılmış ters evrişim yöntemlerinden alınan sonuçlara oranla son derece üstündür. Dalgacıklar tümü ile örnekleme aralığının izin verdiği en dar iğneciklere dönüşmüştür. Çıkışlardaki sonlu süzgeç boyundan kaynaklanan gürültü diğer yöntemlerde oluşan gürültüye oranla çok düşüktür. En çarpıcı sonuç 6. kanalda sadece 1 örnekleme aralığı kayma ile üstüste binmiş dalgacıkların MED çıkışında ayrıştırılmış olmasıdır. Genel ters evrişim yöntemleri bir yana, dalgacığın önceden bilindiği ve bu bilginin ters evrişimde kullanıldığı uygulamalarda dahi bu denli ayrışım elde edilememektedir.

Şekil 6b'deki yapay verinin herbir kanalına bireysel olarak MED uygulamak olanaklıdır. Bu tür bir uygulamada da iyi sonuçlar alınmakla birlikte iğnecikler yeterince dar olmamakta ve 6. kanaldaki yakın dalgacıklar ayrıştırılmamaktadır. Bu nedenle çok kanallı uygulama her zaman yeğlenmelidir. Kanal sayısında bir üst sınır yoktur. Çoğu ters evrişim yönteminde kanal sayısı artması ile kanalların birbirlerini etkilemesi artar, girişte bir veya iki kanalda görülen olaylar ters evrişim sonucu diğer yakın kanallara yayılır. MED yönteminde bu tür bir kanallararası etkilenme söz konusu değildir.

Çok uzun süzgeç boylarında aşırı basitleştirme sonucu sağlıksızlaşma bir önceki tek kanallı çift dalgacıklı yapay veride sergilenene benzer biçimde çok kanallı uygulamada da ender de olsa oluşmaktadır. Bu nedenle çok kanallı uygulamalarda da süzgeç boyu devamlı kontrol altında tutulmalı, gerekiyorsa farklı süzgeç boyları için hesaplamalar yapılarak sonuçlar kendi aralarında ve ters evrişime girer veri ile karşılaştırılarak en iyi sonuç saptanmalıdır.

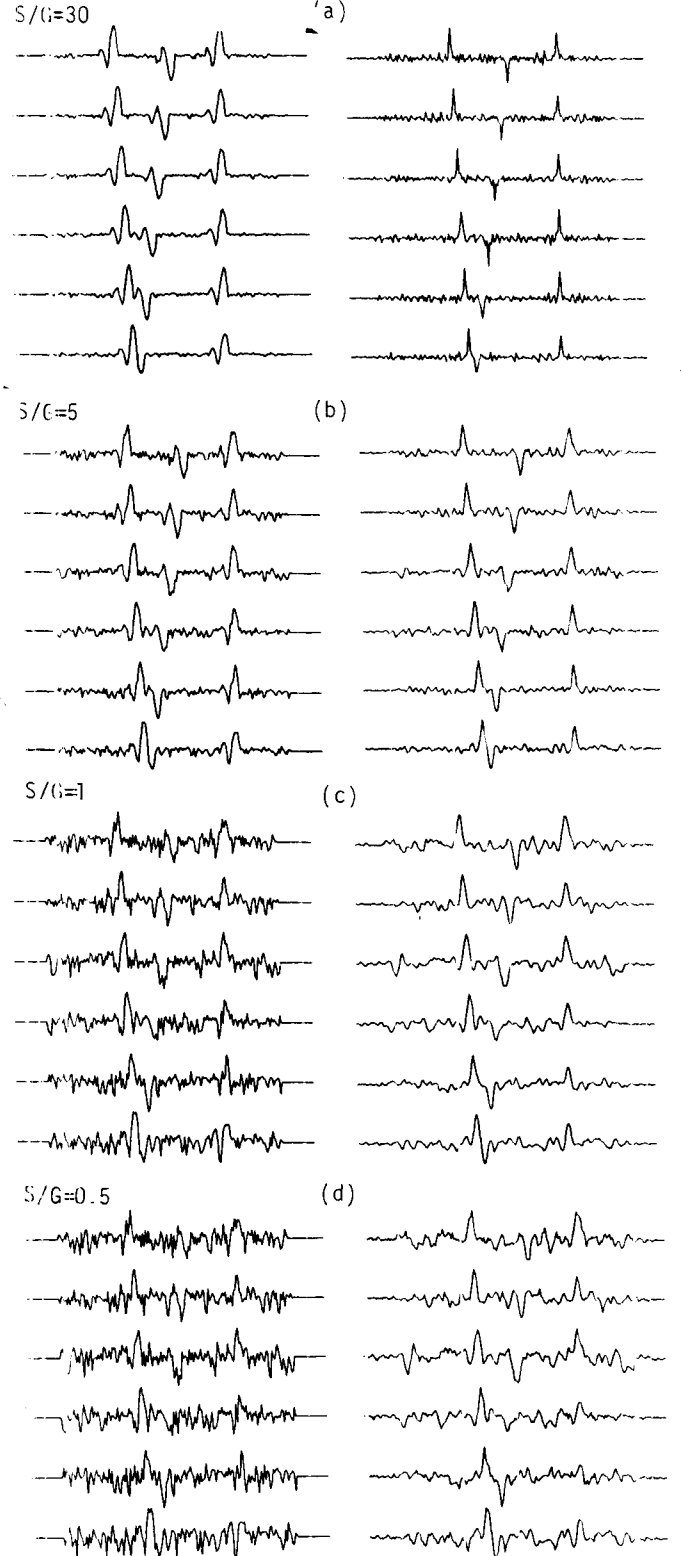
Şekil 6b'deki yapay verinin diğer bir özelliği dalgacığın enbüyük gecikmeli olmasıdır. Çoğu ters evrişim yönteminde süzgeç tasarımı enküçük gecikmeli dalgacık varsayımı ile yapılır ve yöntem karışık veya enbüyük gecikmeli dalgacıklar içeren sinyallere uygulandığında sağlıklı sonuçlar alınmaz. MED yöntemi matematik esas olarak dalgacık tersleme yerine sinyal basitleştirme ilkesine dayandığından dalgacık türünün önemi yoktur. Bu MED yönteminin diğer yöntemlere olan önemli bir üstünlüğüdür.

Şekil 7'den görüldüğü gibi çok kanallı uygulamada gerekli iterasyon sayısı tek kanallı uygulamalara oranla daha fazladır. Çok sayıda irdeleme sonucu çok kanallı uygulamalarda 5 ila 7 iterasyonun yeterli olduğu görülmüştür.

### 3.4- Yapay Veri IV: Çok Kanallı Gürültülü Kamalanma

Gürültü içermeyen yapay veri modelleri yöntemle ilgili çeşitli özelliklerin yalın bir biçimde anlaşılmasına ve sergilenmesine yardımcı olmakla birlikte doğal olarak yeterli değildir. Üst düzeyde veri modelleri gürültü içermelidir ve bir yöntemin önemli özelliklerinden biri farklı gürültü seviyeleri içeren girişlere davranışdır. MED yönteminin gürültü duyarlılığını incelemek amacı ile oluşturulan yapay veriler Şekil 8'de de görülmektedir. Model 4 katmandan oluşmakta, 2. katman 1. katmana kamalanmaktadır ve alt ara yüzeyi 3. katmandaki düşük hızdan ötürü ters polaritelidir. Yansıma

katsayıları modeli Şekil 8a'daki MED çıkışına çok benzediği için ayrıca görüntülenmemiştir. Yansıma katsayıları modeli bir dalgacık ile evriştirilmiş ve artan oranlarda gürültü eklenmiştir. Sırası ile, sinyal-gürültü oranı ( $S/G$ ) 30, 5, 1, 0.5 alınarak oluşturulan yapay veriler Şekil 8a, b, c, d'de solda ve ilgili MED çıkışları hemen sağında görülmektedir.



Şekil 8- Farklı sinyal-gürültü oranları için oluşturulan yapay veriler ve MED çıkışları.

