

# Yerkürenin Sismik Serbest Titreşim Modlarının VTEC Zaman Serileri Üzerinden Tespit Edilmesi

Meltem Köroğlu<sup>1,2</sup>, Yakup Özkazanç<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ROKETSAN A.Ş.

Ankara

[mkutlu@roketsan.com.tr](mailto:mkutlu@roketsan.com.tr)

<sup>2</sup>Hacettepe Üniversitesi

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Ankara

[yakup@ee.hacettepe.edu.tr](mailto:yakup@ee.hacettepe.edu.tr)

## Özet

*İyonosfer, dünya atmosferinin iyonize olmuş gazlardan oluşan katmanıdır. Bu katman kısa dalga ve uydu haberleşmesi açısından atmosferin en önemli katmanını oluşturur. Toplam elektron içeriği (TEC, Total Electron Content) iyonosfer katmanındaki iyonlaşmayı karakterize etmek için kullanılan temel ölçütlerden biridir. Bu çalışmada GPS tabanlı bir yaklaşımla elde edilmiş VTEC (Vertical Total Electron Content) zaman serileri incelenmiştir. VTEC zaman serileri üzerinde yapılan frekans analizleri ile ayın yer küre etrafındaki dönüşünden kaynaklanan bazı gel-git (tidal waves) modlarını gözlemek mümkün olmuştur. Bu analize ilave olarak; VTEC zaman serilerinin güneşten kaynaklanan ışımaya dayandığı temel alınarak güneş ışıması-VTEC dinamiği için yüksek mertebeli doğrusal bir model geliştirilmiştir. Bu modelin parametreleri, VTEC zaman serilerine kanonik korelasyon analizi uygulanarak elde edilmiştir. Güneş-VTEC modelinin rezonans frekanslarından pek çoğunun yer kürenin elastik titreşim modları olarak değerlendirilebilecek olan sismik titreşim modları (Free Oscillation of the Earth) ile örtüştüğü tespit edilmiştir.*

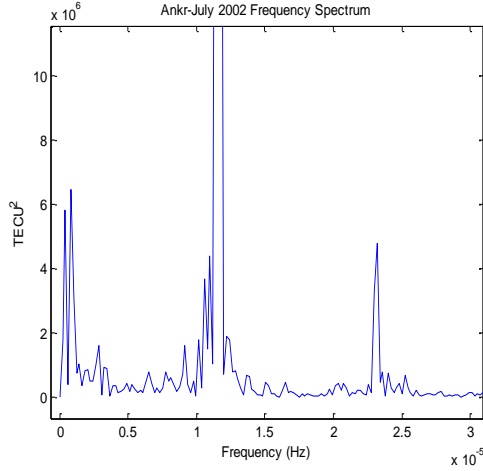
## 1. Giriş

İyonosfer, atmosferin termosfer ve ekzosfer katmanları arasında yer alan bir katmanıdır. İyonosferin karakteristik özelliği güneş ışınları ile iyonize olan serbest elektronlardan oluşmasıdır. Güneş ışımasını iyonosferde bulunan serbest elektron miktarını doğrudan etkileyen en önemli faktördür. İyonosferde bulunan toplam elektron içeriği (TEI) iyonosonda teknikleri ile doğrudan veya GPS ölçümlerindeki faz kaymasından yararlanılarak dolaylı olarak ölçülebilmektedir [1]. Yerküre üzerinde bir lokasyona ait VTEC büyüklüğü, ilgili yerden atmosfere doğru uzanan ve birim kesit alanlı yarı-sonsuz bir silindirik hacim içerisinde bulunan toplam serbest elektron miktarı ile ifade edilmektedir. VTEC zaman serileri incelendiğinde bu sinyallerin çok belirgin bir günlük periyoda sahip olduğu, ancak buna ilave olarak gürültü nitelikli bir davranış da sergilediği gözlenmektedir. Günlük periyot güneş ışıması ile doğal olarak eşleştirilmekte iken, VTEC sinyallerindeki diğer ‘gürültü’ bileşenleri için bugüne kadar getirilmiş kapsamlı bir çerçeve veya model bulunmamaktadır. Bu çalışmada VTEC sinyalleri kör analiz yöntemleri ile incelenmiştir. Periodogram yönteminden yararlanılarak; VTEC sinyalleri içinde, dünya-ay gravitasyonel etkileşimi olan, gel-git etkisini karakterize eden modlar (tidal waves) tespit edilmiştir. VTEC sinyallerinin lokal güneş ışıma şiddetinin bir sonucu olduğunu temel alan dinamik bir model ortaya konulmuştur. Kanonik korelasyon analizi ile elde edilen güneş-iyonosfer dinamiği modelinin rezonans frekansları olarak ortaya çıkan modların yerkürenin sismik serbest titreşim modları (free oscillations of the earth) ile örtüştüğü belirlenmiştir.

## 2. VTEC Zaman Serileri ve Periodogram Analizi

Bu çalışmaya temel teşkil etmesi için, dünyanın belirli konumlarına yerleştirilmiş olan GPS almacıların ölçümlerini işleyerek VTEC verilerini elde etme yöntemlerinden birisi olan IONOLAB-TEC [2] yöntemi ile elde edilmiş olan VTEC zaman serilerinden yararlanılmıştır. Yararlanılan VTEC zaman serilerinin örneklenme periyodu 2.5 dakika olup, ölçümler her almaca (istasyona) özel, yıllar bazında ve aylık olarak ele alınmıştır. Yapılan analizler normal ölçüm olarak kabul edilen 1 ve 160 TECU değerleri arasında bulunan üç farklı istasyonun aynı zamana ait zaman serileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Analiz edilen verilerin karşılaştırılması amacı ile, bir ay boyunca 2.5 dakika aralıklı olarak elde edilmiş eksiksiz veri setlerinin bulunduğu aylar ve istasyonlar arasında numune olarak üç istasyona ait VTEC verileri seçilmiştir. Bu istasyonlar Ankara/Türkiye (Ankr), Hailsham/İngiltere (Hers) ve Olysztyń/Polonya (Lama) istasyonlarıdır. Bu istasyonlardan alınan Temmuz 2002 ayına ait GPS verilerinden derlenen VTEC zaman serileri üzerinde frekans analizleri gerçekleştirmek amacıyla; periyodogram yöntemi kullanılmıştır. Periyodogram yöntemi, zaman serileri

üzerindeki gizli tekrarları ortaya çıkarmakta kullanılmaktadır [3]. Bu yöntemle zaman serilerinde güç bakımından düşük olan bileşenleri de elde etmek mümkündür. Şekil-1’de ankr istasyonuna ait VTEC verilerinin frekans spektrumu örnek olarak verilmiştir. Bu analiz, her üç istasyon için de tekrarlanmış ve tüm istasyonlarda ortak olarak gözlenen periyotlar Tablo-1 olarak verilmiştir.



Şekil 1 Ankara Temmuz 2002 Frekans Spektrumu

Gözlenen Periyot	Gel-Git Periyodu (Tidal wave)
682,66667 sa	≈ 27.4789 gün Lunar Monthly
341,33333 sa	≈ 13.6235 gün Lunar Synodic Fornightly
27,30667 sa	28.006 Larger Elliptic Diurnal
26,25641 sa	≈ 26.87 Larger Lunar Elliptic
25,283951 sa	≈ 25.82 Principal Lunar Diurnal
23,953216 sa	Luni Solar Diurnal
22,755556 sa	≈ 23.1 saat Small Lunar Elliptic
21,67196 sa	≈ 22.30 saat Lunar Diurnal
11,976608 sa	≈ 11.96723606 saat Lunisolar Semidiurnal
11,57062 sa	≈ 11.6069 saat Shallow Water Semidiurnal
11,010753 sa	
7,984405 sa	≈ 8.280400802 saat Lunar Terdiurnal

Tablo 1 İstasyonların Ortak Periyotları ve Gel-Git Etkileri

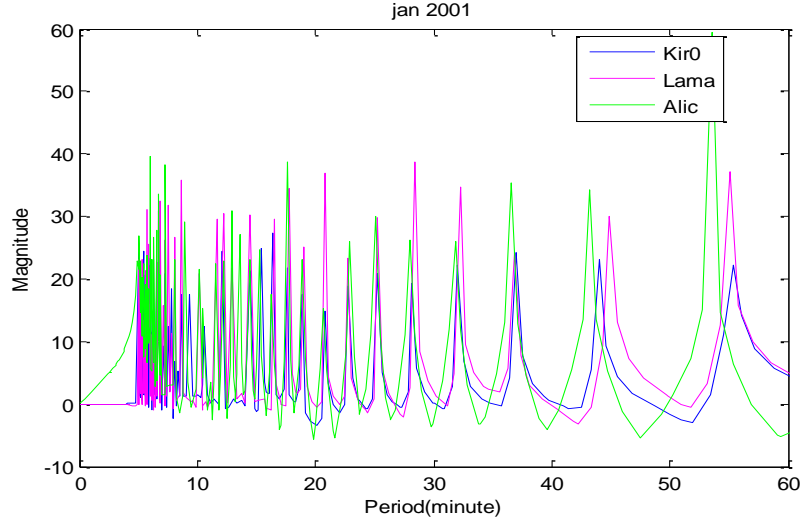
Her üç istasyonda da gözlemlenen ortak periyotların, Dünya’nın ve Ay’ın görece hareketinden kaynaklanan gel-git modları (tidal waves) [4] olduğu tespit edilmiştir. Bu modlar arasında, 23.95 saat olarak ve diğerlerine göre misli ile kuvvetli olarak gözlenen ‘Luni Solar Diurnal’ modu dünyanın kendi etrafındaki günlük dönüşü ile ilgili iken, diğer modlar ayın dünya üzerinde yarattığı gravitasyonel çekim (gel-git etkisi) kuvvetinin belirtileridir. Yerkürenin gel-git modlarının VTEC verilerinden gözlenmesi; yerkürenin hareketinin elektro-magnetik bir sonucu olabileceğini ima etmektedir. Yeryüzeyindeki kayaçların piezo-elektrik niteliklerinin bu etkileşimin en doğal müsebbibi olduğu yolundaki kanaatimizi de burada vurguluyoruz.

### 3. VTEC Zaman Serilerinin Dinamik Bir Sistem Olarak Modellenmesi

VTEC zaman serilerinin, güneş ışımasının bir sonucu olduğu temel alınmış ve güneş ışıma şiddeti ile VTEC sinyali arasındaki ilişkiyi karakterize eden dinamik bir model geliştirilmiştir. Güneş ışıma şiddeti ve VTEC verisi arasında doğrusal bir dinamik ilişki olduğu varsayılmış ve bu ilişkiyi 96. mertebeden bir doğrusal fark denklemi olarak ifade eden bir model oluşturulmuştur. VTEC ölçüm aralıklarının 2.5 dakika olduğu göz önüne alınırsa, dinamik modelimizin 4 saatlik kayan bir pencere içinde Güneş-VTEC dinamiğini modellediğini söyleyebiliriz. Yapısını bu şekilde belirlediğimiz dinamik modeli veri setleri üzerinden tanımak için Kanonik Korelasyon Analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Kanonik korelasyon analizi iki veri grubu arasındaki optimal doğrusal eşleşimi belirlemek için kullanılabilen bir çok-değişkenli istatistik tekniğidir [5].  $X$  ve  $Y$  matrislerini  $x$  ve  $y$  ile ifade edeceğimiz verileri satırları olarak kabul eden veri matrisleri olarak ele alacağız. Kanonik korelasyon analizinin amacı bu iki veri seti arasında,  $a$  ve  $b$  vektörleri  $x$  ve  $y$  veri setlerinin boyutu ile uyumlu olacak şekilde,  $ax = bx$  olarak ifade edilen bir eşitliği ‘optimal’ olarak tesis etmektir.  $X$  ve  $Y$  verileri setlerinin sıfır ortalamalı olduğunu varsayarsak, bu eşitliği ‘optimal’ olarak sağlamanın bir yöntemi eşitliğin her iki tarafında yer alan ifadelerin aralarındaki korelasyonu maksimize edecek şekilde  $a$  ve  $b$  vektörlerini seçmek olacaktır. Bu optimizasyon problemi, bir genelleştirilmiş özdeğer-özvektör problemine eşdeğerdir ve bu çalışmada MATLAB statistics toolbox kullanılarak kanonik korelasyon problemi çözülmüştür.

Bu çalışmada,  $X$  veri seti periyodu ‘luni solar diurnal’e eşit olarak tanımladığımız bir sinus sinyalinin 2.5 dakikada bir örneklenmiş versiyonudur. Bu sinus sinyalinin tepe noktası ise UTC zamanı ile analizin yapılacağı istasyondaki lokal öğle zamanı [6] olarak seçilmiştir. Böylece, çok kaba bir biçimde olsa da, iyonosfere erişen güneş ışıma şiddeti modellenmiş olmaktadır.  $Y$  veri seti olarak ise; ilgili istasyondan 2.5 dakika aralıkla derlenmiş ve UTC zamanı ile tanımlanmış olan VTEC veri seti alınmıştır.  $X$  matrisinin her bir satırı güneş ışıma şiddetini modelleyen sinus sinyalinin 2.5 dakika ara ile alınmış, ardışık 96 örneğinden,  $Y$  matrisinin denk gelen satırı ise yine aynı 4 saatlik zaman dilimine ait ve 2.5 dakika ara ile ardışık olarak ölçülmüş olan 96 adet VTEC verisinden oluşmaktadır. Kayan pencere mantığı ile bir aylık VTEC verisi bu şekilde yapılandırılmış ve kanonik korelasyon analizi yapılarak; güneş-VTEC dinamiğini karakterize eden 96. Mertebeden bir fark-denklemini elde edilmiştir. Bu fark denkleminin  $z$ -dönüşümü [3] uygulanmış ve güneş ışıma şiddetini girdi sinyali, VTEC miktarını ise çıkış sinyali olarak ifade ettiğimiz bir transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Kesikli-zamanda ifade edilen bu transfer fonksiyonu, örnekleme zamanının 2.5 dakika olduğu göz önüne alınarak, sürekli-zamanlı bir transfer fonksiyonuna dönüştürülmüştür. Bu işlem ankr, hers ve lama istasyonlarından alınan Ocak 2001 ayına ait VTEC verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ve Güneş-VTEC dinamiğini ifade eden transfer

foksiyonlarının Bode genlik diyagramı, frekans eksenini yerine periyot eksenini kullanarak, aşağıda Şekil-2’de verilmiştir.



Şekil 2 İstasyonların Bode Genlik Diyagramları

VTEC miktarının güneş ışımasından kaynaklanan dinamik bir değişken olduğu varsayılarak elde edilen transfer fonksiyonu modellerinde, Şekil-2’den görülebileceği gibi çok baskın bazı rezonans modlarının bulunduğu gözlenmiştir. Gözlenen bu rezonans modlarının uzun periyotlu olanları istasyondan istasyona küçük bir varyasyon sergilese de; kısa periyotların neredeyse sabit olduğu tespit edilmiştir. Gözlediğimiz bu rezonans modlarından en baskın olanının yaklaşık 54 dakikalık bir periyoda sahip olduğu ve bu modun yer kürenin serbest titreşim modlarından [7] en bilineni olması sebebi ile; güneş-VTEC dinamiğinde ortaya çıkan tüm diğer rezonans modları belirlenmiştir. Örnek olarak, ankr Temmuz 2002 modellemesinden ortaya çıkan rezonans modlarını yer kürenin serbest titreşim modları ile eşleştiren bir tablo aşağıda verilmiştir.

Elde Edilen Periyot	Serbest Titreşim Modu	Fark (Titreşim Modu-Periyot)	Yüzde hata
6.76 sa			
2.99 sa			
1.74 sa			
1.20 sa			
54,185	OS2 53.9 dk	-0.2860	%0.53
44,148	OT2 43.8 dk	-0.3481	%0.79
37,1009	OS3 35.6 dk	-1.5009	%4.21
32,1327			
28,0522	OT3 28.5 dk	0.4477	%1.57
25,1591	OS4 25.7 dk	0.5409	%2.10
22,8203	OT4 21.6 dk	-1.2204	%5.65
20,6964	OS0 20.5 dk	-0.1965	%0.95
19,0648	OS5 19.81 dk	0.7452	%3.76
17,6903	OT5 17.8 dk	0.1097	%0.62
16,5026	OS6 16.03 dk	-0.4726	%2.95
15,3378	OT6 15.35 dk	0.0122	%0.079

Elde Edilen Periyot	Serbest Titreşim Modu	Fark (Titreşim Modu-Periyot)	Yüzde hata
14,4277			
13,6169	OS7 13.48 dk, OT7 13.57dk	-0.0470	%0.35
12,8624	1T2 12.6 dk	-0.2625	%2.08
12,2265	OT8 12.22 dk	-0.0066	%0.054
11,6449	OS8 11.72 dk	0.0751	%0.64
11,0213	1S0 10.1 dk	-0.9214	%9.12
8,93796	OS11 8.91dk, OT12 8.93 dk	-0.0080	%0.089
8,06594	OS13 7.89 dk, OT14 7.93 dk	-0.1359	%1.71
7,30725	OS14 7.47 dk	0.1627	%2.18
6,49720	OT18 6.52 dk	0.0228	%0.35
6,01667	OT20 5.99 dk	-0.0267	%0.44
5,46309	OS23 5.42 dk	-0.0431	%0.79
5,21204	OS24 5.25 dk	0.0380	%0.72

Tablo 2 Ankr Temmuz 2002 Güneş-Vtec Modeli Rezonans Periyotları

Tablo-2’den görülebileceği gibi iyonosferik rezonans modlarının pek çoğu yer kürenin serbest titreşim modları [8, 9] ile örtüşmektedir. Tabloda yer kürenin sismik modlarında S küresel, T ise torsiyonel modları ifade etmektedir. Bazı modlarda sismik ve iyonosferik periyotlar arasındaki fark binde 1 mertebesinde bile daha düşük olmaktadır. Bu aşamada gözlenen iyonosferik modların anlamını da kısaca irdelememiz yerinde olacaktır. Modelleme espirimiz içinde VTEC sinyallerinin sinusoid olarak aldığımız güneş ışıma şiddetinin bir sonucu olduğu varsayılmıştır. Öte yandan, doğrusal bir sistemin sinusoid bir girdiye verdiği kalıcı-durum tepkisinin yine bir sinusoid olduğunu bilmekteyiz. Kanonik korelasyon analizi ile kurduğumuz model yalnızca temel uyarı frekansında sinusoidal girdi ve çıktı sinyalleri arasındaki genlik ve faz ilintisini yakalamakla kalmamakta, aynı zamanda VTEC sinyalinde gözlenen tüm bileşenleri transfer fonksiyonu modelinin parametrik yapısı içine gömmektedir. Böylece, VTEC sinyalleri içinde diğer analiz yöntemleri ile tespit edilemeyecek kadar

zayıf periyodik sinyalleri de tespit etmiş olmaktadır. VTEC sinyalleri içinde, çok zayıf da olsa, yerkürenin sismik serbest titreşim modlarının tespit edilmesi; yerküre ile ionosfer arasında bir elektro-magnetik bir etkileşim olduğuna delalet etmektedir. Bu etkileşim için en doğal adayın; yerkabuğunu oluşturan kayaların tipik özelliği olan piezo-elektrik etki olduğunu düşünmekteyiz.

#### 4. Sonuç

Çalışmamız, ionosfer katmanındaki iyonlaşma süreçlerinde güneş, ay ve dünyanın etkilerini göstermektedir. Dünyanın kendi etrafındaki günlük dönüşü, bir lokasyon civarındaki VTEC miktarını birincil olarak etkileyen faktördür. Güneş ışımasının yanında, gel-git modlarının (tidal waves) izleri de VTEC sinyalleri içinde tespit edilmiştir. Gel-git kaynaklı bileşenlerden de zayıf olmak üzere, dünyanın sismik rezonans modlarının da ionosferik sinyaller üzerinden gözlenmesi; bildiğimiz kadarı ile ilk defa rapor edilmektedir. VTEC sinyallerinde, güneş ışımasının, dünya-ay gravitasyonel etkileşiminin (tidal waves) ve yerkürenin sismik serbest titreşim modlarının etkilerini azalan sıra ile gözlenmiş durumdayız. Bu analizler sonucu; bu üç etkenden herhangi birisi ile eşleştiremediğimiz bazı modlarda gözlenmiştir. Eksiksiz bir tarama yapmadan, bu modların ionosferin kendi öz-dinamiği olup olmadığı konusunda ise şimdilik yorum yapmaktan kaçınmaktayız.

#### 5.Kaynaklar

- [1] Mannuci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements, *Radio Sci.*, 33(3), 565-582, 1998.
- [2] Arıkan F.C, Erol C.B., Arıkan O., Regularized Estimation of Vertical Electron Content From GPS Data For a Desired Time Period, *Radio Science*, 39, 2004.
- [3] Oppenheim A.V., Schafer R.V., *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, 1989.
- [4] Cartwright D.E, *Tides: a scientific history*, Cambridge University Press, 2001
- [5] Johnson, Richard A.; Wichern, Dean W., *Applied Multivariate Statistical Analysis* (Sixth ed.), Prentice Hall, 2007.
- [6] B.D. Yallop, A simple, compact algorithm for calculating times of sunrise and sunset, H.M. Nautical Almanac Office, 1996
- [7] Shved G.M., Petrova L.N., Polyakova O.S., Penetration of the Earth's Free Oscillations at 54 Minute Period Into the Atmosphere, *Annales Geophysicae*, 2000
- [8] Robert L.Kovarch, Don L. Anderson, Study of the Energy of the Free Oscillations Of the Earth, *Journal of Geophysical Research*, 1967
- [9] Alsop L.E., Spheriodal Free Periods Of The Earth Observed At Eight Stations Around The World, *Seismological Society of America*, 1964