

# Gerçek Zamanlı Kinematik GPS ile Ölçülen Köprü Salınımlarının Zaman Serisi Analizi

K. Sedar GÖRMÜŞ<sup>1</sup>, Çetin MEKİK<sup>2</sup>, Ş. Hakan KUTOĞLU<sup>2</sup>

## Özet

Bu çalışmada, Gerçek Zamanlı Kinematik (GZK) GPS ile köprü salınımlarının modellenmesinde farklı bir yöntem olarak daha çok Elektrik-Elektronik mühendisliği disiplini kullanılarak ve bir zaman serileri analiz yöntemi olan Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) tekniği kullanılmıştır.

Bu amaçla Zonguldak kent merkezindeki 1956 yılında tamamı perçinli çelik konstrüksiyon olarak inşa edilen Fevkanı Köprüsünün, günün farklı zamanlarındaki trafik yoğunluğuna göre salınım ve titreşimleri GZK GPS ile ölçülmüştür. Bunun için referans alıcısı kentin yüksek tepelerinden birinin üzerine yerleştirilmiş ve iki gezici alıcı da köprüünün belirlenen iki noktasında sabit merkezleme düzeneği üzerine konulmuştur. Trafikğin ve özellikle ağır tonajlı araçların en yoğun ve en seyrek geçtiği zamanlarda 1 saniye ölçü aralığı (interval) ile ölçmeler gerçekleştirilmiştir.

## Anahtar kelimeler

Gerçek Zamanlı Kinematik GPS, deformasyon, Hızlı Fourier Dönüşümü

## Abstract

### Determining Resonance Of a Bridge Using Time Series Analysis

Today GPS technology has found various uses in many fields as well as in geodetic applications. One of the most crucial factors in expanding the use of GPS is by means of the real time kinematic (RTK) GPS method which produces positions in a few seconds with a few centimeter accuracy, and consequently the productivity in projects.

This study focuses on another use of RTK GPS or rather the employability of RTK GPS in another field. For this purpose, vibrations and resonance of the Fevkanı Bridge -situated in the city centre of Zonguldak and built as a composite construction of riveted steel and asphalt in 1956-are observed by RTK GPS during the different parts of the day depending on the traffic density. The base (reference) receiver is placed on one of the highest hills in the city and two rover receivers on both rails of the bridge on the fixed centering mechanisms. The observations are carried out with one second interval during busy and less busy hours of the traffic, especially accounting for heavy load vehicle traffic. The changes in vibrations and resonance of the bridge computed by the analyses explained here are modeled using approaches such as Fast Fourier Transform and presented in this paper.

## Key Words

Real Time Kinematic GPS, deformation, Fast Fourier Transform

## 1.Giriş

Verilerin ya da sinyallerin zaman uzayında art arda sıralanmasına zaman serisi denilmektedir. Zaman serileri tek boyutlu sinyallerdir. Bir zaman serisinin frekans uzayında örneklenmesi için seriye Fourier dönüşümü uygulanabilir (HEUNECKE ve PELZER 1998).

Fourier dönüşümü yapmanın amacı sürekli-zamanlı bir işaretin, frekans alanında örneklenmesi sonucu zaman alanında periyodik olan dalga formu bulmaktır (XIAOJING vd 2004).

Yine bu dönüşümle zaman-frekans arasında geçiş yapılarak titreşimin frekansı belirlenir (KAYRAN ve EKŞİOĞLU 2004, AKIHITO vd 2004, WELSCH vd. 1996).

Fourier dönüşümü bir serideki frekans değişimlerini incelemek için uzun zamanlarda yoğunlukla kullanılan etkin bir metottür. Özellikle Elektrik-Elektronik Mühendisliği disiplini sıklıkla dijital sinyal işleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Mühendislik disiplinleri arasındaki etkileşim ile beraber bu gibi yöntemler her türlü mühendislik alanında uygulanmaktadır.

Zaman serilerinin analizi için çok uzun zamanlardan beri kullanılan bu yöntem, son zamanlarda Jeodezi ve Fotogrametri mühendisliğinde de kullanım alanı bulmuştur.

Gerçek Zamanlı Kinematik-GPS (GZK-GPS) sayesinde uygulamacılar, saniyelerle ölçülen çok kısa zaman aralıklarında, objelerin birkaç cm duyarlılıkla konumlarını belirleme olanağına kavuşmuşlardır (ARSLANOĞLU ve MEKİK 2003, WELLS 2004). Bu gelişmeyle birlikte GPS, detay alımı ve aplikasyon gibi çalışmalarda klasik yöntemlere alternatif olmuştur. Bunun yanı sıra, yüksek binalar, köprüler ve barajlar gibi büyük mühendislik yapılarının karakteristik ve karakteristik olmayan hareketlerinin anlık olarak izlenebilmesi olanağı doğmuştur (MEKİK vd. 2005).

Çalışmanın amacı köprüdeki salınımların (GZK-GPS) ile belirlenmesidir. Bu çalışmada, köprüdeki salınımları modellemek amacı ile Hızlı Fourier Dönüşümü-Fast Fourier Transform (FFT) yönteminden yararlanılacaktır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ölçme ve analiz konuları işlenecek sonra Fourier dönüşümü anlatılacak ve sonuçlarına yer verilecektir.

Bu çalışmaya konu olan Fevkanı Köprüsü, Zonguldak Kent Merkezinde bulunan ve 1956 yılında yapımı tamamlanan perçinli çelik yapı bir köprüdür. Değişik yıllarda çok defa üzerinde asfalt yenileme çalışmaları gerçekleştirilmiş, fakat taşıyıcı sistemle ilgili bu güne kadar herhangi bir çalışma

<sup>1</sup> Y. Lis. Öğr., ZKÜ Fen Bil.Enst., Jeodezi ve Fot. Müh. Anabilim Dalı, <sup>2</sup> Yrd.Doç.Dr., ZKÜ Müh. Fakültesi, Jeodezi ve Fot. Müh. Böl.

yapılmamıştır. Söz konusu köprü bu haliyle, bir dereyle ikiye ayrılan kent merkezinin iki yakasını 5 ayrı kolla birbirine bağlayan alternatifsiz bir ulaşım yapısıdır.

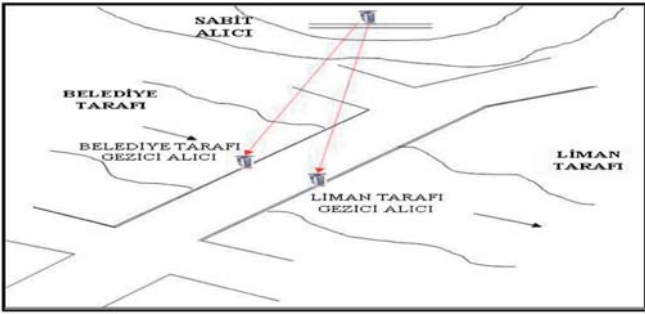
Çalışmada köprü'nün düşey yöndeki bileşeni kullanılacaktır. Bunun sebebi, yatay yönde anlamlı bir hareket beklenmemesidir.

## 2. GZK ile Köprü Salınımlarının Belirlenmesi Uygulaması

Köprü'nün GZK-GPS ile ölçmelerinin yapılabilmesi için ilk olarak referans alıcısının yeri seçilmiştir. Yüksek bir alan seçilerek mümkün olduğu kadar yansıma etkisinin azaltılması amaçlanmıştır. Radyo sinyalinin kesebilecek yüksek binalar görüş alanına girmeyecek şekilde, merkezleştirme düzeneği kurularak referans alıcı Şekil 3'deki gibi yerleştirilmiştir. Gezici alıcılar ise köprü'nün ortasında, karşılıklı iki korkuluğu üzerine kurmuştur. Şekil 1 ve 2'de Zonguldak Merkez Fevkani köprü'nün uydu görüntüsü ve krokisi görülmektedir. Referans alıcı ile gezici alıcılar arası mesafe yaklaşık 1km'dir.



Şekil 1. Fevkani Köprüsü Uydu Görüntüsü



Şekil 2. Fevkani Köprüsü Krokisi

Gezici alıcıların köprü'nün iki korkuluğu üzerine karşılıklı yerleştirilmesi köprü'deki salınımların en iyi şekilde modellenilebilmesi içindir. Titreşimin maksimum oranda tespit edilebilmesi için noktaların köprü'nün tam ortasına gelmesine dikkat edilmiştir (OGAJA vd. 2005, WAN 2005). Köprü'nün iki yanına yerleştirilen alıcılardan liman tarafına bakan noktaya FK-LİM, Zonguldak Belediye Binası tarafındaki noktaya ise FK-BEL noktası denilecektir. Referans alıcı ile gezici alıcının resmi Şekil 3 ve 4'de sunulmuştur.

Referans noktasının yerleştirildiği korkuluk, 3 ayrı noktadan zemine demir kolonlarla sabitlenmiş bir alanın ortasında yer almaktadır. Standart bir alet sehpasının sağlayabileceğinden

daha sağlam bir altlık olduğu test edildikten sonra bu korkuluk üzerine referans noktasının tesisine karar verilmiştir.



Şekil 3. Referans GPS Alıcısı



Şekil 4. Belediye Tarafı Gezici Alıcısı

### 2.1. Ölçme ve Analiz

Ölçmelerin, trafiğin en yoğun ve seyrek olduğu saatlerde gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Böylece GZK-GPS'in trafik yoğunluğu farklarından kaynaklanan salınım farklılığının belirlenip belirlenemeyeceğinin tespiti de amaçlanmıştır.

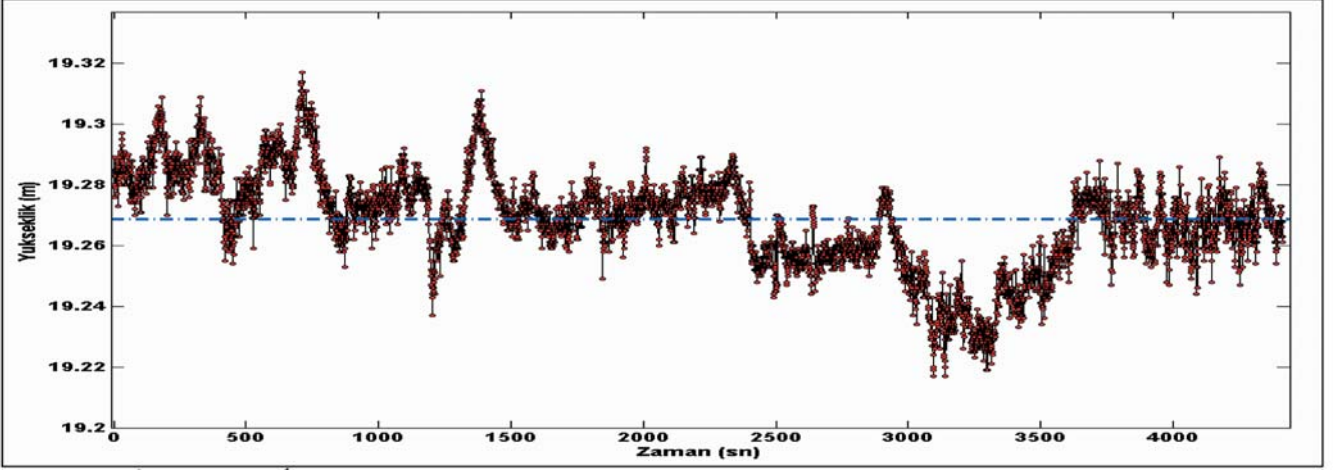
Bu nedenle iş çıkış saatlerini içine alan 16:00–19:00 saatleri ile yoğunluğun azaldığı 23:30–00:30 saatlerinde iki ayrı ölçme kampanyası düzenlenmiştir.

Ölçümlerin yapıldığı 27 Nisan 2005 tarihinde hava koşulları dikkate alınarak önceden seçilmiştir. Ölçmeler için Thales™ marka Z-max GZK-GPS alıcılar kullanılmıştır. Ölçme yapılırken araç trafiği gözlenmiş ve ağır tonajlı araçların geçiş zamanları kaydedilmiştir. Kayıt aralığı 1 saniye olarak seçilmiştir. Ölçme süresince yatay ve düşey karesel ortalama hata değerleri sürekli izlenmiştir.

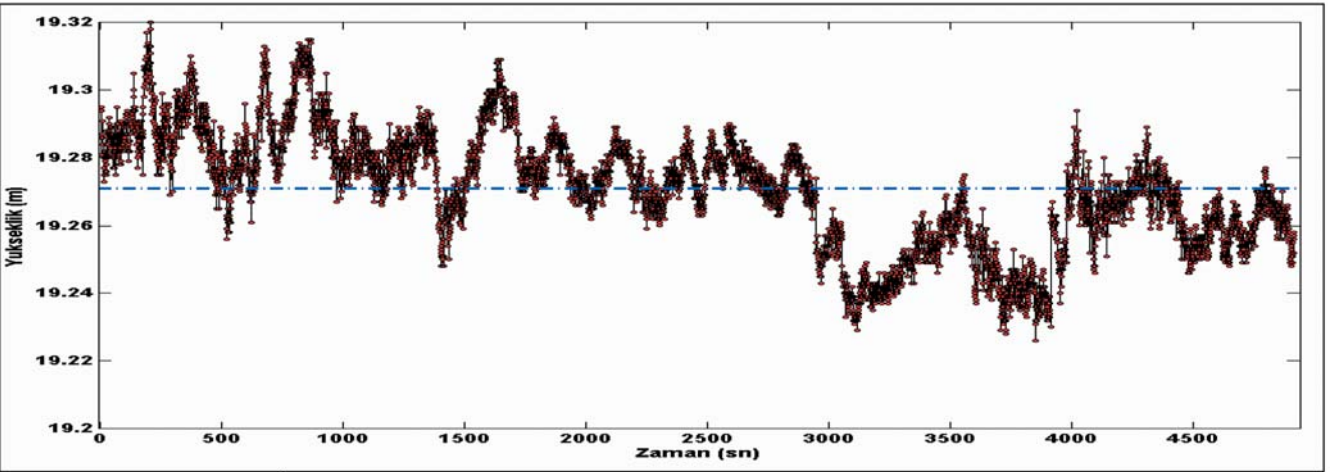
Grafiklerde yatay eksen saniye biriminde zamanı, düşey eksen ise metre biriminde yükseklik bilgisini göstermektedir. Yüksekliklerin aritmetik ortalama değeri ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmektedir.

FK-LİM noktasında yapılan gündüz ölçümleri Şekil 5'de sunulmuştur. FK-BEL noktasında yapılan gündüz ölçümleri Şekil 6'da sunulmuştur.

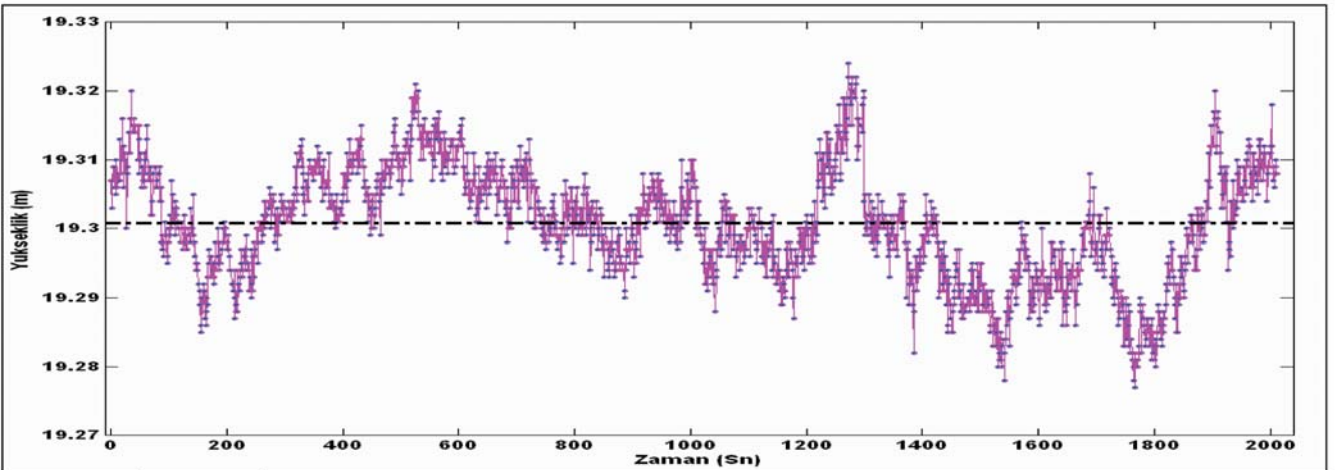
Gündüz ölçümlerinden sonra aynı günün gecesinde trafiğin çok daha az yoğunlukta olduğu 23:30–00:30 saatleri arası ölçümler yapılmış ve sonuç olarak elde edilen grafikler Şekil 7 ve 8'de sunulmuştur.



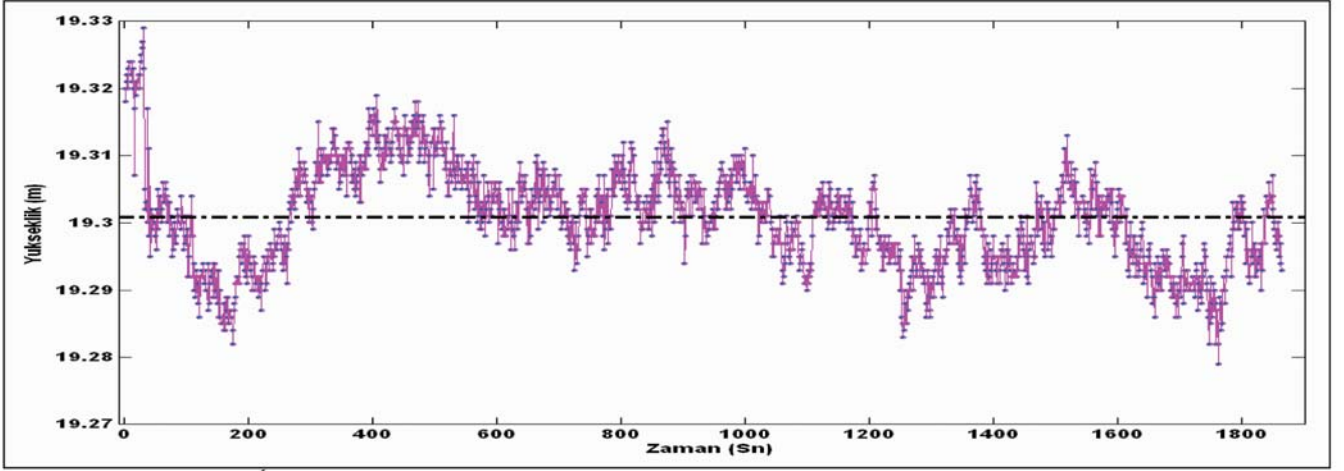
Şekil 5. FK-LİM Gündüz Ölçümü



Şekil 6. FK-BEL Gündüz Ölçümü



Şekil 7. FK-LİM Gece Ölçümü



Şekil 8. FK-BEL Gece Ölçümü

Tablo 1. GPS Ölçüleri Farklar Tablosu

Oturum İsmi	Ölçü Sayısı	Maksimum h (Turuncu Çizgi)	Minimum h (Turuncu Çizgi)	Farklar	Aritmetik Ortalama (Kırmızı Çizgi)	Std Sapma (Mor Çizgi)	A.Ort RMS (Siyah Çizgi)
FK-LİM Gündüz	4414	19.317 m.	19.217 m.	10.0 cm	19.269 m.	0.01579 m.	0.013 m.
FK-BEL Gündüz	4918	19.320 m.	19.226 m.	9.4 cm	19.271 m.	0.01685 m.	0.014 m.
FK-LİM Gece	2012	19.324 m.	19.277 m.	4.7 cm	19.301 m.	0.00817 m.	0.010 m.
FK-BEL Gece	1863	19.329 m.	19.279 m.	5.0 cm	19.301 m.	0.00737 m.	0.011 m.

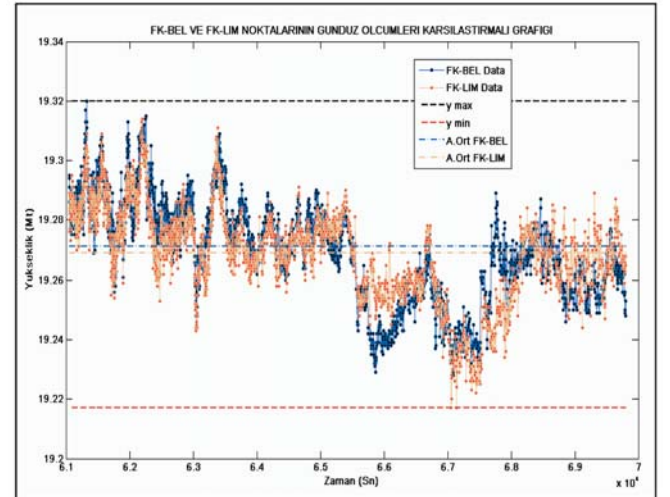
Yukarıda Tablo 1’de grafiklere ait sayısal veriler özetlenmiştir. Tabloda, her bir ölçme grubuna ait toplanan ölçü sayısı (epok), ölçmelerin maksimum ve minimum değerleri ve bunlar arasındaki farklar, ölçmelerin aritmetik ortalaması değerleri sunulacaktır.

Tabloda belirtildiği üzere, FK-LİM noktasında yapılan gündüz ölçmelerinde maksimum ve minimum yükseklik değerleri arasındaki fark 10 cm’dir. FK-BEL noktasındaki gündüz ölçmelerinde bu fark değeri 9,4 cm’dir. Aradaki fark ölçme duyarlılığı sınırları içerisinde. Diğer bir ifadeyle, bu iki değer birbirine eşdeğerdir denilebilir. Gece ölçüleri için de benzer durum geçerlidir.

FK-LİM noktasının gece ölçmelerinde fark değeri 4,7cm olup FK-BEL noktasının gece ölçmeleri fark değeri ise 5cm bulunmuştur. Gündüz ve gece ölçüleri karşılaştırıldığında maksimum ve minimum yükseklik değerleri arasındaki farklar, gece saatlerinde köprüdeki salınım ve titreşimlerin daha az olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, gündüz verileri ile gece verilerinin ortalamaları arasında 3cm’lik bir fark vardır. Gece ölçmelerinde sıcaklığın düşüşü ve buna bağlı olarak da köprünün elastikiyetinin azalması nedeni ile köprüde yaklaşık 3cm’lik bir yükselme olduğu kanısına varılmaktadır. Bununla beraber bu yükselmenin, gece ölçmelerinde salınımın daha az olması nedeni ile ölçme ortalamalarının değişmesinden de kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Köprünün her iki tarafında izlenen bu hareketler gündüz için Şekil 9, gece için Şekil 10’da bindirmeli olarak verilmiştir. Bu grafiklerin hemen altlarında fark grafikleri

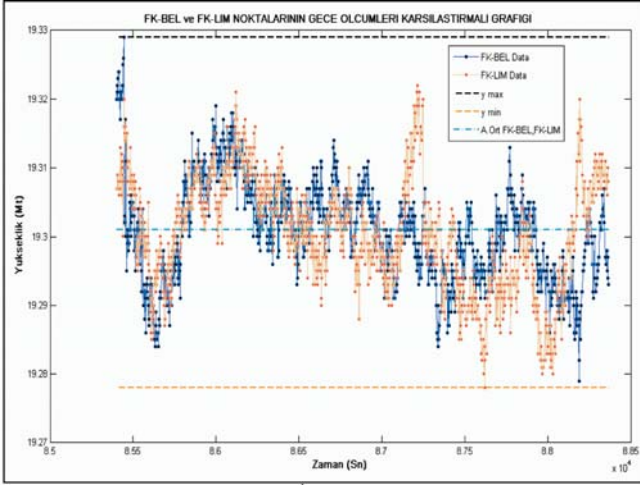
verilmektedir. Bindirmeli grafiklerde mavi renkte olan veri kümesi FK-BEL noktasını, turuncu renkte olan veri kümesi ise FK-LİM noktasını temsil etmektedir.



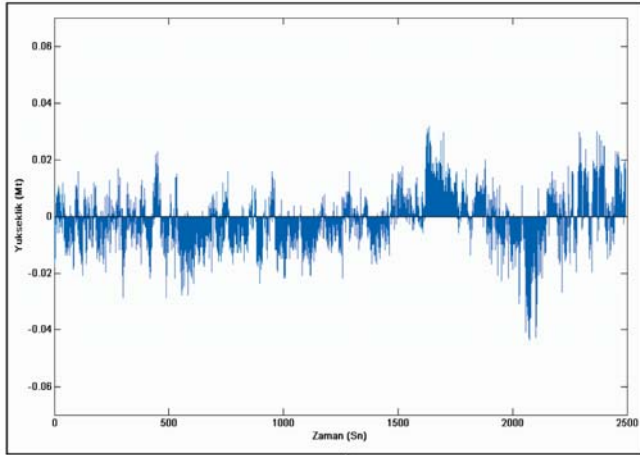
Şekil 9. Gündüz ölçmelerinin bindirilmesi

Gece ölçümlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 11’de ve fark grafiği şekil 12’de sunulmuştur. Şekil 11 incelendiğinde 87000–87500 saniyeleri arasında FK-LİM verisini temsil eden turuncu renkli seride ani bir yükseliş ve düşüş trendi görülmektedir. Bu düşüş miktarı yaklaşık 2cm civarındadır. Taşıt akışının kaydedildiği verilere bakıldığında 2cm’lik değişimin olduğu anda, liman tarafından ağır tonajlı ve yüklü bir kam-

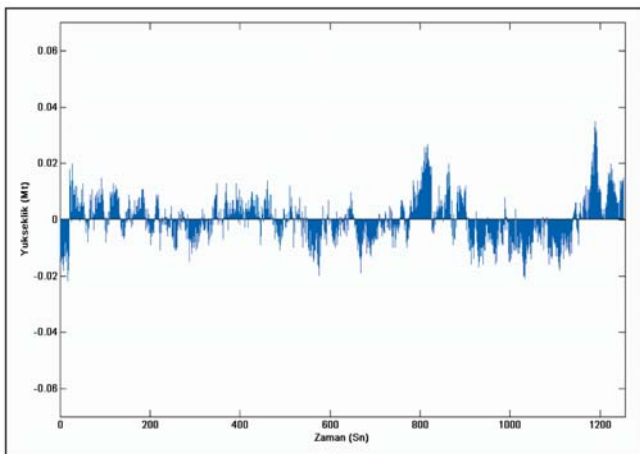
yonunun geçişinin kaydedildiği görülmüştür. Sıçramaya bu aracın sebep olabileceği gibi yansıma (multipath-çok yolluluk) etkisi de olabilir.



Şekil 10. Gece ölçmelerinin bindirilmesi



Şekil 11. Gündüz ölçmelerinin farkları

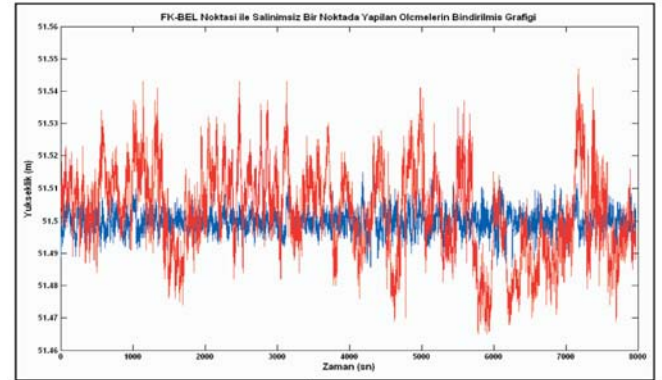


Şekil 12. Gece ölçmelerinin farkları

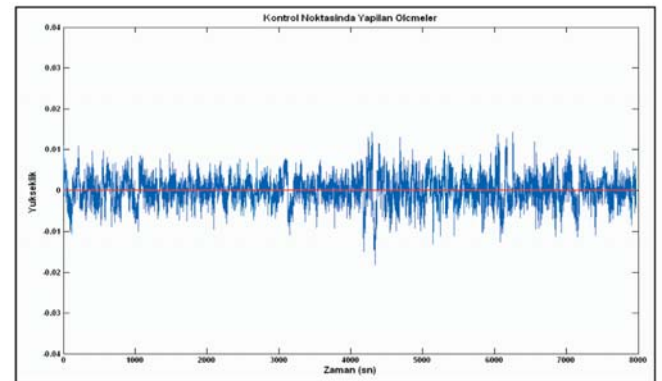
Karşılaştırmalı grafiklerin birbiriyle uyum katsayıları gündüz için %82, gece için %83 gibi yüksek oranlı değerler bulunmuştur. Bu sonuçlar, köprünün her iki tarafında birbiriyle tutarlı bir hareketin olduğunu göstergesidir.

Ölçmelerin dış kontrolünün yapılabilmesi için ve yöntemin hassasiyetini anlamak amacı ile referans alıcı ile gezici alıcılar arası yaklaşık 1 km olan bir bazda ve gezici alıcının mikrosismik hareketlerden etkilenmediği düşünülen başka bir noktada ölçmeler gerçekleştirilmiş ve bindirmeli grafiği Şekil 13’de sunulmuştur. Sunulan grafikte, kırmızı renkli zaman serisi köprü ölçmelerini, mavi renkli zaman serisi de Salınımsız noktada yapılan ölçmeleri temsil etmektedir.

Şekil 14’de sunulan kontrol ölçmelerinin standart sapması  $\pm 0,0036m$  bulunmuştur. Bu değer GZK-GPS ölçmelerinin yeterli doğrulukta olduğunu göstergesidir.



Şekil 13. Kontrol Ölçmeleri Bindirmeli Grafiği



Şekil 14. Kontrol Noktasındaki Ölçmeler

### 3. Zaman Serileri Analizi

Verilerin veya sinyallerin zaman uzayında art arda sıralanmasına zaman serisi denilmektedir. Çalışmada zaman serisi olarak bir saniye kayıt aralığında ölçülen köprü yüksekliklerinin zamana bağlı değişimi kullanılmıştır.

Bir zaman fonksiyonunun frekans uzayına dönüşümü, o fonksiyonun periyodik özellikleri hakkında bilgi vermektedir (TAPRAMAZ 2002). Zaman uzayında görülemeyen veya seçilemeyen periyodiklikler ya da bunların periyodunun sayısal olarak hesaplanması Fourier dönüşümü sayesinde olabilmektedir.

Köprü ölçmelerinden elde edilen yükseklik verileri ilk olarak içerdiği trend bileşeninden ayıklanacaktır. Daha sonra FFT analizine geçilecektir.

Bir sonraki bölümde Fourier dönüşümünden kısaca söz edilecektir.

### 3.1 Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümü yapmanın amacı sürekli-zamanlı bir işaretin, frekans alanında örneklenmesi sonucu zaman alanında periyodik olan dalga formu bulmaktır. Yine bu dönüşümle zaman-frekans arasında geçiş yapılarak titreşimin frekansı belirlenir (KAYRAN VE EKŞİOĞLU 2004). Bir fonksiyonun frekans uzayına dönüşümü, o fonksiyonun periyodik özellikleri hakkında bilgi verir. Dönüşümün amacı ve yaptığı işlem, birbiri ile dönüşüm altında ilişkili olan iki farklı uzay arasında geçiştir (CHATFIELD 1975).

Zaman uzayında  $-\infty < t < \infty$  aralığında tanımlı bir  $t$  zamanına bağlı, tanımlı bir  $x(t)$  fonksiyonu verilmiş olsun. Bu fonksiyon, periyodik fonksiyonlarla;

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) [a_f \cos(2\pi ft) + b_f \sin(2\pi ft)] dt \quad (1)$$

biçiminde ifade edilebilir. Bu eşitlikte  $y(t)$ ,  $x(t)$  fonksiyonunun Fourier serisini göstermektedir (WELSCH 1996). Eşitlikte geçen  $f$  frekans  $a_f$  ve  $b_f$  ise Fourier katsayılarıdır. Karmaşık sayıların kullanılması ile

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

elde edilir.

Burada  $X(f)$ ,  $x(t)$  zaman serisinin Fourier spektrumu olarak bilinir. Aynı şekilde frekans uzayındaki  $X(f)$  kullanılarak;

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \quad (3)$$

ile elde edilir. Bu eşitlikle, zaman uzayındaki  $x(t)$ 'yi elde etmek mümkün olup bu işleme ters Fourier dönüşümü denilir. Bir seriye ait zaman ve frekans uzaylarındaki gösterimi arasında geçiş (2) ve (3) eşitlikleri ile mümkündür. Bu özellik sinyal analizinde sıklıkla kullanılan filtreleme ve korelasyon gibi kavramlar için çok önemlidir.

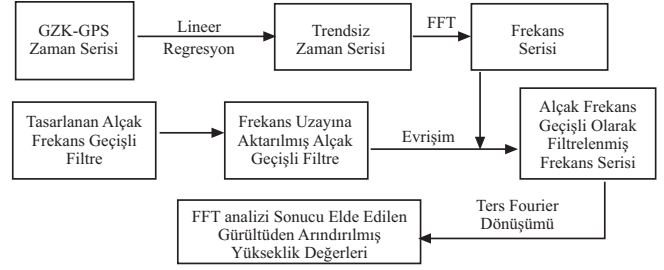
$x$ , değişkeni ve  $L$ , periyodu göstermek üzere, Fourier dönüşümü toplam fonksiyonu şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \quad (4)$$

Burada  $a_n$  ve  $b_n$  bilinmeyen Fourier katsayılarını göstermektedir.

Bir zaman serisi Fourier dönüşümüne tabi tutulduğunda elde edilen spektrumda küçükten büyüğe doğru sinyale katkı veren frekanslar sıralanır. Jeodezik anlamda düşünüldüğünde sinyallerdeki periyodik etkiler, sinyalin türüne bağlı olmak üzere genelde yüksek frekanslıdır. Bunun nedeni, jeodezik çalışmalarda kaba hatalı ve sistematik hatalar dışında hep rastlantısal verilerle çalışılmasıdır. Rastlantısal özelliğe sahip ve gürültü olarak isimlendirilen sinyaller yüksek frekanslıdır, yani çok tekrarlanır (KOÇAK 2004).

GZK-GPS ile ölçülen yükseklik değerlerinin oluşturduğu zaman serisine uygulanan FFT analizinin akış diyagramı Şekil 15'de sunulmuştur;



Şekil 15. FFT Analizi Akış Şeması

Zaman serisi analizlerinin geleneksel yaklaşımında ilk yapılan işlem, serinin zaman ekseninin çizilmesidir. Burada serinin trend bileşenine sahip olup olmadığı araştırılır, ardından periyodik hareketlerin şiddeti ölçülmeye çalışılır.

Zaman Serisi =  $f$  (Trend Bileşeni, Periyodik Bileşen, Stokastik Bileşen) biçiminde yazılabilir (ERDOĞAN 2005).

Köprünün GPS ölçmeleri ile elde edilen zaman serilerinde Şekil 16-22-28-34'de gözle görülür bir trend bileşeni olduğu görülmektedir. İlk olarak serilere Lineer regresyon geçirilmiştir. Trendden söz edebilmek için bu regresyon eğrisinin eğiminin sıfırdan farklı olması gerekir. Tüm ölçmeler için eğim sıfırdan farklı ve anlamlı çıkmıştır. Bu trend serilerden elimine edilmiş ve FFT analizine bu aşamadan sonra geçilmiştir. Bu işlem için zaman serisinden geçirilen doğrusal trend eğrisi, zaman serisinin her noktasında birebir eşleştirme yapılarak seriden çıkarılır.

### 3.2 FFT Analizleri

Gece ve gündüz olmak üzere iki periyotta gerçekleştirilen ölçmelerin FFT analizleri bu bölümde sunulacaktır. Analizler için Matlab™ programı kullanılmıştır. FFT analizi için Şekil 15'de sunulan akış şeması takip edilecektir. Analiz sonucunda, GPS ölçmelerinden elde edilen yükseklikler ve Şekil 15'de anlatılan akış şemasındaki gibi üretilecek olan modelden bulunan yüksekliklerin birbiri ile ne kadar uyumlu oldukları yüzdelik değerler olarak verilecektir.

Uyum kontrolü için genel ve geçerli bir yöntem, 'regresyon katsayısı' diye bilinen değerdir. Regresyon katsayısını bulabilmek için kullanılan referans değer, ölçü değerlerinin ortalamasıdır ve  $n$  ölçü sayısında,

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (5)$$

olarak bulunur. Burada  $y_i$  ölçü değerleri,  $\bar{y}$  ise ölçülerin ortalama değeridir. Daha sonra  $y_i$  ve  $\bar{y}$  değerleri arasındaki farkların kareleri toplamı;

$$\delta_y = \sum_{i=1}^N [y_i - \bar{y}]^2 \quad (6)$$

olarak bulunur. Benzer biçimde uyum fonksiyonu  $f(x_i)$  için;

$$\delta_f = \sum_{i=1}^N [f(x_i) - \bar{y}]^2 \quad (7)$$

olarak bulunur. Burada  $f(x_i)$  uyum fonksiyonudur. Uygulamada bu fonksiyon, modelden elde edilen yüksekliklerin fonksiyonu olarak alınmıştır. Bu iki değer kullanılması ile regresyon katsayısı;

$$r = \sqrt{\frac{\delta_f}{\delta_y}} \quad (8)$$

ile belirlenir (TAPRAMAZ 2002).

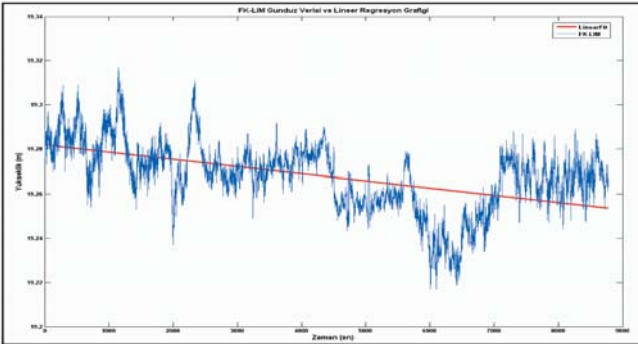
Bu değere FFT analizi verilerinin uyum katsayısı veya doğrusal korelasyon katsayısı denilebilir. İki serinin birbiriyle ne kadar korelasyonlu olduğu bu rakamın yüzdelik değerinin ne kadar büyük olduğu ile ilişkilidir.

Analizlerde bu değer sıklıkla kullanılacaktır. Ölçülen GPS verileri ile filtreleme sonucu modelden bulunan yükseklik verilerinin birbiri ile korelasyonu (8) formülü ile hesaplanacaktır.

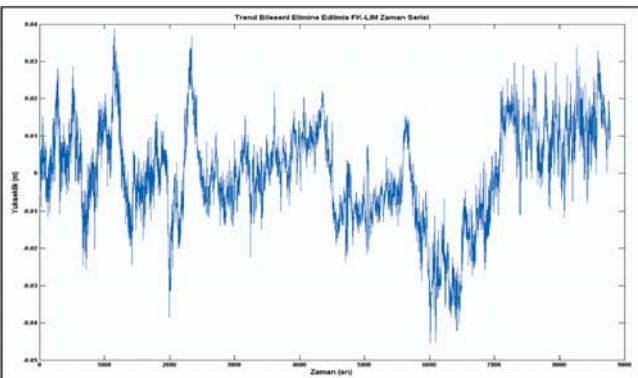
Aşağıda köprü ölçmelerine ait FFT analizi grafikleri verilecektir. Grafiklerin kolay anlaşılması için gruplandırma yapılacaktır. FK-LİM gündüz verileri birinci grup, FK-BEL gündüz verileri ikinci grup, FK-LİM gece verileri üçüncü grup, FK-BEL gece verileri ise dördüncü grup olarak adlandırılacaktır. Her grup için 6 tane olmak üzere, toplam 24 grafik sunulacaktır. Grafiklerin akış sırası her grup için aynı sırada olacaktır. Bu grafiklerden ilki GPS ölçülerinin zaman ekseninde çizilmiş ve trend eğrisi geçirilmiş halidir. Mavi renkli seri GPS verilerini göstermektedir ve trend eğrisi kırmızı renktedir. İkincisi ise trendi elimine edilmiş zaman serisidir.

Üçüncü grafikte serilerin FFT spektrumu, dördüncü grafikte de FFT spektrumunun ilk 100 değeri verilecektir. Bunun sebebi, sinyale katkı veren yüksek frekanslı değerleri daha iyi görülebilmesi içindir. Beşinci grafikte seriye ait genlik spektrumu verilecektir. Bu grafiğe bakılarak köprüye ait periyodik bileşen ve bunun genliği görülebilir. Altıncı grafikte ise filtrelenmiş veriler ile ölçülen GPS verilerinin bindirmeli grafiği sunulmuştur.

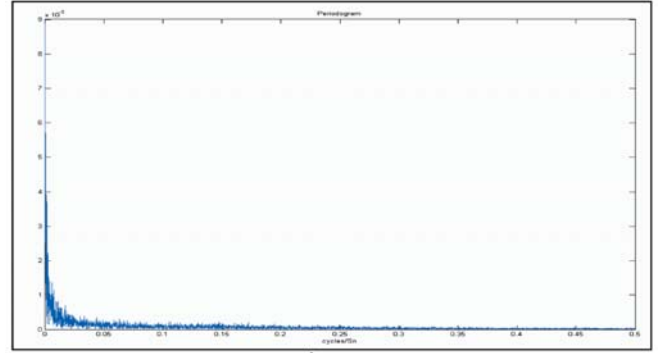
Birinci grup, FK-LİM noktası için yapılan analizlerin grafikleri aşağıdaki gibidir;



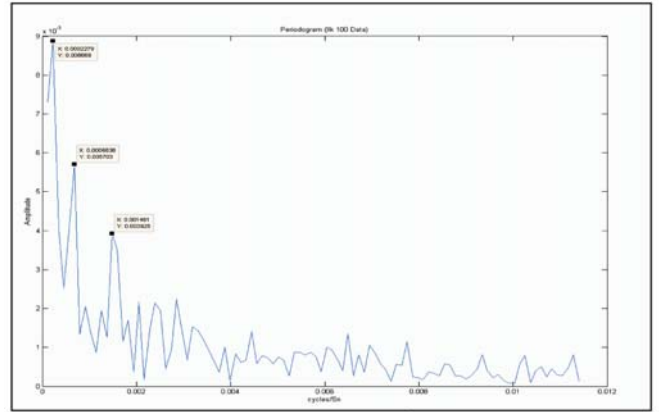
Şekil 16. FK-LİM gündüz ve Doğrusal Trend



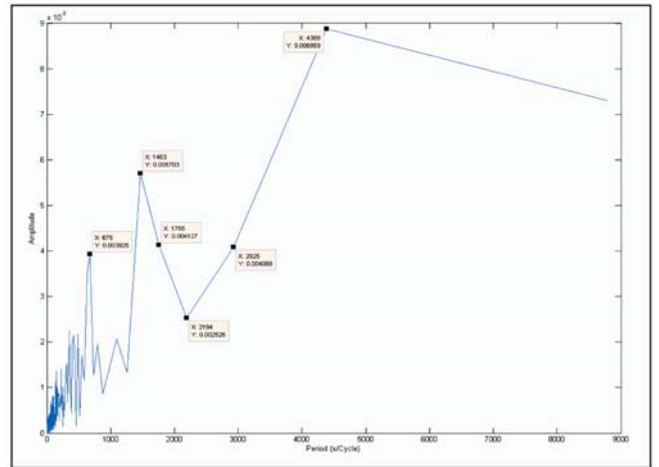
Şekil 17. Trend Bileşeni Giderilmiş FK-LİM Serisi



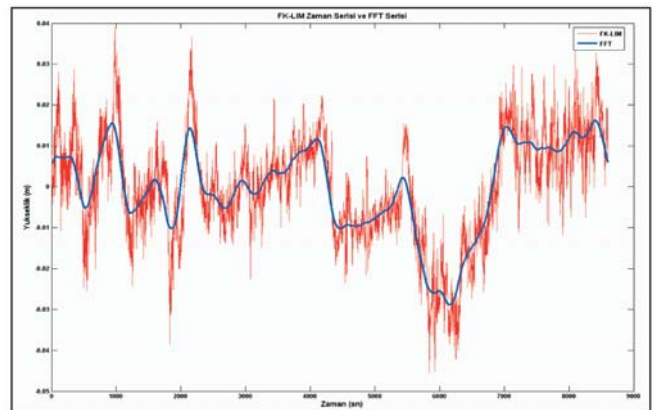
Şekil 18. FK-LİM FFT Spektrumu



Şekil 19. FFT Spektrumu (İlk 100 Veri)

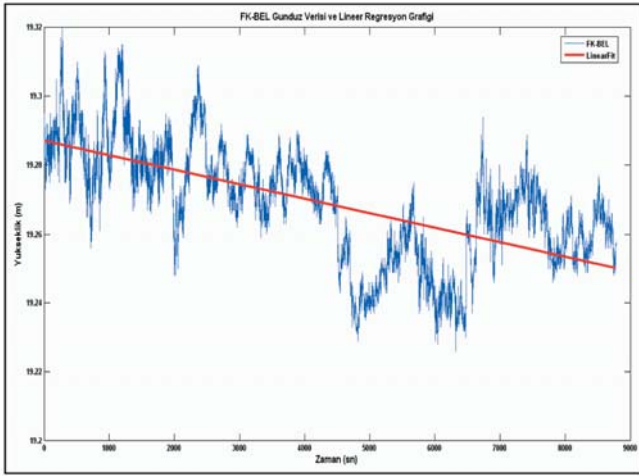


Şekil 20. Genlik Spektrumu

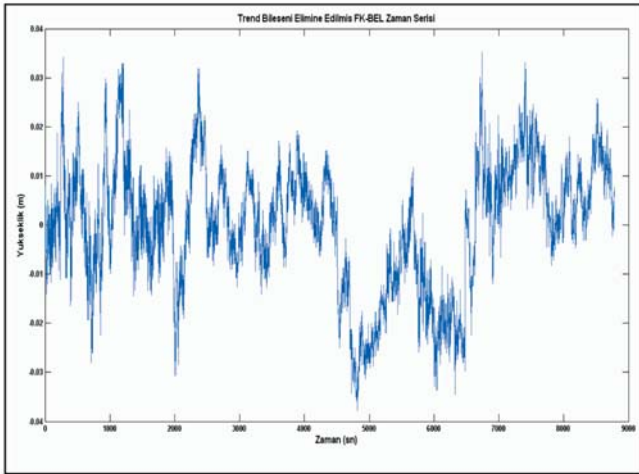


Şekil 21. Filtrelenmiş FK-LİM Verisi

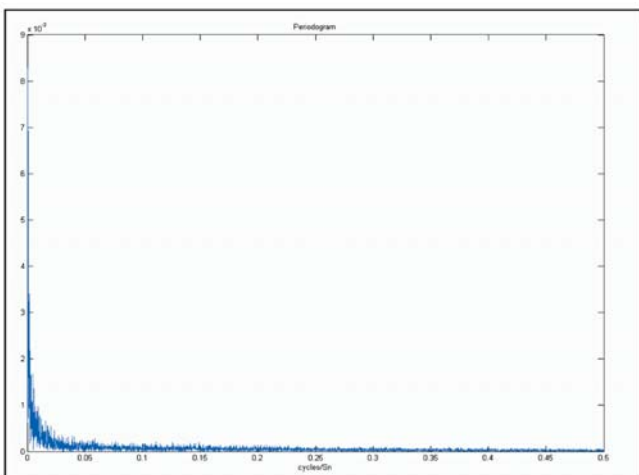
FK-BEL noktası için yapılan analizlerin grafikleri de benzer olarak; (2. Grup).



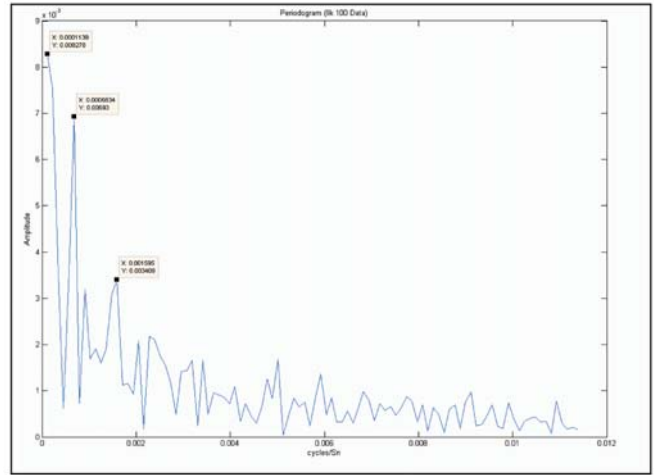
Şekil 22. FK-BEL gündüz ve Doğrusal Trend



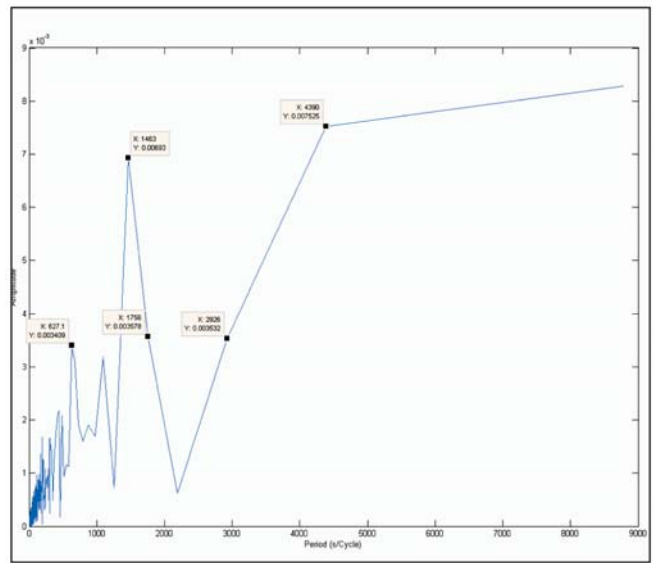
Şekil 23. Trend Bileşeni Giderilmiş FK-BEL Serisi



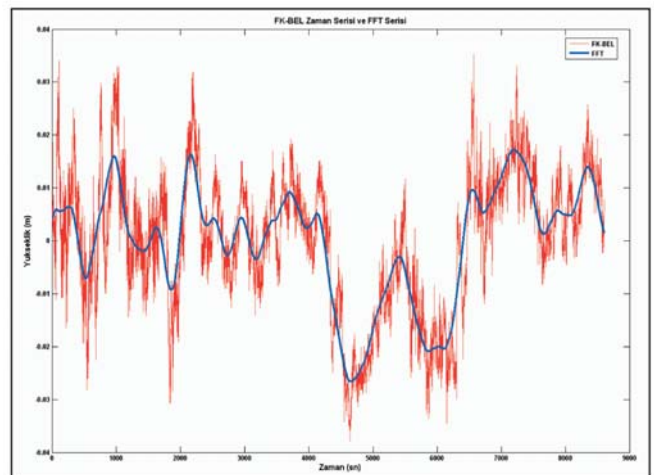
Şekil 24. FK-BEL FFT Spektrumu



Şekil 25. FFT Spektrumu (İlk 100 Veri)



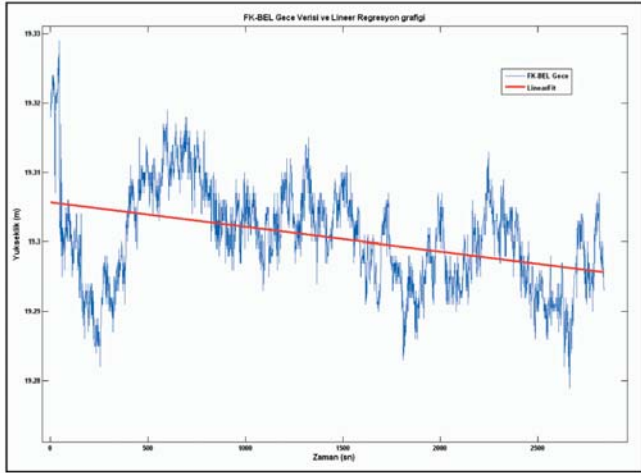
Şekil 26. Genlik Spektrumu



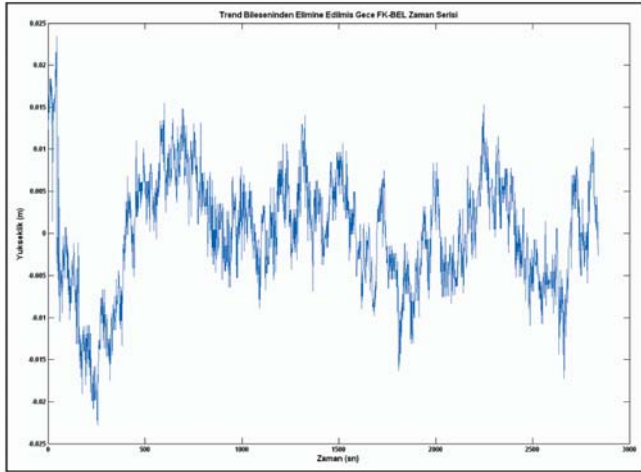
Şekil 27. Filtrelenmiş FK-BEL Verisi



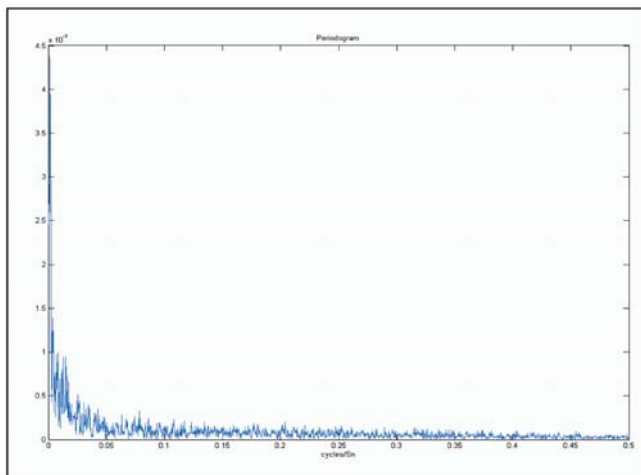
FK-BEL noktası gece ölçmeleri için yapılan analizlerin grafikleri de benzer olarak; (3. Grup).



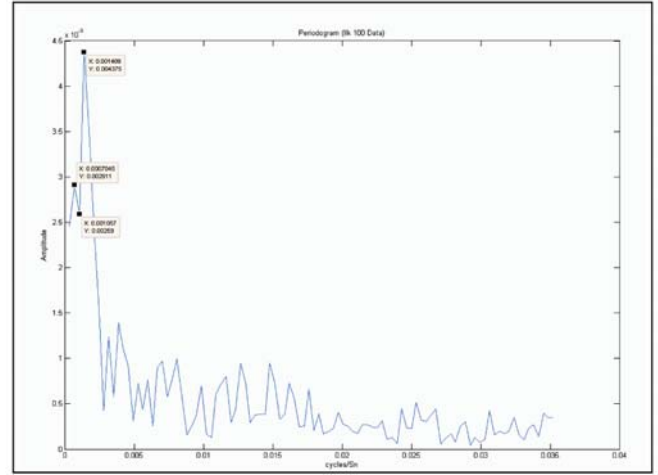
Şekil 28. FK-BEL gece ve Doğrusal Trend



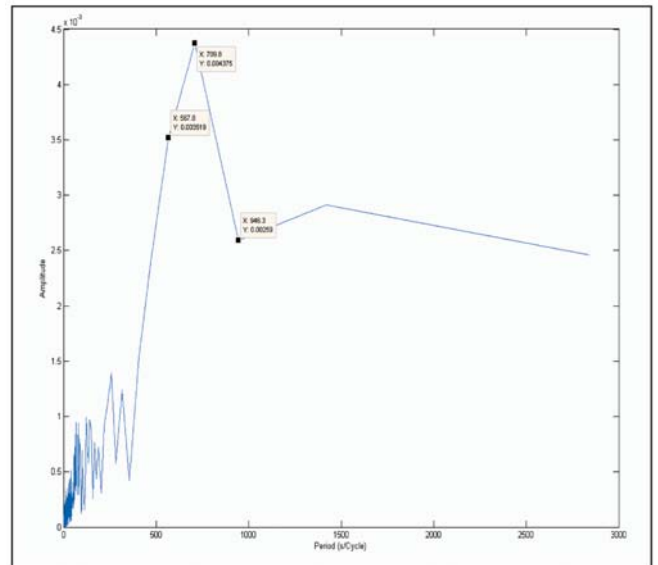
Şekil 29. Trend Bileşeni Giderilmiş FK-BEL Serisi



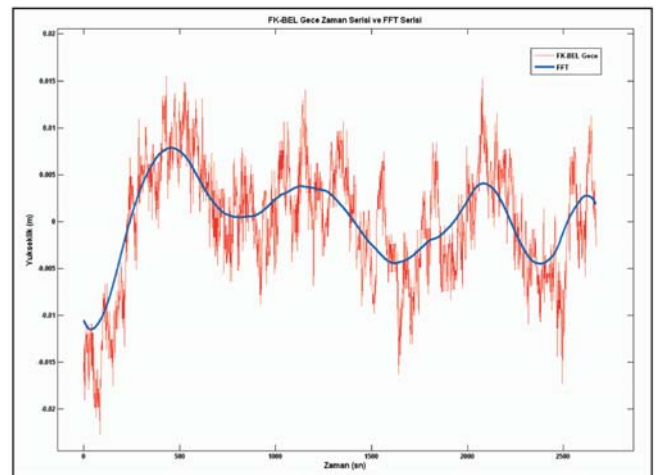
Şekil 30. FK-BEL Gece FFT Spektrumu



Şekil 31. FFT Spektrumu (İlk 100 Veri)

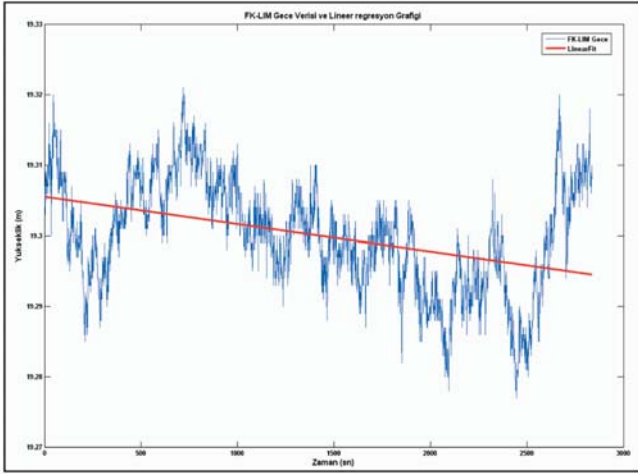


Şekil 32. Genlik Spektrumu

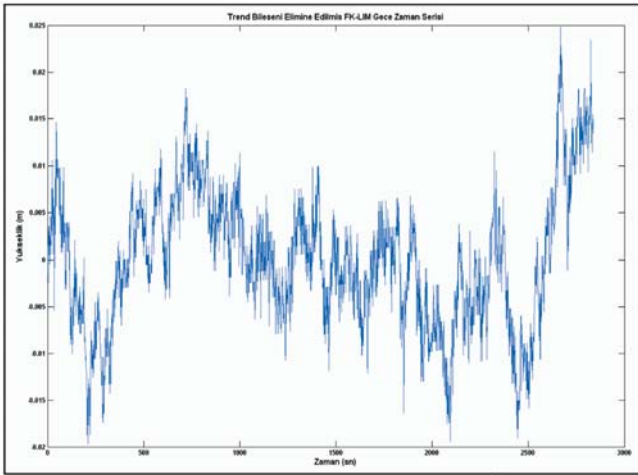


Şekil 33. Filtrelenmiş FK-BEL Gece Verisi

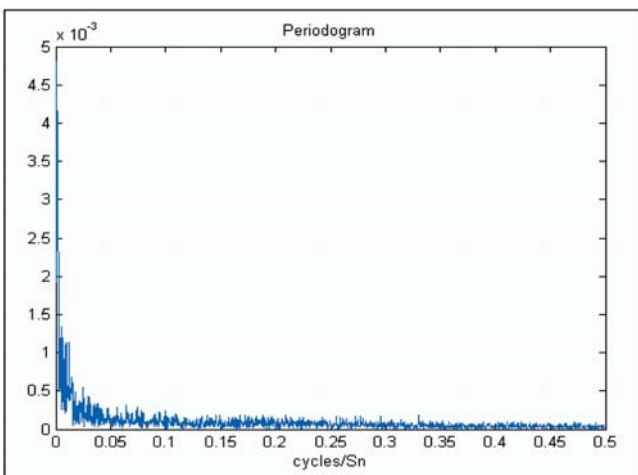
FK-LİM noktası gece ölçmeleri için yapılan analizlerin grafikleri de benzer olarak; (4.Grup).



Şekil 34. FK-LİM gece ve Doğrusal Trend

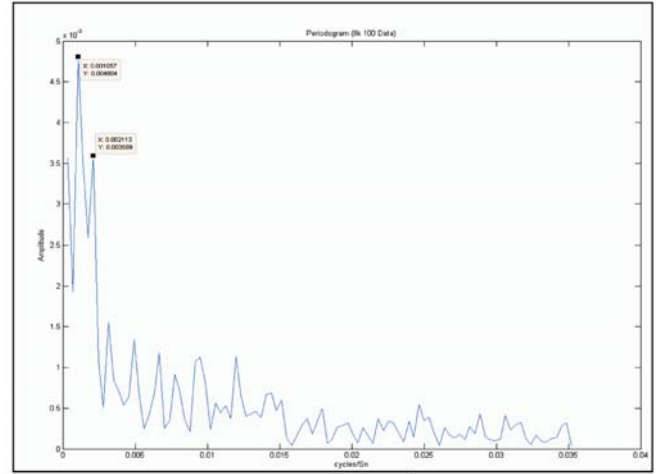


Şekil 35. Trend Bileşeni Giderilmiş FK-LİM Serisi

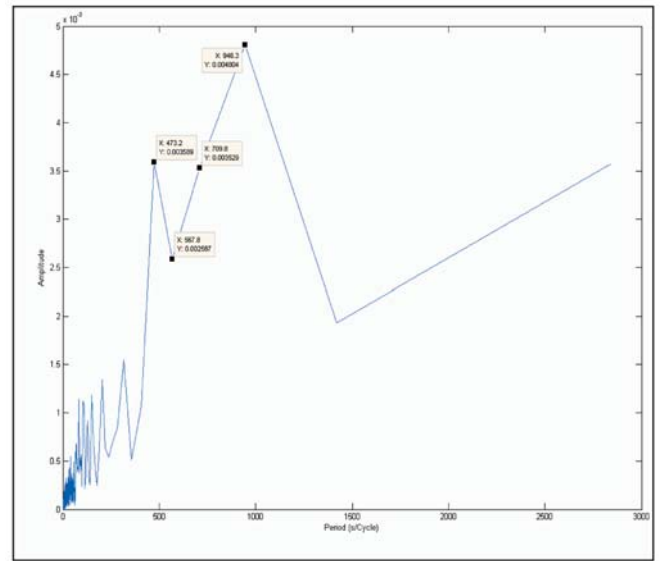


Şekil 36. FK-LİM Gece FFT Spektrumu

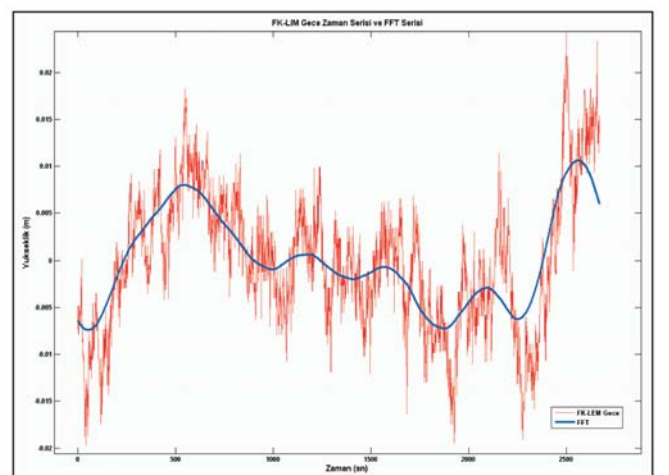
Tüm grafikler verildikten sonra bu grafiklerin yorumlanması gerekir. 1. Grup grafiklerine baktığımızda, ilk grafikte trend bileşenine sahip olan seriyi görmekteyiz. Bu bileşenin anlamlı olup olmadığı t-testi sonucunda belirlenmiştir. Eğimi sıfırdan farklı bu bileşen seriden çıkarılmış ve Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 37. FFT Spektrumu (İlk 100 Veri)



Şekil 38. Genlik Spektrumu



Şekil 39. Filtrelenmiş FK-LİM Gece Verisi

Şekil 18'de FFT spektrumu ve Şekil 19'da bu spektrumun ilk 100 değerinin gösterildiği grafikler verilmiştir. Şekil 20'de ise FK-LİM gündüz ölçmelerine ait genlik spektrumu verilmiştir. Burada önemli sayılabilecek periyot ve genlikler vardır. Örneğin 73 dakikada yaklaşık 1cm genlikli bir periyot belirlenmiştir. 49 dakikada ise 0,5cm genlikli bir periyot vardır.

Şekil 21’de ise GPS verileri ile FFT ile filtrelenen verilerin bindirmeli grafiği verilmiştir. Bu iki seri birbiri ile %89 oranında korelasyonlu çıkmıştır. Aynı şekilde 2. Grup, FK-BEL gündüz ölçmelerinde 73 dakika periyotlu 0,9cm genlikli ve 49 dakikalık 0,4cm genlikli bir periyot belirlenmiştir (Şekil.26). Şekil 27’de sunulan bindirmeli grafikteki zaman serileri birbirleri ile %90 oranda korelasyonludur.

3. Grup FK-BEL gece ölçmelerinde ise 11 dakika 0,5 cm’lik genlikli bir periyot belirlenmiştir. Şekil 33’de verilen zaman serileri birbirleri ile %90 oranda korelasyonludur.

4. Grup olarak sunulan, FK-LİM gece ölçmelerinde Şekil 10’da sunulan grafikte açıkça görülen, serinin genel gidişine aykırı olan kısım, FFT analizleri sonuçlarına kötü etki göstermemesi amacı ile seriden ayıklanmıştır. FK-LİM gece ölçmelerinin zaman serisi analizlerinden 16 dakikalık, 0,5cm genlikli bir periyot belirlenmiştir. Şekil 39’da ise GPS ölçmeleri ile modelden elde edilen filtrelenmiş yükseklik verilerinin grafiği verilmiştir. Bu karşılaştırmanın doğrusal korelasyon katsayısı %91 bulunmuştur.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada Zonguldak kent merkezindeki çelik konstrüksiyonlu Fevkanı köprüsünün düşey hareketleri GZK-GPS ile ölçülüp FFT analizi ile modellenmiştir.

Fourier dönüşümü ile zaman uzayında görülemeyen periyodik hareketler veya periyodun genliği bilgileri elde edilebilir. Yine bu yöntemle sinyal gürültü olarak adlandırılan hatalı verilerden uzaklaştırılarak analizi gerçekleştirilebilir. Çalışmada ilk olarak zaman serisi oluşturan düşey yöndeki verilerin trend bileşenleri elimine edilmiştir. Daha sonra periyodik bileşen üzerinde durulmuştur. Alçak frekans geçişli bir filtre tasarlanmış ve sinyal bu filtreden geçirilerek alçak frekans geçişli olarak filtrelenmiştir. Filtrelenen sinyal ile GPS ölçmeleri karşılaştırılmış ve uyum katsayıları hesaplanmıştır.

Doğrusal korelasyon katsayıları gündüz ölçmeleri için ortalama %89,5, gece ölçmeleri için %90,5 bulunmuştur. Gündüz ölçmelerinin bindirmeli grafikleri Şekil 21, Şekil 27 ve gece ölçmelerinin bindirmeli grafikleri Şekil 33, Şekil 39 incelenecek olursa, gündüz ölçmeleri için geçirilen mavi renkli FFT serisi, gece ölçmeleri için geçirilen seriye göre daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Gündüz ve gece ölçmeleri için tasarlanan filtre aynı özelliklere sahip olduğu düşünülürse, gece saatlerinde köprünün daha sakin bir salınım hareketi sergilediği düşünülebilir.

Periyodik bileşenler gündüz ölçmeleri için 73 dakika periyotlu ve 1cm genlikli olarak belirlenmiştir. Gece ölçmeleri için ise 11 ve 16 dakikalık 0,5cm genlikli periyotlar belirlenmiştir.

Gece ve gündüz olmak üzere iki ayrı zaman diliminde gerçekleştirilen ölçmelerin sonuçları, köprüdeki salınımların GZK-GPS ile belirlenebilecek seviyelerde olduğunu göstermektedir. GPS ölçümlerinden elde edilen gündüz verilerine bakıldığında yükseklik farkı 10cm’dir. Gece ölçümlerinde bu rakam 5cm olmuştur. Gece ve gündüz sonuçlarının farklarından yola çıkarak, trafik yoğunluğunun köprüdeki salınımları iki katına kadar arttırdığı söylenebilir. Gece ve gündüz ölçmelerinin ortalamalarının farkları alındığında gece ölçmeleri gündüz ölçmelerine oranla 3cm daha yüksektir. Gece saatlerinde

sıcaklık düşüşü ile köprünün elastikiyetinin azalması ve trafik yoğunluğunun da azalması bu yükselmenin sebebi olabileceği düşünülmektedir.

Kontrol noktasındaki ve FK-BEL noktasındaki ölçmelerin Şekil 14’deki bindirmeli grafiği, yöntemin hassasiyetini göstermekte ve köprü ölçmelerinin salınım olduğuna işaret etmektedir.

Köprünün iki tarafında gerçekleştirilen eş zamanlı ölçümler birbiriyle %83 oranda korelasyonludur. Bu durum köprünün salınım mekanizmasında simetri olduğuna işaret etmektedir.

#### Teşekkür

Zaman serileri analizi kısmında yardımlarından yararlandığımız Ydr.Doç.Dr. Güven KOÇAK’a teşekkürlerimizi sunarız. Ölçme aşamasında GZK-GPS alıcılarını sağlayan Köklü Mühendislik Müşavirlik İnşaat Şti. Firmasının sahibi Sayın Hüseyin Ali KÖKLÜ’ ye, ayrıca SKALA İnt. Ltd şirketine ve ölçmelerde teknik yardımlarından yararlandığımız Sayın Murat ÖZKAN’a teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- AKIHITO Y., YUKIO T., MASAHIRO M., SOTOSHI I. ve LUISA C. P.: **Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS and integrity monitoring**, FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, 28 Haziran – 1 Temmuz, 2004, Nottingham, Birleşik Krallık
- ARSLANOĞLU M. ve MEKİK Ç.: **Gerçek Zamanlı Kinematik GPS Konumlarının Duyarlık Analizi ve Bir Örnek Uygulama**, 9. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 31Mart-4 Nisan, s. 437-446, Ankara, 2003.
- CHATFIELD C.: **The Analysis of Time Series: An Introduction**. Chapman and Hall, ISBN1-58488-317-0, Florida, 2003.
- ERDOĞAN H., GÜLAL E., AKPINAR B. ATA E. ve POYRAZ F.: **Mühendislik Yapılarına Etkiyen Büyüklüklerin Modellenmesi**, 2. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İstanbul.
- HEUNECKE O. ve PELZER H.: **A new terminology for deformation analysis models based on system theory**. In: Kahmen H., Brückl E ve Wunderlich T. (Eds.): IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, 20-22 Nisan 1998, s. 285-292, Eisenstadt 1998.
- KOÇAK G.: **GPS Sabit İstasyonlarında Zaman Serileri Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.**
- KAYRAN A. ve EKŞİOĞLU E.: **Sayısal İşaret İşleme**, Birsan yayınevi, İstanbul, 2004.
- MEKİK Ç. ve ARSLANOĞLU M.:**Gerçek Zamanlı Kinematik GPS Konumlarının Doğruluk Analizi ve Bir Örnek Uygulama**, 9. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 31 Mart - 4 Nisan 2003, s. 549-558, Ankara, 2003.
- MEKİK Ç. GÖRMÜŞ K. S. ve KUTOĞLU H.: **Gerçek Zamanlı Kinematik(GZK) GPS ile Köprü Salınım ve Titreşimlerinin Belirlenmesi**, 2. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, s. 161-176, İstanbul, 2005.
- OGAJA C., RIZOS C. ve WANG J.:**Toward The Implementation Of On-Line Structural Monitoring Using Rtk-Gps And Analysis Of Results Using The Wavelet Transform**, 10th FIG Int. Symp. on Deformation Measurements, , 19-22 Mart 2005 Orange, s. 284-293, California, 2005.
- TAPRAMAZ R.: **Sayısal Çözümleme**, Literatür yayıncılık, İstanbul, 2002.
- XIAOJING L., LINLIN G., GANG-DING P., CHRIS R., YUKIO T. ve AKIHITO Y.: **Seismic Response of a Tower as Measured by an Integrated RTK-GPS System**, Las Vegas, Nevada, USA, 2004.
- WAN A. W., ZULKARNAINI M. A. ve AND SHU K.: **The Deformation Study of High Building Using RTK-GPS: A First Experience in Malaysia**, From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8 Cairo, Egypt 16-21 Nisan 2005, F16, s. , 2005.
- WELLS C. H.: **Real-time Grid Reliability Metrics**, OS/soft, Inc., San Leandro, CA EIPP, sponsored by DOE, www.phasors.pnl.gov Aralık 15, 2004.
- WELSCH W.: **Geodetic analysis of dynamic processes: Classification and terminology**. 8th International Symposium on Deformation Measurements, 25-28 Haziran 1996, s.147-156, Hong Kong, 1996.