



## Çok Kanallı Sismik Verilerde Tekrarlı Yansımaların Bastırılmasında Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması

### *Comparison of Methods Used for Suppression of Multiple Reflections in Seismic Data*

SELİN CEREN <sup>1\*</sup>, HAKAN ALP <sup>1</sup>, YELİZ İŞCAN ALP <sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Geliş (*received*): 23 Ekim (October) 2020 Kabul (*accepted*): 24 Kasım (November) 2021

#### ÖZ

Sismik sinyalin aynı yolu birden fazla kat etmesi sonucu oluşan tekrarlı yansımalar sismik kesitler üzerinde birincil yansımaları maskeleyerek verilerin işlenmesinde ve yorumlanmasında hatalara sebebiyet vermektedirler. Bu nedenle gürültü olarak kabul edilen tekrarlı yansımaları bastırabilmek için sismik veri işleminde birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada çok kanallı sismik yansıma verisi üzerine rutin veri işlem adımlarının uygulanmasının yanı sıra tekrarlı yansımaların bastırılabilmesi için bazı veri işlem adımları uygulanmıştır. Çok kanallı sismik veri İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Jeofizik Mühendisliği Sismik Veri İşlem Laboratuvarında Linux İşletim Sistemi altında çalışan Paradigm® Echos® sismik veri işlem yazılımları kullanılarak işlenmiştir. Rutin veri işlem adımları; veri yükleme (data loading), geometri tanımlama (geometry definition), istenmeyen izlerin atılması (editing), istenmeyen alanların atılması (muting), kazanç analizi (gain recovery), bant geçişli filtreleme (band-pass filter), ortak derinlik noktası düzenine geçiş (common depth point-CDP), hız analizi (velocity analysis), normal kayma zamanı düzeltmesi (normal moveout correction-NMO), yığılma (stack) ve migrasyondur (migration). Tekrarlı yansımaların bastırılabilmesi için ise sismik veri üzerine önkestirim dekonvolüsyonu ve F-K eğim süzgeci yöntemleri uygulanmıştır. Önkestirim dekonvolüsyonu işlemi uygulanmasında deneme-yanılma yoluyla parametre değerleri seçilerek her parametreler için ayrı ayrı elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Daha sonra bu veriler arasında karşılaştırmalar yapılarak en uygun sonucu veren parametre değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. F-K eğim süzgeci uygulanmasında ise birincil yansımaların ve tekrarlı yansımaların arasındaki NMO (Normal Kayma Zamanı) farkından yararlanılmıştır. F-K ortamında süzgeçleme için iki farklı modül irdelenmiştir. Bu modüllerden daha başarılı olanı seçilerek önkestirim dekonvolüsyonu yöntemi ile karşılaştırmaya gidilmiştir. Sonuç olarak tekrarlı yansımaları bastırma işleminde, önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmış veri ile F-K eğim süzgeci uygulanmış veriler arasında karşılaştırmalar yapılmış ve en uygun sonucu veren yöntem belirlenmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sismik yansıma verileri, ardışık yansıma, F-K eğim süzgeci, önkestirim dekonvolüsyonu.

#### ABSTRACT

*Multiple reflections caused by the seismic signal traveling the same path more than once can mask the primary reflections on seismic sections and can cause difficulties in the data processing and interpretation of seismic data. For this reason, many methods have been developed in seismic data processing in order to suppress multiple reflections considered as a noise. In this study, besides routine data processing steps, some data*

*processing steps were applied to data to remove multiples. This multichannel seismic data was processed using Paradigm® Echos® software in "Seismic Data Processing Laboratory" at the Department of Geophysical Engineering Istanbul University-Cerrahpasa. Routine data processing steps are; data loading, geometry definition, editing, muting, gain recovery, bandpass filtering, CDP sorting, velocity analysis, NMO correction, stack, and migration. In order to suppress multiple reflections, predictive deconvolution and F-K filter were applied on seismic data. In the application of the predictive deconvolution process, the parameter values were selected by trial and error and the data were evaluated for each parameter. Then, comparisons were made between these data and the parameters that gave the most appropriate results. In the application of the F-K slope filter, the NMO (Normal Shift Time) difference between the primary reflections and the multiple reflections was used. Two different modules were studied for filtering in the F-K environment. A comparison with the predictive deconvolution was made by selecting the more successful of these modules. As a result, in the suppression of multiple reflections comparison were made between predictive deconvolution that gave best result and F-K filter, then best method that gave correct result was tried to be determined.*

**Key Words:** Multichannel seismic data, multiple reflections, F-K filter, predictive deconvolution.

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.842506>

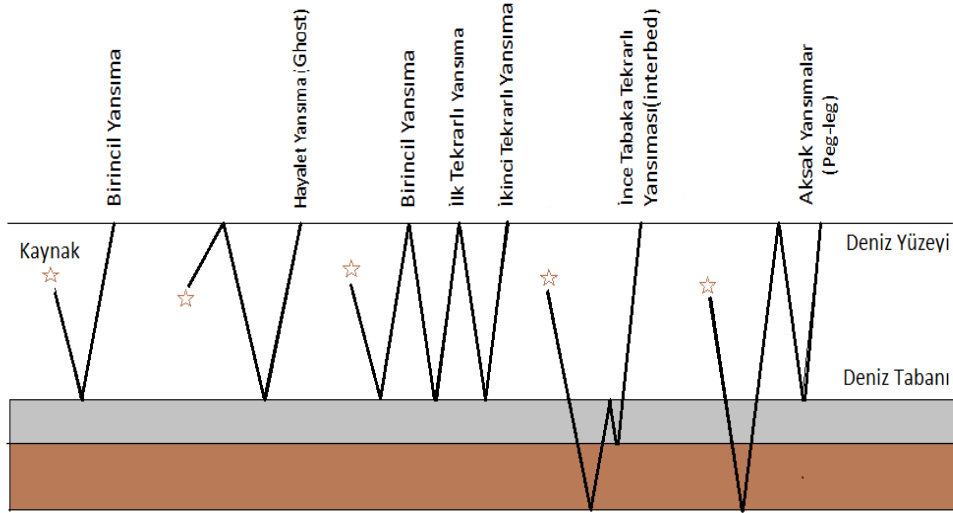
\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: selin.ceren@ogr.iu.edu.tr

## GİRİŞ

Tekrarlı yansımalar sismik sinyalin aynı yolu birden fazla kat etmesi sonucu oluşmakta ve sismik kesitlerde kendilerini tekrarlamaktadırlar. Sismik kesitlerde birincil yansımaları maskeleyen tekrarlı yansımalar, birincil yansımalar ile aynı frekans bandına ve genellikle aynı varış zamanlarına sahiptir (Dondurur, 2018). Tekrarlı yansımalar da kendi içlerinde gruplara ayrılmaktadırlar (Sheriff, 1991) (Şekil 1). Uzun yollu tekrarlı yansımalar (long period multiples), sismik sinyalin güçlü yansıtıcı yüzeyden ardışık yansımaları ve sinyalin yeraltı ince tabakalardan ardışık yansımaları (Peg-leg) şeklindedir. Kısa yollu tekrarlı yansımalar ise (short period multiples) hayalet yansımalar (ghost) ve taban altı ince tabaka (interbed) içerisinde gerçekleşen tekrarlı yansımalarıdır (Dragoset ve Jericevic, 1998). Deniz sismiğinde su-hava ara yüzeyinin oldukça iyi bir yansıtıcı olması nedeniyle, en sık görülen su yüzeyi ile deniz tabanı arasında birden fazla oluşan tekrarlı yansımalarıdır

(Wiggins, 1998). Tekrarlı yansımalar ile birincil yansımalar birbirlerinden aralarındaki NMO hız farkı ve tekrarlı yansımaların periyodiklik özelliği sayesinde ayırt edilmektedir (Claerbout ve Doherty, 1972; Castle, 1994; Yılmaz, 2001; Dondurur, 2009, 2018). Tekrarlı yansımalar kendileri ile aynı sıfır zamanında bulunan birincil yansımalarından her zaman daha fazla NMO farkına sahip olmasıyla ayırt edilmektedir (Castle, 1994; Taner, 1980; Schoenberger, 1996). Ayrıca eğimli tabakalarda gerçekleşen tekrarlı yansımalar sismik kesitlerde daha fazla eğime sahip olarak ortaya çıkarlar. Veri işlem aşamasında tekrarlı yansımaları bastırabilmek oldukça önemlidir. Bu etkiyi giderebilmek için birçok yöntem kullanılmasına karşın hala bazı zorluklar bulunmaktadır (Hampson 1986; Verschuur, 1992; Landa, 1999; Lu, 1999; İscan Alp, 2015; Dondurur, 2018). Bu çalışmada tekrarlı yansımaları bastırabilmek için önkestimir dekonvolüsyonu ve F-K eğim süzgeci veri üzerine uygulanmıştır. Önkestimir dekonvolüsyonu tekrarlı yansımaların belirli zaman aralıkları ile kendilerini tekrarlama

özelliğinden yararlanırken, F-K eğim yansımalar arasındaki NMO (Normal Moveout) süzgecinde birincil yansımalar ile tekrarlı farkından yararlanılmaktadır.



**Şekil 1.** Tekrarlı yansımalar türleri.

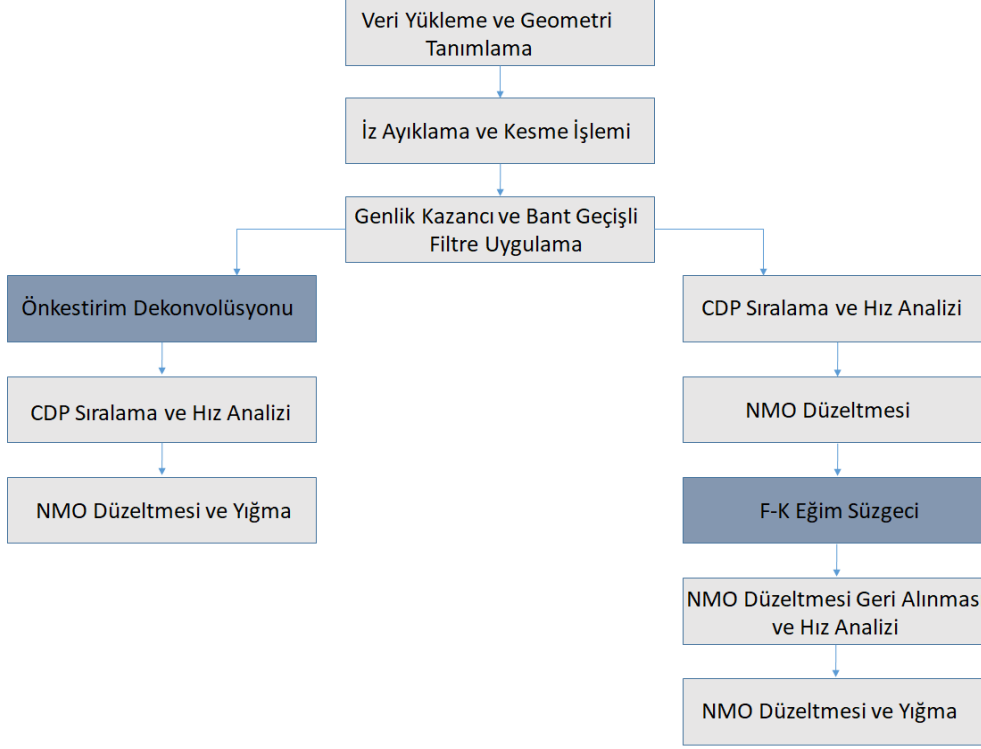
**Figure 1.** Multiple reflection types.

## MATERYAL VE METOT

### Veri geometri bilgileri ve veri işlem akış şeması

Bu çalışmada kullanılan çok kanallı sismik yansımalar verisi "SEG: SEAM açık veri, <https://seg.org/News-Resources/Research-Data/Open-Data> web sitesinden alınmıştır. Sismik veri toplam 1857 atıştan oluşmaktadır. Verinin kanal sayısı 32, alıcı aralığı 6.25 m, atış aralığı 12.5 m, yakın ofset 50 m, kayıt uzunluğu 1024 ms ve örnekleme aralığı 2 ms'dir. Çok kanallı sismik yansımalar verisine uygulanan veri işlem akış şeması şekil 2'de verilmektedir. Rutin veri işlem adımlarında İlk olarak sismik verinin geometri tanımlaması yapılmış sonra verinin sinyal/gürültü oranını arttırabilmek için

gürültülü izler veriden giderilmiş (editing), doğrudan gelen dalgalar ve kırılma dalgaları veriden kesilmiştir (muting). Verinin kazanç eğrileri incelenerek kazanç analizi uygulanmış (gain recovery), genlik spektrumları incelenerek bant geçişli filtreleme uygulanmıştır. Bant geçişli filtrelemede kesme frekansları  $f_1=20$  Hz,  $f_2=25$  Hz,  $f_3=115$  Hz,  $f_4=120$  Hz olarak alınmıştır. Son olarak sismik veri atış atış ortamından ortak orta nokta (CDP) ortamına aktarılmış ve veri üzerine NMO düzeltmesi (Normal Moveout Correction), yığma (stack) işlemi uygulanmıştır. NMO düzeltmesi sayesinde tüm birincil yansımalar sıfır zamanına çekilmiş ve yığma (stack) sayesinde CDP gruplarında ki her izler tek bir iz haline getirilmiştir.



**Şekil 2.** Çok kanallı yansıma verisine uygulanan akış şeması.

**Figure 2.** Flowchart of data processing steps used in multi-channel seismic reflection.

### Tekrarlı yansımaların bastırılmasında kullanılan yöntemler

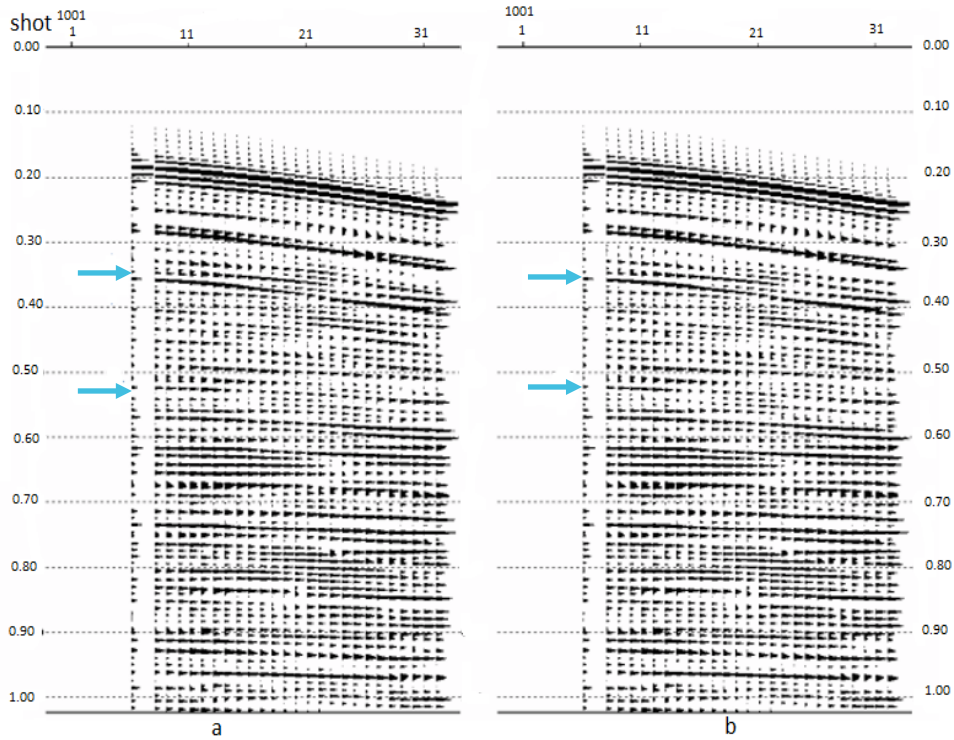
#### Önkestirim dekonvolüsyonu

Önkestirim dekonvolüsyonu tekrarlı yansımaları bastırmada yaygın olarak kullanılan bir veri işlem yöntemidir. Bu yöntemin uygulanması ile giriş verisinin  $x(t)$  (sismogram) gelecek ( $a$ ) zaman kadar sonraki değeri  $x(t+a)$  kestirmeye çalışılır (Yılmaz, 2001). Burada  $a$  kestirim uzaklığını ifade etmekte ve yöntem sismik izler üzerine uygulanmaktadır (trace by trace). Önkestirim dekonvolüsyonu ile periyodik özelliğe sahip tekrarlı yansımalar öncelikle veri içerisinde

kestirmeye çalışılır ve daha sonra giriş verisinden çıkarılmaktadırlar. Bu işlemde operatör uzunluğu ve kestirim uzaklığı parametrelerinin doğru seçilebilmesi tekrarlı yansımaları bastırmada oldukça öneme sahiptir (Peacoc ve Treitel 1969). Seçilen parametrelere göre normal denklemlerden yararlanılarak sismik iz üzerinde kestirim uzaklığı zamanı kadar gidilir ve daha sonra operatör uzunluğu kadar olan zaman bölümü veriden çıkarılmaktadır. Bu çalışma içerisinde bu parametreler deneme-yanılma yoluyla belirlenmiştir. Her parametre değerleri için ayrı ayrı önkestirim dekonvolüsyonu işlemi uygulanmış ve daha sonra seçilen

parametreler ışığında veri işleme devam edilmiştir. Önkestirim dekonvolüsyonu işleminde seçilen parametre değerlerinin doğruluğu, her parametre değerleri için elde edilen atış grupları ve yığma kesitlerinin karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir. Buna göre operatör uzunluğu sismogramın özilişkisi incelenerek 100 ms olarak seçilmiş ve 100 ms operatör uzunluğu için kestirim uzaklıkları ise sırasıyla 15, 30, 60, 120, 140, 160, 180 ms

olarak programa tanımlanmıştır. Şekil 3'te kestirim uzaklıkları 120 ms ve 140 ms seçilerek önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmış atış grupları gösterilmektedir. Buna göre 140 ms kestirim uzaklığı için atış gruplarında ilk tekrarlı yansıma giderilemezken 120 ms kestirim uzaklığı için elde edilen atış gruplarında ise tekrarlı yansımalar giderilmiştir.

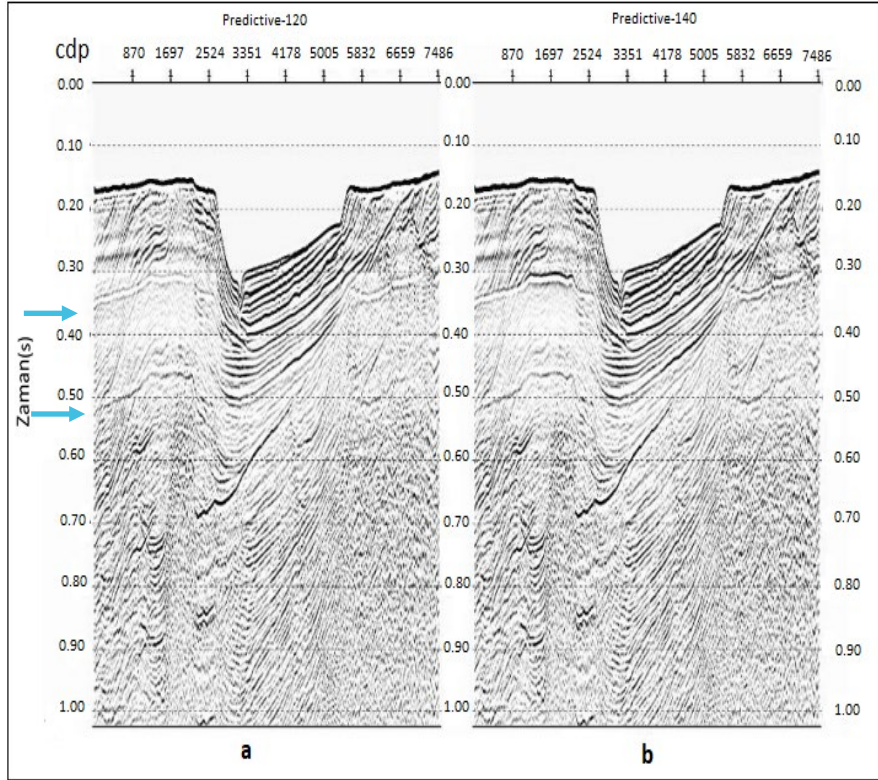


**Şekil 3.** Operatör uzunluğu 100 ms ve kestirim uzaklıkları sırasıyla a) 120 ms ve b) 140 ms seçilerek önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmış verilerin görünümü. Tekrarlı yansımalar ok işaretleri ile gösterilmektedir.

**Figure 3.** The image of the data with predictive deconvolution applied to the shot groups by selecting operator length 100 ms and prediction lag distances of a) 120 ms and b) 140 ms. Multiple reflections are indicated by blue arrows.

Her kestirim uzaklığı için önkestirim dekonvolüsyonu uygulandıktan sonra veri işleme devam edilmiş ve ayrı ayrı yığma kesitleri elde edilmiştir. Buna göre burada sadece örnek olarak operatör uzunluğu 100 ms için kestirim uzaklığı 120 ms ve 140 ms seçilerek önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmış yığma kesitleri verilmiştir (Şekil 4). Bu yığma kesitlerine göre kestirim uzaklığı 120 ms için elde edilen yığma kesitinde her iki tekrarlı yansıma bastırılırken, 140 ms kestirim

uzaklığı için elde edilen yığma kesitinde birincil tekrarlı yansıma bastırılmamıştır. Kesitlerin değerlendirilmesine göre kestirim uzaklığı az seçildiğinde ikincil tekrarlı, fazla seçildiğinde ise birincil tekrarlı bastırılmamıştır. Bu durumda önkestirim dekonvolüsyonu işleminin değerlendirilmesinde sonuç olarak operatör uzunluğu 100 ms ve kestirim uzaklığı 120 ms için elde edilen yığma kesiti diğer yığma kesitlerine göre daha iyi sonuç vermiştir.



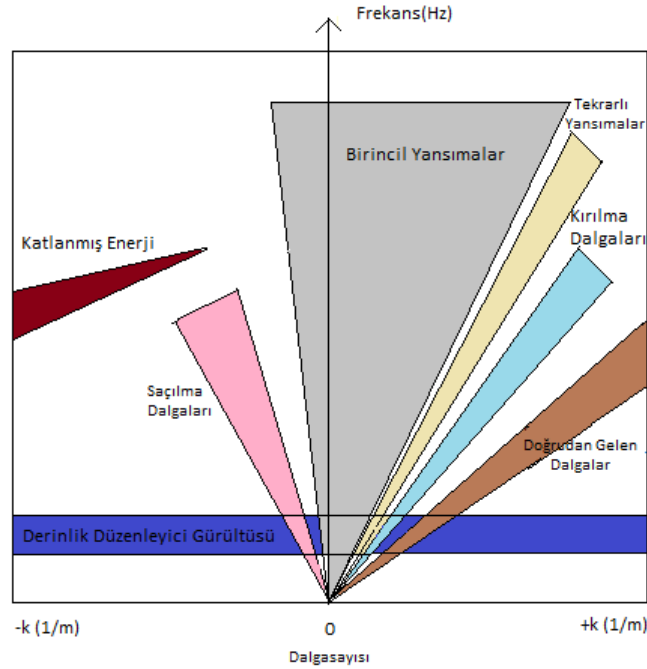
**Şekil 4.** Atış gruplarına operatör uzunluğu 100 ms kestirim uzaklıkları sırasıyla a) 120 ms ve b) 140 ms seçilerek önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmış yığma kesitlerinin görünümü. Tekrarlı yansımalar mavi oklarla gösterilmiştir.

**Figure 4.** The image of the stacked sections with predictive deconvolution applied to the shot groups by selecting operator length 100 ms and prediction lag distances of a) 120 ms and b) 140 ms. Multiple reflections are indicated by blue arrows.

*F-k eğim süzgeci*

Sismik verilerde tekrarlı yansımaların bastırılmasında kullanılan bir diğer yöntem f-k eğim süzgecidir. Bu yöntemde sismik verinin 2B Fourier dönüşümü alınarak zaman ortamındaki veri (x,t) frekans-dalga sayısı (f-k) ortamına aktarılır. F-k eğim süzgecinin uygulanması ile F-K spektrumunda farklı eğimlere sahip birincil yansımalar ve gürültüler birbirlerinden ayrılabilir. Şekil 7'de F-K spektrumunda birincil yansımaların ve gürültülerin yerleri gösterilmektedir. Bu

spektruma göre birincil yansımalar frekans eksenine yakın bir şekilde, genellikle pozitif panelde bulunmalarına karşın negatif panelde de az olarak bulunabilmektedirler. Pozitif panelde ayrıca dalgasayısı eksenine yaklaşılarak sırasıyla tekrarlı yansımalar, kırılma dalgaları ve doğrudan gelen dalgalar bulunmaktadır. Negatif panelde ise uzaysal katlanma olayı ve geri saçılmış dalgalar bulunmaktadır. Deniz sismiğinde görülen derinlik düzenleyici (bird) gürültüsü ise spektrumda yatay olarak ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 5.** Zaman ortamında farklı eğimlere sahip olayların F-K spektrumunda gösterimi (Dondurur 2018' den düzenlenmiştir).

**Figure 5.** F-K spectrum representation of events with different slopes in time domain (Editted from Dondurur, 2018).

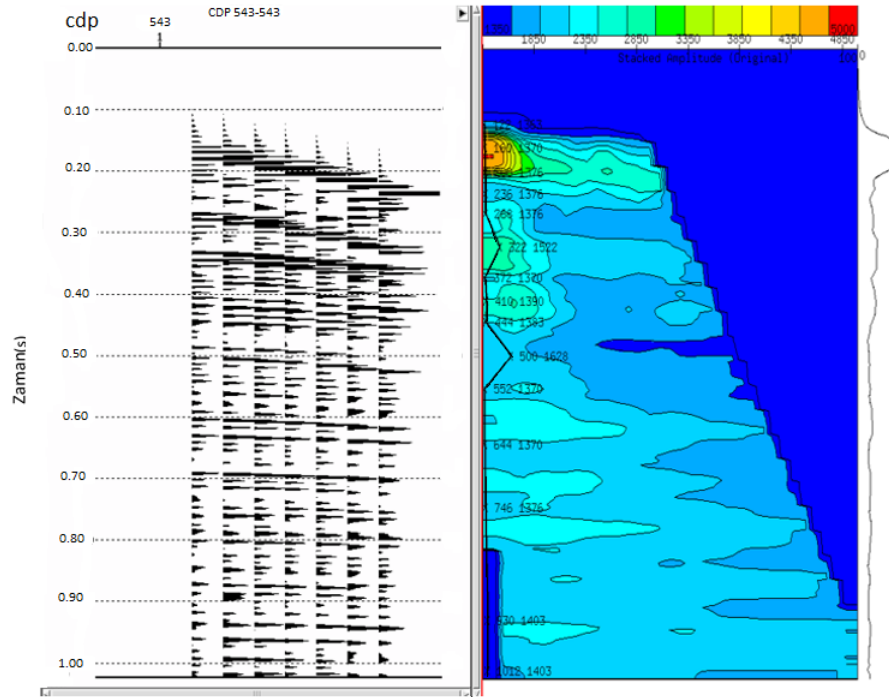
*FKFILT modülü*

Bu çalışmada F-K eğim süzgeci (FKFILT modülü) veri üzerine uygulanmadan önce bant

geçişli süzgeçlenmiş veri atış ortamından CDP ortamına aktarılmış ve sonra CDP grupları üzerine hız analizi uygulanmıştır. Burada

seçilecek olan hızlar yöntemin uygulanabilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. Uygulanan hız analizinde birincil yansımalar gereğinden düşük hız, tekrarlı yansımalar ise onları NMO düzeltmesi sonrası CDP gruplarında yatay hale getirecek hız verilmiştir (Şekil 6). Böylelikle NMO düzeltmesi sonrası CDP gruplarında birincil yansımalar aşırı düzeltilmiş (overcorrection) tekrarlı yansımalar ise yatay hale gelmiştir (Şekil 7). NMO düzeltmesi sonrası birincil yansımaların ve tekrarlı yansımaların birbirlerinden ayrıştırılması sonucunda, F-K spektrumunda

düşey eksen  $k=0$  boyunca dar bir alanda tekrarlı yansımalar, spektrumun negatif panelinde ise birincil yansımalar yer almaktadır (Şekil 8). Bu dar alandaki tekrarlı yansımaların genlikleri FKFILT modülü sayesinde sıfırlanmıştır. FKFILT modülü ile tekrarlı yansımalar giderildikten sonra NMO düzeltmesi geri alınmış (inverse NMO) ve veri üzerine tekrar doğru hız analizi uygulanmıştır. Son olarak uygulanan doğru hız analizi sonrası CDP gruplarına tekrar NMO düzeltmesi uygulanmış ve birincil yansımalar yatay hale getirilmiştir.

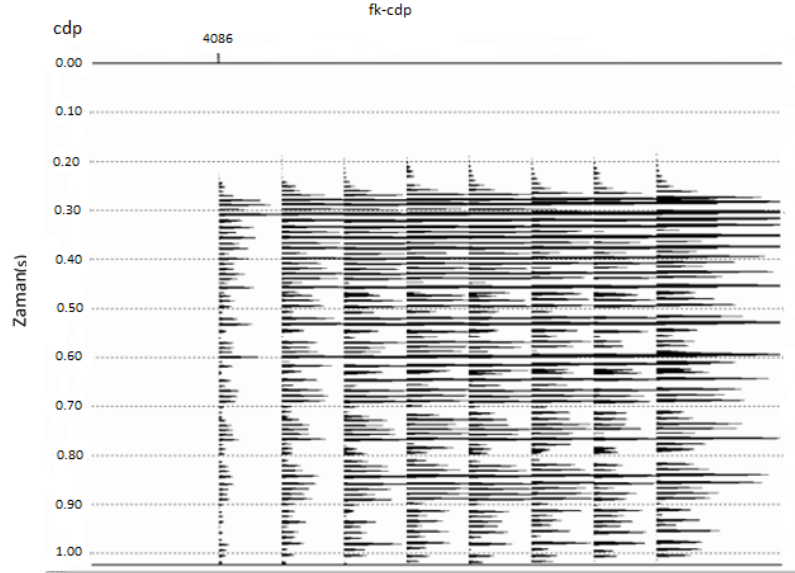


**Şekil 6.** Hız analizi yöntemi. Birincil yansımalar düşük hızlar,tekrarlı yansımalar onları CDP gruplarında yatay hale getiren hızlar verilmiştir.

**Figure 6.** Representation of velocity analysis. Primary reflections were given low velocities and multiple reflections were given velocities making them flat in CDP groups.

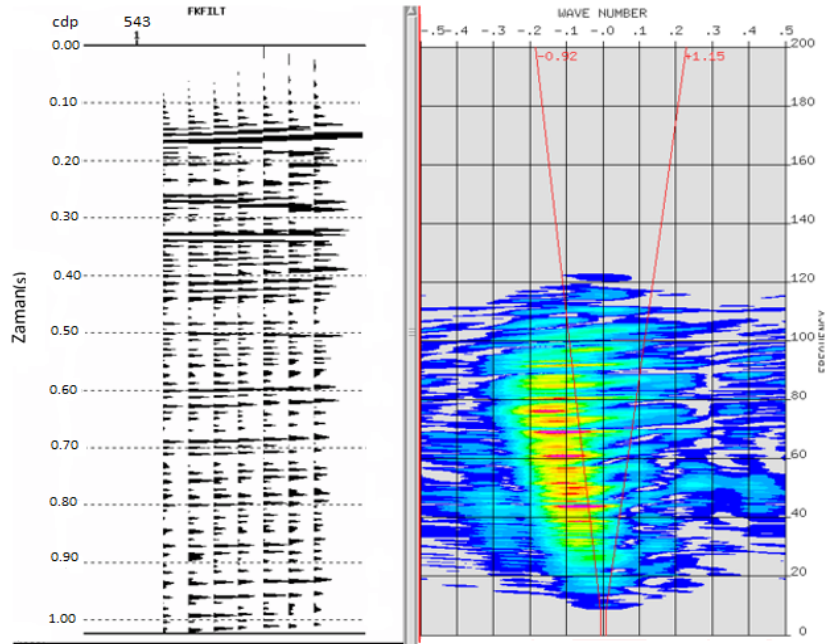


Ceren vd./Yerbilimleri, 2022, 43 (1), 1-17



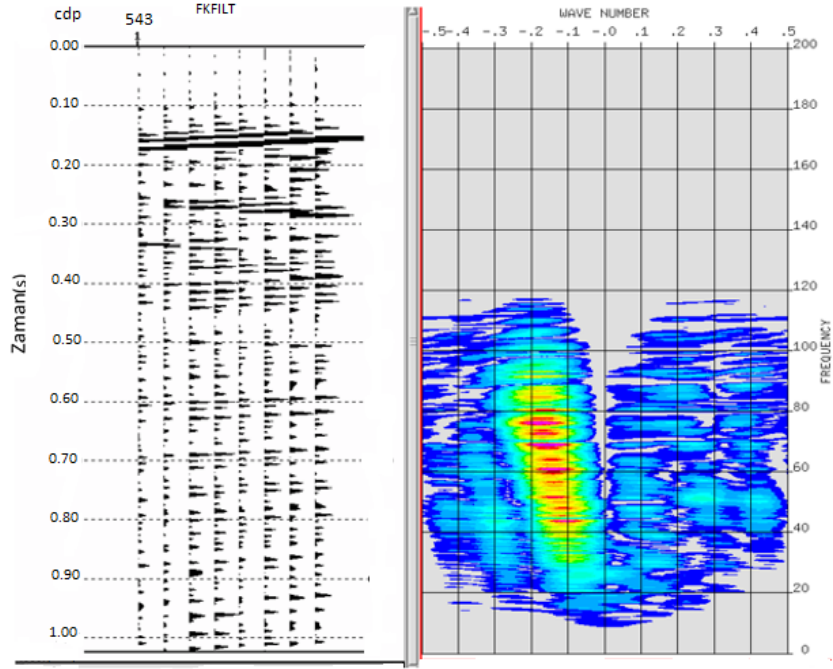
Şekil 7. CDP gruplarının gösterimi

Figure 7. Representation of (fkfilt module) CDP groups



Şekil 8. F-K eğim süzgeci uygulanmadan önce F-K spectrumunun gösterimi.

Figure 8. Representation of the F-K spectrum before applying the F-K filter.



**Şekil 9.** F-K eğim süzgeci uygulandıktan sonra F-K spektrumunun gösterimi.

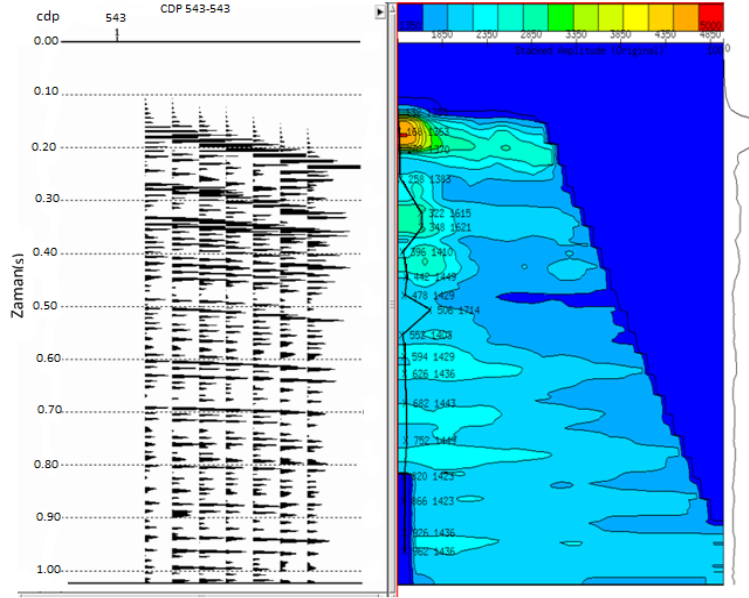
**Figure 9.** Representation of the F-K spectrum after applying the F-K filter.

#### ZMULT modülü

Bu çalışma içerisinde F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) veri üzerine uygulanmadan önce bant geçişli süzgeçlenmiş veri atış ortamından CDP ortamına aktarılmış ve CDP grupları üzerine hız analizi uygulanmıştır. Hız analizinde birincil yansımalar gereğinden düşük hız (suyun hızından düşük hız), tekrarlı yansımalar ise gereğinden fazla hız verilmiştir (Şekil 8) (İşcan Alp vd., 2015). Böylelikle NMO düzeltmesi sonrası CDP gruplarında birincil yansımalar aşırı düzeltilmiş (overcorrection), tekrarlı yansımalar ise yetersiz düzeltilmiş

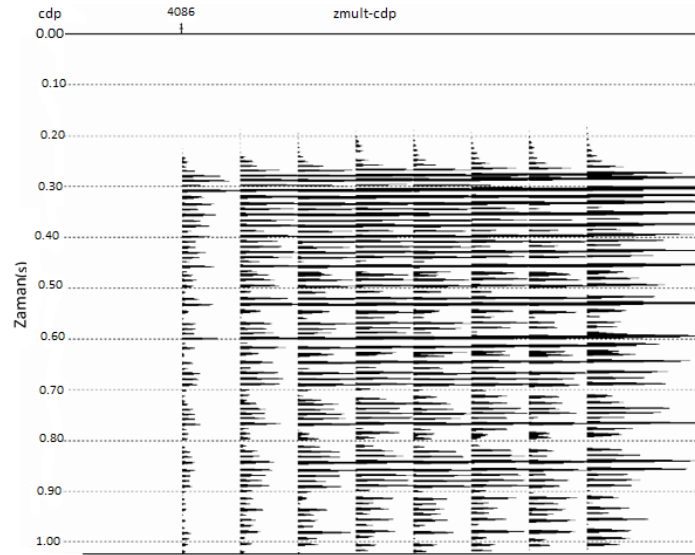
(undercorrection) hale gelmiştir. ZMULT modülü veri üzerine uygulanırken filtre uzunluğu 59 ms, başlangıç ve bitiş zamanı sırasıyla 0 ms ve 1024 ms olarak alınmıştır. ZMULT modülü sayesinde yetersiz düzeltilmiş olaylar (undercorrection events) veriden çıkarılmıştır. Tekrarlı yansımaların bastırılmasından sonra NMO düzeltmesi geri alınmış (inverse NMO) ve veri üzerine tekrar doğru hız analizi uygulanmıştır. Son olarak uygulanan doğru hız analizi sonrası CDP grupları üzerine yeniden NMO düzeltmesi uygulanmış ve birincil yansımalar yatay hale getirilmiştir.

Ceren vd./Yerbilimleri, 2022, 43 (1), 1-17



**Şekil 10.** Hız analizi gösterimi. Birincil yansımalarla düşük hız, tekrarlı yansımalarla ise fazla hız verilmiştir.

**Figure 10.** Representation of velocity analysis. Primary reflections were given low velocities and multiple reflections were given high velocities.



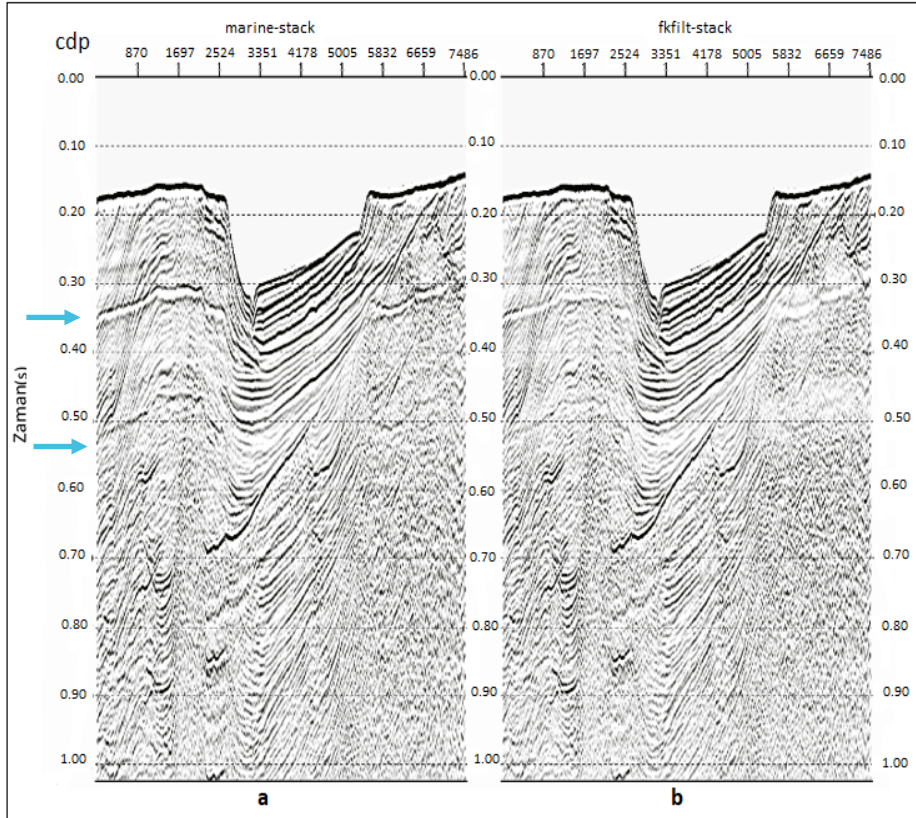
**Şekil 11.** CDP (Zmult modülü) gruplarının gösterimi.

**Figure 11.** Representation of (Zmult module) CDP groups.

### TARTIŞMA

Bu çalışmada tekrarlı yansımaların bastırılmasında kullanılan F-K eğim süzgeci ve önkestirim dekonvolüsyonu yöntemleri hem kendi aralarında hem de birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 12 'de CDP grupları üzerine F-K eğim süzgeci (FKFILT modülü) uygulanmamış yığılma kesiti ile b) uygulanmış yığılma kesitinin karşılaştırılması verilmiştir. Bu yığılma kesitleri göz önüne alındığında F-K eğim süzgeci (FKFILT modülü) sayesinde sismik kesitte mavi ok işaretleri ile gösterilen birincil ve

ikincil tekrarlı yansımaların etkisi giderilmiştir. Ancak tekrarlı yansımalar veriden giderilirken sismik kesitte bu iki tekrarlı yansımaların olduğu bölgelerde birincil yansımaların genliklerinde az da olsa kayıplar yaşanmıştır. Bunun nedeni F-K eğim süzgeci (FKFILT modülü) yönteminin uygulanmasından önce gerçekleştirilen hız analizi sonrası CDP gruplarında birincil yansımalar ile tekrarlı yansımaların yeterince ayırt edilememesi ve FKFILT modülünde manuel olarak seçilen sıfırlanma zonunun gereğinden fazla seçilmesi olabilmektedir.

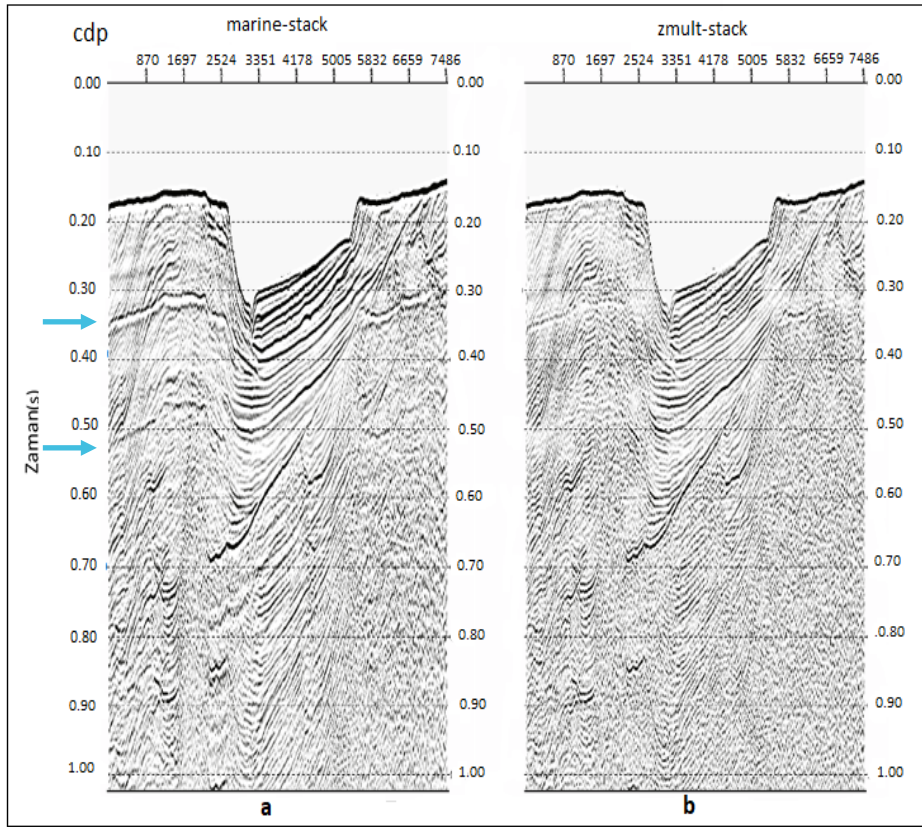


**Şekil 12.** CDP gruplarına F-K eğim süzgeci (FKFILT modülü) a) uygulanmamış ve b) uygulanmış yığılma kesit görünümlerinin karşılaştırılması. Tekrarlı yansımalar mavi oklarla gösterilmiştir.

**Figure 12.** Comparison of stack section views (a) with and (b) without F-K slope filter (ZMULT) module applied to CDP groups. Multiple reflections are indicated by blue arrows.

Şekil 13'te CDP grupları üzerine F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) a) uygulanmamış yığma kesiti ile b) uygulanmış yığma kesitinin karşılaştırılması verilmektedir. Bu iki kesit karşılaştırıldığında tekrarlı yansımaları bastırmada F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) oldukça başarılı sonuç vermiştir. F-K eğim süzgecinin veri üzerine uygulanması öncesi gerçekleştirilen hız analizi aşamasında seçilen RMS hızlarının doğruluğu yöntemin başarısında oldukça önem arz etmiştir. Seçilen

hızlar sayesinde CDP gruplarında birincil yansımalar ve tekrarlı yansımalar birbirlerinden ayırt edilmiş ve tekrarlı yansımalar bastırılmıştır. F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) uygulanmış yığma kesitinde hem tekrarlı yansımalar giderilmiş hem de birincil yansımaların genlikleri korunmuştur. Ayrıca bu yöntemin veri üzerine uygulanması sayesinde yığma kesitinin kalitesi ve tabakaların ayrırlılığı arttırılmıştır.

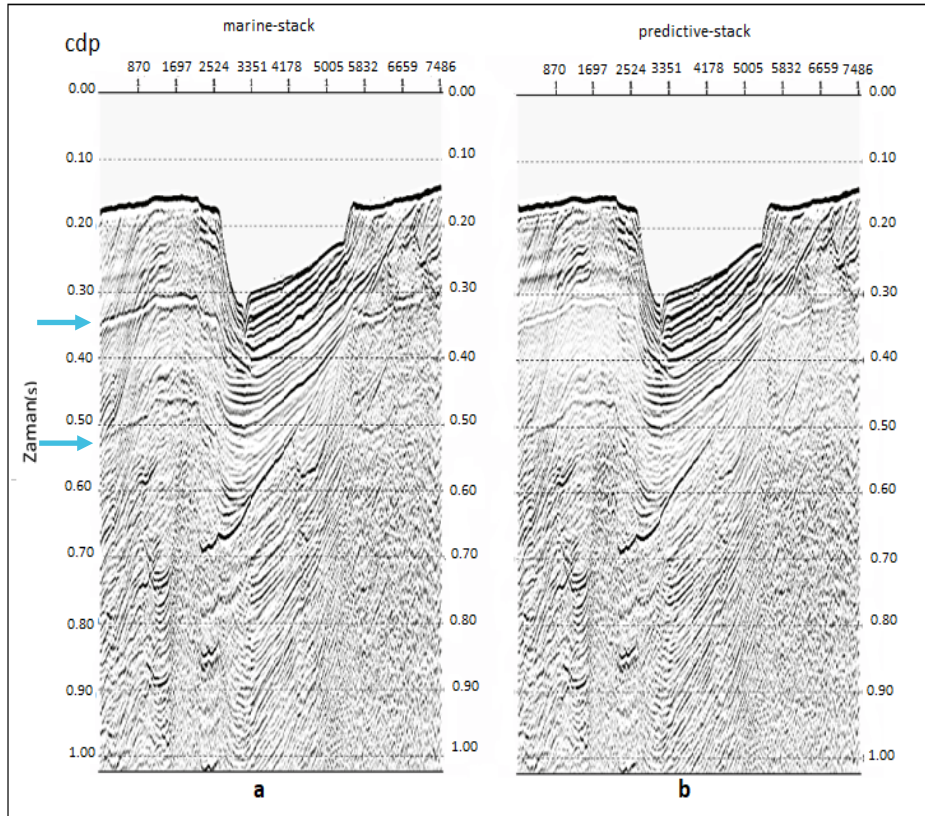


**Şekil 13.** CDP gruplarına a) F-K eğim süzgeci (ZMULT) modülü uygulanmamış ve b) uygulanmış yığma kesit görüntülerinin karşılaştırılması. Tekrarlı yansımalar mavi oklarla gösterilmiştir.

**Figure 13.** Comparison of stack section views (a) with and (b) without F-K slope filter (ZMULT) module applied to CDP groups. Multiple reflections are indicated by blue arrows.

Şekil 14'te atış gruplarına önkestirim dekonvolüsyonu a) uygulanmamış ve b) uygulanmış sismik yığma kesit görüntülerinin karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 14 b) yığma kesiti, operatör uzunluğu 100 ms ve kestirim uzaklığı 120 ms seçilerek önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmış yığma kesitidir. Ancak bu kesitlerin karşılaştırılmasına göre seçilen parametrelere bağlı olarak tekrarlı yansımaların bastırılmasının yanı sıra tekrarlı yansımaların bulunduğu bölgelerde sismik

kesitin kalitesinde oldukça azalmalar yaşanmıştır. İstenen sonuç hem tekrarlı yansımaları bastırmak hem de birincil yansımaların genliklerini korumak olduğundan önkestirim dekonvolüsyonu bu çalışmada çok başarılı sonuç verememiştir. Bunun nedeni önkestirim dekonvolüsyonu işleminin uygulanması sırasında seçilen parametre değerlerinin (operatör uzunluğu, kestirim uzaklığı) doğruluk derecesi olabilmektedir.



**Şekil 14.** Atış gruplarına önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmamış (a) ve uygulanmış (b) yığma kesit görüntüleri karşılaştırılması. Tekrarlı yansımalar mavi oklarla gösterilmiştir.

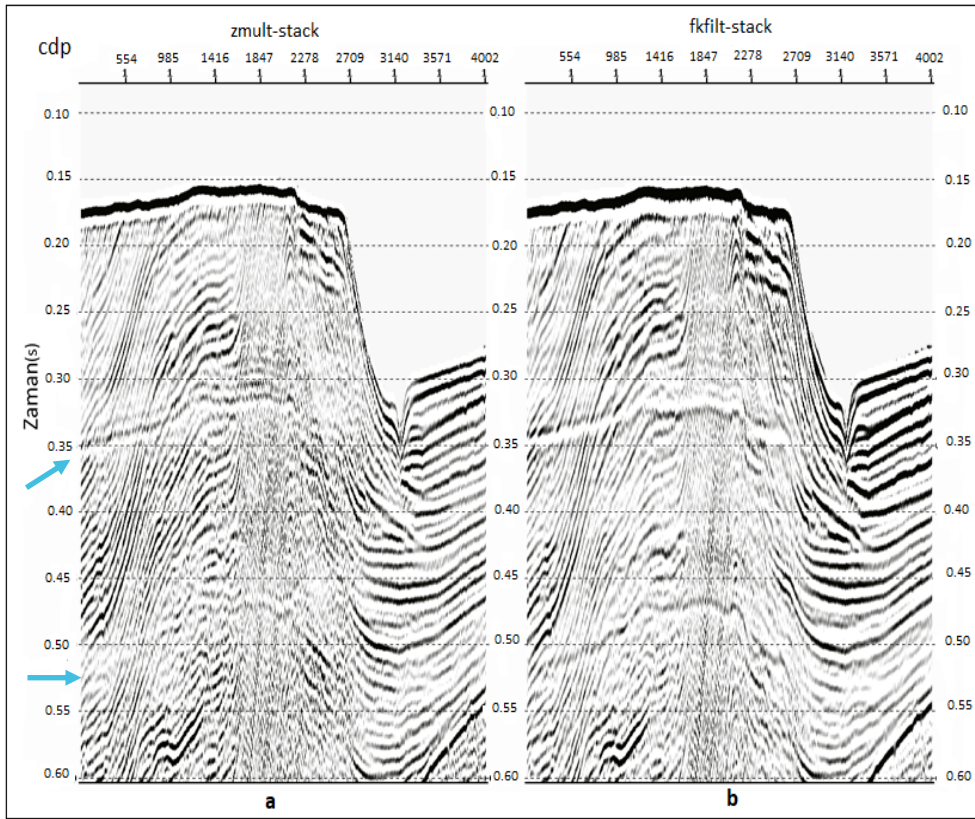
**Figure 14.** Comparison of stack section views a) with and b) without predictive deconvolution applied to shot groups. Multiple reflections are indicated by blue arrows.

## SONUÇLAR

### F-K Eğim Süzgeci FKFILT Modülü ile F-K Eğim Süzgeci ZMULT Modülü Karşılaştırılması

Şekil 15' de CDP gruplarına f-k eğim süzgeci (FKFILT modülü) ile F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) yöntemlerinin uygulanması sonucu elde edilmiş yığma kesitlerinin yakın görüntüleri karşılaştırılmıştır. Bu iki kesit

karşılaştırıldığında F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) tekrarlı yansımaları bastırmada ve kesitin kalitesini arttırmada daha başarılı sonuç vermiştir. Bu nedenle önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmış yığma kesiti ile karşılaştırma işleminde F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) uygulanmış yığma kesiti tercih edilmiştir.



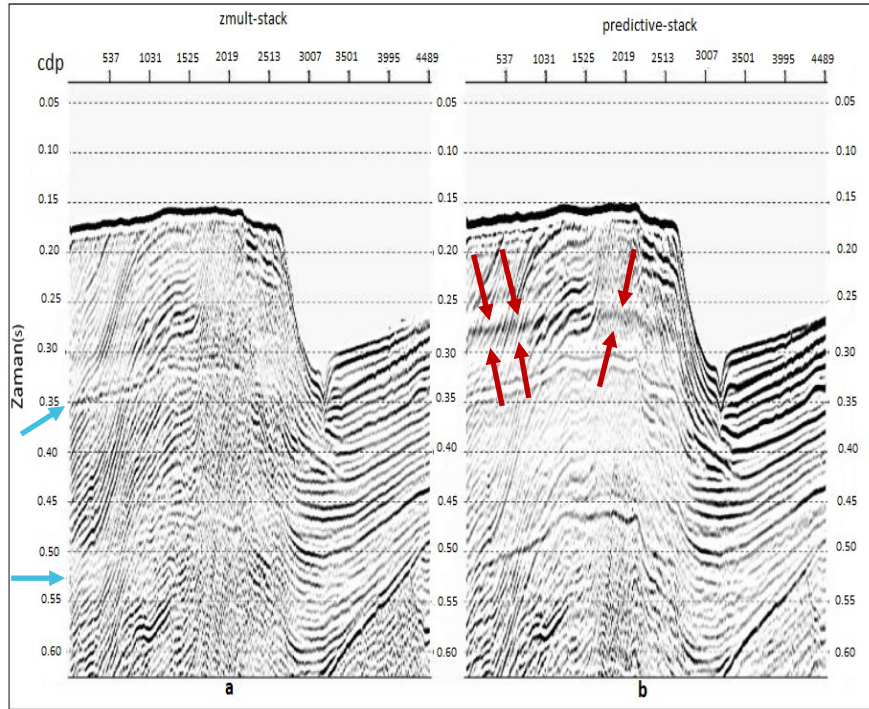
**Şekil 15.** a) F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) ve b) F-K eğim süzgeci (FKFILT modülü) uygulanması sonucu elde edilen yığma kesitlerinin yakınlaştırılmış görüntülerinin karşılaştırılması. Tekrarlı yansımalar mavi oklarla gösterilmiştir.

**Figure 15.** Comparison of zoomed stack section images obtained by applying (a) F-K filter (ZMULT module) and b) F-K filter (FKFILT module). Multiple reflections are indicated by blue arrows.

### Önkestirim dekonvolüsyonu ile F-K eğim süzgeci (ZMULT Modülü) karşılaştırılması

Şekil 16'da a) CDP grupları üzerine F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) uygulanmış ve b) atış gruplarına önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmış yığma kesitlerinin yakın görünüşleri verilmiştir. Bu kesitler değerlendirildiğinde tekrarlı yansımaları bastırmada F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) oldukça başarılı sonuç vermiştir. Atış

gruplarına önkestirim dekonvolüsyonu uygulanmış yığma kesitinde 0.34 s-0.52 s çift yol seyahat zamanları arasında tekrarlı yansımalar bastırılırken aynı zamanda kesitin kalitesinde de azalmalar yaşanmış ve kesitin yorumlanması oldukça zorlaşmıştır. Ayrıca önkestirim dekonvolüsyonu işlemi yığma kesitinde 0.25 s-0.30 s çift yol seyahat zamanları arasında yalancı bir yansıma izine neden olarak birincil yansımaları maskeleymiştir (Şekil 16).



**Şekil 16.** a) F-K eğim süzgeci (ZMULT modülü) ve b) önkestirim dekonvolüsyonu uygulanması sonucu elde edilen yığma kesitlerinin yakınlaştırılmış görünüşlerinin karşılaştırılması. Tekrarlı yansımalar mavi oklarla yalancı yansıma izi ise kırmızı oklarla gösterilmiştir.

**Figure 16.** Comparison of zoomed stack section images obtained by applying a) F-K filter (ZMULT module) and b) predictive deconvolution. The false reflection trace is indicated by red arrows and multiple reflections is indicated by blue arrows.



**KAYNAKLAR**

- Claerbout, JF. and Doherty, SM., 1972. Downward continuation of moveout-corrected seismograms. *Geophysics*, 37, 741-768.
- Castle, R.J., 1994. A theory of normal moveout, *Geophysics*, 72, W33-W43.
- Dondurur, D., 2009. Deniz Sismiğinde Veri İşlem, JFMO Eğitim Yayınları No:11, Ankara.
- Dondurur, D., 2018. Acquisition and Processing of Marine Seismic Data. Elsevier Science Publishing Co. ISBN: 978-0-12-811490-2, USA.
- Dragoset, W.H., Jericevic, Z., 1998. Some remarks on surface multiple attenuation. *Geophysics*, 63, 772 -789.
- Hampson, D., 1986. Inverse velocity stacking for multiple elimination. *J. Can. Soc. Explor. Geophys*, 22, 44–55.
- İşcan Alp ,Y. Loreto, MF., Ocakoğlu, N., Zgur, F., 2015. FK-filtering vs. Predictive Deconvolution in the Multiple Reflection Removal Approach. Japan Geoscience Union Meeting 24-28 May, Makuhari-Messe Japan.
- Landa, E., Belfer, I.,Keydar, S.,1999. Multiple attenuation in the parabolic  $\tau$ -p domain using wavefront characteristics of multiple generating primaries. *Geophysics*, 64, 1806–1815.
- Lu, G., Ursin, B., Lutro, J., 1999. Model-basedremoval of water layer multiple reflections. *Geophysics*, 64, 1816–1827.
- Peacock, K.I., Treitel, S., 1969. Predictive deconvolution: theory and practice. *Geophysick*, 34,155-169.
- SEG: SEAM open data, <https://seg.org/News-Resources/Research-Data/Open-Data>.
- Sheriff, R.E. Exploration seismology. Cambridge Univercity press. New York.
- Schoenberger, M., 1996. Optimum weighted stack for multiple suppression. *Geophysics*, 61, 891–901.
- Taner, M.T., 1980. Long-period sea-floor multiples and their suppression. *Geophys. Prospect*, 28, 30–48.
- Data. SEG, Tulsa, OK. Verschuur, D.J., Berkhout, A.J., Wapenaar, C.P.A., 1992. Adaptive surface-related multiple elimination. , 57, 1166–1177
- Yılmaz, Ö., 1987. Seismic Data Processing. SEG, Tulsa, OK.
- Wiggins , J.W., 1998. Attenuation of complex water-bottom multiples by Wave-equation-based prediction and subtraction. *Geophysics*, 53, 1527-1539.



## Doğu Akdeniz epibatyal kıyı çökelleri arşivlerinden Kalabriyen-Kibaniyen yaşlı planktik foraminifer topluluklarının sayısal analizi ve paleoekolojisi (Mersin, Türkiye)

### *Quantitative analysis of Calabrian-Chibanian planktic foraminifer assemblages and paleoecology of the Eastern Mediterranean Sea from the onshore epibathyal sedimentary archives (Mersin, Turkey)*

NAZİK ÖĞRETMEN <sup>1, 2\*</sup> 

<sup>1</sup> Max Planck Kimya Enstitüsü, İklim Jeokimyası Bölümü, Mainz, Almanya

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Geliş (*received*): 31 Mayıs (*May*) 2021 Kabul (*accepted*): 24 Ocak (*January*) 2022

#### ÖZ

Doğu Akdeniz'de epibatyal derinlikte oluşmuş en genç denizel çökeller Kalabriyen-Kibaniyen yaşlı olup, Orta Anadolu Platosu'nun güney kesiminde yakın zamanda keşfedilmiştir. Dolayısıyla Kalabriyen-Kibaniyen yaşlı planktik foraminiferlerin yaşadığı Doğu Akdeniz'in o döneme ait ekolojisi bu zamana kadar incelenmemiştir. Bu çalışma Türkiye'nin güneyinde Mersin civarında bulunan Kalabriyen ve Kibaniyen yaşlı iki adet denizel birime ait planktik foraminifer topluluklarını ve Doğu Akdeniz'in yüzey sularının sıcaklık ve besin gibi çevresel parametreler bağlamında ekolojik özelliklerini ortaya koymaktadır. Burada planktik foraminiferler arasındaki baskın toplulukları belirlemek için Küme Analizi, çok değişkenli istatistiksel verisetindeki etkin ekolojik değişkenleri belirlemek için ise Temel Bileşen Analizi uygulanmıştır. Çok değişkenli istatistiksel analiz sonuçları, Kalabriyen yaşlı Doğu Gülnar denizel biriminin *Globorotalia*, *Globigerinella*, *Globigerina*, ve *Orbulina* olarak dört ana toplulukla temsil edildiğine işaret etmektedir. Çökelleme ortamının Kibaniyen yaşlı daha genç kesimi olan Tol istifinin ise *Globigerinoides* ve *Globigerinella obesa*, *Orbulina* ve *Globigerinoides*, ve *Orbulina* olmak üzere üç ana toplulukla temsil edildiğine işaret etmektedir. Topluluklar arasındaki istatistiksel ilişki incelendiğinde Doğu Gülnar denizel birimi için üç temel ekolojik faktör (sıcaklık, besin, kıydan uzaklık), Tol birimi için ise tek bir ekolojik faktör (su derinliği) tanımlanabilmiştir. Bu durum, kesitlerin farklı iklimsel koşullarda oluştuğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** planktik foraminiferler; Doğu Akdeniz; paleoekoloji; Erken-Orta Pleyistosen

**ABSTRACT**

*The youngest epibathyal marine deposits in the Eastern Mediterranean Region giving Calabrian-Chibanian age have been recently discovered around the southern Central Anatolian Plateau, Turkey. Hence the Calabrian-Chibanian planktic foraminifer paleoecology of the Eastern Mediterranean surface waters has not been investigated yet. This study reports the planktic foraminifer assemblages of the Calabrian and Chibanian aged two marine successions in the Mersin district in southern Turkey. Here, the ecological properties of the Eastern Mediterranean sea-surface waters and their controlling environmental parameters such as temperature and nutrient availability are documented through quantitative analysis. Quantitative analysis includes the Cluster Analysis to find dominant associations among planktic foraminifers and the Principal Component Analysis to quantify the (ecological) variables within the multivariate dataset. The multivariate statistical analysis revealed that the Calabrian marine succession, Gülnar East (1.72-1.08 My), is represented by four main assemblages: Globorotalia, Globigerinella, Globigerina, and Orbulina assemblage. The second and the younger Chibanian section, Tol (<0.61 and >0.46 My), is represented by three assemblages: Globigerinoides and Globigerinella obesa assemblage, Orbulina and Globigerinodes assemblage, and Orbulina assemblage. Examining the statistical correlations between the assemblages, three ecological variables for the Gülnar East section (temperature, nutrient, and coastal distance) and one variable for the Tol section (water depth) were identified. This outcome points to different climatic conditions prevailed during the deposition of the two sections.*

**Keywords:** planktic foraminifers; Eastern Mediterranean; paleoecology; Early-Middle Pleistocene

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.945728>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: ogretmenn@itu.edu.tr

**INTRODUCTION**

The Mediterranean Region has been of interest to researchers for several decades since it has recorded several tectonic and climatic events in its Neogene aged sedimentary archives given the uniqueness of the Messinian Salinity Crisis (MSC) that occurred at ~5.6 My (Hsü et al., 1973; Cita et al., 1977; Bizon, 1985; Ryan, 2009). The MSC, the event that was triggered by the uplift of the Gibraltar Strait, resulted in almost complete desiccation of the Mediterranean Sea (Hsü et al., 1973, 1977; Krijgsman et al., 1999, 2018; Loget and van den Driessche, 2006). The MSC was followed by the "Lago-Mare" event, the megaflood that occurred during the Zanclean at around 5.33

My when the Atlantic waters filled the Mediterranean Basin as the Strait of Gibraltar opened, which marked the ending of the Miocene and starting of the Pliocene stage (van Couvering et al., 2000; Garcia-Castellanos et al., 2009, 2020; Guerra-Merchán et al., 2010; Cipollari et al., 2012; Cosentino et al., 2013; Roveri et al., 2019). In Turkey, Zanclean and post-Zanclean marine deposits are found onshore in the southern (Yıldız et al., 2003; Cipollari et al., 2012; Faranda et al., 2013; Tekin et al., 2019) and southwestern (Akay et al., 1985; Glover and Robertson, 1998; Poisson et al., 2003; Nazik, 2004; Çiner et al., 2008) Central Anatolian Plateau as well-preserved outcrops. However,

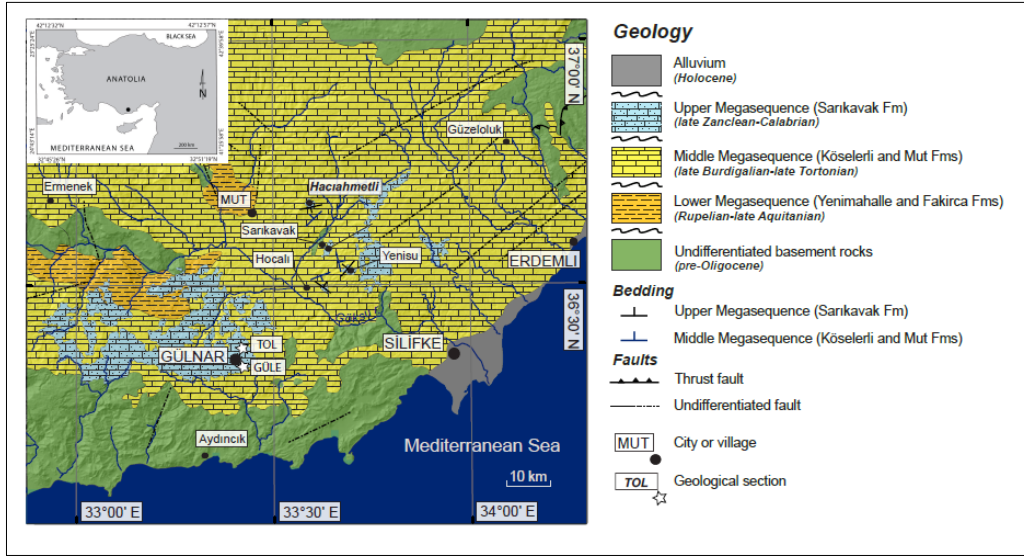
Quaternary deposits onlapping these Neogene units are poorly investigated (Yıldız et al., 2003; Öğretmen et al., 2018a, 2018b; Kanbur and Öğretmen, 2022). In fact, given the semi-enclosed nature of the Mediterranean Sea and consequent ecological adaptation of the foraminifers habiting in the Mediterranean waters paved the way to establish a special biozonation scheme for the Mediterranean Region since several foraminiferal bioevents different from the global bioevents were identified (Iaccarino et al., 2007; Cita et al., 2008; Lirer et al., 2019). Indeed, the Pleistocene stratigraphy of the Eastern Mediterranean Region has been updated applying micropaleontological analyses on recently discovered marine successions in the Mersin district, southern Turkey (Öğretmen et al., 2018a) which are the focus of this present study. Nonetheless, to date, paleoecological conditions of the surface waters during the sedimentation of these youngest epibathyal marine deposits of the Eastern Mediterranean realm have remained uninvestigated. In this study, planktic foraminifer assemblages of the Pleistocene Eastern Mediterranean waters are presented and corresponding paleoecological factors from these marine sediments are examined quantitatively applying multivariate statistical analysis.

### GEOLOGICAL SETTING

The study area is located at the southern margin of the Central Anatolian Plateau at >1000 meters above sea level (asl) close to the eastern part of Gülnar village in Mersin (Figure 1). The Central Anatolian Plateau (CAP) has been uplifting as a response to the convergent tectonics between the African, Arabian, and Eurasian plates (Ketin, 1966; Dewey and Şengör, 1979; Şengör et al., 1985; Faccenna et al., 2006; Okay et al., 2020). Recent studies suggest an ongoing mantle driven uplift of the

southern margin of the CAP since the Miocene times (Cosentino et al., 2012; Schildgen et al., 2012; Bartol and Govers, 2014; Radeff et al., 2015; Öğretmen et al., 2018a; Racano et al., 2020). This uplift allowed the preservation of the late Cenozoic epibathyal marine sediments along the southern flank of the CAP (Yıldız et al., 2003; Cipollari et al., 2012; Faranda et al., 2013; Öğretmen et al., 2018a, 2018b).

The marine successions (Gülnar East; referred GÜLE from now on, and Tol) examined in this study, make part of the Sarıkavak Formation onlapping the Miocene shallow-water limestone sequence lies at ~1500 m asl and consist of Plio-Pleistocene deposits which are the youngest deep marine sediments of the Eastern Mediterranean Region found as yet (Figure 1; Öğretmen et al., 2018a). The GÜLE and Tol sections unconformably overlie the middle Miocene limestones of the Mut Formation (Figure 1). The GÜLE section (36° 20' 8.26" N; 33° 25' 51.44" E), found at ~1000 m asl, is represented by grey-beige colored marls with five sapropel layers at the bottom part of the section (Figure 2a). The Tol section (36°23' 05.9" N; 33°25' 25.9" E) is located ~1200 m asl and its bottom part unconformably lies on top of an erosional surface that cuts the middle Miocene shallow-water limestones of the Mut Formation. This marine succession shows some carbonate layers in the upper part. It consists of mainly clayey marls and marly clays including a few dark horizons of bioturbated marly clays. Within these layers some plant remains are present (Figure 2b). These two sections have been studied for their biostratigraphy from foraminifers, ostracods, and calcareous nannoplanktons (Öğretmen et al., 2018a). Based on the identified foraminiferal bioevents first occurrence (FO) of *Neoglobobadrina pachyderma* sx (1.79 My), first influx of *Globorotalia crassaformis* (1.72



**Figure 1.** Geological map of the study area showing sampled Gülnar East (GÜLE) and Tol sections (according to Öğretmen et al., 2018a).

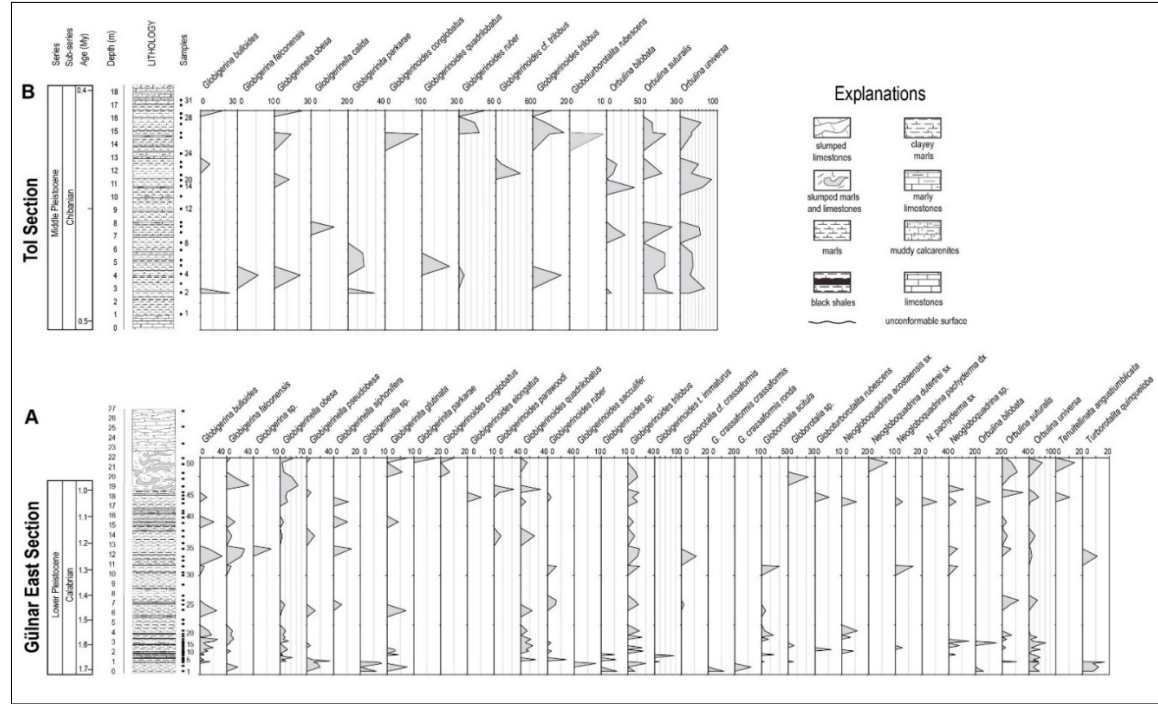
**Şekil 1.** Doğu Gülnar (GÜLE) ve Tol kesitlerinin örneklendiği çalışma alanını gösteren jeoloji haritası (Öğretmen vd., 2018a'dan alınmıştır).

My), FO of modern morphotype of *Bulimina marginata* (1.54 My), bottom and top paracme of *Neogloboquadrina* spp. sx (1.36 and 1.2 My, respectively) (Lourens et al., 2004; Iaccarino et al., 2007; Cita et al., 2008; Lirer et al., 2019); and nannoplankton bioevents medium *Gephyrocapsa* (<1.73 My), large *Gephyrocapsa* (<1.6 My), last occurrence of *Helicosphaera sellii* (1.245 My) (Raffi, 2002; Raffi et al., 2006), the age of the GÜLE section was identified as Calabrian within MPle1 *Globigerina cariacensis* Interval Zone of the Mediterranean planktic foraminifer biozonation (Öğretmen et al., 2018a). Accordingly, the GÜLE section covers the age interval between 1.72 My and 1.08 My. Whereas the Tol section covers the period between <0.61 My and >0.46 My (Öğretmen et al., 2018a) based on the foraminifer bioevents last common occurrence of *Neogloboquadrina* spp. sx (0.61 My) and FO of *Globigerinella calida* (0.78 My) (Lourens et

al., 2004; Iaccarino et al., 2007); and nannoplankton bioevent LCO of *Pseudoemiliania lacunosa* (0.46 My) (Raffi et al., 2006).

#### MATERIAL AND METHOD

The sampling was conducted from the 27 m-thick GÜLE section and 18.5 m-thick Tol section with 50 cm of intervals resulting in total 54 and 26 samples, respectively, for micropaleontological analyses. For the microfaunistic studies, all samples (except for the uppermost GÜLE samples 52, 53, and 54) were disaggregated in an H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 5% solution for 24–48 hour, washed through 63 µm and 125 µm mesh sieves, and dried in an oven at 40°C at the Roma Tre University facilities. Quantitative and qualitative planktic foraminifer analyses were carried out by counting, when possible, up to 300 specimens from the dry residue fraction >125 µm.



**Figure 2.** Stratigraphic logs (from Öğretmen et al, 2018a) and planktic foraminifer relative abundance plots of older GÜLE (A) and younger Tol (B) sections. Age model adapted from Öğretmen et al. (2018a).

**Şekil 2.** Daha yaşlı GÜLE (A) ve daha genç Tol (B) kesitlerine ait planktik foraminifer göreceli çokluk grafikleri ve stratigrafik kayıtları (Öğretmen vd. (2018a)'dan değiştirilerek). Yaş modeli Öğretmen vd. (2018a)'dan alınmıştır.

The taxonomic identification of the species was performed referring to Parker (1962), the Practical Manual of Neogene Planktonic Foraminifera of Iaccarino et al. (2007), and online databases [www.foraminifera.eu](http://www.foraminifera.eu) and World Register of Marine Species ([www.marinespecies.org](http://www.marinespecies.org)). Percentage calculation of each species was performed simply by calculating the number of each species relative to the total assemblage of each sample. For statistical analyses, only species with more than 5% of abundance were taken into account (Figure 2).

To obtain a reasonable ecological model, species were grouped according to their genera based on their ecological requirements following Bé (1977) and Schiebel and Hemleben (2017). Two algorithms were used: the unconstrained Cluster Analysis (Chord distance measure and the un-weighted pair group method using arithmetic average-UPGMA) in Q-mode (column mode) and the Principal Component Analysis (PCA) using the PAST software, ver. 4.04 (Figures 3-8) (Hammer, 2020). The Cluster Analysis was applied in Q-mode to find dominant associations throughout the sections (Figures 3 and 6). The Cluster Analysis dendrogram was tested through the cophenetic correlation coefficient (c) (Sokal and Rohlf, 1962; Mouchet et al., 2008). The highest cophenetic correlation coefficient points to the cluster that holds most of the information (Borcard et al., 2018).

The PCA was applied to quantify variables (components) within the multivariate dataset (Hammer, 2020 and references therein). To test the accuracy of the PCA, bootstrap was used to estimate the variances of factor loadings (Figures 5 and 8) (Chatterjee, 1984). The bootstrapping was carried out with 999 bootstrap replicates for all analyses. In the scree plots, 95% bootstrapped confidence intervals are given for each Eigenvalue, and the broken stick values are reported in Figure

3. The results of the multivariate statistical analyses for both sections are provided as Supplementary Information (SI) and can be accessed via <http://dx.doi.org/10.17632/n3skhm7tz6.1>.

The relative abundance of each planktic foraminifer species above 5% throughout the GÜLE and Tol sections were reported in figures 4 and 7.

## RESULTS

Throughout the GÜLE and Tol sections, several sample levels were not identified for their foraminifer assemblages due to strong recrystallization as indicated also in the previous studies conducted on these two marine successions (Öğretmen et al., 2018a, 2018b). For this reason, in the GÜLE section, samples 8, 9, 11, from 27 to 31, 40 to 42; and in the Tol section samples 1, 5, 8, 11-13, 23, 24, 28, 30, and 31 were excluded from the statistical calculations. Therefore from the GÜLE section in total, 38 and the Tol section in total 15 samples were investigated for their planktic foraminifer assemblages.

### The GÜLE section multivariate statistical analyses

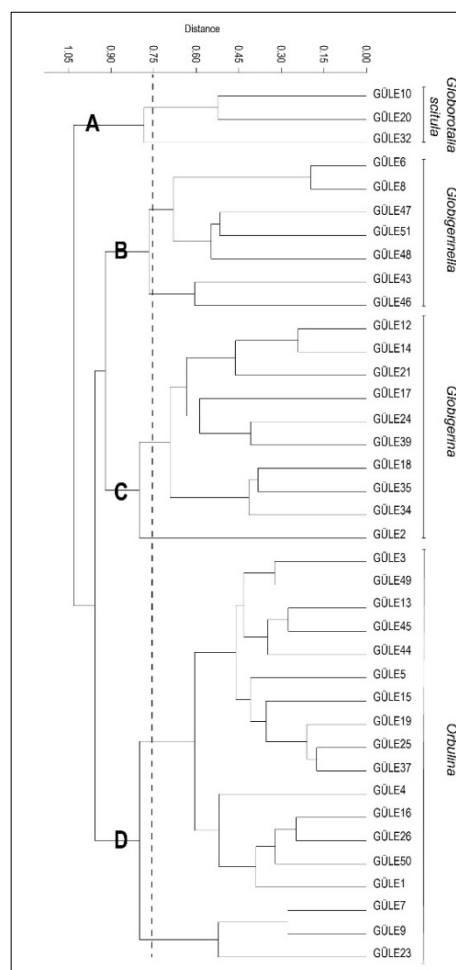
#### Cluster Analysis

The Cluster Analysis in Q-mode ( $c=0.73$ ) yields four main clusters that are discriminated in the GÜLE section at a distance value  $>0.75$  including in total 35 taxa showing more than 5% abundance (Figure 2a). The four clusters of this section were investigated in 10 groupings as *Globigerina*, *Globigerinella*, *Globigerinita*, *Globigerinoides*, *Globorotalia*, *Neogloboquadrina*, *Orbulina*; however, *Globoturborotalita rubescens*, *Tenuitellinata angustiumbilitata*, and *Turborotalita quinqueloba* were left as single species since they are the only representatives of their genera throughout the section. *Globigerina* group consists of *Globigerina bulloides*, *G. falconensis*, and *Globigerina* sp.;

*Globigerinella* consists of *Globigerinella obesa*, *G. pseudobesa*, and *G. siphonifera*; *Globigerinita* group includes *Globigerinita glutinata* and *G. parkerae*; *Globigerinoides* group includes *Globigerinoides cf. tenellus*, *G. conglobatus*, *G. elongatus*, *G. parawoodi*, *G. quadrilobatus*, *G. ruber*, *G. sacculifer*, and *G. immaturus*. The groupings of *Globigerinoides* sp., *G. cf. trilobus*, *G. trilobus*, *Globorotalia* includes *Globorotalia cf. crassaformis*, *G. crassaformis crassaformis*, *G. crassaformis ronda*, *G. scitula*, and *Globorotalia* sp.; *Neogloboquadrina* consists of *Neogloboquadrina acostaensis* sx, *N. dutertrei* sx, *N. pachyderma* dx, *N. pachyderma* sx, and *Neogloboquadrina* sp.; and finally *Orbulina* group consists of *O. bilobata*, *O. suturalis*, and *O. universa*. In this study, right coiled and left coiled neogloboquadrinids are grouped under *Neogloboquadrina* since *N. pachyderma* sx is never the dominant species within the corresponding planktic foraminifer assemblage, except only in sample 32 it shares the same percentage as *N. pachyderma* dx. Nonetheless, also in sample 32, the dominant assemblage is not *Neogloboquadrina* (Figure 2a).

Accordingly, four clusters of the section reported in Figure 2 are the following: (1) cluster A, including three samples, is dominated by *Globorotalia scitula* assemblage where sample 20 is almost equally dominated by *Globigerina*, and sample 32 by *Neogloboquadrina*; (2) cluster B includes seven samples and is dominated by *Globigerinella* assemblage consisting of mainly *G. obesa*, and sample 51 bearing only *G. obesa*; and all the other samples accompanied by other species and taxa groups such as *O. universa*, *G. falconensis*, *Globorotalia*, *Neogloboquadrina*, and *Globigerinoides*, where sample 8 is almost equally dominated by *O. universa*, and sample 46 is equally

dominated by *Globigerinodes*; (3) cluster C is dominated by *Globigerina* assemblage consisting of 10 samples in which *Globigerina* group is accompanied by several other taxa and species only sample 12 is subordinated to *Globigerinoides* while *Globigerina* group is still being abundant and *Globigerinella obesa* is



**Figure 3.** Dendrogram in Q-mode of the Cluster Analysis (UPGMA, Chord algorithm) performed on the planktic foraminifers from the GÜLE section. On the right side of the dendrogram, sample numbers are given.



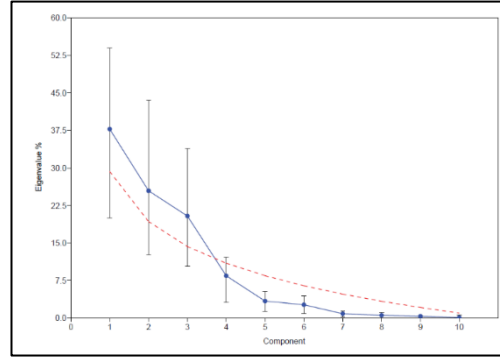
**Şekil 3.** GÜLE kesiti planktik foraminiferlerine uygulanan Q-tipi Küme Analizi (Aritmetik Ortalama ile Ağırlıksız Çift Grup Metodu, Chord algoritması) dendrogramı. Dendrogramın sağında örnek numaraları verilmiştir.

equally dominant, sample 17 is subordinated to *Globigerinella obesa*, *Globigerina* being the second most abundant taxa group, and sample 14 is subordinated to *Globigerinoides* (*G. quadrilobatus* and *G. trilobus*), *Globigerina* (*G. bulloides*) and *Globigerinella* (*G. obesa*) are being the second and most abundant species, and finally (4) cluster D is represented by *Orbulina* assemblage including 18 samples and accompanied by other taxa groups and species, only in samples 7, 9, 23 are subordinated by *Globigerinoides* while *Orbulina* being the second most abundant taxa group.

#### Principal Component Analysis

The PCA of the GÜLE section demonstrates three Principal Components completely lie above the broken stick values falling inside the 95% confidence interval (Figure 4). The GÜLE section was deposited in a marine setting controlled by three ecological factors (PC 1, PC 2, and PC 3) and is represented by four planktic foraminifer assemblages (*Globorotalia scitula*, *Globigerinella*, *Globigerina*, and *Orbulina*) (Figures 3 and 4). The Component 1 explains 37.8% of the variance, Component 2 explains 25.4%, and Component 3 explains 20.4%. The Principal Component (PC) loadings >0.3 were considered for the PCA interpretation (Figures 5a, 5b, and 5c). Accordingly, PC 1 is positively correlated with *Globigerina* (loading 0.37) and *Globigerinella* (loading 0.43), but negatively correlated with *Orbulina* (loading -0.8). PC 2 is positively correlated with *Globigerinella* (loading 0.74) and *Orbulina* spp. (loading 0.32), negatively correlated with *Globigerinoides* (loading -0.45). PC 3 is positively correlated with *Globigerinella* (loading 0.31) and

*Globigerinoides* (loading 0.73), negatively correlates with *Globigerina* (loading -0.52) (Figures 5a-5c).



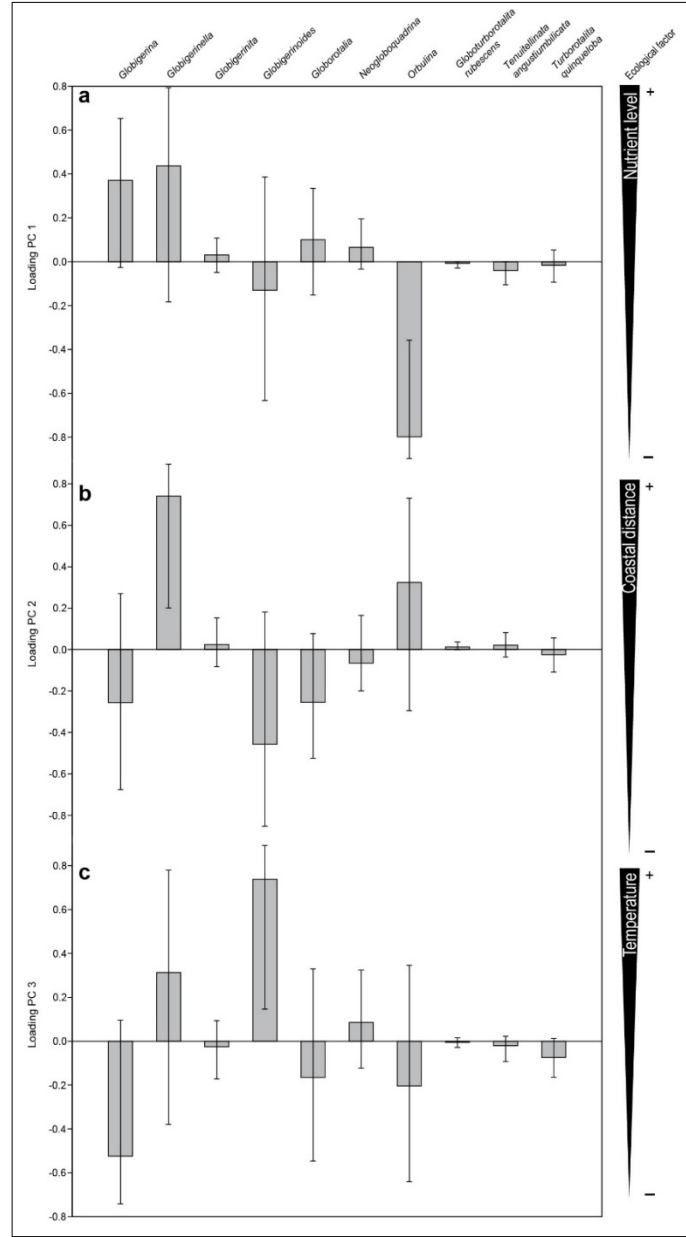
**Figure 4.** Scree plot of the GÜLE section showing the three Principal Components lie above the broken stick values (red-dashed line) falling inside the 95% confidence interval.

**Şekil 4.** GÜLE kesitinin kırmızı kesik çizgi ile gösterilen %95'lik güven aralığında kalan üç adet Temel Bileşeni'ni gösteren yamaç birikinti grafiği.

#### The Tol section multivariate statistical analyses

##### Cluster Analysis

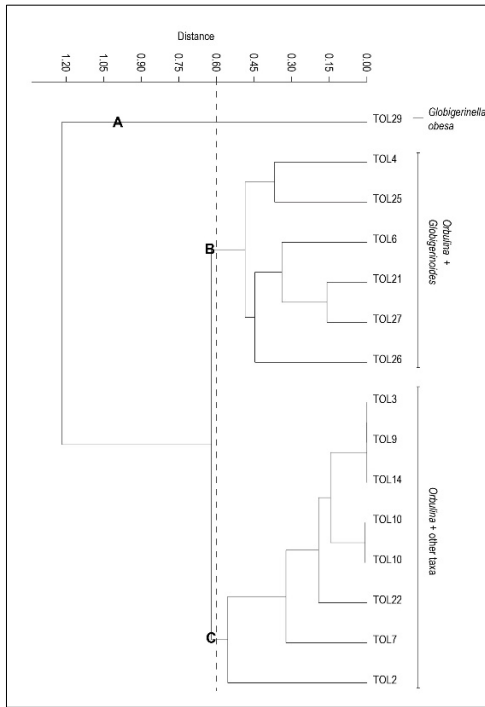
In the Tol section, in total 14 taxa showing more than 5% of abundance were identified (Figure 2b) and examined in six groupings, two being represented only by a single species *Globoturborotalita rubescens* and *Globigerinita parkarae*. Other four groupings are *Globigerina*, *Globigerinella*, *Globigerinoides*, and, *Orbulina*. *Globigerina* consist of *G. bulloides* and *G. falconensis*; *Globigerinella* includes *G. obesa* and *G. calida*; *Globigerinoides* consists of *G. conglobatus*, *G. quadrilobatus*, *G. ruber*, *G. cf. trilobus*, and *G. trilobus*; and *Orbulina* comprises *O. bilobata*, *O. suturalis*, and *O. universa* (Figure 2b).



**Figure 5.** Loadings of the three Principal Components, corresponding foraminiferal assemblages, and interpreted ecological factors of the GÜLE section.

**Şekil 5.** GÜLE kesitinin Temel Bileşen yüklemeleri ve bunlara karşılık gelen foraminifer toplulukları ile beraber yorumlanmış ekolojik parametreleri.

The Cluster Analysis applied in Q-mode (c=0.90) for the planktic foraminifer groupings of the Tol section yielded three main clusters at a distance level >0.5 (Figure 6). These clusters are as following: **(1)** cluster A includes only sample 29 and is dominated by *Globigerinella obesa* being accompanied by *Globigerinoides* (*G. ruber* and *G. trilobus*); **(2)** cluster B consists of six samples and is dominated by *Orbulina*, only sample 26 is subordinated by *Globigerinoides* but *Orbulina* being second most abundant taxa group; and **(3)** cluster C includes eight samples being dominated by *Orbulina* and accompanied by other taxa including *Globigerinella* (*G. calida* in sample 10 and *G. obesa* in sample 20), *Globigerina* in sample 22, *Globigerinita parkarae* in sample 7, and *G. parkarae* and *Globigerina bulloides* in sample 2. Samples 3, 9, and 14 are represented only by *Orbulina* (Figure 5).



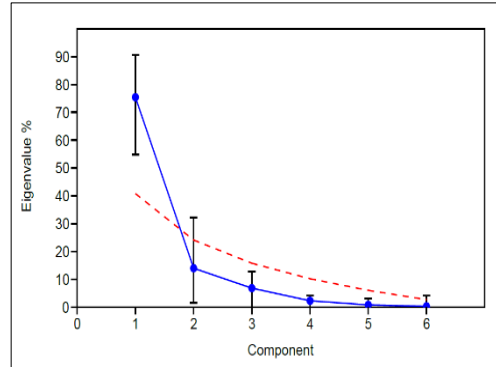
**Figure 6.** Dendrogram in Q-mode of the Cluster Analysis (UPGMA, Chord algorithm) performed on the planktic foraminifers from the

Tol section. On the right side of the dendrogram, sample numbers are given.

**Şekil 6.** Tol kesiti planktik foraminiferlerine uygulanan Q-tipi Küme Analizi (Aritmetik Ortalama ile Ağırlıksız Çift Grup Metodu, Chord algoritması) dendrogramı. Dendrogramın sağında örnek numaraları verilmiştir.

#### Principal Component Analysis

The PCA of the Tol section reveals only one Principal Component which completely lies above the broken stick value falling within the 95% confidence interval (Figure 7). The Tol section was deposited in an environment with a single controlling parameter and it hosts three planktic foraminifer assemblages (*Globigerinoides* assemblage, *Orbulina* and *Globigerinoides* assemblage, and *Orbulina* assemblage) (Figures 6 and 7). This PC explains 75.4% of the variance (Figure 6). Analyzing the loadings of the PC of the Tol section, it is evident that *Orbulina* shows a positive correlation (loading 0.81) with the PC whereas *Globigerinoides* shows a negative correlation (loading -0.56) (Figure 8).



**Figure 7.** Scree plot of the Tol section showing the Principal Component lies above the broken stick values (red-dashed line) falling inside the 95% confidence interval.

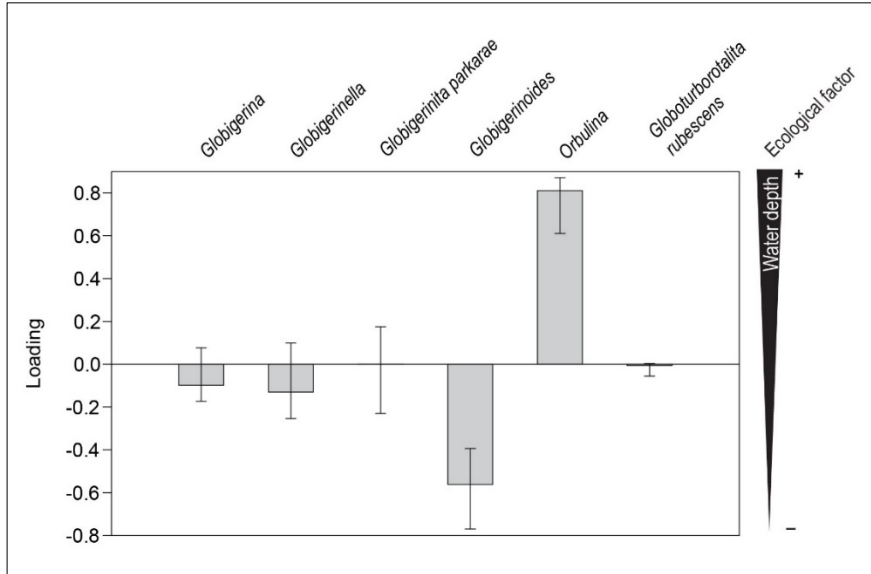
**Şekil 7.** Tol kesitinin kırmızı kesik çizgi ile gösterilen %95'lik güven aralığında kalan tek bir adet Temel Bileşeni'ni gösteren yamaç birikinti grafiği.

## DISCUSSION

### Ecological factors of the GÜLE section

The PCA analysis from the GÜLE section has revealed that PC 1 shows a positive correlation with *Globigerina* and *Globigerinella*, but *Orbulina* is weighted negatively for PC 1 (Figure 5a). *Globigerina*, consisting of mainly *G. bulloides* and *G. falconensis*, is suggestive for food availability. Examining in more detail, even though *G. falconensis* is a symbiont-bearing species (Rink et al., 1998), *G. bulloides* is considered as a non-symbiont bearing opportunistic species (Schiebel and Hemleben, 2017) and, in the modern-day Mediterranean Sea, *G. bulloides* is less abundant in oligotrophic waters of the Eastern Mediterranean (Mallo et al., 2017). Therefore, symbiosis as an ecological factor can be eliminated to explain PC 1. However, in the

same study (Mallo et al., 2017) it has also been reported that in the Eastern Mediterranean, the abundance of *G. bulloides* increases during winter related to phytoplankton blooms. In fact, *G. bulloides* and *G. falconensis* are two species commonly used for surface water (paleo)productivity studies (Véneç-Peyré and Caulet, 2000; Jonkers and Kučera, 2015). Reichart and Brinkhuis (2003) reported an increase in *G. bulloides* and *G. falconensis* in the late Quaternary Arabian Sea as a result of surface water mixing during winters. On the other hand, *Globigerinella* in the GÜLE planktic foraminifer assemblage is mainly dominated by *G. obesa*, except for samples 2, 3, 4, and 5, which are represented by *G. pseudobesa*- a species that is closely related to *G. obesa* in terms of morphological features (Kennett and Srinivasan, 1983), and sample 35 is dominated by *G. siphonifera*.



**Figure 8.** Loadings of the Principal Component of the Tol section and corresponding foraminiferal assemblages are given together with interpreted ecological parameter.

**Şekil 8.** Tol kesitinin Temel Bileşen yüklemeleri ve bunlara karşılık gelen foraminifer toplulukları ile beraber yorumlanmış ekolojik parametreleri.

Regarding the ecological preference of *Globigerinella obesa* the studies are scarce and only its latitudinal distribution has been reported which is tropical to temperate (Kennett and Srinivasan, 1983). This species is commonly found in the Miocene marine successions. For example, *G. obesa* is among the representative species of the Middle Miocene (Badenian) gypsum deposits of Paratethys (Bicchi et al., 2003; Bojar et al., 2020) and the Messinian syn-evaporitic unit in the Iberian Peninsula (Corbí et al., 2020). In a recent study, nutrient availability in hypersaline environments, such as evaporitic basins, was investigated and suggested that sufficient supply of ammonia sustains the primary productivity through nitrification, denitrification, and anammox processes and might have been the case during the Messinian Salinity Crisis (Isaji et al., 2019). And hence, the intervals of *G. obesa* as the dominant species together with *Globigerina* may potentially indicate the periods of increased sea-surface salinity and (paleo)productivity during the sedimentation of the GÜLE section.

*Orbulina*, instead, is known to tolerate wide ranges of temperature and salinity throughout the tropical and temperate waters being cosmopolitan taxa (Schiebel and Hemleben, 2017). *Orbulina universa* is an indicator species of the Indian Ocean of high salinity, intermediate temperature and oxygen, and low phosphate values (Bé, 1977), whereas in the Mediterranean Sea a significant pattern for its distribution was not observed (Mallo et al., 2017). However, Lekieffre et al. (2020) state that *Orbulina universa* is abundant in oligotrophic environments. This information suggests that PC 1 stands for paleoproductivity of the surface waters pointing to foraminifer assemblages dominated by *Globigerina* and *Globigerinella* represent high nutrient surface waters, whereas, oligotrophic (low nutrient)

surface waters were represented by the *Orbulina* assemblage.

The PC 2 for the GÜLE section positively correlates with *Globigerinella* and *Orbulina*, but negatively correlates with *Globigerinoides* (Figure 5b). *Globigerinoides* in the GÜLE section is mainly represented by *G. quadrilobatus*, *G. ruber*, *G. trilobus*, and *G. immaturus*. In fact, *G. quadrilobatus*, *G. immaturus*, and *G. trilobus* can be categorized as morphotypes of *G. sacculifer* (André et al., 2013) and they live in the euphotic zone of the water column; however, they may show differences during their reproductive cycles (Bijma and Hemleben, 1994). Another study suggests that *G. trilobus* and *G. sacculifer* should belong to a new taxonomic classification "*Trilobatus*" (Spezzaferri et al., 2015). In this study, they are kept as separate species but grouped under *Globigerinoides* due to their similar ecological preferences. Accordingly, *G. ruber* mainly lives in the upper 50 meters of the water column (Bé, 1977). It is a salinity tolerant species that can survive in regions of freshwater runoff and can be found in different ecological habitats (Schiebel and Hemleben, 2017). It is positively correlated with primary productivity and can tolerate neritic conditions (Schmuker and Schiebel, 2002). *Globigerinoides quadrilobatus*, similar to *G. ruber*, prefers oligotrophic conditions affected by enhanced continental runoff which increases the quantity of preferred food of this species during the spring (Sprovieri et al., 2006). *Globigerinoides immaturus* and *G. trilobus* are indicators of low sea-surface productivity, hence oligotrophic environments (Wilson, 2012). Even though *Orbulina* is abundant in oligotrophic environments, it prefers open ocean settings similar to *Globigerinella* (BouDagher-Fadel, 2013). Therefore, one can conclude that PC 2 points to distance from the coast as *Orbulina* and

*Globigerinella* dominance is related to the increased sea levels, and dominance of *Globigerinoides* refers to the decreased sea levels and hence adaptation to neritic conditions.

The PC 3 positively correlates with *Globigerinoides* and *Globigerinella*, and negatively correlates with *Globigerina* (Figure 5c). The main difference between these taxa groups is that *Globigerina* simply prefers cool waters, whereas *Globigerinella* is found in temperate-warm waters (Kennett and Srinivasan, 1983; Schiebel et al., 2017). This suggests PC 3 refers to temperature. In a previous study, samples 10, 18, and 20 were collected from the three sapropel levels at the bottom portion of the GÜLE section (Öğretmen et al., 2018a). The researchers conducted a paleoclimate analysis and revealed that sapropel layers of samples 10, 18 and 20 were deposited during cool/cold climate conditions; and the other two sapropel layers (samples 7 and 15) were deposited in warm-climate settings (Öğretmen et al., 2018b). The results demonstrated here confirm this finding as samples 10, 18, and 20 weigh negatively and sample 7 weighs positively for PC 3 (see SI). Even though sample 15 does not show any significant correlation for this PC, it was resulted in *Orbulina* assemblage (Figure 3), which is oligotrophic taxa of temperate-warm waters as explained above, confirming previous findings.

In summary, the age interval of the GÜLE section comprises 41-kyr cycles (Öğretmen et al., 2018a) before the onset of the Early-Middle Pleistocene Transition (EMPT) that occurred ~1.2-700 ka. The EMPT refers to the onset of the abrupt and repeated shifts in glacial-interglacial cycles occurred due to the change of Earth's axial tilt and eccentricity (Berger, 1988; Clark et al., 2006). As a result of this

change, 41-kyr climate cycles were replaced by 100-kyr cycles. Hence ecologically varying environment of the Eastern Mediterranean Sea detected from the GÜLE section is parallel to global climate conditions carrying the signatures of short-term changes in sea-level and climate (i.e. temperature), eventually influencing the nutrient conditions.

### Ecological factors of the Tol section

The Tol section revealed only one PC, which shows a positive correlation with *Orbulina* and a negative correlation with *Globigerinoides* (Figure 8). Similar to *Globigerinoides*, also *Orbulina* is symbiont-bearing (Bé, 1977; Spero, 1987) and they share a similar diet (Schiebel and Hemleben, 2017). In terms of seasonality, they both are categorized as summer taxa, however, *Globigerinoides* species such as *G. ruber*, *G. sacculifer*, *G. trilobus*, and *G. conglobatus* are found mainly in the upper 50 m of the water column, whereas *Orbulina universa* can be found in deeper water column reaching down to 100 m (Bé, 1977). Indeed, the paleodepth of the Tol section was estimated to be deeper than that of the GÜLE section. The Tol section, being deposited after the EMPT, was deposited in climate conditions with 100-kyr cycles as observed with a single controlling factor. The age interval of the Tol section between ~0.6 and 0.46 My comprises two interglacial marine isotope stages which are MIS13 at the bottom and MIS11 at the top part of the succession which might have resulted in increased sea-levels (Öğretmen et al., 2018a). Consequently, it is possible to argue that PC for the Tol section points to the depth habitat of these *Globigerinoides* and *Orbulina* groups.

### CONCLUSION

This study quantitatively demonstrates the controlling paleoecological factors of the

surface waters of the Eastern Mediterranean during the Calabrian and Chibanian derived from the planktic foraminifer assemblages of the Gülnar East (GÜLE) and Tol sections, respectively, in Mersin district in southern Turkey. To unravel the controlling paleoecological factors of the surface waters of the Calabrian-Chibanian Eastern Mediterranean Sea, the Cluster Analysis to find dominant associations and the Principal Component Analysis to quantify the (ecological) variables within the multivariate dataset were applied. The results highlight that the older marine succession (GÜLE) was deposited under varying trophic conditions recording sea-level fluctuations during different climatic episodes (varying temperatures) as inferred from the planktic foraminifer assemblages from 38 samples. The planktic foraminifer assemblages of the Tol section particularly mark the increased water depth of the sedimentary environment and a less diverse fauna inferred from the lower number of taxa compared to the GÜLE section dominated by a rather cosmopolitan assemblage suggestive of an open sea setting as inferred from 15 samples. The GÜLE section was represented by four main assemblages, namely *Globorotalia*, *Globigerinella*, *Globigerina*, and *Orbulina* assemblage. The Tol section, on the other hand, was represented by three main assemblages, which are *Globigerinoides* and *Globigerinella obesa* assemblage, *Orbulina* and *Globigerinodes* assemblage, and *Orbulina* assemblage. Accordingly, the GÜLE section with its diverse fauna points to three different ecological variables which are coastal distance, nutrient, and temperature that played an important role during the sedimentation of the succession between ~1.72 and 1.08 My. The controlling ecological factor for the Tol section, instead, is water depth during the

sedimentation of the succession between <0.6 Ma and >0.46 Ma.

#### ACKNOWLEDGMENT

This study is part of the Anatolian Plateau Climate and Tectonic Hazards (ALeT) project, funded by the European Union Marie Skłodowska-Curie Actions "Innovative Training Networks" program (FP7-PEOPLE-2013-ITN) [grant agreement number 607996]. The author is grateful to Domenico Cosentino, Elsa Gliozzi, Paola Cipollari, Costanza Faranda, Giuditta Radeff, and Virgilio Frezza for their contributions during the data production which constitutes the basis of this study. The author received support from the Max Planck Society and TÜBİTAK-2221-Fellowship Program for Visiting Scientists and Scientists on Sabbatical Leave during the preparation of this manuscript.

#### REFERENCES

- Akay, E., Uysal, S., Poisson, A., Cravatte, J. and Müller, C. 1985. Antalya Neojen Havzasının Stratigrafisi. Bull Geol Soc Turkey, 28, 105–119.
- André, A., Weiner, A., Quillévéré, F., Aurahs, R., de Garidel-Thoron, T., Escargue, G., de Vargas, C., and Kučera, M. 2013. The cryptic and the apparent reversed: lack of genetic differentiation within the morphologically diverse plexus of the planktonic foraminifer "*Globigerinoides sacculifer*". Paleobiology, 39, 21–39.
- Bartol, J. and Govers, R. 2014. A single cause for uplift of the Central and Eastern Anatolian plateau? Tectonophysics, 637, 116–136.
- Berger, A. 1988. Milankovitch theory and climate. Rev Geophys, 26, 624–657.
- Bé, A. W. H. 1977. Chapter 1: An Ecological, Zoogeographic and Taxonomic Review of Recent Planktonic Foraminifera. In:

- Ramsay, A. T. S., editor. *Oceanic Micropaleontology*. London, Academic Press, pp. 1–100.
- Bicchi, E., Ferrero, E. and Gonera, M. 2003. Palaeoclimatic interpretation based on Middle Miocene planktonic Foraminifera: The Silesia Basin (Paratethys) and Monferrato (Tethys) records. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 196, 265–303.
- Bijma, J. and Hemleben, C. 1994. Population dynamics of the planktic foraminifer *Globigerinoides sacculifer* (Brady) from the central Red Sea. *Deep Sea Research I*, 41, 485–510.
- Bizon, G. 1985. Mediterranean Foraminiferal Changes as Related to Paleoceanography and Paleoclimatology. Stanley, D. J. and Wezel, F.-C., ed. 2004. *Geological Evolution of the Mediterranean Basin*, Springer-Verlag, 453–470.
- Bojar, H. P., Antoniade, C., Barbu, V. and Bojar, A. V. 2020. A new preparation method of microfauna from gypsum: Micropaleontological association from the middle Miocene Badenian gypsum deposits of Paratethys. *Geosciences*, 10, 1–14.
- Borcard, D., Gillet, F. and Legendre, P. 2018. Chapter 4: Cluster Analysis. In: *Numerical Ecology with R*. Springer International Publishing, pp. 59–150.
- BouDagher-Fadel, M. K. 2013. *Biostratigraphic and Geological Significance of Planktonic Foraminifera*. London, UCL Press. pp. 1–298.
- Chatterjee, S. 1984. Variance estimation in factor analysis: An application of the bootstrap. *Br. J. Math. Stat. Psychol.*, 37, 252–262.
- Cipollari, P., Cosentino, D., Radeff, G., Schildgen, T. F., Faranda, C., Grossi, F., Gliozzi, E., Smedile, A., Gennari, R., Darbas, G., Dudas, Ö., Gürbüz, K., Nazik, A., Echtler, H. 2012. Easternmost Mediterranean evidence of the Zanclean flooding event and subsequent surface uplift: Adana Basin, southern Turkey.
- Robertson, A. H. F., Parlak, O. and Ünlügenç, U. C., ed. 2012. *Geological Development of Anatolia and the Easternmost Mediterranean Region*. London, Geological Society. Special Publications, 372, 473–494.
- Cita, M. B., Vergnaud-Grazzini, C., Robert, C., Chamley, H., Ciaranfi, N., and D'Onofrio, S. 1977. Paleoclimatic record of a long deep sea core from the eastern Mediterranean. *Quat Res*, 8, 205–235.
- Cita, B., Capraro, L., Ciaranfi, N., Di Stefano, E., Lirer, F., Maiorano, P., Marino, M., Raffi, I., Rio, D. and Sprovieri, R. 2008. The Calabrian Stage redefined. *Episodes*, 31, 408–419.
- Clark, P. U., Archer, D., Pollard, D., Blum, J. D., Rial, J. A., Brovkin, V., Mix, A. C., Pisias, N. G., Roy, M. 2006. The middle Pleistocene transition: characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric pCO<sub>2</sub>. *Quat Sci Rev*, 25, 3150–3184.
- Corbí, H., Soria, J. M., Giannetti, A. and Yébenes, A. 2020. The step-by-step restriction of the Mediterranean (start, amplification, and consolidation phases) preceding the Messinian Salinity Crisis (climax phase) in the Bajo Segura basin. *Geo-Mar Lett*, 40, 341–361.
- Cosentino, D., Schildgen, T. F., Cipollari, P., Faranda, C., Gliozzi, E., Hudáčeková, N.,



- Lucifora, S. and Strecker, M. R. 2012. Late Miocene surface uplift of the southern margin of the Central Anatolian Plateau, Central Taurides, Turkey. *Geological Society of America Bulletin*, 124, 133–145.
- Cosentino, D., Buchwaldt, R., Sampalmieri, G., Iadanza, A., Cipollari, P., Schildgen, T. F., Hinnov, L. A., Ramezani, J. and Bowring, S. A. 2013. Refining the Mediterranean “Messinian gap” with high-precision U-Pb zircon geochronology, central and northern Italy. *Geology*, 41, 323–326.
- Çiner, A. Karabiyikoğlu, M., Monod, O., Deynoux, M. and Tuzcu, S. 2008. Late Cenozoic sedimentary evolution of the Antalya Basin, southern Turkey. *Turkish J Earth Sci*, 17, 1–41.
- van Couvering, J. A., Castradori, D., Cita, M. B., Hilgen, F. J. and Rio, D. 2000. The base of the Zanclean Stage and of the Pliocene Series. *Episodes*, 23, 179–187.
- Dewey, J. F. and Şengör, A. M. C. 1979. Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geol Soc Amer Bull*, 90, 84–92.
- Faccenna, C., Bellier, O. and Martinod, J. 2006. Slab detachment beneath eastern Anatolia: a possible cause for the formation of the North Anatolian Fault. *Earth Planet Sci Lett*, 242, 85–97.
- Faranda, C., Gliozzi, E., Cipollari, P., Grossi, F. and Darbaş, G. 2013. Messinian paleoenvironmental changes in the easternmost Mediterranean Basin: Adana Basin, southern Turkey. *Turkish J Earth Sci*, 22, 839–863.
- Garcia-Castellanos, D., Estrada, F., Jiménez-Munt, I., Gorini, C., Fernández, M., Vergés, J. and De Vicente, R. (2009). Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian Salinity Crisis. *Nature*, 462, 778–781.
- Garcia-Castellanos, D., Micallef, A., Estrada, F., Camerlenghi, A., Ercilla, G., Periañez, R. and Abril, J. M. 2020. The Zanclean megaflood of the Mediterranean – Searching for independent evidence. *Earth Sci Rev*, 201, 103061.
- Glover, C. P. and Robertson, A. H. F. 1998. Role of regional extension and uplift in the Plio-Pleistocene evolution of the Aksu Basin, SW Turkey. *J Geol Soc*, 155, 365–387.
- Guerra-Merchán, A., Serrano, F., Garcés, M., Gofas, S., Esu, D., Gliozzi, E. and Grossi, F. 2010. Messinian Lago-Mare deposits near the Strait of Gibraltar (Malaga Basin, S Spain). *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 285, 264–276.
- Hammer, Ø. 2020. PAST: PAleontological STatistics Version 4.03 Reference manual, Natural History Museum, pp. 1–283.
- Hsü, K. J., Ryan, W. B. F. and Cita, M. B. 1973. Late Miocene Desiccation of the Mediterranean. *Nature*, 242, 240–244.
- Hsü, K. J., Montadert, L., Bernoulli, D., Cita, M. B., Erickson, A., Garrison, R. E., Kidd, R. B., Mèlierés, F., Müller, C. and Wright, R. 1977. History of the Messinian salinity crisis. *Nature*, 267, 399–403.
- Iaccarino, S. M., Premoli Silva, I., Biolzi, M. P., Foresi, L. M., Lirer, F. and Turco, E. 2007. *Practical Manual of Neogene Planktonic Foraminifera*. Perugia, Università degli studi di Perugia. pp. 1-154.
- Isaji, Y., Kawahata, H., Ogawa, N. O., Kuroda, J., Yoshimura, T., Jiménez-Espejo, F. J., Makabe, A., Shibuya, T., Lugli, S., Santulli, A., Manzi, V., Roveri, M. and Ohkouchi, N. 2019. Efficient recycling of nutrients in

- modern and past hypersaline environments. *Sci Rep*, 9, 1–12.
- Jonkers, L. and Kučera, M. 2015. Global analysis of seasonality in the shell flux of extant planktonic Foraminifera. *Biogeosciences*, 12, 2207–2226.
- Kanbur, S. and Öğretmen, N. 2022. Revised late Cenozoic foraminifer biostratigraphy of the Eskiköy Formation (Aksu Basin), SW Turkey and its paleoenvironmental conditions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 591C, 110883. DOI: 10.1016/j.palaeo.2022.110883
- Kennett, J. P. and Srinivasan, S. M. 1983. Neogene Planktonic Foraminifera: A Phylogenetic Atlas. Pennsylvania, Hutchinson Ross Publishing Company. pp. 1-263.
- Ketin, İ. 1966. Anadolu'nun Tektonik Birlikleri. *MTA Dergisi*, 66, 20–34.
- Krijgsman, W., Hilgen, F. J., Raffi, I., Sierro, F. J. and Annunzio, Á. G. D. 1999. Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature*, 400, 652–655.
- Krijgsman, W., Capella, W., Simon, D., Hilgen, F. J., Kouwenhoven, T., Meijer, P. T., Sierro, F. J., Tulbure, M. A., van den Berg, B. C. J., van der Schee, M. and Flecker, R. 2018. The Gibraltar Corridor: Watergate of the Messinian Salinity Crisis. *Mar Geol*, 403, 238–246.
- Lekieffre, C., Spero, H. J., Fehrenbacher, J. S., Russell, A. D., Ren, H., Geslin, E. and Meibom, A. 2020. Ammonium is the preferred source of nitrogen for planktonic foraminifer and their dinoflagellate symbionts: N recycling in a symbiotic foraminifer. *Proc Royal Soc B, Biol Sci*, 287, 20200620.
- Lirer, F., Foresi, L. M., Iaccarino, S. M., Salvatorini, G., Turco, E., Cosentino, C., Sierro, F. J. and Caruso, A. 2019. Mediterranean Neogene planktonic foraminifer biozonation and biochronology. *Earth-Sci Rev*, 196, 102869.
- Loget, N. and van den Driessche, J. 2006. On the origin of the Strait of Gibraltar. *Sediment Geol*, 188–189, 341–356.
- Lourens, L., Hilgen, F., Shackleton, N. J., Laskar, J. and Wilson, J. 2004. Appendix 2: Orbital tuning calibrations and conversions for the Neogene Period. Gradstein, F., Ogg, J. G. and Smith, A., ed. 2004. *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge University Press, pp. 469–484.
- Mallo, M., Ziveri, P., Mortyn, G. P., Schiebel, R. and Grelaud, M. 2017. Low planktic foraminiferal diversity and abundance observed in a spring 2013 west-east Mediterranean Sea plankton tow transect. *Biogeosciences*, 14, 2245–2266.
- Mouchet, M., Guilhaumon, F., Villéger, S., Mason, N. W. H., Tomasini, J.-A. and Mouillot, D. 2008. Towards a consensus for calculating dendrogram-based functional diversity indices. *Oikos*, 117, 794–800.
- Nazik, A. 2004. Planktonic foraminiferal biostratigraphy of the Neogene sequence in the Adana Basin, Turkey, and its correlation with standard biozones. *Geol Mag*, 141, 379–387.
- Öğretmen, N., Cipollari, P., Frezza, V., Faranda, C., Karanika, K., Gliozzi, E., Radeff, G., and Cosentino, D. 2018a. Evidence for 1.5 km of uplift of the Central Anatolian Plateau's southern margin in the last 450 kyr and implications for its multi-

- phased uplift history. *Tectonics*, 37, 359–390.
- Öğretmen, N., Frezza, V., Hudáčková, N., Gliozzi, E., Cipollari, P., Faranda, C., Radeff, G. and Cosentino, D. 2018b. Early Pleistocene (Calabrian) marine bottom oxygenation and palaeoclimate at the southern margin of the Central Anatolian Plateau. *Ital J Geosci*, 137, 452–464.
- Okay, A. I., Zattin, M., Özcan, E., and Sunal, G. 2020. Uplift of Anatolia. *Turkish J Earth Sci*, 29, 696–713.
- Parker, F. L., 1962 Planktonic foraminiferal species in Pacific sediments. *Micropalontology*, 8, 219–254.
- Poisson, A., Wernli, R., Sağular, E. K. and Temiz, H. 2003. New data concerning the age of the Aksu Thrust in the south of the Aksu Valley, Isparta Angle (SW Turkey): Consequences for the Antalya Basin and the Eastern Mediterranean. *Geol J*, 38, 311–327.
- Racano, S., Jara-Muñoz, J., Cosentino, D. and Melnick, D. 2020. Variable Quaternary Uplift Along the Southern Margin of the Central Anatolian Plateau Inferred From Modeling Marine Terrace Sequences. *Tectonics*, 39, e2019TC005921.
- Radeff, G., Schildgen, T. F., Cosentino, D., Strecke, M. R., Cipollari, P., Darbaş, G. and Gürbüz, K. 2015. Sedimentary evidence for late Messinian uplift of the SE margin of the Central Anatolian Plateau: Adana Basin, southern Turkey. *Basin Research*, 29, 488–514.
- Raffi, I. 2002. Revision of the early-middle pleistocene calcareous nannofossil biochronology (1.75-0.85 Ma). *Mar Micropaleontol*, 45, 25–55.
- Raffi, I., Backman, J., Fornaciari, E., Pa, H. and Rio, D. 2006. A review of calcareous nannofossil astrobiochronology encompassing the past 25 million years. *Quat Sci Rev*, 25, 3113–3137.
- Reichart, G. J. and Brinkhuis, H. 2003. Late Quaternary *Protoperidinium* cysts as indicators of paleoproductivity in the northern Arabian Sea: *Mar Micropaleontol*, 49, 303–315.
- Rink, S., Köhl, M., Bijma, J. and Spero, H. J. 1998. Microsensor studies of photosynthesis and respiration in the symbiotic foraminifer *Orbulina universa*. *Mar Biol*, 131, 583–595.
- Roveri, M., Gennari, R., Persico, D., Rossi, F. P., Lugli, S., Manzi, V., Reghizzi, M. and Taviani, M. 2019. A new chronostratigraphic and palaeoenvironmental framework for the end of the Messinian salinity crisis in the Sorbas Basin (Betic Cordillera, southern Spain). *Geol J*, 54, 1617–1637.
- Ryan, W. B. F. 2009. Decoding the Mediterranean salinity crisis: *Sedimentology*, 56, 95–136.
- Schiebel, R., Spielhagen, R. F., Garnier, J., Hagemann, J., Howa, H., Jentzen, A., Martínez-García, A., Meilland, J., Michel, E., Repschläger, J., Salter, I., Yamasaki, M. and Haug, G. 2017. Modern planktic foraminifers in the high-latitude ocean. *Mar Micropaleontol*, 136, 1–13.
- Schiebel, R. and Hemleben, C. 2017. *Planktic Foraminifers in the Modern Ocean*. Berlin, Springer, pp. 1-358.
- Schildgen, T. F., Cosentino, D., Caruso, A., Buchwaldt, R., Yıldırım, C., Bowring, S., Rojay, B., Echtler, H. and Strecke, M. R. 2012. Surface expression of eastern Mediterranean slab dynamics: Neogene topographic and structural evolution of the

- southwest margin of the Central Anatolian Plateau, Turkey. *Tectonics*, 31, TC2005.
- Schmuker, B. and Schiebel, R. 2002. Planktic foraminifers and hydrography of the eastern and northern Caribbean Sea. *Mar Micropaleont*, 46, 387–403.
- Sokal, R. R. and Rohlf, F. J. 1962. The Comparison of Dendrograms by Objective Methods. *Taxon*, 11, 33–40.
- Spero, H. 1987. Symbiosis in the planktonic foraminifer, *Orbulina universa*, and the isolation of its symbiotic dinoflagellate, *Gymnodinium beii* sp. nov.: *Journal of Phycology*, 23, 307–317.
- Spezzaferri, S., Kučera, M., Pearson, P. N., Wade, B. S., Rappo, S., Poole, C. R., Morard, R. and Stalder, C. 2015. Fossil and genetic evidence for the polyphyletic nature of the Planktonic foraminifera “*Globigerinoides*”, and description of the new genus *Trilobatus*. *PLoS ONE*, 10, 1–20.
- Sprovieri, R., Sprovieri, M., Caruso, A., Pelosi, N., Bonomo, S. and Ferraro, L. 2006. Astronomic forcing on the planktonic foraminifera assemblage in the Piacenzian Punta Piccola section (southern Italy). *Paleoceanography*, 21, 1–21.
- Şengör, A. M. C., Görür, N. and Şaroğlu, F. 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. *The SEPM*, 37, 227–264.
- Tekin, E., Varol, B., Herece, E., Büyükmeriç, Y., Akça, N. and Sözeri, K. 2019. Pre-and post-deposition stages of messinian evaporites based on facies interpretations in the Hatay Graben and its sub-basins, southeastern Turkey. *Neues Jahrb Geol Palaontol Abh*, 292, 211–245.
- Vénec-Peyré, M. T. and Caulet, J. P. 2000. Paleoproductivity changes in the upwelling system of Socotra (Somali Basin, NW Indian Ocean) during the last 72,000. years: Evidence from biological signatures. *Mar Micropaleont*, 40, 321–344.
- Wilson, B. 2012. Biogeography and ecostratigraphy of Late Quaternary planktonic foraminiferal taphocoenoses in the Leeward Islands, Lesser Antilles, NE Caribbean Sea. *Mar Micropaleont*, 86–87, 1–10.
- Yıldız, A., Toker, V., Demircan, H. and Sevim, S. 2003. Mut Havzası Pliyosen-Pleyistosen nannoplankton, planktik foraminifera, iz fosil bulguları ve paleoortam yorumu. *Yerbilimleri*, 28, 123–144.



## Ganos Fayı Güncel Deprem Etkinliğinin Değerlendirilmesi: MONGAN Sismik Ağ Yapısı ve Veri Kalitesi

### *Evaluation of Current Earthquake Activity on the Ganos Fault: MONGAN Seismic Array Structure and Data Quality*

EŞREF YALÇINKAYA<sup>1\*</sup>, MARCO BOHNHOFF<sup>2,3</sup>, ETHEM GÖRGÜN<sup>1</sup>, HAKAN ALP<sup>1</sup>, STEPHAN BENTZ<sup>2</sup>, ALİ PINAR<sup>4</sup>, FATİH ALVER<sup>5</sup>, ÖMER KILIÇARSLAN<sup>5</sup>, BURÇİN DİDEM TAMTAŞ<sup>1</sup>, BURÇAK GÖRGÜN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Geomechanics and Scientific Drilling, Helmholtz-Centre Potsdam, GFZ German Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

<sup>3</sup> Institute of Geological Sciences, Free University Berlin, Berlin, Germany

<sup>4</sup> Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

<sup>5</sup> Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 23 Ekim (*October*) 2020 Kabul (*accepted*): 24 Kasım (*November*) 2021

#### ÖZ

1912 yılında iki büyük depremle kırılan Ganos Fayı'nın güncel depremselliği ve gerilme dağılımı fay boyunca önemli farklılıklar gösterir. Kırığın kara ve Saros kesimi asismik (deprem üretmeyen) bir davranış sergilerken, Marmara Denizi içindeki kısmı oldukça yoğun bir deprem etkinliğine sahiptir. Fayın geometrik ve fiziksel özelliklerindeki farklılıklar, fay boyunca değişen gerilme koşullarının bu tür davranış farklılıkları oluşturabileceği açıktır. MONGAN sismik gözlem ağı Ganos Fayı'nın kara parçası üzerinde toplam 40 istasyondan oluşan ve yaklaşık 3 yıl süreyle veri toplamış bir ağıdır. Elde edilen verinin hem fayın fiziksel özelliklerine ilişkin, hem de oluşan depremsellik ile ilgili katkı üretmesi beklenmektedir. Birbirinin devamı olan iki eşlenik makaleden oluşan çalışmanın birinci bölümünde sismik ağın yapısı ve veri kalitesi üzerinde durulmaktadır. İkinci bölüm ise daha çok ilksel veri analizlerinden ve sismolojik değerlendirmelerden oluşmaktadır (Yalçinkaya vd. 2022). İki farklı tip sensör ve kayıtçının kullanıldığı çalışmada 4,5 Hz Geophone sensör ve CUBE kayıtçılarının, 1 Hz Mark sensör ve EDL kayıtçılara oranla çok daha yüksek veri toplama verimliliği sağladığı tespit edilmiştir. Her iki sensörün 0,3 Hz frekanslara kadar yer titreşimlerine duyarlı oldukları, daha düşük frekanslarda alet içsel gürültülerinin hakim olmaya başladığı görülmüştür. İstasyonlarda gözlenen gürültü seviyelerinin negatif büyüklüğe kadar depremleri yakalamaya imkan verebileceği hesaplanmıştır.

Ganos Fayı'nın iki malzemeli yapısının hem yakın yüzey etkileri açısından, hem de dönüşmüş dalga fazları, fay zonu dalgaları gibi kayıtlar üzerinde önemli etkiler oluşturacağı görülmektedir. Fayın daha genç ve gevşek birimlerden oluşan güney bloğunda yer alan istasyonlar, daha yaşlı ve sıkı kuzey blok üzerinde yer alan istasyonlara göre çok daha uzun kayıt sürelerine, çok daha büyük dalga genlikleri sergilemektedirler. İstasyonlardaki H/V analizlerinden elde edilen zemin rezonans frekansları iki bloklu yapıyı açık olarak ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Ganos, Mikro Deprem, Deprem Gözlem Ağı, İki Malzemeli Fay Yapısı

#### **ABSTRACT**

*The current seismicity and stress distribution of the Ganos Fault, which was ruptured by two major earthquakes in 1912, show significant differences along the fault. While the land and Saros part of the fault exhibit an asismic (non-earthquake producing) behavior, the part in the Marmara Sea has a very intense earthquake activity. It is clear that the differences in the geometric and physical properties of the fault and the changing stress conditions along the fault can create such behavioral differences. MONGAN seismic observation array consists of a total of 40 stations on the land of the Ganos Fault and has collected data for about 3 years. It is expected that the obtained data will contribute both to the physical properties of the fault and to the seismicity that occurs. In the first part of the study, which consists of two contiguous articles, which are the continuation of each other, the distribution of the seismic array and the data quality are emphasized. The second part consists mostly of primary data analysis and seismological evaluations (Yalçınkaya et al. 2022). In the study where two different types of sensors and recorders were used, it was determined that 4,5 Hz Geophone sensor and CUBE recorder provided much higher data collection efficiency than 1 Hz Mark sensor and EDL recorder. It has been observed that both sensors are sensitive to ground vibrations up to 0,3 Hz frequencies, and instrument internal noises begin to dominate at lower frequencies. It has been calculated that the noise levels observed at the stations can allow to detect earthquakes up to negative magnitudes. It is seen that the bi-material structure of the Ganos Fault will have significant effects both in terms of near surface effects and on records such as transformed wave phases and fault zone waves. The stations located in the southern block of the fault, which consists of younger and looser units, exhibit much longer recording times and much larger wave amplitudes than the stations located on the older and stiffer northern block. The ground resonance frequencies obtained from the H/V analyzes at the stations clearly reveal the two-block structure.*

**Keywords:** Ganos, Micro Earthquake, Earthquake Observation Array, Bi-material Fault Structure

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1015302>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: eyalcin@iuc.edu.tr

#### **GİRİŞ**

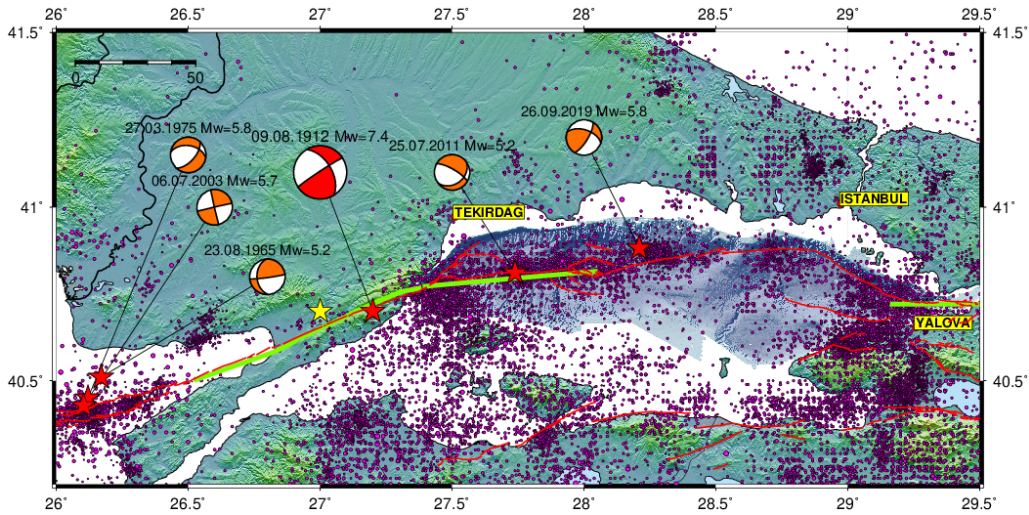
Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) batı ucunda, Tekirdağ ile Saros Körfezi arasında yer alan Ganos Fayı (GF), en son 1912 yılında büyüklükleri 7,4 (9 Ağustos 1912 Mürefte) ve 6.8 (13 Eylül 1912 Saros) olan iki depremle kırılmıştır (Şekil 1). Depremlerin Saros Körfezi'nden itibaren karada 45 km ve Marmara Denizi içindeki uzantısıyla birlikte toplam 140km uzunluğunda çok segmentli bir yüzey faylanması oluşturduğu düşünülmektedir (Rockwell vd., 2001; Altunel vd., 2004; Armijo vd., 2005, Uçarkuş vd., 2011;

Aksoy, 2021). Deprem kırığı, 1999 İzmit M7,4 ve Düzce M7,2 depremlerinde gelişen yüzey kırıkları ile benzer geometrik özellikler sergiler (Aksoy vd., 2010). Karadaki parçası üzerinde yapılan çalışmalar depremde oluşan atımların 5,5 m'ye eriştiğini göstermektedir (Aksoy vd., 2010).

KAFZ'nin Marmara Bölgesi içindeki ortalama yıllık kayma miktarı 20 mm kabul edildiğinde, bu depremden günümüze kadar geçen yaklaşık 100 yıllık süre içinde GF üzerinde 2 m'lik bir kaymanın biriktiği tahmin edilebilir. Paleosismoloji çalışmaları GF üzerinde büyük

deprem oluşumlarının ortalama 323 yıllık bir döngüye sahip olduğunu göstermektedir (Meghraoui vd., 2012). Günümüzde GF üzerinde yapılan tartışmalar, devam eden levha hareketlerinin ne kadarının GF üzerinde gerilme birikimine dönüştüğü, ne kadarının akma gösterdiği ve fay düzlemi boyunca bu paylaşımın nasıl dağıldığı şeklindedir. Motagh vd. (2007) interferometri ve GPS ölçümlerinden GF'nin kilitleme derinliğini 8-17 km olarak belirlemişlerdir. Ergintav vd. (2014)

değerlendirdikleri GPS ölçümleri ile GF'yi, 20 mm yıllık atıma sahip saf doğrultu atımlı ve kilitlemiş bir fay olarak nitelendirmişlerdir. de Michele vd. (2017) yaptıkları interferometri çalışmasında GF üzerinde farklı kesimlerde farklı davranış biçimlerine dikkat çekmişler, GF'nin batı kesimlerinde sığ yüzey hareketleri gözlenirken özellikle doğu tarafında hiç yüzey hareketi gözlenmediği, yüzeyden itibaren tüm fay düzleminin kilitlemiş ve gerilme biriktirdiğini vurgulamışlardır.



**Şekil 1.** Çalışma bölgesi ve çevresinin aletsel dönem depremselliği ve ana yapısal unsurlar. Yeşil kalın çizgi 1912 ve 1999 depremleri kırığını temsil eder. Fay boyunca oluşan önemli depremler ve kaynak mekanizma çözümleri gösterilmiştir. Sarı yıldız 13 Eylül 1912 depremi lokasyonunu gösterir.

**Figure 1.** Instrumental period seismicity of the study area and its surroundings and main structural elements. The green thick line represents the 1912 and 1999 earthquakes rupture. Significant earthquakes along the fault and source mechanism solutions are shown. The yellow star indicates the location of the September 13, 1912 earthquake.

Ulusal gözlem ağlarından (Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü-KRDAE ve Afet Acil Durum Yönetim Başkanlığı-AFAD) elde edilen deprem dağılımları GF üzerinde oluşan depremselliğin Marmara Denizi içinde

göre yok denecek kadar az olduğuna dikkat çekmektedir (Şekil 1). Özellikle 1912 depreminin Saros Körfezi içinden Orta Marmara Çukuru'na kadar bir kırılma ürettiği düşünülürse, aletsel dönem deprem etkinliğinin Marmara Denizi içinde

kalan kısmın diğer kısımlara göre çok farklılık göstermesi dikkat çekicidir. Kara ve Saros Körfezi içindeki kısımda deprem sayısının azlığı birçok araştırmacı tarafından sismik boşluk veya asismik (deprem üretmeyen) kilitlemiş fay olarak adlandırılmıştır (Tüysüz vd., 1998; Karabulut vd., 2006; Schmittbuhl vd., 2016; Bohnhoff vd., 2016; Aksoy, 2021). Janssen vd. (2009) 8 adet deprem istasyonundan oluşan yerel bir sismik ağ ile 75 günlük kısa süreli yaptıkları çalışmada, GF'nin kara parçası üzerinde, büyüklükleri 2,5'ten küçük olan bir sismik etkinliğe vurgu yapmışlardır. Çalışma süresi içinde ulusal ağ tarafından bölgede yakalanan deprem sayısı sadece 11 iken, yerel ağ tarafından yakalanan deprem sayısı 115'tir. Küçük ölçekli kırılma deformasyonlarının belirlenmesinde yoğun ağların katkısına dikkat çekilmiş ve incelenen fay parçası için tamamen kilitlemiş-asismik değil, küçük depremlerle aktiviteye sahip, kısmi akma olduğu belirtilmiştir. Öztürk vd. (2015) GF'nin Marmara Denizi içindeki kısmında meydana gelen deprenselliği ve kaynak mekanizmalarını incelemiş, elde ettiği sonuçlarda oluşan depremlerde ters faylanma ve normal faylanma mekanizmalarına çok sık rastlanıldığından ve elde edilen çözümlerin genel KAFZ yapısına ve geometrisine bağlı olarak olağan özellikler gösterdiğinden bahsetmişlerdir.

Fay zonu boyunca biriken gerilmeler ve oluşan deprensellik ilişkilerinin fay zonunun fiziksel ve mekanik özellikleriyle yakından bağlantılı olduğu açıktır. Karaş vd. (2017) GF üzerinde yaptıkları özdirenç çalışmasında fay zonunu, yüzey kesiminde oldukça iletken bir özellik gösteren, bunun karşılığında zayıf ve deforme olmuş, sıvı içeriği yüksek bir fay yapısı olarak tanımlamışlardır. Fay zonu boyunca ofiyolitik temele kadar bu özellikler asimetrik bir karakter göstermekte, fayın kuzeyinde güneye göre elektrik özdirenç daha yüksek bir birim, derine doğru ise nispeten direnci yüksek, mekanik özellikleri daha güçlü temel yapıya geçilmektedir. Temel yapının akışkan içeriğinin düşük olması GF boyunca

deprem aktivitesinin kısır olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Janssen vd. (2009) ve Karaş vd. (2017) çalışmalarında, GF zonunun oldukça geniş bir ezilmiş zona sahip olduğu belirtilmiştir.

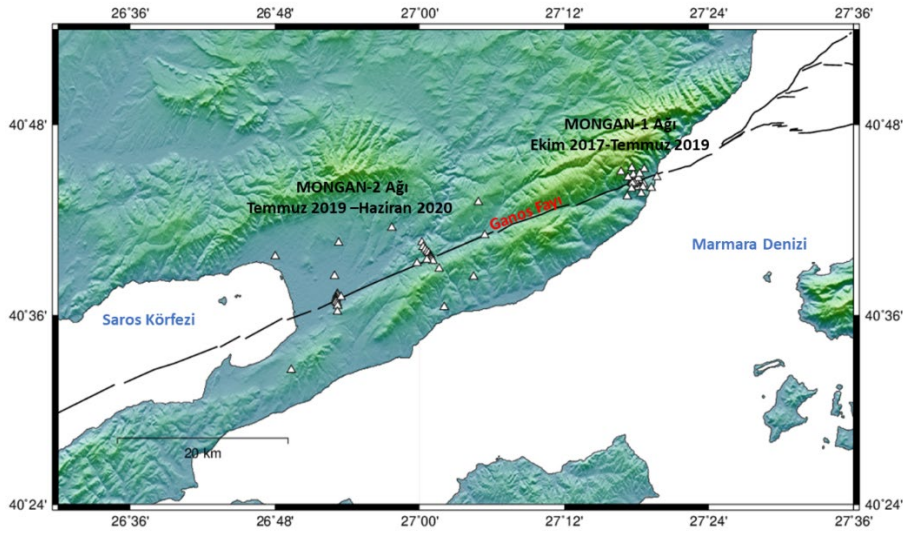
Ganos Fayı kuzeyde Eosen yaşlı birimlerle güneyde Miyosen yaşlı birimleri birbirinden ayıran, farklı litolojik ve fiziksel özelliklere sahip iki malzemeli (bimateryal) bir yapının ara yüzeyini oluşturur. Bu tür iki malzemeli fay yapılarında oluşan kırılmalar, hem sismolojik açıdan hem de olası hasarın değerlendirilmesi açısından büyük öneme sahiptirler. İki malzemeli fay yapısı, fay zonu boyunca gelişen; asimetrik ezilme zonu, çatlak yoğunluğu, sıvı ve gözenek içeriği, asimetrik sismik dalga hızları ve dalga sönümü anlamı taşır (Andrews, 2005; Ben-Zion ve Shi, 2005). Bu yapı üzerinde meydana gelen kırılmalarda ortaya çıkan dalga genliklerinde ve buna bağlı hasar dağılımında farklılıklar meydana gelir. İki malzemeli ara yüz boyunca kayma ve normal gerilme arasındaki etkileşim, sürtünmeyi dinamik olarak azaltabilir ve kırılma yayılımı için mekanik olarak tercih edilen yüzeyler oluşturur (Ben-Zion, 2001; Brietzke ve Ben-Zion, 2006). İki malzemeli bir ara yüzün varlığının diğer olası sonuçları; çok yüksek kayma hızları ve yırtılma cephesinin ilerlemesi (Ben-Zion, 2001; Ampuero ve Ben-Zion, 2008), fay üzerindeki artçı şokların asimetrik dağılımları (Rubin ve Gillard, 2000; Zaliapin ve Ben-Zion, 2011) ve fay boyunca asimetrik jeodezik alanların oluşmasıdır (Le Pichon vd., 2005; Wdowski vd., 2007). Tüm bu nedenlerden dolayı fay zonları boyunca iki malzemeli yapıları mümkün olan en yüksek çözünürlükte keşfetmek önemlidir (Allam vd., 2014; Qiu vd., 2017). KAFZ boyunca Düzce (Ben-Zion vd., 2003), Mudurnu (Bulut vd., 2012) ve Karadere (Najdahmadi vd., 2016) segmentlerinde iki malzemeli fay yapıları sismolojik çalışmalarla ortaya çıkarılmıştır.

2018 yılında Tübitak-Almanya BMBF ikili işbirliğiyle oluşturulan bir proje kapsamında Ganos Fayı'nın kara segmenti üzerinde toplam 40 adet



istasyondan oluşan bir deprem izleme ağı (MONGAN-Monitoring Ganos Fault) kurulmuştur (Şekil 2). Ağın amacı ulusal gözlem ağlarından (KRDAE ve AFAD) elde edilen sonuçlara göre asismik davranış sergileyen Ganos Fayı'nın olası mikro sismik etkinliğini gözlemleyebilmek ve iki malzemeli fay yapısını fay zonu dalgaları analizleriyle inceleyebilmektir. Gözlem ağı iki aşamalı çalıştırılmış olup, birinci aşamada istasyonlar fayın doğu ucunda (MONGAN-1), dar

bir alan içinde 2 yıl süreli çalıştırılmış, ikinci aşamada ise istasyonlar fayın batı kesimine kaydırılmış (MONGAN-2) ve daha geniş bir alana yayılarak yaklaşık 1 yıl süreyle kayıt toplanmıştır. Bu makalede öncelikle MONGAN-1 ağı temel alınarak; kurulan ağların özellikleri, veri toplama ve veri kalitesi konularından bahsedilecek, eşlenik ikinci makalede ise (Yalçınkaya vd., 2022) ilksel sismolojik analizler üzerinde durulacaktır.



**Şekil 2.** Bölgesel topografik harita üzerine işlenmiş Ganos Fayı (siyah çizgi) ve MONGAN-1, MONGAN-2 sismik ağların konumları (beyaz üçgenler istasyon lokasyonlarını gösterir).

**Figure 2.** Locations of Ganos Fault (black line) and MONGAN-1, MONGAN-2 seismic networks (white triangles show station locations) on the regional topographic map.

### MONGAN SİSMİK AĞLARIN ÖZELLİKLERİ

MONGAN deprem izleme ağı proje süresi içinde iki aşamalı planlanan bir ağıdır (Şekil 2). Ağın birinci aşamasında istasyonlar, Ganos Fayı'nın doğu kesiminde Güzelköy civarında konumlandırılmışlardır (MONGAN-1). MONGAN-1 ağı 2017 yılı Ekim ayında faaliyete geçirilmiş ve 2019 yılı Temmuz ayına kadar arazide kalmıştır. İkinci aşamada ise, istasyonlar Ganos Fayı'nın

batı kesimine kaydırılmış (MONGAN-2) ve Temmuz 2019-Haziran 2020 tarihleri arasında kayıt toplamışlardır.

MONGAN-1 çok yakın aralıklarla fay zonu üzerine konumlandırılan bir ağıdır (Şekil 3). Bu ağın hedefi daha çok fay zonu dalgalarını keşfetmeye yöneliktir. Bu dalgalar; fay zonu baş dalgaları (FZBD), fay zonu kapanlanmış dalgalar (FZKD) ve fay zonu yansımış dalgalar (FZYD) olup, fay zonu

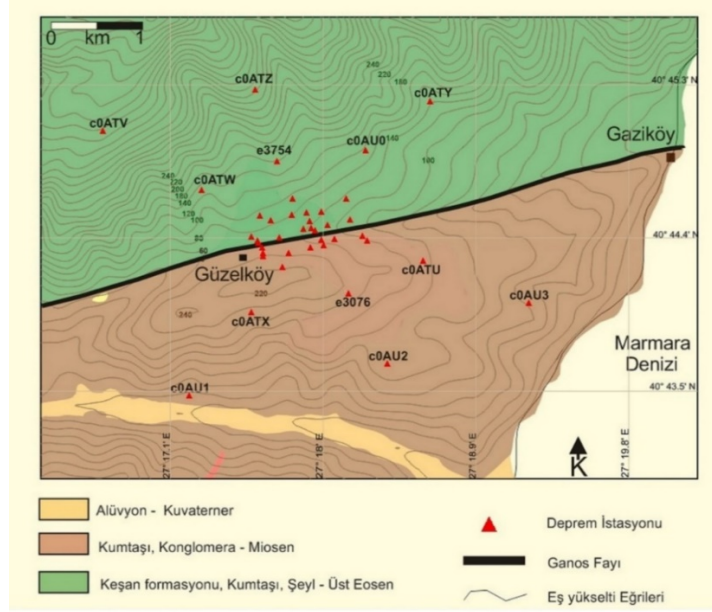
boyunca iki malzemeli yapı nedeniyle ortaya çıkan hız farklılıklarının etkilerini taşırlar (Allam vd., 2014; Ben-Zion 1989). Bu dalgalarla ilgili ilk analizler eşlenik makalede bulunabilir (Yalçınkaya vd., 2022). Ağ için seçilen lokasyon 1912 depremi gözlemlerinde en yüksek atımın ölçüldüğü (5.5 m) Güzelköy'dür. Yapılan paleosismolojik kazı çalışmaları ve depremin doğada bıraktığı ötelenme izleriyle, fay zonu arazide rahatlıkla takip edilebilmektedir (Aksoy, 2021; Altunel vd., 2000, 2004). Bu lokasyonda istasyon yerleri fayı birkaç noktada kesecek şekilde, faya dik ve paralel olarak bir yıldız şeklinde tasarlanmıştır. İstasyonlar arasında en uzak mesafe ~4 km, en yakın mesafe ise 25 m civarındadır. Fay üzerinde istasyon arası mesafeler kısa tutulurken, faydan uzaklaştıkça mesafeler artmaktadır. İstasyonların bir kısmı doğrudan fay zonu üzerinde kalırken, yarısı daha yaşlı ve sert kaya birimlerden oluşan kuzey blok üzerinde, diğer yarısı ise daha genç ve gevşek birimlerden oluşan güney blok üzerindedir. Bölgede topografya güneye doğru deniz seviyesine inerken, kuzeye doğru Ganos Dağı boyunca yükselir. Ağ kapsamında en düşük ve en yüksek istasyonlar arasındaki kot farkı yaklaşık 500 m'dir.

MONGAN-2 ağı Ganos Fayı'nın batı kesiminde Gölcük ile Kavaklı yerleşim yerleri arasında kurulmuştur (Şekil 4). Fay zonu iki ayrı lokasyonda istasyonlarla dik hatlar şeklinde kesilmiştir. Bu hatlardan birincisi Sofuköy civarında, diğeri ise fayın güncel alüvyon birimlerle örtülü olduğu Kavaklı'dadır. MONGAN-2'de istasyonlar yaklaşık 350 km<sup>2</sup>'lik bir alan içinde dağılır. En yakın istasyon mesafesi ~50 m iken, en uzak 30 km civarındadır. MONGAN-1'den farklı olarak MONGAN-2'de istasyonların daha geniş bir alana dağılmasının nedeni, fay zonu dalgaların gözlenmesinin yanı sıra, bölgede oluşan mikro depremselliğin izlenebilmesine yöneliktir. Konuyla

ilgili tartışmalar eşlenik ikinci makalede bulunabilir (Yalçınkaya vd., 2022).

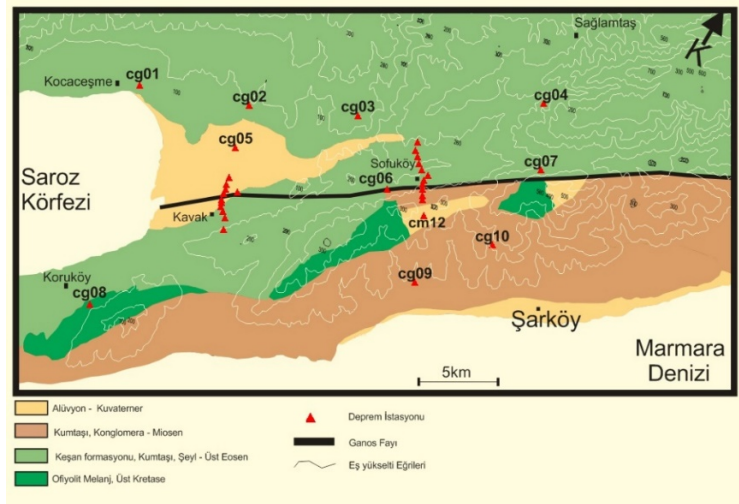
### ALETSEL DONANIM

MONGAN deprem izleme ağları toplam 40 istasyondan oluşur. Proje süresi içinde aktif çalışan istasyon sayısı arızalanma, zarar görme, yer değiştirme gibi çeşitli nedenlerle farklılık gösterir. Proje amacına uygun olarak yakın ve küçük depremleri kaydedebilmek hedefiyle istasyonlarda üç bileşen kısa periyot cihazlar tercih edilmiş olup, 30 adet 1 Hz Mark L4C ve 10 adet 4,5 Hz Geophone sensörler kullanılmıştır (Şekil 5). Kayıtçı olarak EarthData EDL PR6-24 ve DATA-CUBE3 olmak üzere iki farklı cihaz mevcuttur. Genel olarak Mark sensörler EDL kayıtçılarla, Geophone sensörler ise CUBE kayıtçılarla eşleştirilmiştir. EDL kayıtçılar harici, CUBE kayıtçılar ise dahili GPS alıcılara sahiptirler. Kayıtçılarda 200 Hz örnekleme frekansları kullanılmakla birlikte, kurulum dosyalarında oluşan bazı hatalar nedeniyle dönem dönem 100 Hz veri kaydettikleri fark edilmiştir. EDL verileri saatlik MiniSEED dosyalar şeklinde kaydedilmekte iken, CUBE kayıtçılar kendilerine özgü CUBE formatında günlük dosyalar şeklinde verileri kaydeder. EDL kayıtçılarda veri depolama amacıyla 12 GB boyutunda değiştirilebilir hard diskler kullanılır. CUBE kayıtçılar ise 32 GB boyutunda dahili hard disklere sahiptirler. İstasyonlar offline çalışmaları nedeniyle hard diskleri dolmadan kaydedilen verinin boşaltılmasına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle yaklaşık her üç ayda bir istasyonlar gezilerek veriler indirilmiş ve istasyon bakımları yapılmıştır. İstasyonların güç beslemeleri 12 Volt 72 Amper aküler ve 100 Watt güneş panelleriyle sağlanmıştır. MONGAN-1 ve MONGAN-2 ağları istasyon künyeleri sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilir.



**Şekil 3.** MONGAN-1 ağı istasyon dağılımı (üçgenler) ve yüzey jeolojisi. Sadece ağın dış istasyonlarının kodları gösterilmiştir.

**Figure 3.** MONGAN-1 network station distribution (triangles) and surface geology. Only the codes of the external stations of the network are shown.



**Şekil 4.** MONGAN-2 ağı istasyon dağılımı (üçgenler) ve yüzey jeolojisi. Sadece ağın dış istasyonlarının kodları gösterilmiştir.

**Figure 4.** MONGAN-2 network station distribution (triangles) and surface geology. Only the codes of the external stations of the network are shown.



**Şekil 5.** İstasyonlarda kullanılan sensör (1 Hz Mark ve 4.5 Hz Geophone) ve kayıtçılar (EDL ve CUBE).  
**Figure 5.** Sensor (1 Hz Mark and 4.5 Hz Geophone) and recorders (EDL and CUBE) used in stations.

**Çizelge 1.** MONGAN-1 ağı istasyon bilgileri.

**Table 1.** MONGAN-1 network station information.

No	İstasyon Kod	Sensör	Kayıtçı (ayıtçı/Sensör Ser	Enlem(°)	Boylam(°)	Yükseklik(m)	Güç Desteği
1	e3067	Mark 1Hz	EDL e3067	40.74227	27.29383	234	Güneş Paneli+Akü
2	e3068	Mark 1Hz	EDL e3068	40.73988	27.29353	213	Güneş Paneli+Akü
3	e3069	Mark 1Hz	EDL e3069	40.74132	27.30046	192	Güneş Paneli+Akü
4	e3070	Mark 1Hz	EDL e3070	40.74261	27.29985	206	Güneş Paneli+Akü
5	e3071	Mark 1Hz	EDL e3071	40.74252	27.29843	214	Güneş Paneli+Akü
6	e3072	Mark 1Hz	EDL e3072	40.74221	27.29696	221	Güneş Paneli+Akü
7	e3073	Mark 1Hz	EDL e3073	40.74172	27.29877	206	Güneş Paneli+Akü
8	e3075	Mark 1Hz	EDL e3075	40.73984	27.29984	192	Güneş Paneli+Akü
9	e3076	Mark 1Hz	EDL e3076	40.73459	27.30248	211	Güneş Paneli+Akü
10	e3077	Mark 1Hz	EDL e3077	40.74031	27.30393	175	Güneş Paneli+Akü
11	e3078	Mark 1Hz	EDL e3078	40.74400	27.29706	235	Güneş Paneli+Akü
12	e3080	Mark 1Hz	EDL e3080	40.74102	27.29922	201	Güneş Paneli+Akü
13	e3081	Mark 1Hz	EDL e3081	40.73906	27.29403	209	Güneş Paneli+Akü
14	e3084	Mark 1Hz	EDL e3084	40.73712	27.29603	238	Güneş Paneli+Akü
15	e3085	Mark 1Hz	EDL e3085	40.73986	27.30117	193	Güneş Paneli+Akü
16	e3086	Mark 1Hz	EDL e3086	40.74021	27.29313	227	Güneş Paneli+Akü

## Yalçinkaya vd. /Yerbilimleri, 2022, 43 (1), 37-60

17	e3087	Mark 1Hz	EDL	e3087	40.74003	27.29575	206	Güneş Paneli+Akü
18	e3088	Mark 1Hz	EDL	e3088	40.73983	27.30439	183	Güneş Paneli+Akü
19	e3089	Mark 1Hz	EDL	e3089	40.73918	27.29883	205	Güneş Paneli+Akü
20	e3090	Mark 1Hz	EDL	e3090	40.73833	27.29422	211	Güneş Paneli+Akü
21	e3091	Mark 1Hz	EDL	e3091	40.73939	27.30009	206	Güneş Paneli+Akü
22	e3093	Mark 1Hz	EDL	e3093	40.74181	27.29493	233	Güneş Paneli+Akü
23	e3095	Mark 1Hz	EDL	e3095	40.74180	27.30269	182	Güneş Paneli+Akü
24	e3097	Mark 1Hz	EDL	e3097	40.74077	27.29928	196	Güneş Paneli+Akü
25	e3098	Mark 1Hz	EDL	e3098	40.73958	27.29372	213	Güneş Paneli+Akü
26	e3099	Mark 1Hz	EDL	e3099	40.74086	27.29815	199	Güneş Paneli+Akü
27	e3754	Mark 1Hz	EDL	e3754	40.74761	27.29553	301	Güneş Paneli+Akü
28	e3082	Mark 1Hz	EDL	e3082	40.74390	27.30236	198	Güneş Paneli+Akü
29	e3083	Mark 1Hz	EDL	e3083	40.73854	27.29663	203	Güneş Paneli+Akü
30	e3096	Mark 1Hz	EDL	e3096	40.73858	27.29419	212	Güneş Paneli+Akü
31	c0ATU	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATU	40.73781	27.30985	165	Akü
32	c0ATV	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATV	40.75051	27.27847	572	Akü
33	c0ATW	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATW	40.74473	27.28814	267	Akü
34	c0ATX	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATX	40.73273	27.29296	208	Akü
35	c0ATY	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATY	40.75341	27.31056	200	Akü
36	c0ATZ	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATZ	40.75458	27.29341	468	Akü
37	c0AU0	Geoph 4.5Hz	Cube	c0AU0	40.74858	27.30423	238	Akü
38	c0AU1	Geoph 4.5Hz	Cube	c0AU1	40.72463	27.28697	70	Akü
39	c0AU2	Geoph 4.5Hz	Cube	c0AU2	40.72775	27.30639	161	Akü
40	c0AU3	Geoph 4.5Hz	Cube	c0AU3	40.73362	27.32027	101	Akü

Çizelge 2. MONGAN-2 ağı istasyon bilgileri.

Table 2. MONGAN-2 network station information.

Noistasyon Kc	Sensör	Kayıtçı/Kayıtçı/Sensör Seri	Enlem(°)	Boylam(°)	Yükseklik(m)	Güç Desteği	
1	em01	Mark 1Hz	EDL 3089/1348	40.67629	27.00305	130	Güneş Paneli+Akü
2	cm02	Mark 1Hz	Cube 18/1334	40.67153	27.0048	162	Güneş Paneli+Akü
3	em03	Mark 1Hz	EDL 3081/1342	40.66881	27.00771	175	Güneş Paneli+Akü
4	cm04	Mark 1Hz	Cube 21/1355A	40.66666	27.01037	193	Güneş Paneli+Akü
5	em05	Mark 1Hz	EDL 3095/1339A	40.66517	27.01243	203	Güneş Paneli+Akü
6	cm06	Mark 1Hz	Cube 17/1332	40.66275	27.01491	194	Güneş Paneli+Akü
7	em07	Mark 1Hz	EDL 3067/1351A	40.66114	27.01488	189	Güneş Paneli+Akü
8	cm08	Mark 1Hz	Cube 14/1330	40.66029	27.01508	173	Güneş Paneli+Akü

9	em09	Mark 1Hz	EDL 3754/1351	40.65951	27.01601	153	Güneş Paneli+Akü
10	em10	Mark 1Hz	EDL 3099/1330A	40.65811	27.01703	131	Güneş Paneli+Akü
11	em11	Mark 1Hz	EDL 3087/1346A	40.65667	27.01828	139	Güneş Paneli+Akü
12	cm12	Mark 1Hz	Cube 16/1332	40.64859	27.02695	262	Güneş Paneli+Akü
13	em13	Mark 1Hz	EDL 3078/1333A	40.65803	27.00996	183	Güneş Paneli+Akü
14	em14	Mark 1Hz	EDL 3077	40.62216	26.88627	6	Güneş Paneli+Akü
15	em15	Mark 1Hz	EDL 3076/1340	40.62067	26.88567	6	Güneş Paneli+Akü
16	em16	Mark 1Hz	EDL 3090/1349	40.61831	26.88492	8	Güneş Paneli+Akü
17	em17	Mark 1Hz	EDL 3070/1337A	40.61698	26.88449	7	Güneş Paneli+Akü
18	em18	Mark 1Hz	EDL 3071/1333	40.6154	26.88424	7	Güneş Paneli+Akü
19	em19	Mark 1Hz	EDL 3068/1334A	40.61481	26.88385	5	Güneş Paneli+Akü
20	em20	Mark 1Hz	EDL 3075	40.61361	26.88441	5	Güneş Paneli+Akü
21	em21	Mark 1Hz	EDL 3069/335A	40.61232	26.88607	8	Güneş Paneli+Akü
22	em22	Mark 1Hz	EDL 3084/1334	40.60949	26.88655	18	Güneş Paneli+Akü
23	em23	Mark 1Hz	EDL 3097/1353	40.60326	26.88631	80	Güneş Paneli+Akü
24	em24	Mark 1Hz	EDL 3091/1349A	40.61876	26.89132	7	Güneş Paneli+Akü
25	cg01	Geoph 4.5Hz	Cube ,TY	40.66156	26.80024	12	Güneş Paneli+Akü
26	cg02	Geoph 4.5Hz	Cube ,TZ	40.67593	26.88802	62	Güneş Paneli+Akü
27	cg03	Geoph 4.5Hz	Cube ,U2/4205	40.69171	26.96135	96	Güneş Paneli+Akü
28	cg04	Geoph 4.5Hz	Cube ,TX/4204	40.71862	27.08115	326	Güneş Paneli+Akü
29	cg05	Geoph 4.5Hz	Cube ,U1	40.64097	26.88232	8	Güneş Paneli+Akü
30	cg06	Geoph 4.5Hz	Cube ,TV/4206	40.65443	26.99629	120	Güneş Paneli+Akü
31	cg07	Geoph 4.5Hz	Cube ,U0/4209	40.68389	27.09006	132	Güneş Paneli+Akü
32	cg08	Geoph 4.5Hz	Cube ,TU	40.54195	26.82237	123	Güneş Paneli+Akü
33	cg09	Geoph 4.5Hz	Cube ,U3	40.60812	27.03396	80	Güneş Paneli+Akü
34	cg10	Geoph 4.5Hz	Cube ,TW/4201	40.64018	27.07465	199	Güneş Paneli+Akü

## İSTASYON KURULUMU

Belirlenen lokasyonlarda Mark sensörler yüzeyden 50 cm derinliğinde açılan çukurlar içerisine, tabanda 5 cm kalınlığında beton atılarak, üzerine mermerden su yalıtımı yapılmış kutular içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 6). Geophone sensörler ise 50 cm çukur içerisine doğrudan toprağa saplanarak yerleştirilmiştir. Sensörlerin etrafları toprak örtüsüyle sıkılaştırılarak yerle temasları iyileştirilmiştir. Fakat bazı istasyonlarda kış koşullarında etraflarındaki dolgu malzemenin

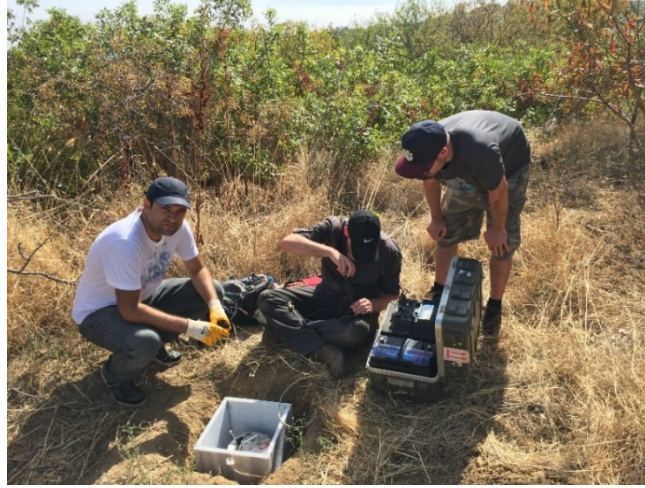
gevşediği ve düzeçlerinde bozulmalar olduğu gözlenmiştir. Bazı istasyonlarda ise yapılan yalıtımların yetersiz kaldığı ve mermer kaidelerin içlerinin su dolduğu fark edilmiştir. Benzer durumların toplanan kayıtlarda etkiler oluşturabileceği beklenmekle birlikte, istasyon bazında tam bir değerlendirme henüz yapılamamıştır. Sismometrelerin kuzey okları kurulum sırasında pusula yardımıyla manyetik kuzeye yönlendirilmiş, ancak kayıtlarda tanecik hareketleriyle ilgili bazı ön değerlendirmelerde bu

hızalamanın sapmalar içerebileceği gözlenmiştir. Tüm istasyonlar çevre güvenliği alınarak ve istasyon künyeleri oluşturularak kayıt almaya hazır hale getirilmişlerdir.

### VERİ TASNİFİ

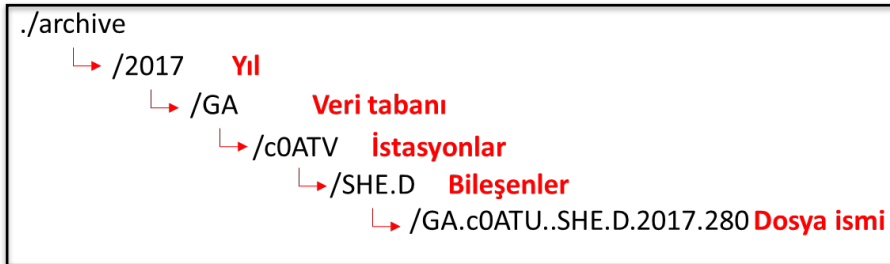
Araziden EDL ve CUBE kayıtçılardan iki ayrı formatta indirilen ham veriler ortak bir veri arşivi oluşturmak amacıyla bazı formatsal değişikliklere tabi tutulur. Verilerin arşivlenmesi konusunda dosya yapılarının SeisComP Data Structure (SDS) arşivleme mantığına uygun olarak saklanmasına

karar verilmiştir. Bu arşivleme yönteminde en üst klasör yıl olmak üzere sırasıyla alt klasörler; veri tabanı ismi, istasyon adı, bileşen isimleri ve en son olarak ta günlük MiniSEED formatında dosyalar şeklinde yer alır (Şekil 7). Kayıtçılardan \*.pri0, \*.pri1 ve \*.pri2 uzantılarıyla gelen veri dosyaları sırasıyla Z, NS, EW bileşen uzantılarına çevrilerek saklanır. MiniSEED formatında 200 Hz örnekleme aralığına sahip bir günlük tek bileşen dosya boyutu yaklaşık 30 MB olup, 40 istasyon 3 bileşen bir günlük veri boyutu 3.6 GB, bir yıllık ise 1.3 TB veri hacmine ulaşır.



**Şekil 6.** 1 Hz sensör ve EDL kayıtçıların arazi kurulumu.

**Figure 6.** Field setup of 1 Hz sensor and EDL recorders.



**Şekil 7.** Veri depolamada kullanılan dosyalama yapısı.

**Figure 7.** File structure used in data storage.

### İSTASYONLARIN KAYIT PERFORMANSLARI

İstasyonların kayıt performanslarını belirleyen iki önemli unsur, oluşan veri kaybı ve elde edilen veri kalitesidir. Veri kayıpları genel olarak güç ünitelerinde yaşanan sıkıntılardan kaynaklanabildiği gibi, kayıtçı veya sensörlerde oluşabilecek arızalar da kayıplara neden olabilir. Güç ünitelerinde yaşanan sıkıntılar genellikle nemli ve kapalı bir ortamda bulunan akülerdeki performans kayıpları, dış etkenlerle oluşan bağlantı kopuklukları, güneş panellerinde yaşanan arızalar şeklinde sıralanabilir. Bu tip arızalar her üç ayda bir yapılan istasyon bakım gezilerinde ortaya çıkabilmekte ve müdahale edilebilmektedir. Genel olarak Geophone-CUBE istasyonların çalışma performanslarının oldukça iyi olduğu, arızalanma olasılıklarının son derece düşük olduğu gözlenmiştir. Buna karşın Mark-EDL istasyonlar oldukça problem oluşturdukları izlenmiştir. EDL kayıtçılar sensörlerden gelen sinyalleri belirli zaman aralıklarıyla kendi depolama ünitelerinden harici disklere atarlar. Harici disklerin takılmasında veya veri atımı sırasında ortaya çıkan bazı sorunlar nedeniyle, verilerin hard disklere yazılmasında problemler yaşandığı gözlenmiştir. Ayrıca disklere atılan verilerde bazı durumlarda formatsal hatalar ve GPS hataları olduğu da gözlemlerimiz arasındadır. Bazı istasyonlarda ilk günlerden itibaren EDL'in çalışmadığı veya sensörlerin bileşenlerinde sürekli bir gürültü izi olduğu gözlenmiştir. Bu istasyonlar için olanaklar dahilinde EDL ve sensör değişikliği yoluna gidilmiş, fakat istasyonlarda önemli veri kayıpları ortaya çıkmıştır.

MONGAN-1 ve MONGAN-2 istasyonların veri toplama performansları Şekil 8'de görülebilir. Şekilde yatay eksen zamanı, dikey eksen ise istasyonları göstermekte olup, renkli çizgiler kaydın varlığını, boşluklar ise veri kayıplarını ifade etmektedir. Görüldüğü gibi bazı istasyonlarda (MONGAN-1: e3084, e3083, e3076, e3073, e3072, e3071, MONGAN-2: em07, em14, em17, em18, em21, em22) kayıt toplama süreleri oldukça

düşük kalmıştır. Kötü performans sergileyen istasyonların tamamı EDL kayıtçılar oluşturur ve çoğunlukla kalıcı EDL arızasına sahiptirler. Ne yazık ki proje kapsamında fazladan EDL olmaması nedeniyle bu tip istasyonlarda EDL değişimine gidilememiştir. Akü performanslarının da bazı istasyonlarda önemli sorunlar oluşturduğu, bakım sonrası dahi kısa süre içinde akülerin boşaldığı ve veri kayıplarına yol açtıkları gözlenmiştir.

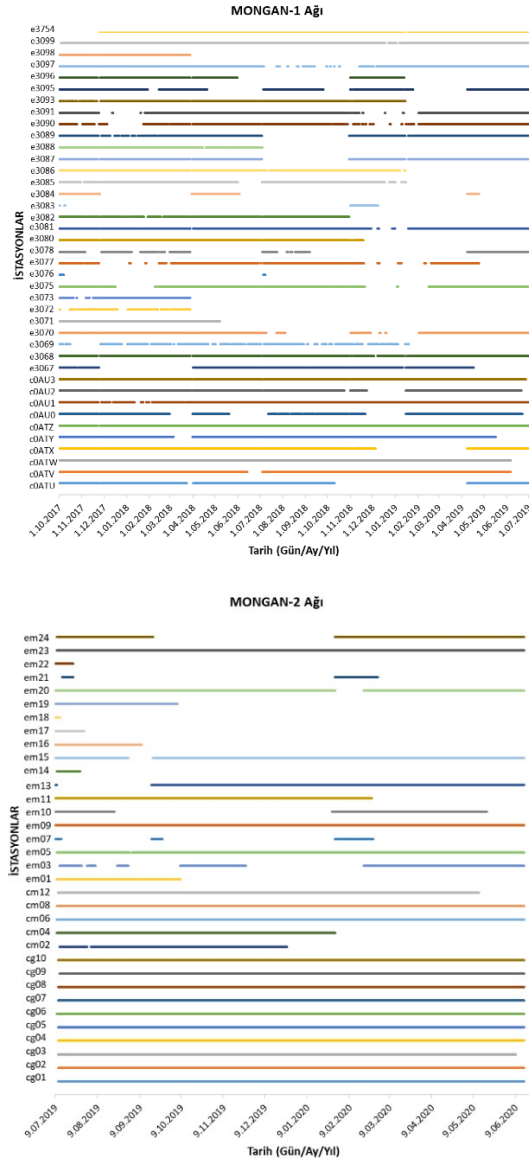
### İSTASYONLARIN ÇEVRESEL GÜRÜLTÜ İÇERİKLERİ

Veri kalitesini belirleyen en önemli unsur istasyonlardaki çevresel gürültü karakterleridir. İstasyonların yüzeye oldukça yakın, sığ çukurlar içine yerleştirilmeleri nedeniyle çevresel gürültülerden önemli şekilde etkilenecekleri açıktır. Ancak lokasyonların daha çok kırsal alanlarda seçilmesi nedeniyle, kültürel gürültünün (>1 Hz) nispeten az olacağı düşünülmüştür. Bölgede olası gürültü kaynakları; istasyonların deniz kıyısına yakın olması nedeniyle dalga gürültüsü, gemi-tekne trafiği, tarım alanları içinde olunması nedeniyle çiftçilik faaliyetleri, yer yer taş ocağı, otoyol çalışmaları ve bazı noktalarda rüzgar santrali etkileri olarak sıralanabilir.

Kaynaklar arasında ayırım yapmadan, genel olarak istasyonlardaki gürültü altyapısını görebilmek amacıyla, her bir istasyonda olasılıksal güç yoğunluk spektrumları (PSD) hesaplanmıştır (Mc Namara ve Buland, 2004). İlk aşamada PSD grafikleri birer saatlik kayan pencereler kullanılarak, toplam 1 aylık süre için SEISAN yazılımı (Havskov ve Ottemoller, 1999) kullanarak hesaplanmıştır. Şekil 9 her iki ağ için de örnek istasyonlarda dikey bileşenler için hesaplanan PSD grafiklerini gösterir. Aynı zamanda istasyonların gürültü seviyelerini, genel gürültü seviyeleriyle karşılaştırmak amacıyla Peterson (1993) NLNM (new low noise model) ve NHNM (new high noise model) eğrileriyle birlikte verilir. Görüldüğü gibi istasyonların büyük çoğunluğunda

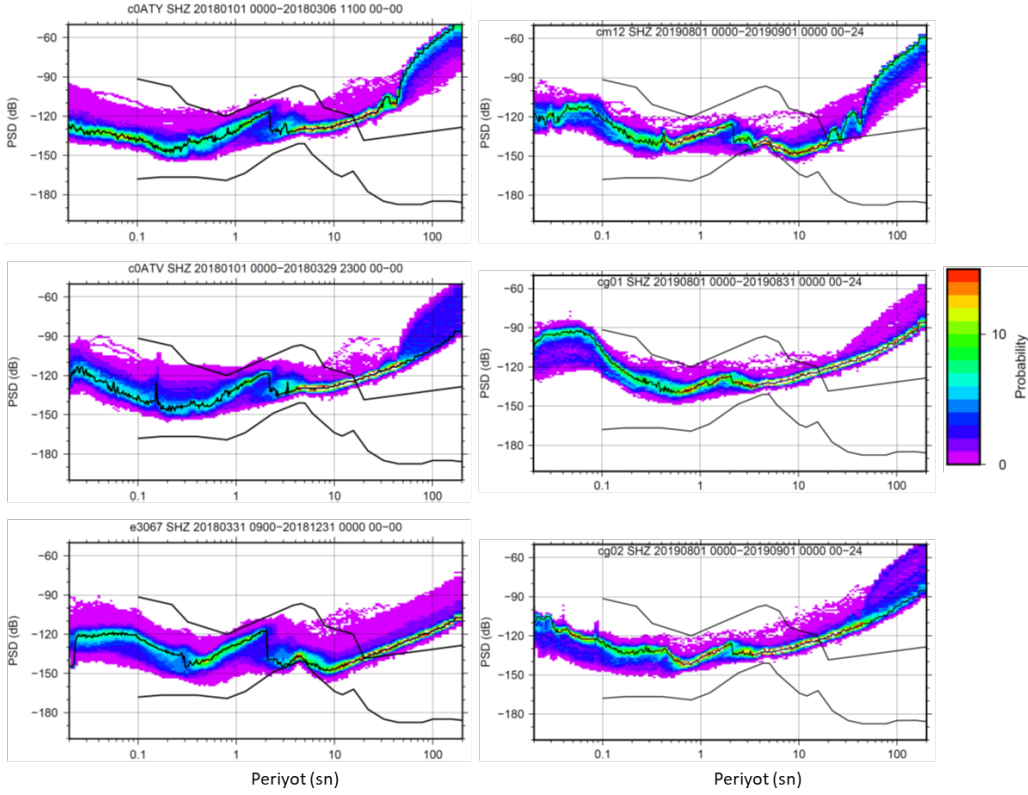


Yalçınkaya vd. /Yerbilimleri, 2022, 43 (1), 37-60



**Şekil 8.** MONGAN-1 (üst resim) ve MONGAN-2 (alt resim) ağları istasyon kayıt performansları. Yatay çizgilerdeki kesiklikler veri kayıplarını temsil eder.

**Figure 8.** Station recording performances of MONGAN-1 (top image) and MONGAN-2 (bottom image) networks. The dashes in the horizontal lines represent data losses.



**Şekil 9.** MONGAN-1 (sol grafikler) ve MONGAN-2 (sağ grafikler) ağı kapsamında çalıştırılan örnek istasyonlarda bir ay süreli veri kullanılarak hesaplanan düşey bileşen PSD grafikleri.

**Figure 9.** Vertical component PSD graphs calculated using one month data at sample stations operated within the MONGAN-1 (left graphs) and MONGAN-2 (right graphs) network.

çevresel gürültüler, yaklaşık 20 sn'nin altındaki periyotlarda NLNM-NHNM eğrilerinin arasında kalır. NLNM-NHNM aralığı, genel bir sismolojik gözlem istasyonunun performansı açısından kabul edilebilir aralıktır. PSD eğrileri yaklaşık 3-10 sn'nin üzerindeki periyotlarda lineer bir artış gösterir ki, aletlerin içsel gürültülerinin kayıtlarda hakim olmaya başladığını ifade eder.

PSD eğrileri yaklaşık 2 sn periyotlarda 20-30 dB'e varan ani sıçramalar gösterirler. Bu sıçramaların aletsel kaynaklı olduğuna dair açık bir kanıt yoktur. Geophone ve Mark sensörlerin doğal periyotlarının birbirinden farkı olmasına karşın,

sıçramalar her iki sensör tipinde aynı periyotlarda izlenir. Sadece sıçrama miktarları istasyonlar arasında değişiklik gösterir. 1 sn'den daha büyük periyotlu gürültü kaynakları genel olarak okyanus kaynaklı dalga hareketleri ve atmosferdeki basınç, sıcaklık değişimi kaynaklıdır ve bunlar mikroseism olarak adlandırılırlar. Okyanus kaynaklı dalgaların hakim periyotlarının birincisi 4-8 sn, ikincisi ise 10-16 sn civarındadır (McNamara ve Buland, 2004). MONGAN istasyonlarında 2sn civarında görülen bu değişimlerin nispeten bir iç deniz olan Marmara ve Akdeniz kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Benzer gürültü karakterleri Sevim vd. (2018)

tarafından Ege Bölgesi deprem istasyonlarında da gözlenmiştir.

Sismolojik verilerin kalitesini belirleyen bir diğer etken, analizlerde kayıtların hangi genlik ve frekans aralığında kullanılabileceğidir. Kullanılabilecek en düşük genliği genel olarak, yukarıda tartıştığımız, istasyonların sahip olduğu çevresel gürültü genlikleri belirler (belirli frekans aralığı cihaz içi gürültüler bunlardan daha düşük genliklidir). Eğer bir depremin oluşturduğu titreşimin genliği çevresel gürültü genliğinin üzerindeyse (genellikle en az üç katı, S/N>3) bu deprem ayırt edilebilir ve analiz edilebilir anlamı taşır. Aksi durumda deprem sinyali gürültü içinde kalır ve bir olay olarak analiz edilmesi mümkün olmaz. Bu nedenle özellikle mikro deprem izlemelerinde istasyonlar mümkün olduğunca çevresel gürültünün az olduğu lokasyonlarda ve açılan kuyu içine konumlandırılmaya çalışılır. Fakat kısa süreli ağ çalışmalarında bu genellikle mümkün olmaz.

Çevresel gürültü genliği aynı zamanda, bir sismik ağ tarafından kaydedilebilecek en küçük deprem büyüklüğüne de işaret eder. Şekil 9'da PSD grafiklerinde görüldüğü gibi 0,1-1 sn aralığında (1-10 Hz,  $f_c \approx 5$  Hz) ağ istasyonlarında çevresel gürültü ivme güç spektrumu genlikleri yaklaşık  $P_a = -150$  dB seviyesine kadar düşmektedir (Şekil 9 c0ATY istasyonu). Bu değer Bormann (1998) bağıntıları kullanılarak önce birim dönüşümü yapılır ve sonra yerdeğiştirme genliğine dönüştürülürse;

$$P_a [(m/sn^2)^2/Hz] = 10^{\frac{P_a[dB]}{10}}$$

$$P_a = 10^{-14} (m/sn^2)^2/Hz$$

$$P_d = \frac{P_a}{(2\pi f_c)^4} = \frac{10^{-14}}{974090,91}$$

$$= 1,027 * 10^{-21} (m^2)/Hz$$

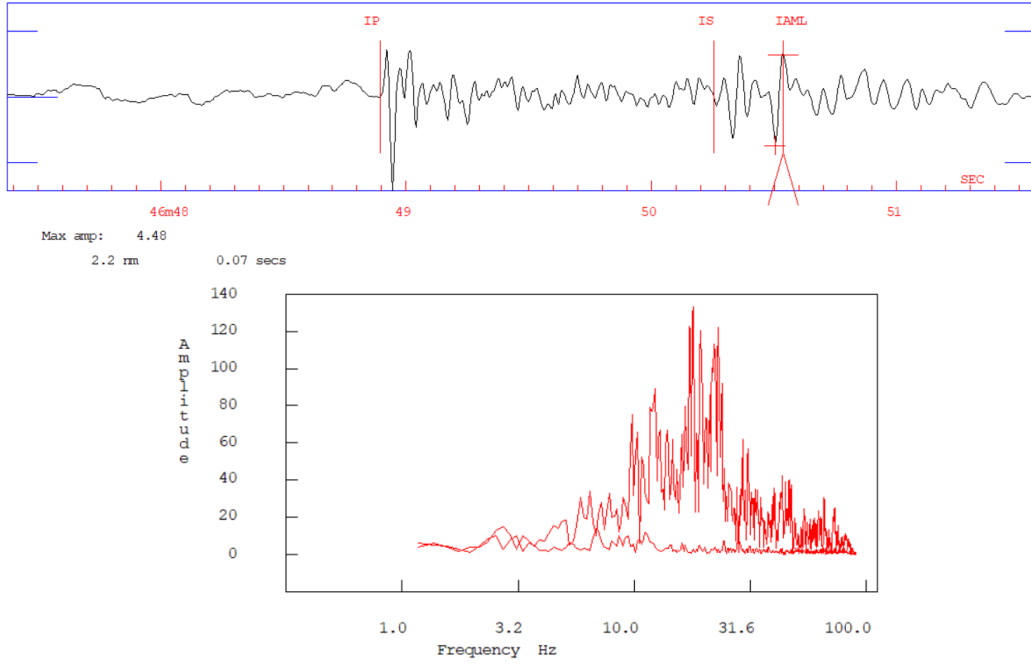
$$d_{RMS} = (P_d * f_c)^{1/2} = 0,072nm$$

elde edilir. Burada  $P_d$ : gürültü yerdeğiştirme güç spektrumu genliğini,  $f_c$ : merkez frekans değerini ve  $d_{RMS}$ : ortalama yerdeğiştirme genliğini temsil eder. Deprem sinyalinin gürültüden ayırt edilebilmesi açısından dalga genliğinin gürültü genliğinin en az 3 katı olması gerektiği düşünülürse (S/N>3), bu durumda ayırt edilebilir en küçük dalga genliği  $0,072nm * 3 = 0,216nm$  olur. Bunu P dalgası var sayar ve depremlerde P dalga ile S dalga genlikleri arasında yaklaşık P/S=0,2 oranı olduğunu varsayarsak, bu durumda yakalanabilir en düşük S dalga genliği 1.1 nm olacaktır. Yalçınkaya vd. (2022) çalışmasında yer alan magnitüd bağıntısı kullanılırsa ve ağ merkez olmak üzere 10, 20 ve 50 km yarıçaplı daireler içinde yakalanabilir en küçük deprem büyüklükleri sırasıyla ML-0,5 ,ML-0,2 ,ML0,2 olacak demektir.

2017.10.06 tarihli bir mikro depremin 10 km uzaklıkta c0ATY istasyonunda kaydedilen düşey bileşen kaydı ve sinyal-gürültü spektrumları Şekil 10'da gösterilmektedir. Yaklaşık 3-50 Hz arasında S/G oranları >3'tür. S dalgasında ölçülen en büyük genlik 2,2 nm olup, hesaplanan lokal büyüklük ML=-0,2'dir. Bu örnek ağ kapsamında negatif büyüklükte yakın depremlerin yakalanabileceğini gösterir. Yalçınkaya vd. (2022) çalışmasında görülebileceği gibi MONGAN ağı tarafından -0,7 büyüklüğüne kadar depremler yakalanabilmiştir.

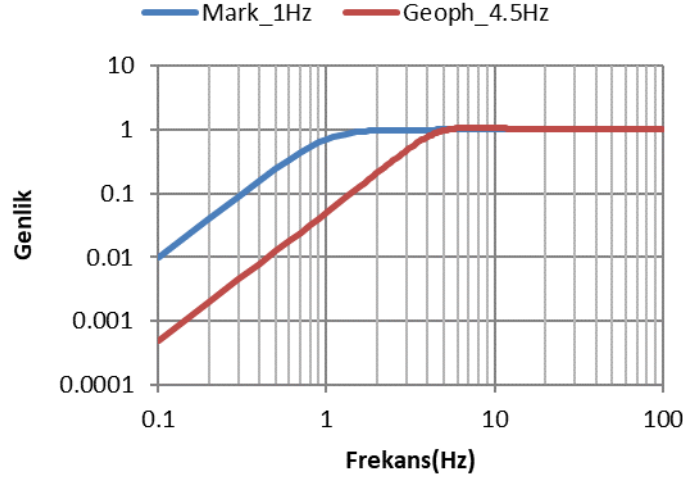
Kayıtlarda kullanılabilecek en yüksek frekans değerini Nyquist frekansı belirler. MONGAN ağı kayıtçıları genel olarak 200Hz örnekleme frekansına sahiptirler. Bu durumda kayıtlarda görülebilecek en yüksek frekans (Nyquist frekansı) 100 Hz olarak hesaplanır. En düşük frekans ise genel olarak sensör doğal frekansı olarak kabul edilir ve bu frekanstan daha düşük frekanslarda sensör hassasiyetinin üstel olarak azaldığı bilinir. Mark 1 Hz ve Geophone 4,5 Hz sensörlere ait genlik transfer fonksiyonları Şekil 11'de gösterilir.

Görüldüğü gibi Mark cihazlar 1 Hz'in altında, Geophone'lar ise 4,5 Hz'in altında frekans bağımlı olarak genlik tepkileri üstel olarak azalır. Teorik hesaplamalar her ne kadar sensör doğal frekansını kayıtlarda kullanılabilir alt sınır olarak belirlese de, birçok çalışmada kullanılan kazanç (gain) değerlerine bağlı olarak sensör frekansının çok daha aşağısına inilebileceği yönünde örnekler de mevcuttur (Reidise vd., 1990; Rasmussen, 2019; Strollo vd., 2008; Ringler vd., 2018).



**Şekil 10.** 2017.10.06 tarihli bir depremin 10 km uzaklıkta c0ATY istasyonunda kaydedilen düşey bileşen kaydı (üstte) ve sinyal-gürültü spektrumları (altta). Kayıt üzerinde P (IP) ve S (IS) dalga varışlarıyla birlikte S dalgası genliği (IAML) okumaları gösterilmektedir. Sinyal spektrumu P ve S dalgalarını kapsar (yüksek genlikli eğri), gürültü spektrumu P dalgası varışı öncesi seçilen kayıttan hesaplanır (yaklaşık düz eğri).

**Figure 10.** Vertical component recording (above) and signal-to-noise spectra (below) of an earthquake of 2017.10.06 recorded at station c0ATY, 10 km away. The recording shows S wave amplitude (IAML) readings with P (IP) and S (IS) wave arrivals. The signal spectrum includes P and S waves (high amplitude curve), the noise spectrum is calculated from the recording selected before P wave arrival (approximate flat curve).



**Şekil 11.** Mark 1 Hz ve Geophone 4,5 Hz sensörlere ait genlik transfer fonksiyonları.

**Figure 11.** Amplitude transfer functions of Mark 1 Hz and Geophone 4.5 Hz sensors.

Şekil 12'de birbirine çok yakın konumda, farklı tip sensörlerin kullanıldığı iki istasyonda PSD grafiklerinden hesaplanan MOD (bir seride en çok tekrar eden değer) eğrileri karşılaştırılmaktadır. e3754 kodlu istasyonda 1 Hz Mark sensör ve EDL kayıtçı, c0ATZ kodlu istasyonda ise 4,5 Hz Geophone sensör ve CUBE kayıtçı bulunur. Görüldüğü gibi sismometrelerin benzer kayıt davranışları, sahip oldukları doğal frekanslarından çok daha düşük frekanslara kadar sürmektedir. Yaklaşık bu benzerlik 0,3-0,5 Hz'e (~2-3 sn) kadar devam eder ve c0ATZ istasyonunda 0,3 Hz'ten, e3754 istasyonunda ise 0,1 Hz'ten itibaren genlikler alet içi gürültüler nedeniyle lineer olarak artmaya başlar. Bu örnek her iki tip cihaz için kayıtların yaklaşık 0,3 Hz'e kadar kullanılabilirliğine işaret eder.

#### **KAYITLARIN ZAMAN VE FREKANS ORTAMI ÖZELLİKLERİ**

Ağ içerisinde istasyonlar arasındaki mesafelerin çok küçük olması nedeniyle, kayıtlar üzerinde yerel zemin etkileri dışında kaynak ve ortam

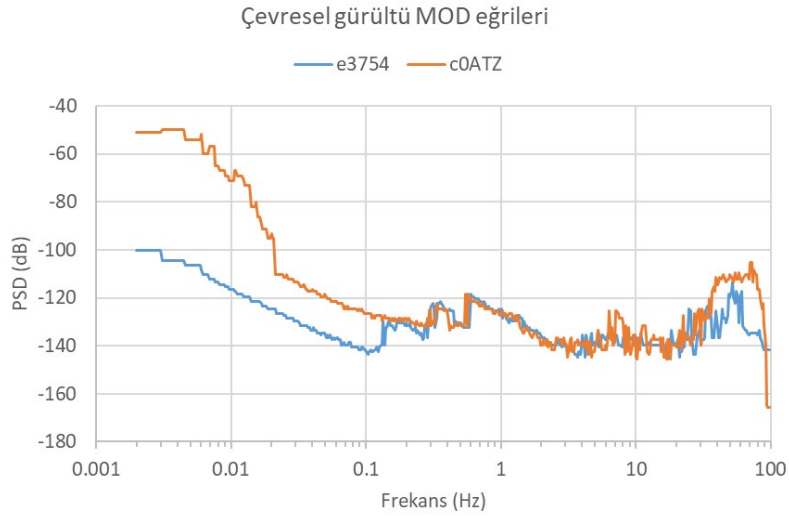
etkilerinin çok farklılık oluşturmayacağı düşünülebilir. Ancak sismik ağın iki malzemeli bir fay zonu boyunca konumlanması, özellikle yakın depremlerde dalgaların farklı fiziksel özelliklere sahip seyahat yollarını kullanmaları olasıdır. Örneğin; doğrudan sert blok veya gevşek blok içinde seyahat eden ya da doğrudan fay zonunu oluşturan ezilmiş birim içinde seyahat eden dalgaların farklı seyahat sürelerine ve sönümlenme dinamiklerine maruz kalacakları açıktır. Ayrıca, farklı hız kontrastlarına sahip ara yüzeylerden oluşan bu yer altı yapısı, istasyonlarda gözlenen dalga formları üzerinde farklı türde dönüşmüş dalga fazları (PS, SP, FZBD, FZKD vb.) üretebilecektir (Najdahmadi vd., 2018; Hrubcova vd. 2016).

Şekil 13'te 25 Ekim 2017 saat 11:05'te, büyüklüğü 3,4 olan ve ağın yaklaşık 15 km doğusunda meydana gelmiş bir depreme ait MONGAN-1 ağı düşey bileşen kayıtları gösterilmektedir. Dalga formlarının karşılaştırılabilmesi amacıyla alet etkileri giderilmiş ve 1-40 Hz band geçişli filtre

uygulanmıştır. Dalga formları istasyonlar altındaki olası düşey zemin kesitiyle birlikte kuzeyden güneye doğru bir hat üzerine iz düşürülmüş şekilde sıralanmışlardır. İstasyonlar arasındaki dalga formlarındaki büyük farklılıklar dikkat çekicidir. Kuzeyden güneye doğru dalga genlikleri belirgin bir şekilde artmakta ve kayıt süreleri uzamaktadır. P dalgalarının hemen devamında bazı olası dönüşmüş dalga fazları (PS, SP) sismogramlarda belirgindir (Şekil 13). Fay zonu üzerine düşen istasyonlarda ayırt edilebilir bir farklılaşma (genlik, süre, frekans içeriği ya da dalga fazları) bu aşamada görebilmek mümkün değildir. Kuzey-güney hat boyunca sismogramlarda genlik ve süre karakterini belirleyen büyük oranda lokal zemin etkileridir. Fakat özellikle düşey bileşenler üzerinde bu etkinin açık gözlenmesi dikkat çekicidir. Çünkü genelde beklenen zemin etkilerinin, yani genlik büyütmelerinin ve süre uzamalarının yatay

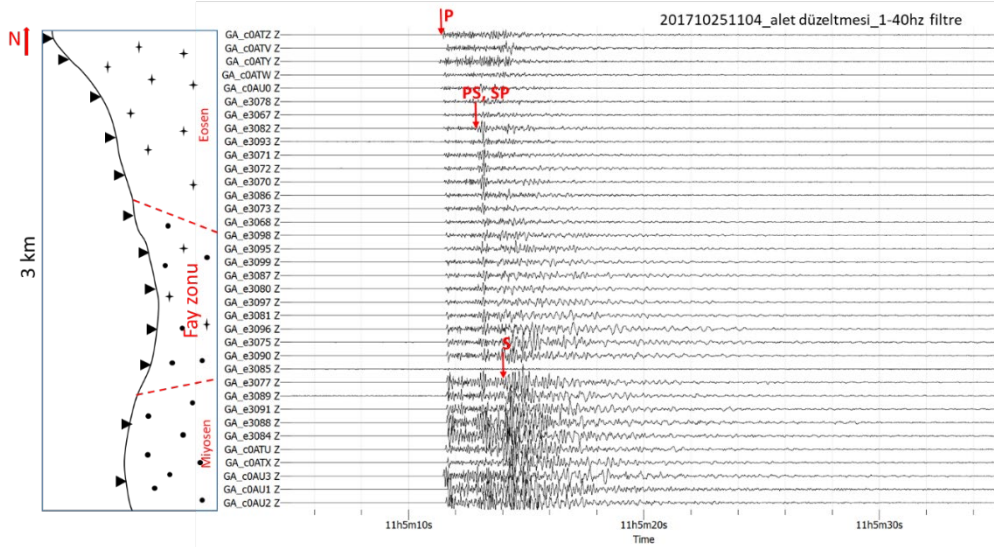
bileşenler üzerinde, yani SH dalgalarında gözlenmesi, bunun aksine düşey bileşen sismogramların birbirine benzer olmasıdır. Özellikle istasyonlar arası genlik farklarının magnitüd hesaplamalarını etkileyeceği açıktır.

Çalışma kapsamında zemin etkilerini araştırmak amacıyla her bir istasyonda gürültü kaydından oluşan 24 saatlik bir veri Yatay/Düşey Spektral Oran (H/V) yöntemiyle (Nakamura, 1989) analiz edilmiştir. Yöntemin esası; ana kaya içinde hareketin yatay ve düşey bileşeninin eşit olduğu ve yatay bileşenin aksine düşey bileşenin yerel zemin koşullarından etkilenmediği varsayımına dayanır. Böylece hareketin yatay bileşeninin düşey bileşene oranı (frekans ortamında) zemin transfer fonksiyonunu verir. Yerel zemin koşullarının etkisini belirlemek için tek istasyon kaydının yeterli olması, yöntemi oldukça kullanışlı kılar.



**Şekil 12.** e3754 ve c0ATZ kodlu istasyonlarda 1 aylık veri kullanılarak hesaplanan en çok tekrarlanan (MOD) PSD eğrileri.

**Figure 12.** Most repeated (MOD) PSD curves calculated using 1-month data at stations coded e3754 and c0ATZ.

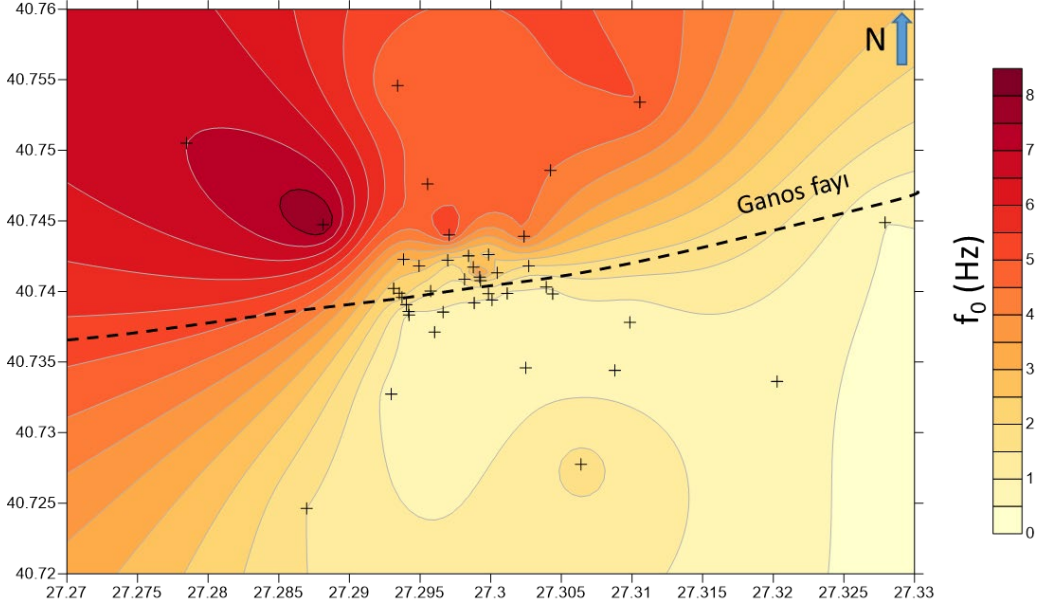


**Şekil 13.** 25 Ekim 2017 saat 11:05'te, büyüklüğü 3,4 olan ve ağın yaklaşık 15 km doğusunda meydana gelmiş depreme ait MONGAN-1 ağı düşey bileşen kayıtları. Kayıtlardan alet etkileri giderilmiş ve 1-40 Hz arası filtre uygulanmıştır. İstasyon kayıtları KG yönünde bir hat boyunca iz düşürülmüş ve hattın derinlik kesiti solda gösterilmektedir.

**Figure 13.** MONGAN-1 network vertical component records of the earthquake with magnitude 3,4 at 11:05 on 25 October 2017, approximately 15 km east of the network. Instrument effects were removed from the recordings and a filter between 1-40 Hz was applied. The station records are traced along a line in the NS direction and the depth section of the line is shown on the left.

Şekil 14'te H/V analizlerinden elde edilen zemin hakim (rezonans) frekansları ( $f_0$ ) haritalanmıştır. Görüldüğü gibi fayın kuzeyinde yer alan sert kaya blokta rezonans frekansları güneydekilere göre belirgin oranda daha yüksektir. Farklı fiziksel özelliklere sahip kuzey ve güney blok yapısı H/V

analizlerinde açık olarak ortaya çıkmaktadır. Güneye doğru zemin rezonans frekanslarının küçülmesi ana kaya üzerindeki düşük hızlı sediman örtü kalınlığının giderek arttığına işaret eder.



**Şekil 14.** 24 saatlik veri kullanılarak H/V yöntemiyle elde edilen zemin hakim frekans ( $f_0$ ) dağılımı. Artı sembolleri istasyon lokasyonlarını gösterir.

**Figure 14.** Ground dominant frequency ( $f_0$ ) distribution obtained by H/V method using 24-hour data. Plus symbols indicate station locations.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Geçici olarak tasarlanan sismik ağların kayıt performanslarının düşük kalmasının ve çevresel faktörlerden daha fazla etkilenmelerinin başlıca nedeni, istasyonların hızlı ve düşük maliyetle konumlandırma gereksinimidir. İstasyon yerlerinin mümkün olduğunca kültürel gürültüden uzak seçilme isteği, istasyonların güvenlik problemleriyle karşılaşma sorunu doğurur. İstasyonların online veri taşıma maliyetlerinin karşılanamaması, offline kayıt almaya yöneltir, fakat bu kez de arızalara hızlı müdahale edebilme şansı ortadan kalkar. Tüm bu koşullar altında MONGAN deprem izleme ağı, özellikle Mark 1 Hz sensör ve EDL kayıtcı istasyonlarında beklenenin altında bir kayıt performansı ile karşılaşmıştır. Buna karşın, Geophone 4,5 Hz ve CUBE kayıtcı

bulunan istasyonlar, kullanım kolaylığı, düşük arızalanma özelliği ve düşük enerji tüketimleriyle bu tür geçici ve lokal deprem izleme çalışmaları açısından son derece tatmin edici sonuçlar üretmişlerdir. Sensörlerin içsel gürültülerinin doğal frekanslarının çok daha aşağısında etkin olmaya başladıkları, 0,3-0,5 Hz'e kadar sağlıklı kayıt alabileceklerini göstermektedir. İstasyonlarda -150 dB seviyelerine kadar inen çevresel gürültü genlikleri, lokal mesafelerde negatif büyüklüğe kadar depremlerin yakalanabileceğinin işaretidir. Ganos Fayı'nın iki malzemeli fay yapısı, farklı bloklar üzerinde yer alan istasyon kayıtlarında açık olarak etkilerini göstermektedir. Fay zonu boyunca dönüşmüş fazlar, kayıt süreleri ve genlik farklılıkları, istasyonların zemin rezonans



frekansındaki değişimler fay zonunu oluşturan iki malzemeli bir yapının açık göstergeleridir.

#### KATKI BELİRTME

MONGAN ağın kurulması aşamasında katkılarından dolayı Patricia Martinez Garzon'a, Virgine Durand'a Amandine Amemoutou'ya, Felix Kastner'e teşekkür ederiz. Arazi çalışmalarına destek sağlayan AFAD Başkanlığına ve Deprem Dairesi Başkanı Dr. Murat NURLU'ya teşekkür ederiz. Bu çalışma TÜBİTAK 118R019 nolu proje tarafından desteklenmektedir. Şekil 1 ve Şekil 2 çiziminde GMT5 (Wessel vd., 2013) programı kullanılmıştır.

#### KAYNAKLAR

- Aksoy, M.E., 2021. The 9 August 1912 Mürefte-Şarköy earthquake of the North Anatolian fault. *Med. Geosc. Rev.*, 3, 95–114. <https://doi.org/10.1007/s42990-021-00050-z>
- Aksoy M.E., Meghraoui, M., Vallee, M., Cakir, Z., 2010. Rupture characteristics of the A.D. 1912 Murefte (Ganos) earthquake segment of the North Anatolian fault (western Turkey). *Geology*, 38, 991–994.
- Allam, A.A., Ben-Zion, Y., Peng, Z. 2014. Seismic imaging of a bimaterial interface along the Hayward Fault, CA, with Fault Zone Head Waves and direct P arrivals. *Pure and Applied Geophysics* 171(11), 2993-3011. doi:10.1007/s00024-014-0784-0
- Altunel, E., Barka, A., Akyüz, S. 2000. Slip distribution along the 1912 Mürefte-Şarköy earthquake, the North Anatolian Fault, Western Marmara. In: Barka A, Kozacı Ö, Akyüz S, Altunel E (eds) *The 1999 Izmit and Düzce earthquakes: preliminary results*. ITU Publications, Istanbul, pp 341–349.
- Altunel, E., Meghraoui, M., Akyüz, H.S., Dikbaş, A. 2004. Characteristics of the 1912 co-seismic rupture along the North Anatolian fault zone (Turkey): implications for the expected Marmara

earthquake. *Terra Nova* 16, 198–204. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00552.x>

- Ampuero, J.-P., Ben-Zion, Y. 2008. Cracks, pulses and macroscopic asymmetry of dynamic rupture on a bimaterial interface with velocity-weakening friction. *Geophysical Journal International* 173(2), 674-692.
- Armijo, R. vd. 2005. Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in Istanbul. *Geochem Geophys Geosystems* 6, Q06009. <https://doi.org/10.1029/2004GC000896>
- Andrews, D.J. 2005. Rupture dynamics with energy loss outside the slip zone. *J. Geophys. Res.* 110, B01307, doi:10.1029/2004JB003191.
- Ben-Zion, Y. 1989. The response of two joined quarter spaces to SH line sources located at the material discontinuity interface. *Geophys. J. Int.* 98, 213–222.
- Ben-Zion, Y. 2001. Dynamic ruptures in recent models of earthquake faults. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 49(9). 2209-2244.
- Ben-Zion, Y., Peng Z., Okaya, D., Seeber, L., Armbruster, J.G., Ozer, N., Michael, A.J., Baris, S., Aktar, M. 2003. A shallow fault-zone structure illuminated by trapped waves in the Karadere–Duzce branch of the North Anatolian Fault, western Turkey. *Geophysical Journal International* 152(3), 699-717.
- Ben-Zion, Y., Shi, Z. 2005. Dynamic rupture on a material interface with spontaneous generation of plastic strain in the bulk. *Earth and Planetary Science Letters* 236(1–2), 486-496. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.025.
- Bohnhoff, M., Martínez-Garzón, P., Bulut, F., Stierle, E., Ben-Zion, Y. 2016. Maximum earthquake magnitudes along different sections

- of the North Anatolian fault zone. *Tectonophysics* 674, 147–165. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.02.028>
- Bormann, P. 1998. Conversion and comparability of data presentations on seismic background noise. *Journal of Seismology* 2, 37–45. <https://doi.org/10.1023/A:1009780205669>
- Brietzke, G.B., Ben-Zion, Y. 2006. Examining tendencies of in-plane rupture to migrate to material interfaces. *Geophysical Journal International* 167(2). 807-819, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03137.x
- Bulut, F., Ben-Zion, Y., Bohnhoff, M. 2012. Evidence for a bimaterial interface along the Mudumu segment of the North Anatolian Fault Zone from polarization analysis of P waves. *Earth and Planetary Science Letters* 327, 17-22.
- de Michele, M., Ergintav, S., Aochi, H., Raucoules, D. 2017. An L-band interferometric synthetic aperture radar study on the Ganos section of the north Anatolian fault zone between 2007 and 2011: Evidence for along strike segmentation and creep in a shallow fault patch. *PLoS ONE* 12(9): e0185422. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185422>
- Ergintav, S. vd. 2014. Istanbul's earthquake hot spots: Geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap. *Geophys Res Lett* 41, 5783–5788. <https://doi.org/10.1002/2014G L060985>
- Havskov, J., Ottemoller, L. 1999. SeisAn Earthquake Analysis Software. *Seismological Research Letters*, 70(5), 532–534. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.5.532>
- Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Boušková, A., Bohnhoff, M. 2016. Shallow crustal discontinuities inferred from waveforms of microearthquakes: Method and application to KTB Drill Site and West Bohemia Swarm Area. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121, 881–902. <https://doi.org/10.1002/2015JB012548>
- Janssen, C., Bohnhoff, M., Vapnik, Y., Görgün, E., Bulut, F., Plessen, B., Pohl, D., Aktar, M., Okay, A.I., Dresen, G. 2009. Tectonic evolution of the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NW Turkey). *J. Struct. Geol.* 31(1), 11–28.
- Karabulut, H., Roumelioti, Z., Benetatos, C., Kömec, A., Özalaybey, S., Aktar, M., Kiratzi, A. 2006. A source study of the 6 July 2003 (Mw 5.7) earthquake sequence in the Gulf of Saros (Northern Aegean Sea): Seismological evidence for the western continuation of the Ganos fault. *Tectonophysics* 412, 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.09.009>
- Karaş M., Tank, B.S., Özaydın, S. 2017. Electrical conductivity of a locked fault: investigation of the Ganos segment of the North Anatolian Fault using three-dimensional magnetotellurics, *Earth, Planets and Space* 69, 107. DOI 10.1186/s40623-017-0695-2
- Le Pichon, X., Kreemer, C., Chamot-Rooke, N. 2005. Asymmetry in elastic properties and the evolution of large continental strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110, 1978– 2012.
- McNamara, D.E., Buland, R.P. 2004. Ambient noise levels in the Continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(4), 1517–1527. <https://doi.org/10.1130/G3144.7.1>
- Meghraoui, M., Aksoy, M.E., Akyüz, H.S., Ferry, M., Dikbaş, A., Altunel, E. 2012. Paleoseismology of the North Anatolian Fault at Güzelköy (Ganos segment, Turkey): size and recurrence time of earthquake ruptures west of the Sea of Marmara. *Geochem Geophys Geosyst* 13, Q04005. <https://doi.org/10.1029/2011G C003960>

- Motagh, M., Hoffmann, J., Kampes, B., Baes, M., Zschau, J. 2007. Strain accumulation across the Gazikoy–Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters* 255, 432–444.
- Najdahmadi, B., Bohnhoff, M., Ben-Zion, Y. 2016. Bimaterial interfaces at the Karadere segment of the North Anatolian Fault, northwestern Turkey. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121. doi:10.1002/2015JB012601
- Najdahmadi, B., Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Bohnhoff, M. 2018. Imaging the Mudurnu segment of the North Anatolian Fault Zone from waveforms of small earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JB015198>
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research* 30, 25-33.
- Öztürk, Y.K., Özel, N.M., Özbakir, A.D. 2015. States of local stresses in the Sea of Marmara through the analysis of large numbers of small earthquakes. *Tectonophysics* 665, 37-57. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.09.027>
- Peterson, J. 1993. Observation and modeling of seismic background noise. *U.S. Geol. Surv. Tech. Rept.* 93-322, 1–95.
- Qiu, H., Ben-Zion, Y., Ross, Z., Share, P.E., Vernon, F. 2017. Internal structure of the San Jacinto fault zone at Jackass Flat from data recorded by a dense linear array. *Geophysical Journal International* 209(3), 1369-1388.
- Rasmussen, T. 2019. Comparison of 4.5 Hz geophones and a broadband seismometer in a real field deployment, Master Thesis, <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/90292>.
- Riedesel, M.A., Orcutt, J.A., Moore, R.D. 1990. Limits of sensitivity of inertial seismometers with velocity transducers and electronic amplifiers. *Bulletin of the Seismological Society of America* 80(6A), 1725–1752.
- Ringler, A.T., Anthony, R.E., Karplus, M.S., Holland, A.A., Wilson, D.C. 2018. Laboratory tests of three Z-Land Fairfield Nodal 5-Hz, three-component sensors. *Seismological Research Letters* 89(5), 1601–1608. doi: <https://doi.org/10.1785/0220170236>
- Rockwell, T.K., Barka, A., Dawson, T., Akyüz, S., Thorup, K. 2001. Paleoseismology of the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolia fault, northwestern Turkey: comparison of the historical and paleoseismic records, implications of regional seismic hazard, and models of earthquake recurrence. *J. Seismol.* 5, 433–448. <https://doi.org/10.1023/A:1011435927983>
- Rubin, A.M., Gillard, D. (2000). Aftershock asymmetry/rupture directivity among central San Andreas fault microearthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105, 1978–2012.
- Sevim, F., Zor, E., Açıkgöz, C., Tarancıoğlu, A. 2018. Ambient noise levels and characterization in Aegean region, Turkey. *J. Seismol.* 22, 499–518 <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9720-y>
- Schmittbuhl, J., Karabulut, H., Lengliné, O., Bouchon, M. 2016. Seismicity distribution and locking depth along the Main Marmara Fault, Turkey. *Geochem Geophys Geosyst* 17(3), 954–965.
- Strollo, A., Parolai, S., Jäckel, K.H., Marzorati, S., Bindi, D. 2008. Suitability of short-period sensors for retrieving reliable H/V peaks for frequencies less than 1 Hz. *Bulletin of the Seismological Society of America* 98(2), 671–681. doi: 10.1785/0120070055.

- Tüysüz, O., Barka, A., Yiğitbaş, E. 1998. Geology of the Saros graben and its implications for the evolution of the North Anatolian fault in the Ganos-Saros region, northwest Turkey. *Tectonophysics* 292, 105–126.
- Uçarkuş, G., Çakır, Z., Armijo, R. 2011. Western termination of the Mw 7.4, 1999 İzmit earthquake rupture: Implications for the expected large earthquake in the Sea of Marmara. *Turkish J. Earth Sci.* 20, 379–394.
- Wdowinski, S., Smith-Konter, B., Bock, Y., Sandwell, D. 2007. Diffuse interseismic deformation across the Pacific–North America plate boundary. *Geology* 35(4), 311-314.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J., Wobbe, F. 2013. Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Trans. AGU*, 94(45), p. 409–410. doi:10.1002/2013EO450001.
- Yalçınkaya, E., Bohnhoff, M., Görgün, E., Alp, H., Bentz, S., Pınar, A., Alver, F., Kılıçarslan, Ö., Tamtaş, B.D., Görgün, B. 2022. Ganos Fayı güncel deprem etkinliğinin değerlendirilmesi: MONGAN ağı test analizleri. *MTA Dergisi*, sunuldu.
- Zaliapin, I., Ben-Zion, Y. 2011. Asymmetric distribution of aftershocks on large faults in California. *Geophysical Journal International* 185(3), 1288-1304.



## Usability Assessment of Different Contact Models for Modelling the Failure Behaviour of Sedimentary Rocks Under Unconfined Stress Conditions

*Sedimanter Kayaçların Tek Eksenli Gerilme Koşullarında Yenilme Davranışlarının Modellenmesi için Farklı Temas Modellerinin Kullanılabilirliklerinin Değerlendirmesi*

ENES ZENGİN <sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği, Kütahya, Türkiye

Geliş (received): 30 Kasım (November) 2021 Kabul (accepted): 26 Ocak (January) 2022

### ABSTRACT

The methods applied in rock material and rock mass studies related to rock mechanics have begun to differentiate with computational and software technology development in recent years. Particle Flow Code software, which is based on the discrete element method, is used in many studies on rock mechanics. Using Particle Flow Code, rock behaviour under different stress conditions can be modelled and analysed in both two and three dimensions. Rocks can be presented by an assembly of disks in two dimensions and spherical particles in three dimensions. These particles are bonded to each other by contact models with different micro-mechanical properties. Model failure occurs as a result of the fracturing with the rupture of these bonds. Using parameters such as density, strength, deformation, which can be defined as the mathematical expression of the natural properties of rock samples, a representative models can be created by following multi-stage calibration procedure and used for different research purposes. In order to have a representative model, chosen contact models should be mimic the failure behaviour of the rock material. For this purpose, calibrated models were created for both PBM (Parallel-bonded model) and FJM (Flat-jointed model) using the experimental results of the unconfined compressive strength test of Hawkesbury sandstone in the laboratory. In the calibration phase, the results obtained from the models were compared against micromechanical data obtained from the laboratory experiments such as elasticity modulus, uniaxial compressive strength, tensile strength, and Poisson ratio. Results were evaluated by considering the displacement vectors, force chains, and crack parameters in terms of resolution and representativeness of the failure behaviour. The results of PBM and FJM model results were similar for displacement vector direction and orientation and distribution of the forces effective in breaking the bonds which is force chain. However, in terms of fracture resolution and localization, FJM provides detailed results, of which could be very useful for comprehensive studies.

**Keywords:** Hawkesbury sandstone, failure behavior, parallel-bond model, flat-joint model, Particle Flow Code

**ÖZ**

*Kaya mekaniği ile ilgili hem kaya malzemesi hem de kaya kütlesi ölçeğinde yapılan çalışmalarda uygulanan yöntemler son yıllarda gelişen hesaplama ve yazılım teknoloji ile birlikte farklılaşmaya başlamıştır. Ayrık elemanlar yöntemini temel alan Particle Flow Code yazılımı kaya mekaniği ile ilgili birçok çalışmada kullanılmaktadır. Particle Flow Code ile kayaların farklı gerilme koşulları altındaki davranışları hem iki hem de üç boyutlu olarak modellenilebilir ve analiz edilebilir. Kayalar iki boyutta diskler, üç boyutta ise küresel tanecikler kullanılarak oluşturulurlar. Bu tanecikler ise birbirlerine farklı mikro mekanik özelliklere sahip olan temas modelleri ile bağlanırlar. Oluşturulan bu bağların kopması ile meydana gelen çatlakların sonucu olarak modelde yenilme meydana gelir. Kaya örneklerinin doğal özelliklerinin sayısal ifadesi olarak tanımlanabilecek yoğunluk, dayanım, deformasyon gibi parametreler kullanılarak çok aşamalı kalibrasyon adımlarının ardından oluşturulan modeller farklı gerilim koşulları altındaki kaya davranışına yönelik çalışmalar yapılabilmektedir. Kalibre edilmiş ve temsil edici bir modele sahip olabilmek için seçilen bağ modelinin kaya malzemesinin yenilme davranışını tam olarak yansıtması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda Hawkesbury kumtaşına ait olan tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçları kullanılarak hem PBM (Paralel-bonded model) hem de FJM (Flat-jointed model) için birer tane olmak üzere iki tane kalibre edilmiş model oluşturulmuştur. Kalibrasyon aşamasında modellerden elde edilen sonuçlar, elastisite modülü, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve Poisson oranı gibi laboratuvar deneylerinden elde edilen mikromekanik verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yer değiştirme vektörleri, kuvvet zincirleri ve çatlak çözünürlükleri parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. PBM ve FJM kullanılarak oluşturulan modeller yer değiştirme vektörleri ve kuvvet zincirleri açısından benzerlik göstermiştir. Bununla birlikte çatlak çözünürlüğü açısından FJM, PBM'e göre çatlak çözünürlüğü ve lokalizasyonu açısından daha detaylı ve kapsamlı veri sunması nedeniyle yenilme davranışının analiz edilmesinde ve sedimanter kayalara yönelik modelleme çalışmalarında kullanılabilirlik açısından öne çıkmaktadır.*

**Anahtar kelimeler:** *Hawkesbury kumtaşı, yenilme davranışı, parallel-bond model, flat-joint model, Particle Flow Code*

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1030332>

\*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: enes.zengin@dpu.edu.tr

**INTRODUCTION**

The mechanical behavior of rocks is fundamentally controlled by their microstructure and inherit properties on a material scale. Especially on laboratory tests, obtained results are a simplified numeric representation of rock's internal composition and structure such as mineralogy, grain size, pores, and flaws, which are the main reasons for the crack formation that leads to the ultimate failure of rock material. Considering this complex and heterogonous structure of the rock material, it has been defined that rocks act like a cemented granular material of complex-

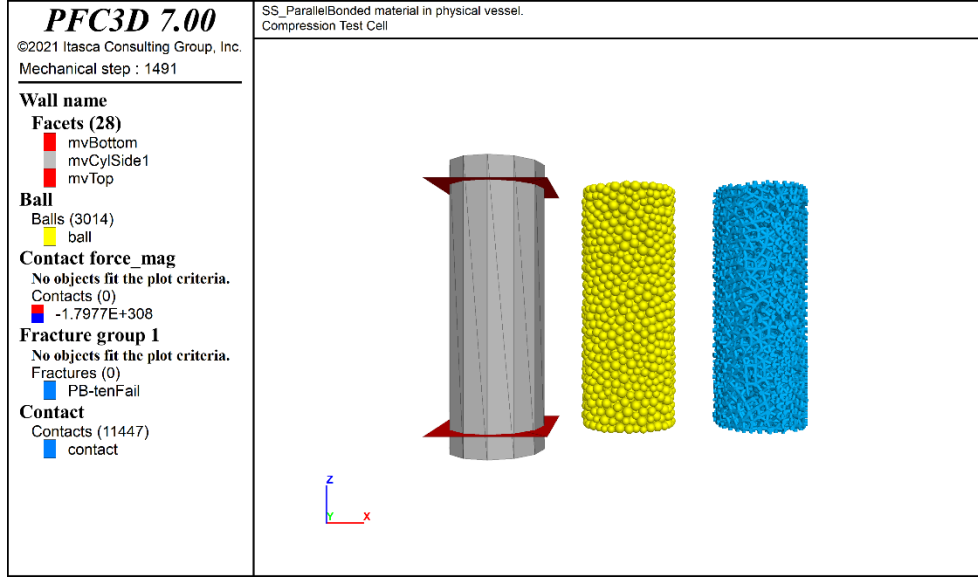
shaped grains in which both the grains and the cement are deformable and may break to develop a representative numerical model for rock behavior on both micro and macro scale (D. O. Potyondy and Cundall, 2004). As a result of this approach, the bonded-particle model (BPM), which depicts the behavior of rocks under different stress conditions in both two and three dimensions. BPM has been extensively used in rock mechanics investigations since it was proposed (Castro-Filgueira et al., 2017; Hazzard et al., 2000; Mas Ivars, 2010; Vallejos et al., 2016). Since then, the BPM has provided a scientific instrument to

investigate the micro-mechanisms that couple to produce complex macroscopic behaviors. Many detailed studies have been carried out to understand the cracking phenomena within the rocks to explain the failure evolution (Bieniawski, 1967a, 1967b; Hallbauer et al., 1973; Kranz, 1979). Experimental investigations propound that most of the compression-induced cracks nucleate around the rocks inherent natural weak spots like grain boundaries, cavities, gaps, pores. In order to model the behavior of rocks with numerical analysis methods, BPMs should be able to mimic the rock's complex structure under different stress conditions. Based on this theory, a general-purpose distinct-element modeling framework Particle Flow Code (PFC), was developed and distributed by ITASCA (D. O. Potyondy, 2017, 2018; D. O. Potyondy and Cundall, 2004). PFC models simulate the interaction and movement of finite-sized particles under Newton's laws of motion. During the simulation, particles can be moved independently depending on their bond status, translate, and rotate. It is also possible to create granular models using the same fundamental approach except for strong bonds between particles. Fundamentally, the PFC simulates the movement of particles and their mechanical interaction at pair-wise contacts. These particles could be defined as disks in 2D and spheres in 3D with finite mass and surface, named balls. Also, walls that are linear segment in 2D and triangles in 3D are used to both create assembly and perform numerical laboratory tests such as frictionless loading platens. A bonded assemble can be created by bonding particles with defining a specific contact model. A simple PFC model includes balls for rock grains, walls to create assembly implement fractures, apply load and contacts to create a bonded assembly (Figure 1). There

are several key points and assumptions that need to know about BMP;

1. Each particle (Circular in 2D, Spherical in 3D) is a rigid body and has a finite mass.
2. The particle can move, translate or rotate independently from each other. Particles only interact with each other on contact points.
3. Bonds between particles can carry the load and break depending on their micromechanical parameters, which represent the rock material's macroscopic properties.
4. Newton's laws apply during the model simulation.

The most crucial component of a PFC model is the contacts. Contacts are the bodies that bond balls and create a bonded assembly with their own unique micro mechanic properties and carry the load at a certain specific point until they break. A new crack called fracture is formed in every bond breakage depending on the increase in load. The collection of fractures form of failure planes. Therefore, it is crucial to define contact model properties which store in the "Contact Model Assignment Table (CMAT)" to mimic rock failure under load. In rock mechanics modeling studies, sedimentary rocks are preferred in terms of their less heterogeneous structure and predominant composition of similar minerals. For this purpose, Hawkesbury sandstone test results were used to create the PFC model and investigate the performance of PBM and FJM to represent the failure behavior of the rock material. Hawkesbury sandstone has been studied extensively in the literature and there is open-source access to the experimental results (Ord et al., 1991; Pells, 2004, 2017; Ranjith et al., 2012). In order to evaluate the usability and performance of the models created by using PBM and FJM under unconfined stress



**Figure 1.** Main components of PFC model; i) Walls (on left, red, and grey), ii) Balls (center, yellow) and iii) Contacts (right, blue).

**Şekil 1.** PFC modelinin temel bileşenleri; i) Duvarlar (solda, kırmızı ve gri), ii) Tanecikler (ortada, sarı) ve iii) Bağlar (sağda, mavi).

conditions, a complex calibration process has been followed. To evaluate the usability and performance of PBM and FJM under unconfined stress conditions, a complex calibration process has been followed for both contact models separately. The behavior of these models was investigated in detail after achieving a calibrated state.

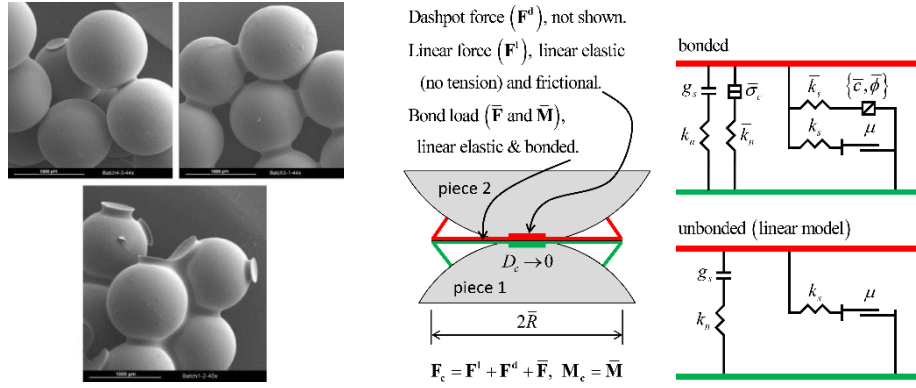
## DEFINITION OF CONTACT MODELS

### Parallel-Bonded Model

The fundamental theory behind the PBM is the mechanical behaviour of a finite-sized piece of cement-like material between two contacting pieces. This behaviour was represented by epoxy cementing the glass beads (Figure 2). A parallel bond can be described as a set of elastic springs having normal and shear

stiffnesses, uniformly scattered over a cross-section lying on the contact plane and centred at the contact point. These cross-sections are rectangular in 2D and circular in 3D. These springs behave in parallel with the springs of the linear component. As a result of motion at the contact due to stress change following the creation of the contact leads to a developing of force and moment within the bond material. This force and moment exploit on the two contacting pieces and can be related to maximum normal and shear stresses acting within the bond material at the bond perimeter. If any of the maximum normal or shear stresses acting over the bond will exceed the bond strength, the parallel bond breaks, and its effect is removed from the model in terms of force, moment and stiffness PBM provides the





**Figure 2.** SEM image of the picture epoxy-cemented glass bead sample (Holt et al., 2005), Behavior and rheological components of the PBM-Based with inactive dashpots (D. O. Potyondy & Cundall, 2004).

**Şekil 2.** Epoksi ile çimentolanmış cam kürelerinin SEM görüntüsü (Holt et al., 2005), Etkin olmayan PBM'in davranışı ve reolojik bileşenleri (D. O. Potyondy & Cundall, 2004).

behaviour of both frictional and bonded interfaces. The frictional interface is infinitesimal, linear elastic with no tension, and carries force. The bonded interface is a finite-size, linear elastic and carries moment (D. O. Potyondy & Cundall, 2004).

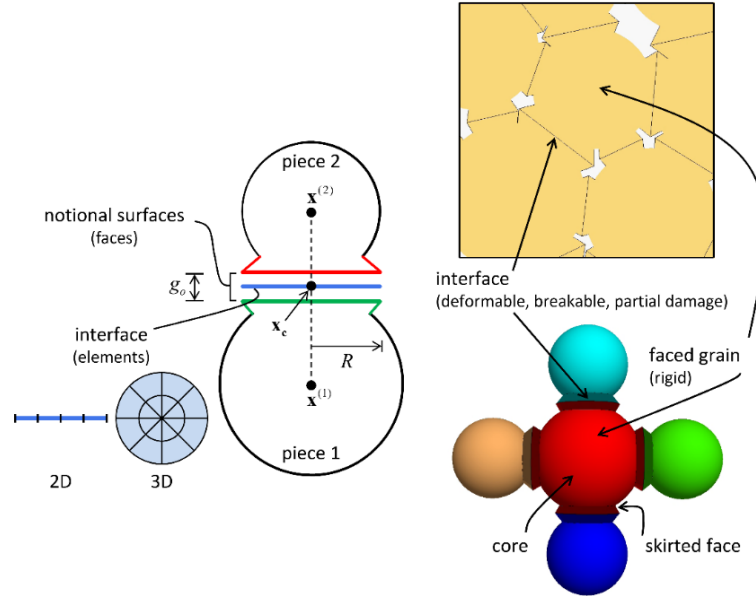
#### Flat-Jointed Model

The FJM provides the macroscopic behaviour of a finite-size, linear elastic, and either bonded or frictional interface that may maintain partial damage. FJM was introduced by (D. O. Potyondy, 2012) and its simplified illustration is given in Figure 3. FJM imitates the microstructure of angular, interlocked grains, which can be pretty similar to marble microtexture and structure; after all, usage of FJM is not limited to marble-like rocks and could be implemented for all types of rocks. The FJM interface is discretized into different elements. Each element can be bonded or unbonded, and the breakage of each bonded element contributes partial damage to the interface. A

model created by using FJM behaves like a linear elastic until the strength limit exceeds. At that critical point, bond breaks, and the model behaves like unbonded, linear elastic, and frictional with slip in terms of Columb limit on the shear force. Every element of the model carries force and moment and follows the force-displacement law and the model's response obeys that depiction.

#### Calibration of Synthetic Rock Material

The creation of the representative synthetic rock model (SRM) is one of the biggest challenges of numerical studies in rock mechanics. A calibrated model should mimic the complex behaviour of rock under different stress conditions and produce a reliable response. The very first step of creating SRM is the calibration process. The main requirement for the calibration process is to have extensive knowledge about e about rock



**Figure 3.** Simplified illustration of FJM (Flat-joint model) (left) and material (right) (D. O. Potyondy, 2012).

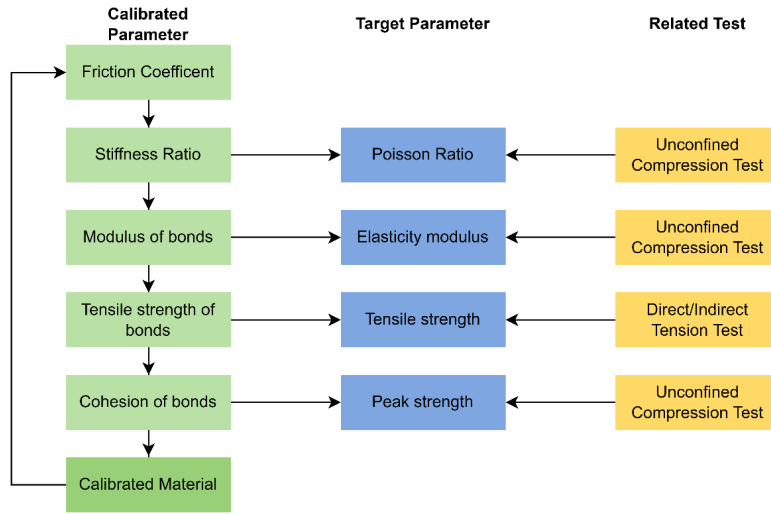
**Şekil 3.** FJM (solda) ve malzemenin (sağda) basitleştirilmiş illüstrasyonu (D. O. Potyondy, 2012).

behaviour and the results of laboratory tests like unconfined compressive strength, direct/indirect tension, and triaxial under different confining pressures. There are multiple micro-mechanical parameters in PFC that differ depending on the chosen contact model. The primary purpose in the calibration phase is to have a model which can achieve the results obtained from the laboratory experiments. A representative model is tried to be obtained by constantly changing the micro-mechanical parameters, a simple approach of continuous back-engineering. The most crucial micromechanical parameters are the modulus, cohesion, tension strength, friction angle, and the stiffness of the bonds. Both BPM and FJM have similar micro-mechanical parameters.

There are multiple suggested calibration flow for the PFC model (Castro-Filgueira et al., 2016; D. Potyondy, 2019; D. O. Potyondy and Cundall, 2004; Schöpfer et al., 2009; Wu and Xu, 2016). The calibration steps used in this study are given in Figure 4, considering the proposed flow by other studies.

### NUMERICAL MODELLING OF HAWKESBURY SANDSTONE

In this study, experimental results of Hawkesbury sandstone were used (Ord et al., 1991; Pells, 2004; Ranjith et al., 2012). Hawkesbury sandstone is a homogeneous medium-grained sandstone from Gosford, New South Wales, Australia, and it is typically massive and predominantly consists of sub-



**Figure 4.** The flow chart of the calibration process.

**Şekil 4.** Kalibrasyon işleminin akış şeması.

angular quartz grains. In addition, the target mechanical parameters used in this study can be listed as follows; elasticity modulus is 1.01 GPa, unconfined compressive strength is 36.51 MPa, and tensile strength is 3.40 MPa. Detailed and complex calibration steps were followed to achieve the mechanical properties derived from laboratory results. Calibrated micro-mechanical parameters for both PBC and FJMs are given in Table 1 and comparison with laboratory results are given in Table 2 and Figure 5. UCS tests were applied by using pre-defined FISH scripts embedded within the PFC. Load was controlled with 0.0003 mm/s constant strain rate in the vertical direction during the test until the occurrence of the ultimate failure. The tests were continued until a 20% drop in the peak strength value of the model throughout the simulation. In addition, stress and deformation values and the number and type of cracks occurring in the model during the experiment were recorded for further analysis. Similarly, direct tension tests were performed to calibrate the model tension behaviour. In order to apply direct tension on

the model, grip grains were defined for balls on the top and bottom of the model to behave like a wall to apply tension. As in UCS, tension was controlled with 0.0003 mm/s constant strain rate and continued until a 20% drop in the tension strength.

#### Sensitivity Analysis

In order to ensure that the results of the models are irrespective of the numerical resolution, a detailed sensitivity analysis was carried out on the model samples. In this regard, five model packings presented in Figure 6 are generated in the same dimension (D: 54 mm, L: 135 mm) but in different particle numbers (24222, 7193, 3014, 1550, 629 respectively) and are subjected to same compressive loading condition. It is worth noting that all models have the exact same micro-mechanical parameters provided in Table 1. At the end of this simulation process, the second, third and fourth model samples present very similar mechanical properties for both methodologies (PBM and FJM) (Table 3).

**Table 1.** Micromechanical parameters of PBM and FJM used in model calibration.**Tablo 1.** Model kalibrasyonunda kullanılan PBM ve FJM ait mikromekanik parametreler.

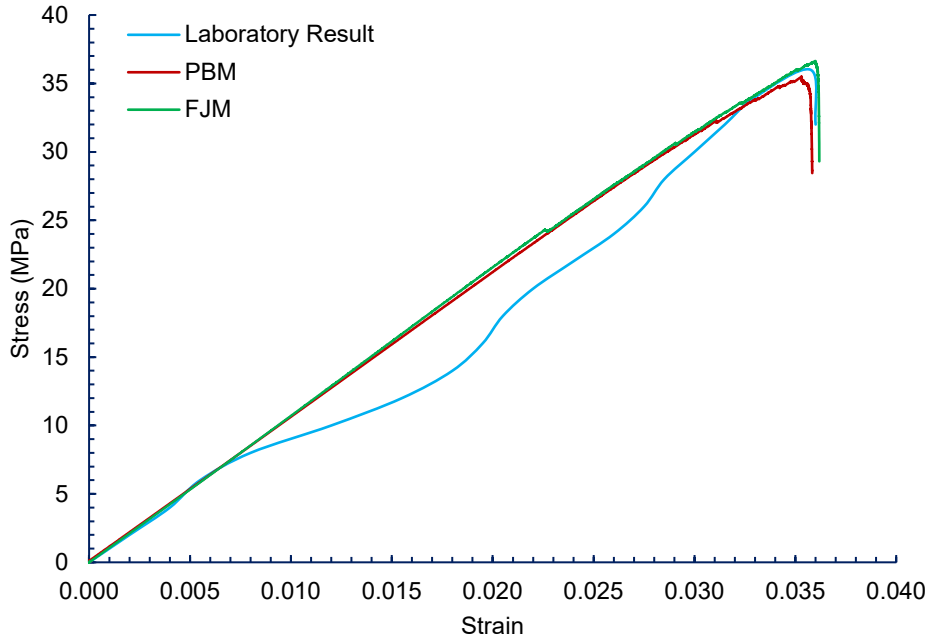
Parameters	Contact Model	Parameter	Calibrated Values
pbm_coh	PBM	Cohesion	18.0e6
fjm_coh	FJM	Cohesion	40.0e6
pbm_bemod	PBM	Effective modulus	0.63e9
pbm_emod	PBM	Effective modulus	0.63e9
fjm_emod	FJM	Effective modulus	1.30e6
pbm_fa	PBM	Friction angle	0
fjm_fa	FJM	Friction angle	0
pbm_fric	PBM	Friction coefficient	0.4
fjm_fric	FJM	Friction coefficient	0.4
pbm_krat	PBM	Stiffness ratio	1.5
fjm_krat	FJM	Stiffness ratio	1.5
pbm_ten	PBM	Tensile strength	3.70e6
fjm_ten	FJM	Tensile strength	5.20e6

**Table 2.** Comparison of laboratory and model results.**Tablo 2.** Laboratuvar ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

Parameters	Laboratory	PBM	FJM
Peak strength (MPa)	36.51	35.49	36.64
Tensile strength (MPa)	3.40	3.41	3.46
Modulus of elasticity (GPa)	1.01	1.04	1.06

**Table 3.** Results of the sensitivity analysis.**Tablo 3.** Hassasiyet analizlerinden elde edilen sonuçlar.

Model	# Balls	Peak Strenght (MPa)	Tensile Strenght (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Laboratory		36.51	3.40	1.01
PBM-1	24222	39.87	3.68	1.11
PBM-2	7193	37.16	3.55	1.08
PBM-3	3014	35.49	3.41	1.04
PBM-4	1550	37.74	3.62	1.04
PBM-5	629	32.67	3.46	1.01
FJM-1	24222	42.34	3.53	1.14
FJM-2	7193	36.79	3.77	1.09
FJM-3	3014	36.64	3.46	1.06
FJM-4	1550	35.18	3.75	1.04
FJM-5	629	23.28	3.50	1.02



**Figure 5.** Stress-strain graphs of the Hawkesbury sandstone and the models.

**Şekil 5.** Hawkesbury kumtaşı ve modellerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.

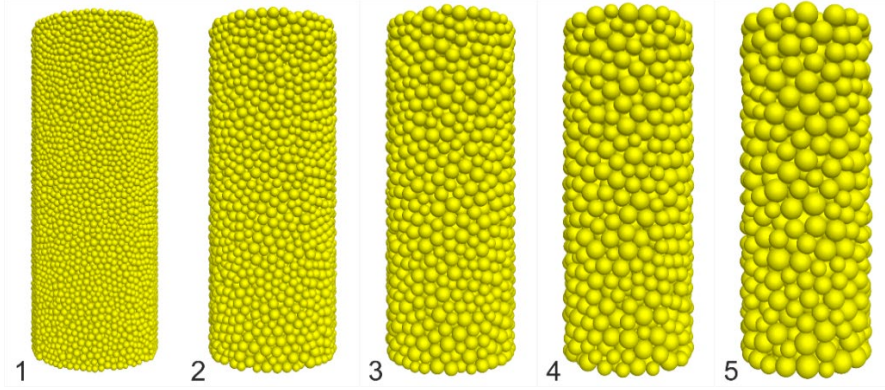
Therefore, to keep the optimum computational time during the simulations, the third model sample with 3014 particle numbers are selected to carry out the analyses in this study.

## RESULTS

In order to assess the usability of different contact models to represent sedimentary rock behaviour under unconfined stress conditions, two models based on PBM and FJM having different micro-mechanical parameters were calibrated to produce the similar macro mechanical properties of Hawkesbury sandstone. The comparison of the stress-strain curves obtained from the unconfined compressive strength tests between numerical predictions and laboratory measurements are given in Figure 6. Obtained results confirm that a successful calibration phase was carried out in terms of elasticity modulus, peak strength, tensile strength, and Poisson ratio. Numerical

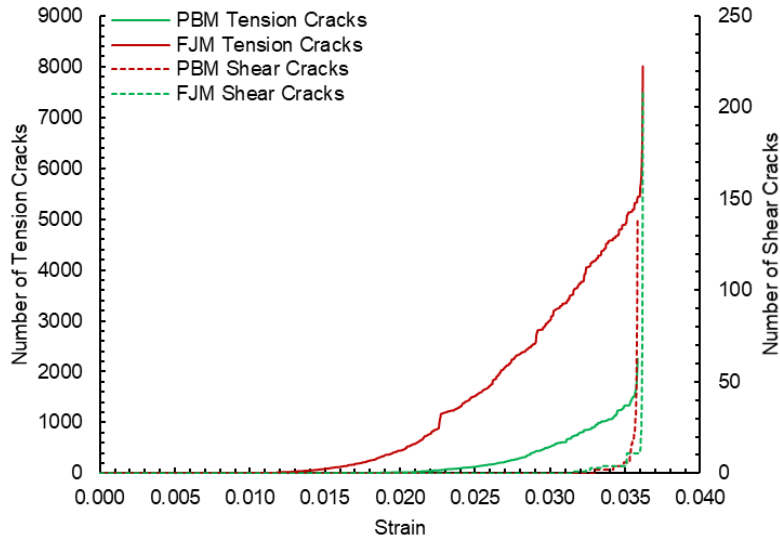
models successfully reproduce the behaviour of rock material. However, at this point, due to the nature of numerical approaches and limitations, it is not possible to mimic the localized stress drop during the initial phase of the test which is also known as crack closure. To create a model to reproduce this behaviour, the mechanical properties of the minerals of the rock should be defined separately, and the resolutions of the model should be increased drastically. Defining the mechanical properties of minerals is a broad subject that needs to be studied entirely separately. Also, increasing the resolution of the model requires having a tremendous computational effort. In this study, every model consists of around 3000 balls and 12000 contacts with around 6-12 hours of computational time. Increasing the resolution causes the computation time to increase in parabolic, up to 120 hours or more.

Shear and tension cracks were recorded from the PBM and FJM at frequent intervals for comprehensive evaluation (Figure 7). The crack numbers given in Figure 6 represent the ruptures that occur as a result of the load applied to model exceeding the strength value



**Figure 6.** Models used in sensitivity analyses (1: 24222 particles, 2: 7193 particles, 3: 3014 particles, 4: 1550 particles, 5: 629 particles).

**Şekil 6.** Hassasiyet analizlerinde kullanılan modeller (1: 24222 tanecik, 2: 7193 tanecik, 3: 3014 tanecik, 4: 1550 tanecik, 5: 629 tanecik).



**Figure 7.** The number of tension and shear cracks in PBM and FJM under unconfined compressive loading.

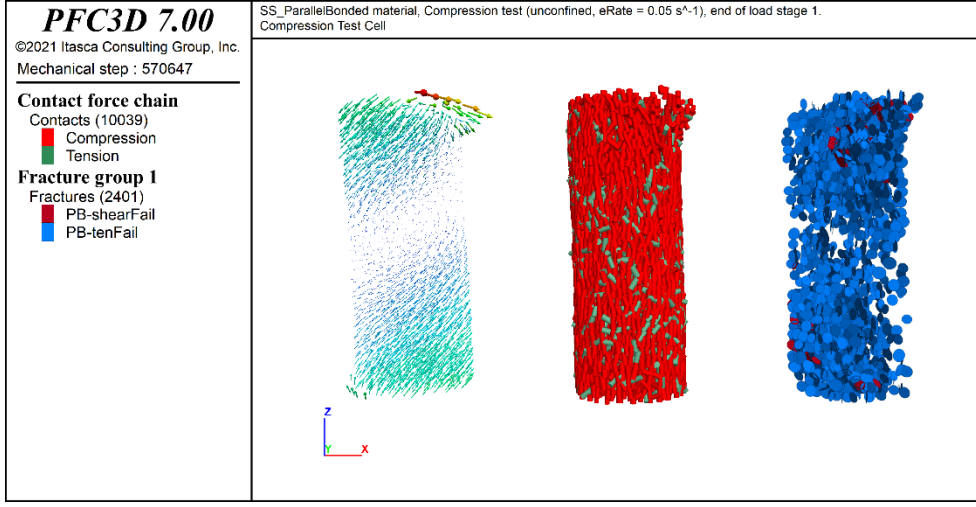
**Şekil 7.** Tek eksenli yükleme koşullarında PBM ve FJM'de meydana gelen çekme ve makaslama çatlaklarının sayısı.

of the bonds. The behaviour of the bonds depending on the applied load is given in the second heading of the paper. Depending on the mechanical definitions of PBM and FJM, their behaviours under load are utterly different from each other. Even if the models are calibrated in terms of elasticity modulus, peak strength, tensile strength, and Poisson ratio, they must also represent failure behaviour derived from the stress-strain response. The crack numbers and types can give an idea to the readers about the mechanisms driven in the sample during loading. This parameter can also be used to compare the failure behaviour of the sample and the model, given in Figure 5. As it can be seen in the laboratory results, failure principally occurred under the effect of tension cracks formed in the direction parallel to the loading direction. Therefore, the number of cracks obtained from the models are mainly of tensile cracks. The total number of cracks formed in the PBM is 2401 and for the FJM is 8218, respectively. The ratio of tensile cracks to the total number of cracks is 94.2% in PBM and 97.5% in FJM. Meanwhile, the number of shear cracks is 5.8% of the total cracks in PBM and 2.5% in FJM emerged mainly prior to the failure. This result can be considered as a numerical expression of failure under the control of tension cracks. In addition, it is seen that from the force chains, models were failed under the dominance of the compressional forces. However, there is no distinctive difference between the two models in terms of force chains.

#### **DISCUSSION AND CONCLUSIONS**

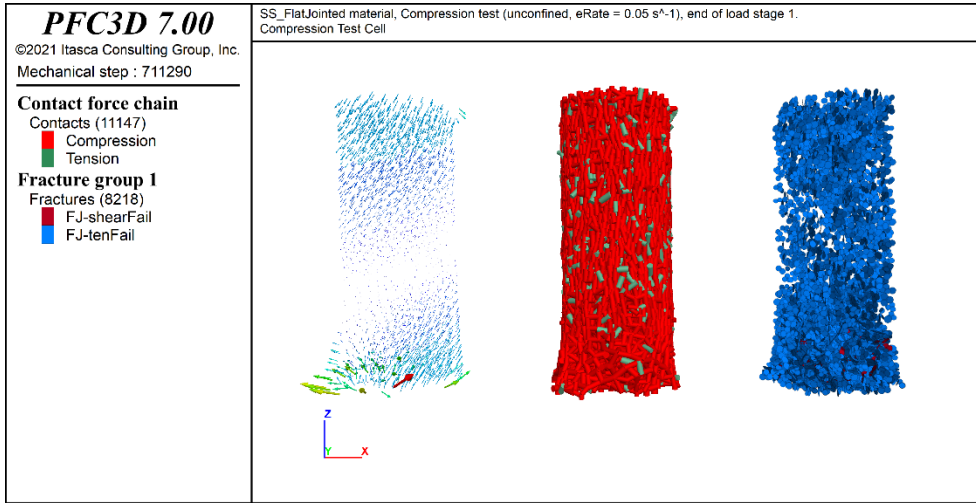
PBM and FJM yielded results consistent with mechanical parameters obtained from laboratory results, such as elasticity modulus, peak strength, tensile strength, and the Poisson ratio. On the other hand, these results

are not sufficient to decide the usability of the contact model in terms of modelling the failure behaviour of sedimentary rocks under unconfined loading conditions. In order to distinguish the PBM and FJM, the model results were analysed in more detail in terms of post-failure conditions, which are given in Figure 7 and Figure 8, respectively. It can be stated that the displacement vectors in both models created by using PBM and FJM are predominantly in the same direction and orientation, with some minor differences between them. This behaviour shows that both models successfully simulate the displacements within the sample. Accurate determination of displacement vectors is crucial because it is a parameter that is frequently used in many small and large-scale geological and geotechnical studies, from tunnelling to hydraulic fracturing (Chiu et al., 2014; Moffat et al., 2015; Verde and Ghassemi, 2015). The extreme displacement values on the top of the PBM and the bottom of the FJM, which can be seen from Figures 8 and 9, emerged due to the rapid free movement of the particles prior to the ultimate failure of the model. In PFC models, the particles move freely until they reach the domain when the bonds forming the model are broken. As a result of the unconfined compression test performed with axial loading, it is seen that both PBM and FJM bonds are carried stress along the entire model surface. It is another critical phenomenon that is essential for evaluating the model response against stress change and variations. The bonds between the spherical particles that form up the model are broken if they are subjected to stress above the strength value. As a result of this particular event, a new fracture occurs. The collection of fractures lead to the failure of the model.



**Figure 8.** Post failure status of the model created by using PBM-Based; a) Displacement vectors, b) Force distributions in bonds, c) Types of cracks.

**Şekil 8.** PBM kullanılarak oluşturulan modelin yenilme sonrası görünümü; a) Yer değiştirme vektörleri, b) Bağlardaki kuvvet dağılımları, c) Çatlakların türleri.



**Figure 9.** Post failure status of the FJM; a) Displacement vectors, b) Force distributions in bonds, c) Types of cracks.

**Şekil 9.** FJM'in yenilme sonrası görünümü; a) Yer değiştirme vektörleri, b) Bağlardaki kuvvet dağılımları, c) Çatlakların türleri.



Tracking fracturing events within the model allow to determine the crack closure, crack initiation and crack closure points which are essential to evaluate the failure behaviour and understand the response of the rock against loading and stress variations which could be very useful for different research topics related to earth sciences. Therefore, the bond model preferred.

In this numerical study, which was carried out using the results obtained from the unconfined compression strength experiments of Hawkesbury sandstone, the usability performance of models (PBM and FJM) was analysed considering the failure behaviour of sedimentary rocks in terms of number of the cracks, displacement vectors and force chains.

The performances of PBM and FJM provide similar results for displacement vectors and force chain parameters. However, FJM provides a more detailed fracturing data structure rather than PBM, exceeding four times in terms of crack resolution. Due to this difference, it has been concluded that FJM is more beneficial for modelling the failure behaviour of sedimentary rocks. In addition to obtained results, it is thought that it would be beneficial to perform laboratory-scale experiments with acoustic emission measurements to study in detail the relationship between cracking in the sample and fracturing in the model and to analyse the performance of the contact models under different stress conditions by performing triaxial compression strength tests under different lateral pressure conditions.

#### ACKNOWLEDGMENT

This research has been supported by Kutahya Dumlupınar University Scientific Research Projects Coordination Office under grant number 2020-09. The author would like to

thank Dr. David Potyondy and Dr. Sacha Emam from Itasca Consulting Group, Inc. for their theoretical and practical support regarding the software used in this study and Dr. Erik Eberhardt for his allowance to use Geological Engineering Advance Computing Laboratory of The University of British Columbia, Faculty of Science, Department of Earth, Ocean and Atmospheric Science. In addition, the reviewers' comments and their contributions to the article are kindly appreciated.

#### REFERENCES

- Bieniawski, Z. T. (1967a). Mechanism of brittle fracture of rock. Part II-experimental studies. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*, 4(4). [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(67\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(67)90031-9)
- Bieniawski, Z. T. (1967b). Mechanism of brittle fracture of rock: Part I—theory of the fracture process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4(4), 395–406. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(67\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(67)90030-7)
- Castro-Filgueira, U., Alejano, L. R., Arzúa, J., & Ivars, D. M. (2017). Sensitivity Analysis of the Micro-Parameters Used in a PFC Analysis Towards the Mechanical Properties of Rocks. *Procedia Engineering*, 191, 488–495 . <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.208>
- Castro-Filgueira, U., Alejano, L. R., Arzúa, J., & Mas Ivars, D. (2016). Numerical simulation of the stress-strain behavior of intact granite specimens with particle flow code. *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*, 1(Itasca), 421–

426.  
<https://doi.org/10.1201/9781315388502-72>
- Chiu, Y. C., Wang, T. T., & Huang, T. H. (2014). A novel characteristic matrix approach for analyzing displacement patterns of tunnels in operation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 72, 117–126.  
<https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2014.09.003>
- Hallbauer, D. K., Wagner, H., & Cook, N. G. W. (1973). Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*, 10(6), 713–726. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(73\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(73)90015-6)
- Hazzard, J. F., Young, R. P., & Maxwell, S. C. (2000). Micromechanical modeling of cracking and failure in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B7), 16683–16697.  
<https://doi.org/10.1029/2000jb900085>
- Holt, R. M., Kjølås, J., Larsen, I., Li, L., Gotusso Pillitteri, A., & Sønstebø, E. F. (2005). Comparison between controlled laboratory experiments and discrete particle simulations of the mechanical behaviour of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(7–8), 985–995.  
<https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2005.05.006>
- Kranz, R. L. (1979). Crack growth and development during creep of Barre granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(1), 23–35.  
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)90772-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)90772-1)
- Mas Ivars, D. (2010). Bonded particle model for jointed rock mass. PhD dissertation. KTH, Stockholm. In KTH-Engineering Geology and Geophysics Research Group (Issue January).
- Moffat, R., Sotomayor, J., & Beltrán, J. F. (2015). Estimating tunnel wall displacements using a simple sensor based on a Brillouin optical time domain reflectometer apparatus.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.10.013>
- Ord, A., Vardoulakis, I., & Kajewski, R. (1991). Shear band formation in Gosford Sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 28(5), 397–409.  
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)90078-Z](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90078-Z)
- Pells, P. J. N. (2004). Substance and Mass Properties for The Design of Engineering Structures in The Hawkesbury Sandstone. *Australian Geomechanics*, 39(3), 1–21.
- Pells, P. J. N. (2017). Engineering properties of the Hawkesbury Sandstone. In *Engineering Geology of the Sydney Region*.
- Potyondy, D. (2019). Material-Modeling Support for PFC [fistPkg6.6]. In Itasca Consulting Group, Inc. (Issues ICG7766-L).  
<https://www.itasca-africa.co.za/software/material-modeling-support-download-files>
- Potyondy, D. O. (2012). A flat-jointed bonded-particle material for hard rock. 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 10.  
<https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2012-501>
- Potyondy, D. O. (2017). Simulating Perforation Damage with a Flat-Jointed Bonded-

- Particle Material. 51st US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2017, 1, 18.
- Potyondy, D. O. (2018). A Flat-Jointed Bonded-Particle Model for Rock. Proceedings 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA 18–12, 1–12. <https://doi.org/>
- Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8 SPEC.ISS.), 1329–1364. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>
- Ranjith, P. G., Viete, D. R., Chen, B. J., & Perera, M. S. A. (2012). Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behaviour of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure. *Engineering Geology*, 151, 120–127. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2012.09.007>
- Schöpfer, M. P. J., Abe, S., Childs, C., & Walsh, J. J. (2009). The impact of porosity and crack density on the elasticity, strength and friction of cohesive granular materials: Insights from DEM modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.03.009>
- Vallejos, J. A., Suzuki, K., Brzovic, A., & Ivars, D. M. (2016). Application of Synthetic Rock Mass modeling to veined core-size samples. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 81(November 2015), 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.11.003>
- Verde, A., & Ghassemi, A. (2015). Modeling injection/extraction in a fracture network with mechanically interacting fractures using an efficient displacement discontinuity method. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.022>
- Wu, S., & Xu, X. (2016). A Study of Three Intrinsic Problems of the Classic Discrete Element Method Using Flat-Joint Model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(5), 1813–1830. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0890-z>



## IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği

### Performance analysis of real-time precise point positioning (RT-PPP) technique using IGS-RTS products: A case study in Antarctica

Reha Metin ALKAN <sup>1</sup>, Serdar EROL <sup>1\*</sup>, Bilal MUTLU <sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Geliş (*received*): 28 Aralık (*December*) 2021 Kabul (*accepted*): 28 Şubat (*February*) 2022

#### ÖZ

Bu çalışmada, 30 ülkenin 100 civarında bilim üssünün bulunduğu Antarktika kıtasında farklı meslek disiplinlerince gerçekleştirilecek çalışmalarda gereksinim duyulan anlık 3-Boyutlu (3B) konum bilgisinin üretilmesinde uydu-bazlı konum belirleme yöntemleri içerisinde yer alan gerçek-zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (RT-PPP) tekniğinin kullanılabilirliği ele alınmıştır. Uygulamada, Türk Antarktik Bilim Üssünün kurulacağı Horseshoe adasına en yakın sürekli gözlem yapan ve ölçülerini gerçek-zamanlı olarak internetten yayınlayan IGS-MGEX Real Time Service (RTS) ağı noktalarından birisi olan OHI300ATA istasyonu verileri kullanılmıştır. RT-PPP tekniğinin performansını değerlendirmek için bu referans istasyonunun her bir ölçme epöğündeki gerçek-zamanlı koordinatları, IGS-MGEX RTS projesi kapsamında çalışmalarını sürdüren analiz merkezlerinden olan Alman DLR ve Fransız CNES kurumları tarafından üretilen çoklu-GNSS gerçek-zamanlı düzeltme ürünleri kullanılarak, farklı uydu konfigürasyonları (GPS; GPS+GLONASS; GPS+GLONASS+Galileo; GPS+GLONASS+Galileo+BDS) için belirlenmiştir. Böylelikle hem farklı GNSS uydu sistemlerinin hem de IGS'in iki farklı analiz merkezinden alınan farklı düzeltme ürünlerinin (hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerinin) RT-PPP çözümleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, RT-PPP çözümüne ardışık olarak ilave edilen GNSS uydu sistemlerinin, tek başına GPS gözlemlerinin kullanımına kıyasla RT-PPP çözüm doğruluğunu iyileştirdiği ve yakınsama süresini kısalttığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak RT-PPP tekniğinin performansının çözüm için kullanılan IGS ürünlerine de bağlı olduğu görülmüştür. Tüm bu bulgular sonucunda, Antarktika kıtasında çoklu-GNSS (multi-GNSS) RT-PPP tekniği ile, çözümde kullanılan IGS Analiz Merkezlerinin düzeltme ürünlerine ve uydu konfigürasyonuna bağlı olarak yaklaşık 10-60 dakika arasında değişen yakınsama süreleri sonrasında, cm ile iki dm arasında değişen doğruluklarla gerçek-zamanlı yatay konum ve yükseklik belirlemenin mümkün olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Antarktika, Kinematik Konum Belirleme, GNSS, Gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP), IGS-RTS, BNC.

**ABSTRACT**

*In this study, the usability of Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) technique, which is one of the satellite-based positioning methods, in the production of 3-Dimensional (3D) position information required for all kinds of studies to be carried out by different disciplines in the Antarctica continent, where there are almost 100 science bases of around 30 countries, was discussed. As a data source, the nearest GNSS station to the Horseshoe island, where the Turkish Antarctic Science Base will be established, OHI300ATA was chosen because it is one of the IGS-MGEX Real Time Service (RTS) network points which makes continuous observations and broadcasts in real-time from the internet. In order to evaluate the performance of the RT-PPP technique, the real-time coordinates of the reference station in each epoch were determined for different satellite configurations (GPS; GPS+GLONASS; GPS+GLONASS+Galileo; GPS+GLONASS+Galileo+BDS) by using multi-GNSS real-time correction products produced by German DLR and French CNES institutions, which are analysis centers working within the scope of the IGS-MGEX RTS project. Thus, the effects of both different GNSS satellite systems and different correction products (precise satellite orbit and clock corrections) taken from two different analysis centers of IGS on RT-PPP solutions were investigated. As a result of the study, it was observed that GNSS satellite systems added to the RT-PPP solution sequentially, improved the RT-PPP solution accuracy and shortened the convergence time compared to the use of GPS-only observations. In addition, it has been revealed that the performance of the RT-PPP technique also depends on the IGS products used for the solution. According to all these findings, it was possible to determine real-time 2D horizontal position and height with a cm to two dm accuracy, respectively in the Antarctica continent by using the multi-GNSS RT-PPP technique, after convergence times ranging from about 10-60 minutes depending on the correction products of the IGS Analysis Centers used in the solution and the satellite configuration.*

**Keywords:** Antarctica, Kinematic Positioning, GNSS, Real-time PPP (RT-PPP), IGS-RTS, BNC.

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1050124>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: erol@itu.edu.tr

**GİRİŞ**

Antarktika Kıtası, keşfinden bu yana geçen yıllar boyunca bilim insanlarının, araştırmacıların, kaşiflerin, turistlerin, gezginlerin ve pek çok farklı grubun yoğun ilgisini çekmiştir. Dünyanın bu beşinci büyük kıtasının yaklaşık %97'si ortalama kalınlığı 1600 metre olan buz tabakasıyla kaplıdır. Bu durum Kıtanın aynı zamanda Dünya yüzeyindeki tatlı suyun %70'ine sahip olmasını da sağlamaktadır. Dünya üzerindeki en soğuk, en izole, en rüzgârlı, en kurak ve en zorlu yaşam koşullarına sahip yer olan çetin Antarktika kıtası, birçok maden yatağına ek olarak dünya petrol ve gaz rezervlerinin de

%25'ine sahiptir. Oldukça zorlu koşullara sahip bu kıtanın da içinde bulunduğu 60 derece güney enleminin daha altındaki tüm bölgeler yıl boyunca 1 uzun gece, 1 uzun gündüz yaşar. Zira bu bölgede Güneş 21 Mart'ta battıktan sonra altı aylık gece süreci başlamaktadır. 23 Eylül'de güneşin doğmasıyla da altı ay sürecek gündüz başlamış olmaktadır. Antarktika kıyılarında, sıcaklıklar genellikle yaz aylarında (Aralık-Şubat) donma noktasına yakın olur. Kış aylarında ise kıyı istasyonlarında aylık ortalama sıcaklıklar -10 °C ile -30 °C arasında değişmektedir (AFI, 2021).

Sahip olduğu pek çok özelliğiyle doğal bir laboratuvar olan Antarktika, bilim dünyasının

her zaman dikkatini çekmiştir. 30 ülkeye ait 100 civarında bilim üssünün bulunduğu kıtada, farklı disiplinlere sahip bilim insanları, Dünyanın bugünü ve geleceğini yakından ilgilendiren iklim, çevre, buzul ve kıyı erozyonları, deniz, jeofizik, sismoloji, tektonik, jeodezik, jeodinamik, biyoloji, tıp ve uzay bilimleri başta olmak üzere diğer birçok bilim dalında çalışmalar ve araştırmalar yapmaktadır.

Bölgede yapılan tüm bu araştırmaların ve faaliyetlerin pek çoğunda konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde her ne kadar klasik yersel ölçme yöntemleri (açı/kenar ve yükseklik farkı ölçmeleri vb.) kolay uygulanabilir olması ve görece düşük maliyeti ile halen yaygın olarak tüm dünyada kullanılıyor olsa da, bu zorlu coğrafyada uygulanmalarının bazı zorlukları ve kısıtları bulunmaktadır. Bunların başında bölgedeki mevcut sert rüzgârlar ve dondurucu soğuklar, nokta tesisindeki güçlükler, 60° güney enleminin daha altındaki bölgelerde yıl boyunca 1 uzun gece, 1 uzun gündüz yaşanması gibi hususlar gelmektedir. Bununla birlikte noktalar arası görüş zorunluluğu gerektirmemesi, hava koşullarından neredeyse bağımsız olması, günün her saatinde ölçme yapılabilmesi gibi unsurlara bağlı olarak uydu-bazlı konum belirleme yöntemlerinden olan Global Navigation Satellite System/Küresel Navigasyon Uydu Sistemlerinden (GNSS) yaygın olarak yararlanılmaktadır. Ancak bu zorlu koşullar GNSS yönteminin uygulanmasında da normal koşullardaki (düşük enlemlerdeki) uygulamalara göre bazı farklılıklar ortaya çıkarmakta ve buna bağlı olarak da konum belirleme performansı olumsuz olarak etkilenmektedir. Örneğin klasik statik rölatif GNSS ölçmelerinde, gezici alıcıya belirli bir mesafede bulunan ve konumu bilinen en az bir referans istasyonu gerekmektedir. Elbette dünyanın pek çok bölgesinde olduğu

gibi Antarktika'da da uluslararası organizasyonların çatısı altında yer alan sürekli gözlem yapan GNSS istasyonları bulunsa da dünyanın diğer bölgelerindekilerle kıyaslanamayacak kadar sayılarının az olması bu istasyonlarla gezici GNSS alıcısı arasındaki baz uzunluklarının yüzlerce km'yi bulmalarına neden olabilmektedir. Bilindiği üzere rölatif yöntemde çözüm yapılabilmesi için referans ve gezici alıcılarda eş zamanlı olarak aynı GNSS uydularına gözlem yapılması gerekmektedir. Antarktika kıtasının bulunduğu coğrafik bölgede GNSS uydularının yörüngelerinin Ekvatorla yaptıkları açıya bağlı olarak, düşük enlemlerdeki bölgelerle kıyaslandığında yüksek açılarla ve uzun sürelerle uydu gözlemlerinin yapılması daha kısıtlı olmakta, buna bağlı olarak da uzun bazlarda güvenilir tamsayı faz başlangıç belirsizliği (ambiguity-fixed) çözümü yapılamamaktadır. Antarktika'daki mevcut referans istasyonlarının kullanılamaması durumunda alternatif çözüm, uygulayıcıların çalışma bölgelerinde çok sayıda konumu bilinen jeodezik nokta tesis ederek sıklaştırma yapmasıdır. Bu seçeneğin uygulanması da yukarıda belirtilen Kıtanın kendine özgü coğrafik ve teknik kısıtları nedeniyle oldukça güç görünmektedir.

Diğer yandan mühendislik ölçmeleri, haritacılık, deniz uygulamaları, İnsansız Hava Aracı uygulamaları, heyelan ölçmeleri, deprem erken uyarı sistemleri, sismoloji, buzul ve kıyı erozyonlarının izlenmesi, otonom ölçme sistemleri gibi bilimsel ve pratik pek çok uygulama alanında gerçek-zamanlı (real-time) olarak cm-dm doğrulukta üretilecek konum bilgisi kritik öneme sahiptir. GNSS yöntemi ile cm-mertebesindeki doğruluklarla gerçek-zamanlı konum belirleme için en yaygın kullanılan yöntem, 1990'lı yıllardan beri uygulanan Single-baseline Real-Time Kinematik (RTK) yöntemidir. Ancak bu yöntemin uygulamasında gezici alıcı ile

referans istasyonu arasındaki mesafenin en fazla 10-20 km arasında olması gerekmekte olup, bu husus yöntemin uygulanmasını kısıtlamakta, ölçme verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuzlukları ortadan kaldıran Network RTK (NRTK) adı verilen diğer bir yöntem, tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak her iki yöntemde de yüksek doğrulukla konumu bilinen referans istasyonlarına veya CORS türü GNSS ağlarına ihtiyaç duyulması, düzeltmelerin iletilmesi/alınması için güçlü bir iletişim altyapısının (radyolink, GSM, internet vb.) gerekmesi, yöntemin bazı bölgelerde kullanımını kısıtlamaktadır. Sayılan tüm bu hususlar, Antarktika'da bilhassa gerçek-zamanlı rölatif konum belirleme yöntemlerinin uygulanmasında önemli lojistik ve teknik sorunlarla karşılaşılacağını ve ayrıca bu bölgede kullanılmalarının çok efektif olamayacağını göstermektedir.

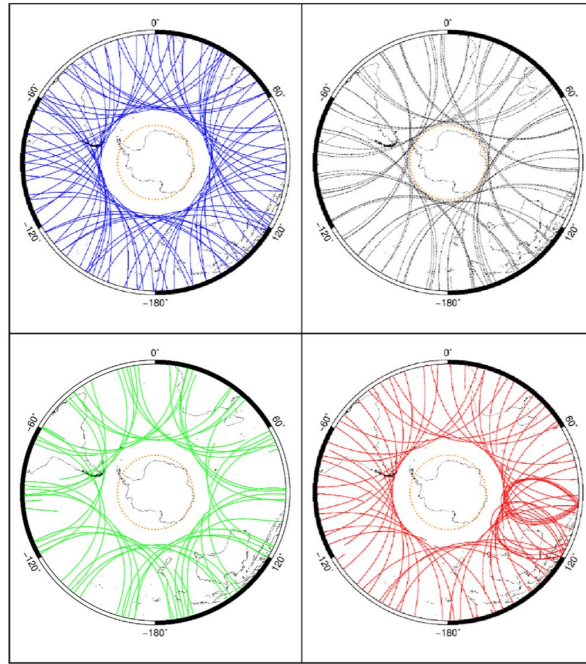
Rölatif yöntemde yer alan bu kısıtlar bilim insanlarını, ilave bir alıcıyla toplanan verilere gereksinim duymayan, rölatif yöntemin sağladığı doğruluğu sağlayacak düzeyde konum belirlemeyi mümkün kılacak yöntem arayışlarına yönlendirmiş ve bu durum tek bir alıcı kullanarak yüksek doğrulukta konum belirlemeye imkân tanıyan yöntemlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Bunlardan en bilineni Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) tekniğidir. Bu teknik aslında 1970'li yıllarda R.J. Anderle (1976) tarafından ortaya konulmuş olmasına karşın, günümüzdeki anlamıyla ilk kez Zumberge vd. (1997) tarafından uygulanmıştır. PPP yönteminde, tekli veya çoklu-frekansa sahip tek bir GNSS alıcısıyla toplanan veriler, başta International GNSS Service (IGS) olmak üzere birçok veri analiz merkezi tarafından yayınlanan hassas uydu yörünge ve saat ürünleri ile kod/faz sapmaları gibi diğer başka ürünlerle birlikte değerlendirilerek konum

belirlenmektedir. Ancak bu yöntemde cm-dm mertebesindeki doğruluklara ulaşabilmek için ölçmelere etki eden bazı etkilerin (taşıyıcı dalga faz dönüklüğü, sagnac, anten faz merkezi, gel-git ve okyanus ve kara yüklemesi vb.) modellenmeleri ve/veya düzeltilmeleri gerekmektedir. PPP ile konum belirlemenin en önemli eksikliği, cm mertebesinde bir doğrulukla konum belirleyebilmek için ortalama 20-30 dakika ila bazı durumlarda daha fazla süreli yakınsama süresine gereksinim duyulmasıdır. Bu durum, tekniğin özellikle gerçek-zamanlı uygulamalarda kullanılabilirliği için önemli bir kısıt olmaktadır. IGS'in başlattığı Real-Time Service (RTS) projesi kapsamında Nisan 2013 yılından bu yana gerçek-zamanlı uydu yörünge ve saat bilgileri üretilerek kullanıma sunulmuştur. Bunun sonucunda gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) konsepti geliştirilmiş ve pek çok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır. PPP sahip olduğu uygulama kolaylığı ve sağladığı doğruluk üstünlüğüyle günümüzün standart bir konum belirleme yöntemi haline gelmiştir.

GNSS tekniğinin kullanımı Antarktika Kıtasında konum belirlemede öne çıkmakla birlikte, bölgenin kendine has coğrafik ve iklimsel koşulları, diğer başka çalışma bölgelerinde yaşanmayan ilave başka zorlukları ve kısıtları beraberinde getirmektedir. Zira genel anlamda kutup bölgelerinde, çalışmamız özelinde ele alınan Antarktika Kıtasında, uyduların konstelasyonlarına bağlı olarak gözlem yapılan uydu sayısı kısıtlı olmakta, GNSS uyduları (GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E) ve BDS (C)) daha kısa süreli olarak ve düşük yükseklik açılarında gözlemlenmektedir. GNSS sisteminin bileşenlerinden GPS ve BDS uydularının yörüngeleri Ekvator düzlemi ile 55°'lik bir açıya sahiptir. Buna karşın Galileo uydularının yörüngeleri Ekvatorla 56°, GLONASS uyduları ise 64.8°'lik açıya sahiptir.

Bu durum, bu açılardan daha fazla değere sahip enlemlerde (yüksek enlem bölgelerinde) gözlemcinin başucu doğrultusunda uydu gözlemi yapılamamasına, kutup bölgelerine yaklaştıkça ancak belirli bir ufuk yüksekliğine kadar ölçmelerin yapılabilmesine imkan vermektedir. Bir başka ifadeyle gözlemcinin bulunduğu yerin enlem değeri arttıkça, gözlemlenen uyduların yükseklik açısı azalmaktadır. Yüksek enleme sahip olan kutup bölgelerinde gözlemcinin bulunduğu konumun üstünde (başucu doğrultusunda), gökyüzünde boşluklar oluşmakta, uydu geometrisi zayıflamakta ve buna bağlı olarak da konum

belirleme performansı olumsuz şekilde etkilenmektedir (özellikle yükseklik bileşeni düşük enlemlerdekine göre çok daha fazla etkilenmektedir) (Jensen ve Sicard, 2010; Jong vd., 2014; Li vd., 2019; Erol vd., 2020; Yastrebova vd., 2021). Antarktika Kıtasının ufkunun üstünde gözlemlenen GNSS sistemine ait uyduların yeryüzü izleri Şekil 1'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere güney kutup noktasının başucu doğrultusunda en az boşluk, GLONASS uydularına aittir. Diğer uydu sistemlerinde ise birbirine oldukça benzer ve daha fazla boşluklar meydana gelmektedir.



**Şekil 1.** Antarktika Bölgesindeki (güney kutup noktasında bulunan bir alıcı için) GNSS Uydularının Yeryüzü İzleri; GPS (sol üst), GLONASS (sağ üst), Galileo (sol alt), BDS (sağ alt) (Zhang vd., 2020)

**Figure 1.** Ground Track of GNSS Satellites in Antarctica (for a receiver occupied at the South Pole); GPS (top left), GLONASS (top right), Galileo (bottom left), BDS (bottom right) (Zhang et al., 2020)



Diğer yandan Ekvator ve kutup bölgelerinde geomanyetik aktivite ve solar aktiviteden kaynaklı olarak iyonosferik sintilasyon daha fazla olmakta ve dikkate alınmaması durumunda konum doğruluğu olumsuz yönde fazlaca etkilenmektedir (Jensen ve Sicard, 2010).

Bu çalışmada GNSS konumlandırma tekniği açısından bazı kısıtları bulunan Antarktika Kıtasında RT-PPP tekniğinin yatay (2B) ve düşey konumlama performansı (doğruluk ve yakınma süresi açısından), farklı GNSS uydu sistemlerinin kombinasyonları ve farklı analiz merkezlerince üretilen gerçek-zamanlı düzeltme ürünlerinin etkileri ile birlikte araştırılmıştır.

#### **GERÇEK ZAMANLI HASSAS NOKTA KONUMLAMA TEKNIĞİ (RT-PPP)**

Hassas Nokta Konumlama (PPP) tekniği, tek bir GNSS alıcısı ile başka hiçbir istasyon verisine ihtiyaç duyulmadan, IGS ve IGS çatısı altında hizmet veren Analiz Merkezleri (IGS AC) tarafından yayınlanan uydu yörünge, saat ve diğer düzeltme verilerini kullanarak, küresel bir koordinat sisteminde yüksek doğruluklu konum sağlayan popüler ve yaygın olarak kullanılan bir Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) konum belirleme tekniğidir. Yöntem, günümüzdeki anlamıyla ilk kez Zumberge vd. (1997) tarafından uygulanmıştır. PPP tekniği ortaya çıktığı ilk yıllarda, IGS tarafından sadece GPS için hassas ürünler sağlandığından, yalnızca bu uydu sistemi için kullanılmıştır. GLONASS uydu sisteminin 2011 yılında tekrar tam kapasite çalışmaya başlaması ve IGS tarafından GPS+GLONASS için bütünleşik hassas ürünlerin yayınlanmasıyla birlikte GPS ve GLONASS ölçüleriyle PPP tekniğinin uygulanması mümkün hale gelmiştir. IGS'in 2016 yılında, farklı sinyal ve uydu sistem verilerinin toplanması, izlenmesi ve analiz edilmesi için başlattığı Multi-GNSS Experiment (MGEX) projesi kapsamında çoklu-GNSS ürünleri kullanıma sunulmuş ve çoklu-GNSS

PPP uygulanmaya başlanmıştır. Çoklu-GNSS kavramıyla beraber, aynı anda çok sayıda uydudan veri elde edilebildiği için, PPP tekniğinin en önemli dezavantajı olan yakınsama süresi, çoklu-GNSS PPP'de anlamlı bir düzeyde kısaltılabilmektedir (Chen vd., 2021; Duong vd., 2020). Ayrıca IGS ve/veya IGS Analiz Merkezleri tarafından üretilen hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerine ek olarak kod ve faz sapma (bias) değerlerinin de üretilmesiyle birlikte PPP çözümündeki başlangıç tam sayı belirsizlikleri tam sayı olarak çözülebilmüş, bu durumda konum doğruluğu artmış ve ayrıca yakınsama süresi de kısaltılabilmektedir (Vaclavovic ve Nesvadba, 2020). PPP tekniğinde başka bir referans istasyonu verisine ihtiyaç duyulmadan, statik ve kinematik olarak yüksek doğruluklarda küresel bir koordinat sisteminde 3B konum belirleme imkânı sunulması, bu yöntemi klasik rölatif konum belirleme yöntemlerine karşı önemli bir alternatif haline getirmiştir.

IGS Analiz Merkezleri tarafından yayınlanan hassas uydu yörünge ve saat ürünleri genellikle sahada gerçekleştirilen ölçmeler sonrası üretildikleri için, PPP tekniği ilk zamanlarda esas olarak ölçme sonrası konumlandırma ve veri işlemede kullanılmıştır. Fakat IGS, Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) uygulamalarının taleplerini karşılamak için, IGS-Gerçek-Zamanlı Servis (IGS-RTS) Projesini Nisan 2013'te resmi olarak kullanıma sunmuştur. RT-PPP için gerekli olan IGS-RTS ürünleri, yayın efemerisine ek olarak uydu yörünge ve saat düzeltmeleri ile kod ve faz sapma değerlerini içermektedir. Bu yaklaşımda, IGS Analiz Merkezleri tarafından hesaplanan GNSS uydu yörüngesi ve saat düzeltmelerinden oluşan IGS RTS ürünleri, RTCM State Space Representation (SSR) standardına göre formatlanır ve NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) ile internet üzerinden anlık olarak yayınlanır. Gerçek-zamanlı olarak yayınlanan SSR formatındaki

IGS-RTS ürünlerinin içerisinde, uydu yayın yörünge bilgilerinden türetilen ECEF koordinat sistemindeki uydu koordinatlarına eklenecek radyal, boyuna ve çapraz yörünge düzeltmeleri ve yayın yörünge bilgilerindeki uydu saat hatalarına eklenecek uydu saat düzeltmeleri bulunmaktadır. Bu yörünge ve saat düzeltmelerini, yayın efemerisinden türetilen uydu yörüngelerine ve saatlerine uyguladıktan sonra, PPP için kesin uydu yörüngeleri ve saatleri hesaplanmış olmaktadır. IGS'in ilk SSR ürünleri sadece GPS ve GPS+GLONASS uydu sistemlerini desteklemekte iken, 2021 yılı itibari ile IGS kendi SSR ürünlerinde; GPS, GLONASS, Galileo ve BDS uydu sistemlerini desteklemeye başlamıştır. IGS'e ek olarak BKG, CAS, CNES, DLR, GFZ, GMV ve WHU isimli IGS Analiz Merkezleri de 2017 yılından bu yana çoklu-GNSS RT-PPP için SSR formatında gerçek-zamanlı ürünler sunmaktadırlar. IGS ve IGS-Analiz Merkezlerinin dışında, Galileo operasyonlarından sorumlu ana yüklenici olan Spaceopal GmbH şirketi, 2018 yılının Ekim ayında NAVCAST olarak bilinen, dünya çapında yeni bir gerçek-zamanlı düzeltme servisini kullanıma açmıştır. Bu servis, Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR) tarafından geliştirilen RETICLE algoritmasına dayalı olarak Galileo+GPS sistemlerini destekleyen gerçek-zamanlı hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerini içermektedir. Ayrıca, Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (JAXA) 2014 yılında GPS, GLONASS ve QZSS sistemlerini destekleyen MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) isimli gerçek-zamanlı uydu yörünge ve saat düzeltme hizmetini kullanıma sunmuştur. Görüldüğü üzere, bu tür servislere yenileri eklenmekte, bu alan hızlı bir gelişmeye sahne olmaktadır.

RT-PPP tekniğinin uygulanmasında, NTRIP protokolü kullanılarak gerçek-zamanlı IGS-

RTS SSR ürünlerinin ve GNSS ham verilerinin alınabilmesi için kullanıcıların "Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) NTRIP Client (BNC)", "Real-time Kinematic Library (RTKLIB)", "Precise Point Positioning With Integer and Zero-difference Ambiguity Resolution Demonstrator (PPP-Wizard)" vb. programların yüklü olduğu sürekli internet bağlantısı olan bir bilgisayara ihtiyaçları vardır. Ancak internet kesintisi veya diğer nedenlerle ortaya çıkan iletişim kopukluğunda gerçek-zamanlı ürünlerin alınmasında aksaklıklar meydana gelmekte, bu da gerçek-zamanlı konum belirlemeyi kısıtlamakta veya yapılamamasına neden olmaktadır.

GNSS konusunda çalışmalar yapan araştırmacılar oldukça yeni sayılabilecek RT-PPP tekniğini farklı alanlarda uygulamakta ve oldukça ümit verici sonuçlar elde etmektedirler. Konuyla ilgili temel bilgiler ve uygulama sonuçları Wang vd. (2018); Li vd. (2019); Monico vd. (2019); Wang vd. (2019); Yang vd. (2019); Di vd. (2020) ve Alcaç ve Turgut (2021)'de verilmektedir.

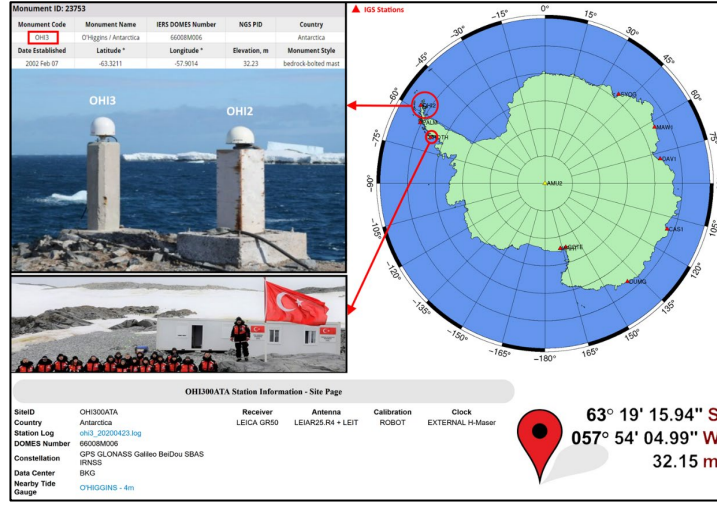
## UYGULAMA

Çalışmada Antarktika kıtasında RT-PPP tekniğinin kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu kapsamda IGS-MGEX RTS projesi kapsamında dörtlü uydu sistemi (GREC) için hizmet veren 6 farklı analiz merkezinden ikisi olan DLR ve CNES kurumlarının çoklu-GNSS gerçek-zamanlı hassas SSR düzeltmelerinin farklı uydu kombinasyonları kullanılarak, RT-PPP tekniğinin farklı analiz merkezlerinin SSR ürünlerine ve farklı uydu konfigürasyonlarına bağlı olarak doğruluk ve yakınsama süresi performansları araştırılmıştır. Bu çerçevede gerçekleştirilen çalışmalar, elde edilen sonuçlar ile birlikte izleyen bölümlerde verilmiştir.

### Çalışma Alanı ve Ölçmeler

Çalışmanın amacına uygun olarak, uygulamada, Türk Antartik Bilim Üssünün kurulacağı Horseshoe adasına en yakın sürekli gözlem yapan ve ölçülerini gerçek-zamanlı olarak internetten yayınlayan OHI300ATA istasyonu (kısaltılmış şekliyle OHI3) seçilmiştir

(Şekil 2). Şekilde ayrıca Ülkemize ait Antartika Bilim Üssünün kurulacağı bölgenin bir görseli de verilmiştir. Seçilen referans istasyonu IGS-MGEX-RTS ağına ait bir nokta olup,  $63^{\circ} 19' 15.941''$  G (S);  $57^{\circ} 54' 04.987''$  B(W);  $h=32.15$  m (ITRF) yaklaşık koordinatlarına sahiptir.



**Şekil 2.** Uygulamada Kullanılan IGS-MGEX RTS Ağının OHI300ATA İstasyonu (fotoğrafta soldaki pilye) (sol) ve Antartika Kıtasındaki Konumu (sağ)

**Figure 2.** OHI300ATA Reference Station (left in photo) of IGS-MGEX RTS Network Used in Study (left) and Location in Antarctica Continent (right)

OHI3 istasyonunda Leica GR50 GNSS alıcısı ile LEIAR25.R4+LEIT anteni bulunmakta olup, GPS, GLONASS, Galileo, BDS ve SBAS uyduları gözlemlenmektedir. İstasyon ile ilgili diğer teknik detaylar IGS (2021)'de yer almaktadır.

Çalışmada, 13 Eylül 2020 tarihinde (GPS Günü/Haftası: 257/2123) ve 15 Eylül 2020 tarihinde (GPS Günü/Haftası: 259/2123) olmak üzere iki farklı günde iki uygulama yapılmıştır. İlk uygulamada 16.5, ikinci uygulamada 14.5 saat süreyle gerçek-zamanlı çoklu-GNSS PPP çözümü ile her bir saniye için RT-PPP koordinatları elde edilmiştir. RT-PPP tekniğiyle konum belirleyebilmek için, her iki gün için de OHI3 istasyonundan alınan gerçek-zamanlı çoklu-GNSS ham gözlem verileri, IGS-RTS'in gerçek-zamanlı ürünü olan RTCM3EPH-MGEX yayın (broadcast) bilgileri ve ilgili gerçek-zamanlı IGS-MGEX SSR düzeltme ürünleri kullanılmıştır. Çoklu-GNSS gerçek-zamanlı PPP çözümlerinde kullanılan yayın efemeris ve SSR düzeltme bilgileri; ürün ismi, RTCM mesaj numaraları ve intervalleri, mesaj içerikleri, ürünü üreten kurum ve bağlı olduğu ülke, ürünün üretildiği yazılım bilgileri ile birlikte Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Çoklu-GNSS Gerçek-zamanlı PPP için Kullanılan MGEX Ürünler**Table 1.** MGEX Products Used for Multi-GNSS Real-time PPP

Ürün/Akış İsmi	GNSS	RTCM Mesaj Numarası ve İntervalı (saniye)	Mesaj İçeriği	Kurum	Yazılım
RTCM3EPH-MGEX	GREC	1019(5), 1020(5), 1045(5)+1046(5), 1042(5)	Yayın Yörünge	BKG/DEU	BNC
SSRA00CNE0	GREC	1060(5), 1066(5), 1243(5), 1261(5), 1059(5), 1065(5), 1242(5), 1260(5), 1265(5), 1266(5), 1267(5), 1270(5)	Bütünleşik Düz. Kod-sapmaları Faz-Sapmaları	CNES/FRA	PPP-WIZARD
SSRA00DLR0	GREC	1057(30), 1063(30), 1240(30), 1258(30), 1058(5), 1064(5), 1241(5), 1259(5), 1059(30), 1065(30), 1242(30), 1260(30), 1265(30), 1266(30), 1267(30), 1270(30)	Yörünge Düz. Saat Düz. Kod-sapmaları Faz-Sapmaları	DLR/DEU	RETICLE

Yukarıda da ifade edildiği üzere farklı düzeltme ürünlerinin ve farklı uydu sistemlerinin gerçek-zamanlı PPP konum belirleme performansına etkisini belirleyebilmek için; ilk uygulamada Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), ikinci uygulamada ise Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) tarafından üretilen sırasıyla 'SSRA00DLR0' ve 'SSRA00CNE0' kodlu RTCM formatındaki SSR ürünleri NTRIP protokolü yardımıyla alınarak aşağıda belirtilen 4 farklı uydu konfigürasyonu senaryosu altında OHI3 istasyonunun 1 sn'de bir RT-PPP koordinatları elde edilmiştir:

**Senaryo 1-** Sadece GPS (G) gözlemleri,

**Senaryo 2-** GPS+GLONASS (G+R) gözlemleri,

**Senaryo 3-** GPS+GLONASS+Galileo (G+R+E) gözlemleri,

**Senaryo 4-** GPS+GLONASS+Galileo+BDS (G+R+E+C) gözlemleri.

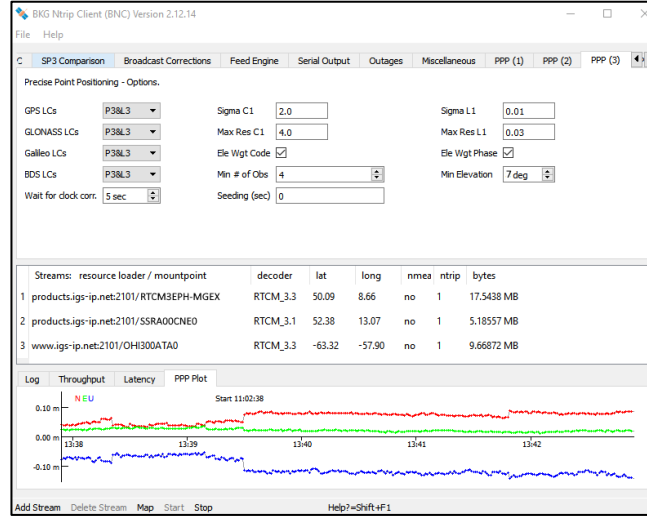
Noktanın gerçek-zamanlı PPP koordinatları Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) tarafından hazırlanıp kullanıma sunulan BKG Ntrip Client (BNC) v.2.12 yazılımı ile hesaplanmıştır (Şekil 3). Burada hatırlatılmasında yarar olan bir husus, IGS-RTS servisinde yararlanabilmek için IGS'e

ücretsiz bir üyelik kaydının yapılarak kullanıcı adı ve şifresinin alınması gerektiğidir.

BNC yazılımı RT-PPP çözümü için üç tür veri kümesine ihtiyaç duymaktadır. Bunlar; GNSS gözlemleri, GNSS yayın efemerisleri (broadcast ephemerides) ve gerçek-zamanlı SSR düzeltmeleridir. BNC yazılımı ile ilgili detaylı bilgiler Weber vd. (2016)'da yer almaktadır.

Uygulamadaki iki farklı gün için gerçekleştirilen 4 farklı uydu konfigürasyonuna (G, GR, GRE ve GREC) ait gerçek-zamanlı PPP çözümleri eş zamanlı olarak, tamamen aynı ölçme ve iletişim (internet) koşullarında elde edilmiştir. Ölçmeler süresince, analiz merkezlerinden SSR düzeltmelerinin alınamamasına neden olacak erişim sorunu ile karşılaşılması gibi internet bağlantısından kaynaklı bir kesinti vb. gibi olumsuzluklar da yaşanmamıştır. Sonuç olarak OHI3 istasyonunun iki uygulama günündeki koordinatları yukarıdaki her bir senaryo için BNC yazılımı ile float olarak (başlangıcı faz belirsizliği tamsayı olmadan) ITRF2014 datumunda epok-epok elde edilmiştir.

BNC yazılımı ile RT-PPP çözümü yapılırken dikkate alınan bazı değerlendirme parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.



**Şekil 3.** Uygulamada Kullanılan BNC Yazılımının Arayüzü

**Figure 3.** Interface of BNC Software Used in the Study

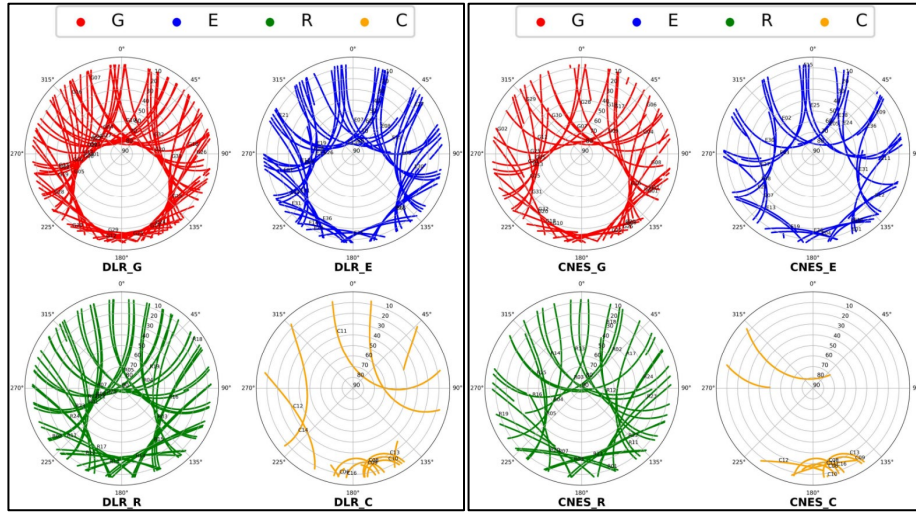
**Tablo 2.** RT-PPP Çözümü için BNC Yazılımında Kullanılan Temel Bazı Parametreler

**Table 2.** Some Main Parameters Used in BNC Software for RT-PPP Solution

Parametre	Tanımı
Yazılım&Sürümü	BKG Ntrip Client (BNC) v.2.12
Çözüm Stratejisi	RT-PPP (Float)
Gözlemler	Fark-alınmamış iyonosfer-bağımsız kod ve faz ölçmeleri
Uydu Sistemleri	G, GR, GRE, GREC
Eğim Açısı	7 derece
Çözüm intervali	1 saniye (1 Hz)
Başlangıç Doğrulukları	Kod ölçüleri için 2m; Faz ölçüleri için 1cm
Ağırlıklandırma	Eğim açısına (E) bağlı olarak $1/\sin^2(E)$
Düzeltilme Ürünleri	SSRA00DLR0, SSRA00CNE0
Yayın Yörüngesi	RTCM3EPH-MGEX
Öncül Troposferik Model	Saastamoinen
Troposferik Gecikme	Kestirildi
İzdüşüm Fonksiyonu	Başucu açısına (z) bağlı olarak $1/\cos(z)$
Faz Dönmesi Düzeltmesi	Uygulandı
Katı Yer Gelgit Düzeltmesi	Uygulandı
Anten Faz Merkezi	Uydular için APC tabanlı SSR, alıcı için igs14.atx
Referans Çerçevesi	ITRF2014

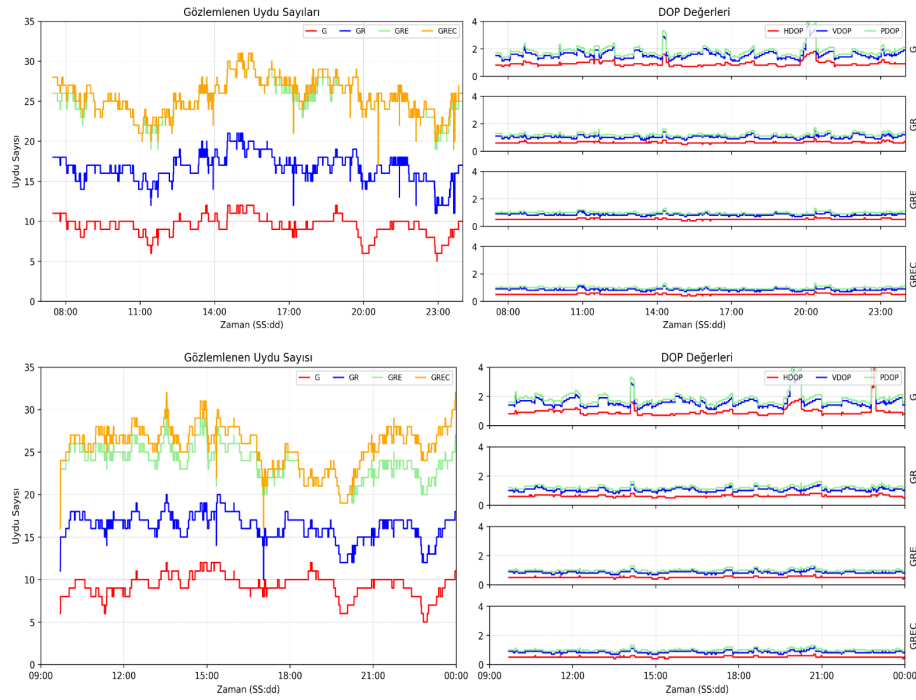
Çözümlerde kullanılan uyduların  $7^\circ$  eğim açısının üstündeki “uydu görünürlük grafikleri” Şekil 4’de verilmiştir (şekillerde yer alan dairelerin merkezi OHI3 istasyonunu temsil

etmektedir). Gözlemlenen uydu sayıları ile DOP (Dilution of Precision-Duyarlılık Kaybı) değerleri de Şekil 5 ile Tablo 3’de verilmiştir.



**Şekil 4.** OHI3 İstasyonuna ait Uydu Görünürlük Grafikleri (sol: ilk ölçmeler; sağ: ikinci ölçmeler)

**Figure 4.** Satellite Visibility Graphs of Station OHI3 (left: first measurements; right: second measurements)



**Şekil 5.** OHI3 İstasyonuna ait Uydu Sayısı ve DOP Değerleri (üst: ilk ölçmeler; alt: ikinci ölçmeler)

**Figure 5.** Number of Satellites and DOP Values of OHI3 Station (top: first measurements; bottom: second measurements)

**Tablo 3.** Çözümlerdeki Minimum, Maksimum, Ortalama Uydu Sayıları ve DOP Değerleri**Table 3.** Minimum, Maximum, Average Number of Satellites and DOP Values in Solutions

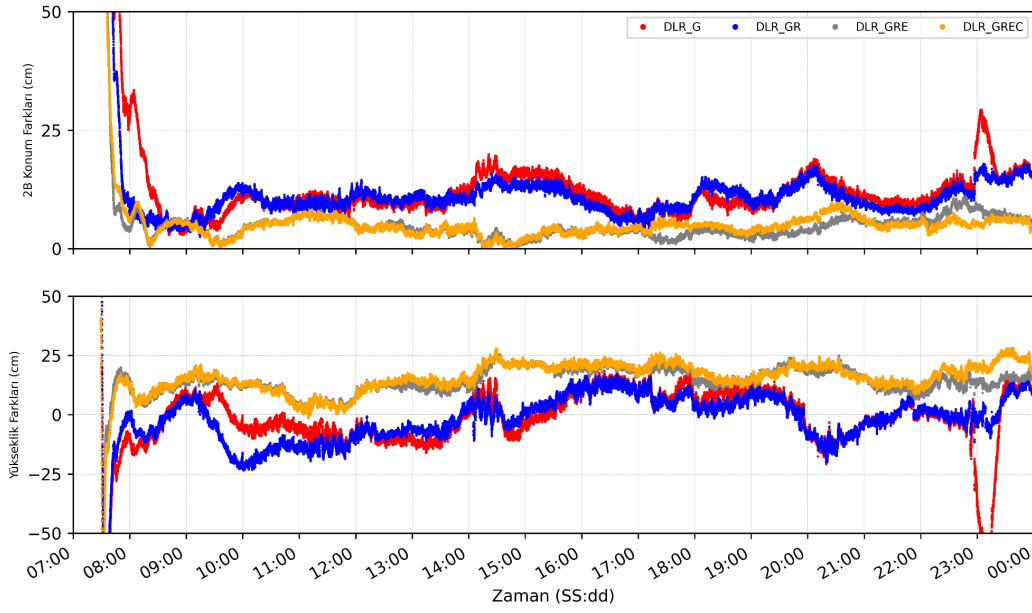
Parametre	İstatistik	DLR SSR Çözümü				CNES SSR Çözümü			
		G	GR	GRE	GREC	G	GR	GRE	GREC
HDOP	Min.	0.7	0.5	0.4	0.4	0.7	0.5	0.4	0.4
	Maks.	1.8	0.9	0.7	0.7	1.8	0.8	0.7	0.7
	Ort.	0.9	0.6	0.5	0.5	0.9	0.6	0.5	0.5
VDOP	Min.	1.1	0.8	0.7	0.7	1.1	0.8	0.7	0.7
	Maks.	3.8	1.5	1.1	1.1	24.2	1.4	1.2	1.2
	Ort.	1.6	1.0	0.1	0.8	1.7	1.0	0.8	0.8
PDOP	Min.	1.3	1.0	0.8	0.8	1.3	1.0	0.8	0.8
	Maks.	4.1	1.7	1.3	1.3	25.4	1.6	1.3	1.3
	Ort.	1.8	1.2	1.0	1.0	2.0	1.2	1.0	1.0
<b>Toplam</b>	Min.	5	11	17	17	5	10	16	16
<b>Uydu</b>	Maks.	12	21	31	31	12	20	30	32
<b>Sayısı</b>	Ort.	9	16	25	25	9	16	23	25

#### Verilerin Değerlendirilmesi ve Sayısal Sonuçlar

İki farklı IGS Analiz Merkezinin SSR düzeltmeleri yardımıyla 4 farklı uydu konfigürasyonu için gerçekleştirilmiş olan RT-PPP çözümlerinin yatay ve düşey konum doğruluklarını belirleyebilmek için, OHI3 istasyonunun yüksek doğrulukla hesaplanmış referans (ITRF2014) koordinatları, her bir çözümün her bir ölçme epöğü için elde edilmiş 2B konum ve yükseklik değerleri ile ayrı ayrı

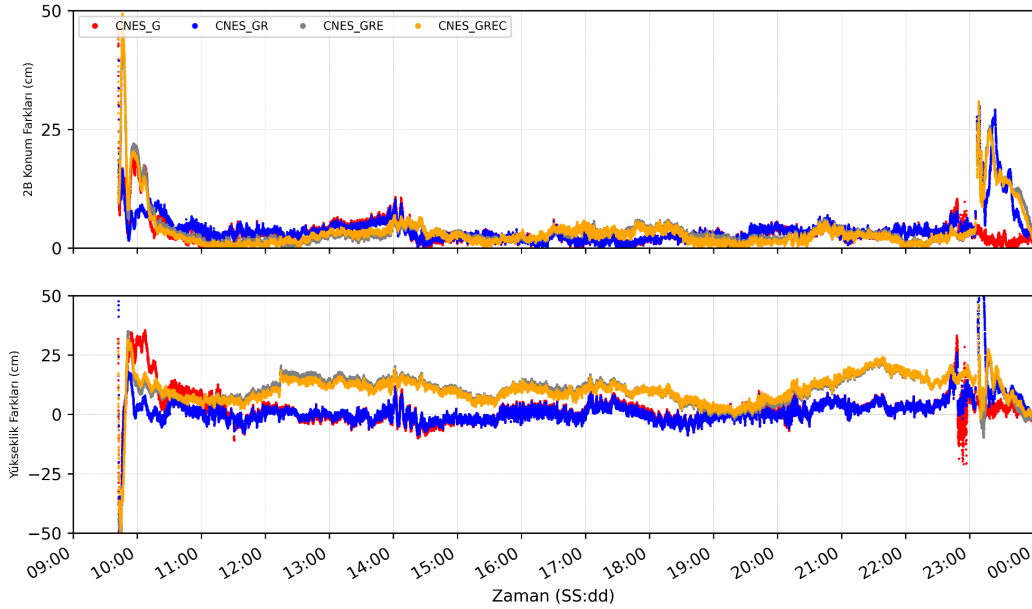
karşılaştırılmıştır. Her iki uygulama günü ve her bir senaryo için elde edilen farklara ait zaman serileri, ilk ölçmeler için Şekil 6'da, ikinci ölçmeler için de Şekil 7'de verilmiştir.

Diğer yandan, yakınsama süresi sonrası, her iki ölçme günü ve her bir senaryo için elde edilen doğu (e) ve kuzey (n) bileşeni farklarının dağılımları iki boyutlu olarak çizdirilmiş ve Şekil 8'de verilmiştir.



**Şekil 6.** OHI3 İstasyonunun Bilinen Koordinatları ile Gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) Koordinatları Arasındaki Farklar (DLR Çözümleri)

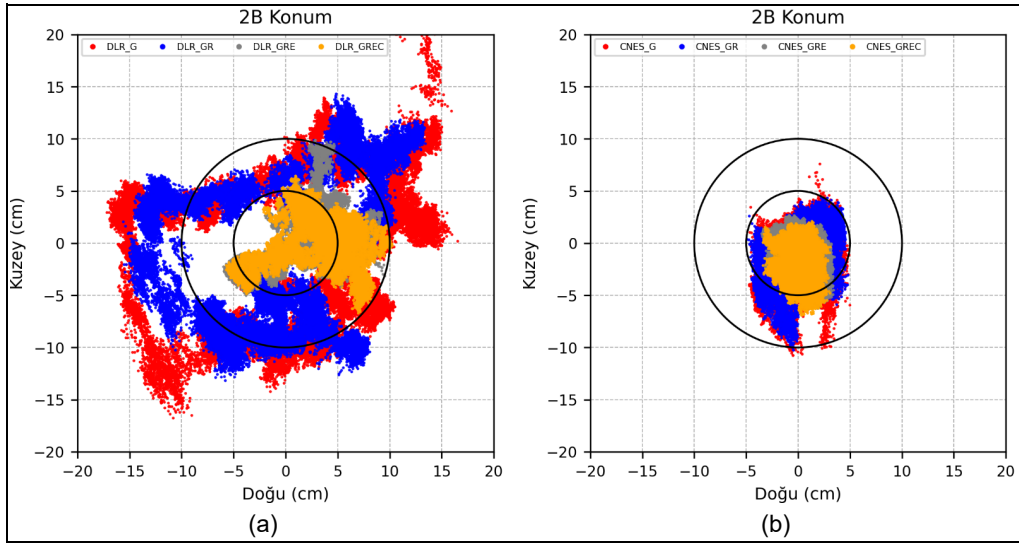
**Figure 6.** Differences between Known Coordinates of OHI3 Station and Real-time PPP (RT-PPP) Coordinates (for DLR Solutions)



**Şekil 7.** OHI3 İstasyonunun Bilinen Koordinatları ile Gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) Koordinatları Arasındaki Farklar (CNES Çözümleri)

**Figure 7.** Differences Between Known Coordinates of OHI3 Station and Real-time PPP (RT-PPP) Coordinates (for CNES Solutions)





**Şekil 8.** Yakınsama Süresi Sonrası İstasyonun Bilinen Koordinatları ile Gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) Koordinatları Arasındaki 2B Konum Dağılımı (a) DLR Çözümü, (b) CNES Çözümü

**Figure 8.** 2D Position Distribution Between Known Coordinates of Station and Real-time PPP (RT-PPP) Coordinates After Convergence Time (a) DLR Solution, (b) CNES Solution

Burada önemle vurgulanması gereken bir husus, çalışmada yakınsama süresinin, ölçmelerin başladığı ilk ölçme epoğundan itibaren, RT-PPP koordinatı ile bilinen nokta koordinatı arasındaki 2B konum farkının 10 cm ve daha az olması için geçen zaman aralığı olarak tanımlanmış olduğudur. Bir başka ifadeyle ölçmelerin başlamasından itibaren 2 boyuttaki konum farkının 10 cm'ye ulaştığı

zamana kadar geçen süre, yakınsama süresi olarak alınmıştır.

Çalışmada ele alınan tüm senaryolar için elde edilen RT-PPP çözümlerinden hesaplanan farklara ilişkin bazı istatistiksel bilgiler (minimum, maksimum ve ortalama farklarla, Karesel Ortalama Hata-KOH) Tablo 4'de verilmiştir. Tabloda ayrıca her bir çözüme ait yakınsama süreleri de yer almaktadır.

**Tablo 4.** Farklara Ait İstatistiksel Bilgiler

**Table 4.** Statistical Information of Differences

Çözüm Senaryosu	Yakınsama Süresi (dakika)	2B Konum (cm)				Yükseklik (cm)			
		Min.	Maks.	Ort.	KOH	Min.	Maks.	Ort.	KOH
DLR (G)	60	3	29	11	± 12	-32	20	0	± 11
DLR (GR)	30	3	18	10	± 11	-23	17	-2	± 9
DLR (GRE)	15	0	11	4	± 5	-1	27	15	± 15
DLR (GREC)	15	0	10	5	± 5	-1	28	16	± 17
CNES (G)	30	0	10	3	± 3	-21	33	2	± 5
CNES (GR)	10	0	10	3	± 4	-9	37	1	± 4
CNES (GRE)	25	0	10	3	± 3	-5	24	11	± 12
CNES (GREC)	25	0	10	3	± 3	-2	24	10	± 11

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada elde edilen sonuçlar, farklı unsurlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bunlardan ilki, çözümlerde kullanılan uyduların görünürlükleri hususudur. Şekil 4'de verilen uydu görünürlük grafiklerine bakıldığında, OHI3 istasyonunun başucu (zenit) doğrultusunda GPS, Galileo ve BDS uydularının gözlemlenemediği görülmektedir. Ancak GLONASS uydularında bu durum olmamış,  $90^\circ$  yükseklikte de gözlem yapılabilmektedir. GPS, Galileo ve BDS uydularının yörüngelerinin Ekvator düzlemi ile yaptığı açılar (yörünge eğimi) sırasıyla  $55^\circ$ ,  $56^\circ$  ve  $55^\circ$  olup, bu değerler ölçme yapılan OHI3 istasyonunun enlem değerinden ( $\sim 63.3^\circ G (S)$ ) daha düşüktür. Buna bağlı olarak da bu istasyonda başucu doğrultusunda yalnızca GLONASS uydularına gözlem yapmak mümkün olabilmektedir. Zira GLONASS uydularının yörüngelerinin diğer uydu sistemlerinin yörüngelerine göre Ekvatorla yaptığı açı daha fazladır ( $64.8^\circ$ ). Bir gözlem istasyonunda uyduların yüksek eğim açılarında gözlemlenememesi yükseklik bileşeninin doğruluğunu düşük enlem bölgelerine kıyasla daha fazla etkilemektedir. Şekillerde bir başka göze çarpan husus da OHI3 istasyonun güneyinde gözlemlenen uyduların daha kısa süreli ve daha düşük eğim açılarında gözlemlenebilmesi olmuştur. Noktanın güneyinde yer alan bu uydular ancak 20 derecelik eğim açısına kadar yükselebilmekte ve daha kısa süreli ufkun üstünde görünmektedirler.

Çözümlerde kullanılan uydu sayıları ile DOP değerlerinin verildiği Şekil 5 ve Tablo 3 incelendiğinde, DLR analiz merkezinden alınan SSR ürününün kullanıldığı ilk uygulama çözümlerinde, GPS uydularının sayısının 5 ile 12 arasında değiştiği (ortalama 9), GLONASS uydularının eklenmesi ile bu sayının 11 ile 21

arasında olduğu (ortalama 16) görülmektedir. Bu iki sisteme Galileo ve BDS uydularının eklenmesi halinde ise bu sayı her iki durumda da 17 ile 31 arasında (ortalama 25) değişmiştir. İlgili şekil ve tablodan anlaşılacağı üzere, dörtlü sistem RT-PPP çözümlerinde çok az sayıda BDS uydusu kullanılabilmiştir. Bu durumun sebebinin, BDS uydularından elde edilen ölçmelerin çift frekanslı olmaması veya RT-PPP çözümü sırasında BDS ölçmelerinin uyumsuz ölçü olarak çözümden çıkartılmış olması olduğu değerlendirilmiştir. İkinci uygulama çözümünde ise, kullanılan GPS uydularının sayısı ortalama 9, GPS+GLONASS uydularının sayısı ortalama 16, GPS+GLONASS+Galileo uydularının sayısı ortalama 23 ve nihayet dörtlü sistemdeki, GPS+GLONASS+Galileo+BDS, uyduların sayısı da ortalama 25 olmuştur. Bu çözümde az da olsa BDS uydu gözlemi (ortalama 2 uydu) çözümde kullanılmıştır.

Benzer durum DOP değerleri için de geçerlidir. DOP değerlerine bakıldığında, yalnızca GPS çözümü için minimum, maksimum ve ortalama HDOP (Horizontal Dilution of Precision) değerlerinin sırasıyla 0.7, 1.8 ve 0.9 olduğu; dörtlü sistem için ise bu değerlerin sırasıyla 0.4, 0.7 ve 0.5'e indiği görülmüştür. Hatırlanacağı üzere çözümde kullanılan uydu geometrisinin hesaplanan noktanın yatay konumuna (enlem ve boylama) etkisi HDOP ile gösterilmektedir. Çözümde kullanılan uydu geometrisinin hesaplanan noktanın yüksekliğine etkisini gösteren VDOP (Vertical Dilution of Precision) değerlerine bakıldığında ise, ilk ölçmelerde yalnızca GPS için minimum, maksimum ve ortalama değerler sırasıyla 1.1, 3.8 ve 1.6; dörtlü sistemde ise sırasıyla 0.7, 1.1 ve 0.8 olarak elde edilmiştir. İkinci ölçmelerde VDOP değeri için oldukça yüksek değerlerin elde edildiği uydu konfigürasyonlarında gözlemlerin yapıldığı zaman dilimleri olsa da genel olarak

ilk ölçmelerdekine benzer değerler elde edilmiştir.

Bu sonuçlara göre, çoklu-GNSS (multi-GNSS) gözlemlerinin kullanımının RT-PPP çözümünde kullanılan uydu sayısını artırdığı, dolayısıyla bu durumun DOP değerlerini de anlamlı düzeyde iyileştirdiğini görmek mümkün olmuştur. Bu durumun, yani çoklu-GNSS (multi-GNSS) gözlemlerinin kullanımının, uyduların düşük yüksekliklerde ve kısa sürelerle gözlem yapılabildiği Antarktika bölgesinde (genelde kutup bölgelerinde) konum belirleme performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmiştir.

PPP tekniğinin en önemli kısıtlarından birisi hiç şüphesiz çözümlerin yakınsama süresidir. Bu çalışmada yakınsama süresi -yukarıda da ifade edildiği üzere- 2B konum konum farklarının (RT-PPP koordinatları ile bilinen nokta koordinatı arasındaki fark) 10 cm veya daha azına ulaşması için ilk ölçmeden itibaren geçen süre olarak kabul edilmiştir. Tablo 4'de verilen her bir çözüme ait yakınsama sürelerine bakıldığında; DLR'nin SSR ürünlerinden GPS, GPS+GLONASS, GPS+GLONASS+Galileo ve GPS+GLONASS+Galileo+BDS uydu konfigürasyonları için sırasıyla 60, 30, 15 ve 15 dakika değerleri elde edilmiştir. Diğer yandan CNES'in SSR ürünlerinin kullanıldığı ölçmelerde bu değerler aynı sıraya göre 30, 10, 25 ve 25 dakika olarak elde edilmiştir. Buradan elde edilen ilk sonuç, çözümde kullanılan uydu sistemlerinin sayısındaki artışın yakınsama süresinin kısaltılmasına genel olarak anlamlı katkı sağladığı olmaktadır. Buna ilave olarak yakınsama süresinin, çözümde kullanılan farklı analiz merkezine ait düzeltme ürünlerine bağlı olarak da değiştiği görülmüştür.

Şekil 6, Şekil 8 ve Tablo 4'de verilen bilgilere göre, DLR Analiz Merkezinin ürünlerinin kullanıldığı RT-PPP çözüm sonuçları

incelendiğinde, sadece GPS uydularının kullanılması durumunda 60 dakikalık yakınsama süresi sonrasında 2B konum için farklar, 3 cm ile 29 cm arasında ( $\pm 12$  cm KOH ile) elde edilmiştir. Yükseklik bileşeninde ise bu değerler benzer şekilde -32 cm ile 20 cm arasında ( $\pm 11$  cm KOH ile) bulunmuştur. GPS ile GLONASS gözlemlerinin çözümde birlikte kullanılması halinde (GR çözüm), 30 dakikalık yakınsama süresi sonrasında 2B konum için farklar 3 cm ile 18 cm arasında ( $\pm 11$  cm KOH ile), yükseklik bileşeninde ise -23 cm ile 17 cm arasında ( $\pm 9$  cm KOH ile) elde edilmiştir. Üçlü-konfigürasyonda ise (GRE çözüm) yakınsama süresinde %75'lik bir iyileşme olmuş ve 15 dakika gibi oldukça iyi bir değere inmiştir. Ayrıca farklarda da anlamlı bir iyileşme gözlemlenmiştir. Yakınsama süresi sonrasında, 2B konum için 11 cm'nin altında ( $\pm 5$  cm KOH ile), yükseklik için de -1 cm ile 27 cm arasında ( $\pm 15$  cm KOH ile) farklar elde edilmiştir. Ancak üçlü uydu sistemi (GRE) ile dördü uydu sistemi (GREC) çözümleri arasında anlamlı bir fark görülmemiştir. Bu durumun nedeni, yukarıda ifade edildiği üzere, çözümde kullanılan BDS ölçmelerinin az sayıda olması, ölçülerin tek frekanslı veya uyumsuz olması olarak değerlendirilmiştir. Genel olarak DLR sonuçlarından çoklu-GNSS gözlemlerinin kullanımının, tekli-GPS sistemine göre hem yakınsama süresini hem de doğruluğu iyileştirdiği anlaşılmıştır.

CNES Analiz Merkezinden alınan SSR düzeltmeleri ile gerçekleştirilen RT-PPP çözümlerine ait Şekil 7, Şekil 8 ve Tablo 4'de verilen değerlere bakıldığında DLR çözümlerine benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Yalnızca GPS uyduları kullanılarak elde edilen gerçek-zamanlı koordinatlarla bilinen koordinatlar arasındaki farkların, 30 dakikalık yakınsama süresi sonrasında, 2B konum için 10 cm'nin altında ( $\pm 3$  cm KOH ile), yükseklik

için de -21 cm ile 33 cm arasında ( $\pm 5$  cm KOH ile) değiştiği görülmüştür. GPS gözlemleri ile GLONASS gözlemlerinin birlikte kullanılması durumunda (GR çözüm) yakınsama süresi 10 dakika gibi oldukça iddialı bir değere ulaşmış, konum ve yükseklik doğrulukları da sadece GPS çözümlerine benzer şekilde elde edilmiştir. Diğer uydu sistemlerinin de eklenmesiyle elde edilen üçlü (GRE) ve dördü (GREC) çözümler incelendiğinde, yakınsama süresinin yalnızca GPS'e göre az da olsa iyileşmiş ve 25 dakikaya inmiştir. Bu çözümler için 2B konumdaki farklar hem GRE, hem de GREC çözüm için 10 cm'nin altında ( $\pm 3$  cm KOH ile) elde edilmiştir. Yükseklikler için ise farkların sırasıyla -5 cm ile 24 cm arasında ( $\pm 12$  cm KOH ile) ve -2 cm ile 24 cm arasında ( $\pm 11$  cm KOH ile) değiştiği görülmüştür.

Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen zaman serilerinden de görülebileceği üzere, her iki gündeki tüm çözüm senaryoları altında gerçekleştirilen RT-PPP çözümlerinde, yakınsamadan sonra ne analiz merkezlerinden düzeltmelerin alınmasında ne de internet bağlantısında bir sorun ile karşılaşılma, ölçmeler sürekli bir şekilde yaklaşık 16.5 ve 14.5 saat boyunca başarıyla yapılmıştır. Her iki analiz merkezinden alınan düzeltme verileri ile çoklu-uydu sistemleri kullanılarak yapılan RT-PPP çözümlerinin yalnızca GPS uydularının kullanılması ile elde edilen çözümlere göre 2B konum farklarını anlamlı şekilde iyileştirdiği (birkaç dm'den 10 cm seviyesine indirdiği) görülmüştür. Ek olarak CNES SSR ürününden elde edilen çözümler, 2B konum farkları ve doğruluklar açısından, DLR ürünlerinden çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak yükseklik için genel olarak tüm çözümlerde 2-3 dm mertebesinde farklar elde edilmiştir. Yükseklik doğruluklarına bakıldığında genel olarak 2B konumdan daha düşük KOH değerleri elde edilmiştir. Yükseklik bileşeni için çoklu-sistemlerin kullanılmasında

tekli-sisteme göre anlamlı bir KOH iyileşmesinin gerçekleşmediği görülmüştür. Özellikle, Galileo ve BDS sisteminin RT-PPP çözümüne eklenmesiyle, bilinen nokta yüksekliği ile çoklu-GNSS RT-PPP çözümleri arasında, DLR için yaklaşık 15 cm, CNES için ise yaklaşık 10 cm lik bias ortaya çıkmıştır. Aslında her iki uygulama günündeki GRE ve GREC konfigürasyonu için elde edilen çoklu-GNSS RT-PPP çözümlerinin yükseklik bileşenlerinin standart sapma değeri  $\pm 5$  cm'dir. Daha önce de belirtildiği üzere kutup bölgelerinde gözlemcinin başucu doğrultusunda gözlem yapılamaması ve uyduların düşük yükseklik açıları ve kısa sürelerle gözlemlenmeleri, yükseklik doğruluğunu düşük ve orta enlem bölgelerinde elde edilen değerlere göre daha fazla (olumsuz olarak) etkilemektedir. Genel olarak tüm çözümlere bakıldığında, dördü-GNSS çözümlerinin tekli, ikili ve üçlü sistemlere göre yakınsama süresini iyileştirdiği, 2B konum doğruluğunu artırdığı, ancak yükseklik bileşeninde bu iyileşmenin aynı oranda olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tüm bu bulgulardan hareketle, gerçek-zamanlı PPP konum belirleme performansının yalnızca kullanılan uydu sistemlerine ve ölçme koşullarına değil, aynı zamanda çözümler sırasında kullanılan gerçek-zamanlı SSR düzeltme ürünlerinin performansına (doğruluğuna ve kullanılabilirliğine) bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bilindiği üzere IGS çatısı altındaki birçok analiz merkezi, SSR düzeltmelerini, farklı sayıdaki ve dağılımdaki GNSS izleme istasyonu verilerini farklı yazılımlar ve farklı veri değerlendirme stratejileri kullanarak üretmektedir. Buna bağlı olarak her bir analiz merkezinin SSR ürünlerinin doğruluğu ve kalitesi de birbirine göre az veya çok farklılık gösterebilmektedir. Hiç şüphesiz RT-PPP'den elde edilen konum

doğrulukları da bu durumdan yakından etkilenmektedir.

## SONUÇLAR

Çalışma kapsamında gerçek-zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) tekniğinin, zorlu çevresel koşullara sahip Antarktika kıtasındaki performansı ve kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çerçevede kıtada yer alan IGS-MGEX-RTS ağına ait noktalardan olan OHI300ATA noktasının RT-PPP koordinatları, iki farklı IGS analiz merkezince üretilen çoklu-GNSS SSR ürünleri kullanılarak farklı uydu konfigürasyonları (G, GR, GRE ve GREC) için gerçek-zamanlı olarak hesaplanmıştır. Böylelikle hem farklı gerçek-zamanlı düzeltme ürünlerinin hem de farklı uydu sistemlerinin RT-PPP çözümlerinin doğruluğuna ve yakınsama süresine olan etkisi araştırılmıştır.

Çalışma sonucunda; Antarktika Kıtasında, BNC yazılımı ile IGS-RTS ürünleri ve tek bir GNSS alıcısının verileri kullanılarak yaklaşık 20-30 dakikalık yakınsama süresi sonrasında, bilinen koordinatlarla cm-dm arasında değişen farklarla gerçek-zamanlı 2B konum belirlemenin mümkün olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, çalışmadan elde edilen yatay ve düşey konum doğruluklarının çözümde kullanılan farklı IGS Analiz Merkezleri SSR düzeltme ürünlerine ve uydu konfigürasyonuna bağlı olduğu da anlaşılmıştır. Diğer yandan yükseklik bileşeninde elde edilen farkların her uydu konfigürasyonu ve analiz merkezi ürünleri için desimetreler mertebesinde olduğu, çoklu-sistemlerin kullanılmasında tekli-sisteme göre anlamlı bir KOH iyileşmesinin gerçekleşmediği hatta bazı durumlarda kötüleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Genel olarak ifade edilecek olursa, çalışma, günümüzde çok farklı ölçme uygulamalarında gittikçe yaygınlaşarak kullanım alanı bulmaya

başlayan RT-PPP tekniğinin Antarktika Kıtasında klasik rölatif yöntem (RTK) ve klasik ölçme sonrası veri değerlendirme (post-process) PPP tekniğine karşı önemli bir alternatif olacak doğruluklarla 2B konum belirleme imkânı sağladığını göstermiştir. Yalnızca bir GNSS alıcısı ile toplanandan başka herhangi bir veriye gerek duyulmaksızın sadece gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat bilgileri kullanılarak konum belirlenebilmesi, yöntemi ekonomik ve uygulanması kolay bir alternatif haline getirmiştir. Ancak yöntemin başarısı düzeltmelerin alınabilmesi için güçlü bir internet bağlantısı ile yakından ilişkilidir. Herhangi bir sebeple veri alımında kesinti olması halinde (ister analiz merkezinden veri alımından ister internet bağlantısından kaynaklı) konum belirleme de kesintiye uğramaktadır. IGS-RTS kullanılarak RT-PPP yöntemiyle konum belirleme işleminin internete bağlı bir bilgisayarda gerçekleştirilmesinin yerine, uydu-bazlı RT-PPP sistemlerinde olduğu gibi, ölçme anında doğrudan GNSS alıcısında anlık olarak gerçekleştirilmesi ve GNSS hassas ürünlerinin alıcıya anlık olarak sadece internet aracılığıyla değil, uydu-bazlı sistemlerle (İridyum Uyduları gibi) iletilerek yapılması, iletişimden kaynaklı olumsuzluklarının ortadan kaldırılmasına katkı sağlayacaktır.

## KATKI BELİRTME

Çalışmanın uygulama kısmında kullanılan GNSS verileri ve ürünlerine erişim imkânı verdikleri için IGS'e ve IGS Analiz Merkezlerine, RT-PPP çözümlerinde kullanılan BNC yazılımı için Bundesamt für Kartographie und Geodäsie'ye içtenlikle teşekkürlerimizi sunuyoruz. Çalışmadaki bazı şekiller, açık kaynak kodlu GNSSpy yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur (Işık vd., 2021). Son olarak, makalenin gözden geçirilmesi için katkıları ve

destekleri nedeniyle editör ve anonim hakemlere teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR

- AFI (Antarctic Facilities Information), 2021. The Council of Managers of National Antarctic Programs (COMNAP), DOI: <https://www.comnap.aq>, 22 Şubat 2022.
- Alcay, S. ve Turgut, M., 2021. Evaluation of the Positioning Performance of Multi-GNSS RT-PPP Method. *Arabian Journal of Geosciences*, 14:155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06534-4>
- Anderle, R.J., 1976. Satellite Doppler Positioning. *International Geodetic Symposium, A77-47370* 22-43, Las Cruces-New Mexico-ABD, 47-75.
- Chen, J., Zhao, X., Liu, C., Zhu, S., Liu, Z. ve Yue, D., 2021. Evaluating the Latest Performance of Precise Point Positioning in Multi-GNSS/RNSS: GPS, GLONASS, BDS, Galileo and QZSS. *Journal of Navigation*, 74(1), 247-267. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463320000508>
- Di, M., Zhang, A., Guo, B., Zhang, J., Liu, R. ve Li, M., 2020. Evaluation of Real-Time PPP-Based Tide Measurement Using IGS Real-Time Service. *Sensors*, 20(10):2968. <https://doi.org/10.3390/s20102968>
- Duong, V., Harima, K., Choy, S., Laurichesse, D. ve Rizos, C., 2020. Assessing the Performance of Multi-frequency GPS, Galileo and BeiDou PPP Ambiguity Resolution. *Journal of Spatial Science*, 65(1), 61-78. DOI: <https://doi.org/10.1080/14498596.2019.1658652>
- Erol, S., Mutlu, B., Erol, B., Katıgöz, S. ve Alkan, R.M., 2020. Antarktika Kıtasında Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) Tekniğinin Performansının İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(5), 844-856. DOI: <https://doi.org/10.35414/akufemubid.761692>
- IGS (International GNSS Service), 2021. OHI300ATA Site Information Form (site log), DOI: [https://files.igs.org/pub/station/log\\_9char/ohi300ata\\_20211005.log](https://files.igs.org/pub/station/log_9char/ohi300ata_20211005.log) 16 Aralık 2021.
- Işık, M. S., Özbey, V., Erol, S. ve Tarı, E., 2021. GNSSpy: Python Toolkit for GNSS Data, 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 8550-8553. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553880>
- Jensen, A.B.O. ve Sicard, J-P., 2010. Challenges for Positioning and Navigation in the Arctic. *Coordinates*, 6(10), 10-13.
- Jong, K., Goode, M., Liu, X. ve Stone, M., 2014. Precise GNSS Positioning in Arctic Regions. *Arctic Technology Conference 2014*, Houston, Texas, USA. DOI: <https://doi.org/10.4043/24651-MS>
- Li, M., Xu, T., Flechtner, F., Förste, C., Lu, B. ve He, K., 2019. Improving the Performance of Multi-GNSS (Global Navigation Satellite System) Ambiguity Fixing for Airborne Kinematic Positioning over Antarctica. *Remote Sensing*, 11(8), 992. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11080992>
- Monico, J.F.G., Marques, H.A., Tsuchiya, Í., Oyama, R.T., de Queiroz, W.R.S., de Souza, M.C. ve Wentz, J.P., 2019. Real

- Time PPP Applied to Airplane Flight Tests. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25(2). DOI: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000200009>
- Vaclavovic, P. ve Nesvadba, O., 2020. Comparison and Assessment of Float, Fixed, and Smoothed Precise Point Positioning. *Acta Geodynamica Et Geomaterialia*, 17(3), 329-340. DOI: <https://doi.org/10.13168/AGG.2020.0024>
- Wang, L., Li, Z., Ge, M., Neitzel, F., Wang, X. ve Yuan, H., 2019. Investigation of the Performance of Real-time BDS-only Precise Point Positioning Using the IGS Real-time Service. *GPS Solutions*, 23(3), Article: 66, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0856-9>
- Wang, Z., Li, Z., Wang, L., Wang, X. ve Yuan, H., 2018. Assessment of Multiple GNSS Real-Time SSR Products from Different Analysis Centers. *International Journal of Geo-Information*, 7(3), 85. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi7030085>
- Weber, G., Mervart, L., Stuerze, A., Rülke, A. ve Stöcker, D., 2016. BKG Ntrip Client (BNC) Version 2.12 User Manual. Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG), Frankfurt, Germany.
- Yang, F., Zhao, L., Li, L., Feng, S. ve Cheng, J., 2019. Performance Evaluation of Kinematic BDS/GNSS Real-Time Precise Point Positioning for Maritime Positioning. *The Journal of Navigation*, 72(1), 34-52. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463318000644>
- Yastrebova, A., Höyhtyä, M., Boumard, S., Lohan, E.S., ve Ometov, A., 2021. Positioning in the Arctic Region: State-of-the-Art and Future Perspectives. *IEEE Access*, 9, 53964-53978. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069315>
- Zhang, Q., Chen, Z., Cui, Y., Zheng, X., Rong, F., Sun, Y. ve Gao, L. A. 2020. Refined Metric for Multi-GNSS Constellation Availability Assessment in Polar Regions. *Advances in Space Research*, 66, 655-670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.033>
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M. ve Webb, F.H., 1997. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B3), 5005-5017. DOI: <https://doi.org/10.1029/96JB03860>