



Paleoseismicity of the Ulubat Fault: Inferences on Seismic Behaviour of the Southern Branch of the North Anatolian Fault Zone, South Marmara

Volkan Karabacak ¹, Taylan Sancar ², Azad Saglam Selcuk ³ and Yusuf Buyukdeniz ²

¹ Eskisehir Osmangazi University, Department of Geological Engineering, Eskisehir, Turkey

² Munzur University, Department of Geography, Tunceli, Turkey

³ Yuzuncu Yil University, Department of Geological Engineering, Van, Turkey

ORCID: 0000-0003-2581-7984, 0000-0002-2500-9787, 0000-0003-4943-3870, 0000-0001-7078-7281

Keywords

North Anatolian Fault Zone, Ulubat Fault, Paleoseismology, Bursa, Southern Marmara

Highlights

* Ulubat Fault is one of the members of the multi-fragment geometry presented by the NAFZ in the South Marmara region

* Paleoseismological fault studies show that the Ulubat Fault has produced 6 surface ruptures in the last 16 thousand years

* Segments of the Ulubat Fault do not present characteristic earthquake behaviour

Acknowledgements

Disaster and Emergency Management Authority (AFAD) and Beta Analytic, Inc.

Aim

This study presents the results of the first paleoseismological studies conducted along the Ulubat Fault and their inferences on the earthquake behavior of the south branch of the North Anatolian Fault Zone.

Location

The study is carried out west of the city of Bursa in southern Marmara (NW Turkey)

Methods

Geological-geomorphological field observations and paleoseismological trenching studies.

Results

The paleoseismological data presented in this study proves that the southernmost members of the North Anatolian Fault Zone do not present characteristic earthquake behavior in terms of recurrence period and this irregularity may be due to the multi-fragment geometry of the fault zone in the southern Marmara.

Supporting Institutions

This study is supported by the Disaster and Emergency Management Authority (AFAD) (UDAP-G-18-01)

Manuscript

Research Article

Received: 04.04.2021

Revised: 16.04.2021

Accepted: 23.04.2021

Printed: 30.06.2021

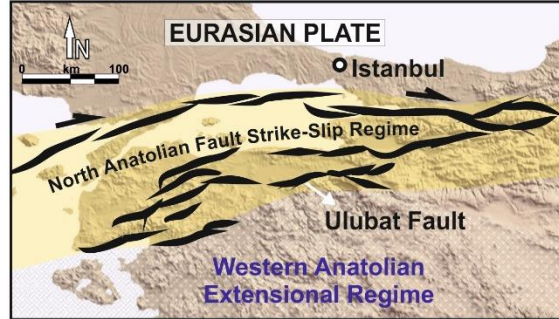
DOI

10.46464/tdad.909358

Corresponding Author

Volkan Karabacak

Email: karabacak@ogu.edu.tr



Figure

This study focuses on paleoseismological excavations along the Ulubat Fault, one of the southernmost members of the North Anatolian Fault strike-slip regime

How to cite

Karabacak V., Sancar T., Selcuk A.S., Buyukdeniz Y., 2021. Paleoseismicity of the Ulubat Fault: Inferences on Seismic Behaviour of the Southern Branch of the North Anatolian Fault Zone, South Marmara, Turk. J. Earthq. Res. 3 (1), 1-19, <https://doi.org/10.46464/tdad.909358>



Ulubat Fayı'nın Paleosismisitesi: Kuzey Anadolu Fay Zonu Güney Kolunun Deprem Davranışı Üzerine Çıkarımlar, Güney Marmara

Volkan Karabacak ¹, Taylan Sançar ², Azad Sağlam Selçuk ³ ve Yusuf Büyükdeniz ²

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

² Munzur Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, Tunceli, Türkiye

³ Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

ORCID: 0000-0003-2581-7984, 0000-0002-2500-9787, 0000-0003-4943-3870, 0000-0001-7078-7281

ÖZET

Bu makale, Ulubat Fayı boyunca yapılan ilk paleosismolojik çalışmaların sonuçlarını ve Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) güney kolunun deprem davranışına ilişkin çıkarımları sunmaktadır. Ulubat Fayı geometrik karakteristik ve paleosismolojik davranışına göre 3 segmente ayrılmıştır. Paleosismolojik fay kazıları ile fay segmentlerinde son 16 bin yılda en az 6 eski deprem izi ayırt edilmiştir. Tarihsel kayıtlarla ilişkilendirilen yaş sonuçları Ulubat Fayı boyunca en son yüzey kırıklarının sırasıyla MS <161/170 (I=IX), MS 1143 (M=6.0) ve MS 1855 (M=7.3) depremleri ile oluştuğunu ve batıya göç ettiğini göstermektedir. Yeterli istatistiksel değerlendirme şansı sunmamakla birlikte, bu çalışmada ortaya konulan paleosismolojik veriler KAFZ güney kolunu oluşturan segmentlerin tekrarlanma periyodu anlamında karakteristik deprem davranışı sunmadığını ve bu düzensizliğin fay zonunun bölgedeki çok parçalı geometrisinden kaynaklı olabileceğini kanıtlamaktadır.

Anahtar kelimeler

Kuzey Anadolu Fay Zonu, Ulubat Fayı, Paleosismoloji, Bursa, Güney Marmara

Öne Çıkanlar

- * Ulubat Fayı KAFZ'nin Güney Marmara bölgesinde sergilediği çok parçalı geometrinin üyelerinden biridir
- * Paleosismolojik fay kazıları Ulubat Fayı'nın son 16 bin yılda en az 6 yüzey kırığı ürettiğini göstermektedir
- * Ulubat Fayı segmentleri karakteristik deprem davranışı sergilememektedir

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 04.04.2021

Düzeltilme: 16.04.2021

Kabul: 23.04.2021

Basım: 30.06.2021

DOI

10.46464/tdad.909358

Sorumlu yazar

Volkan Karabacak

Eposta:

karabacak@ogu.edu.tr

Paleoseismicity of the Ulubat Fault: Inferences on Seismic Behaviour of the Southern Branch of the North Anatolian Fault Zone, South Marmara

Volkan Karabacak ¹, Taylan Sancar ², Azad Saglam Selcuk ³ and Yusuf Buyukdeniz ²

¹ Eskişehir Osmangazi University, Department of Geological Engineering, Eskişehir, Turkey

² Munzur University, Department of Geography, Tunceli, Turkey

³ Yuzuncu Yil University, Department of Geological Engineering, Van, Turkey

ORCID: 0000-0003-2581-7984, 0000-0002-2500-9787, 0000-0003-4943-3870, 0000-0001-7078-7281

ABSTRACT

This article presents the results of the first paleoseismological studies conducted along the Ulubat Fault and their inferences on the earthquake behavior of the south branch of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ). The Ulubat Fault is divided into 3 segments according to its geometric characteristics and paleoseismological behavior. Along the fault segments, at least 6 paleo-earthquake event have been distinguished in the last 16 thousand years with paleoseismologic fault excavations. The dating results correlated with the historical records show that the latest surface ruptures along the Ulubat Fault occurred with the earthquakes of <161/170 AD (I=IX), 1143 AD (M=6.0) and 1855 AD (M=7.3), respectively, and migrated to the west. Although it does not provide sufficient statistical evaluation opportunity, the paleoseismological data presented in this study proves that the segments of the NAFZ south branch do not present characteristic earthquake behavior in terms of recurrence period and this irregularity may be due to the multi-fragment geometry of the fault zone in the region.

Keywords

North Anatolian Fault Zone, Ulubat Fault, Paleoseismology, Bursa, Southern Marmara

Highlights

- * Ulubat Fault is one of the members of the multi-fragment geometry presented by the NAFZ in the South Marmara region
- * Paleoseismological fault studies show that the Ulubat Fault has produced 6 surface ruptures in the last 16 thousand years
- * Segments of the Ulubat Fault do not present characteristic earthquake behaviour

Manuscript

Research Article

Received: 04.04.2021

Revised: 16.04.2021

Accepted: 23.04.2021

Printed: 30.06.2021

DOI

10.46464/tdad.909358

Corresponding Author

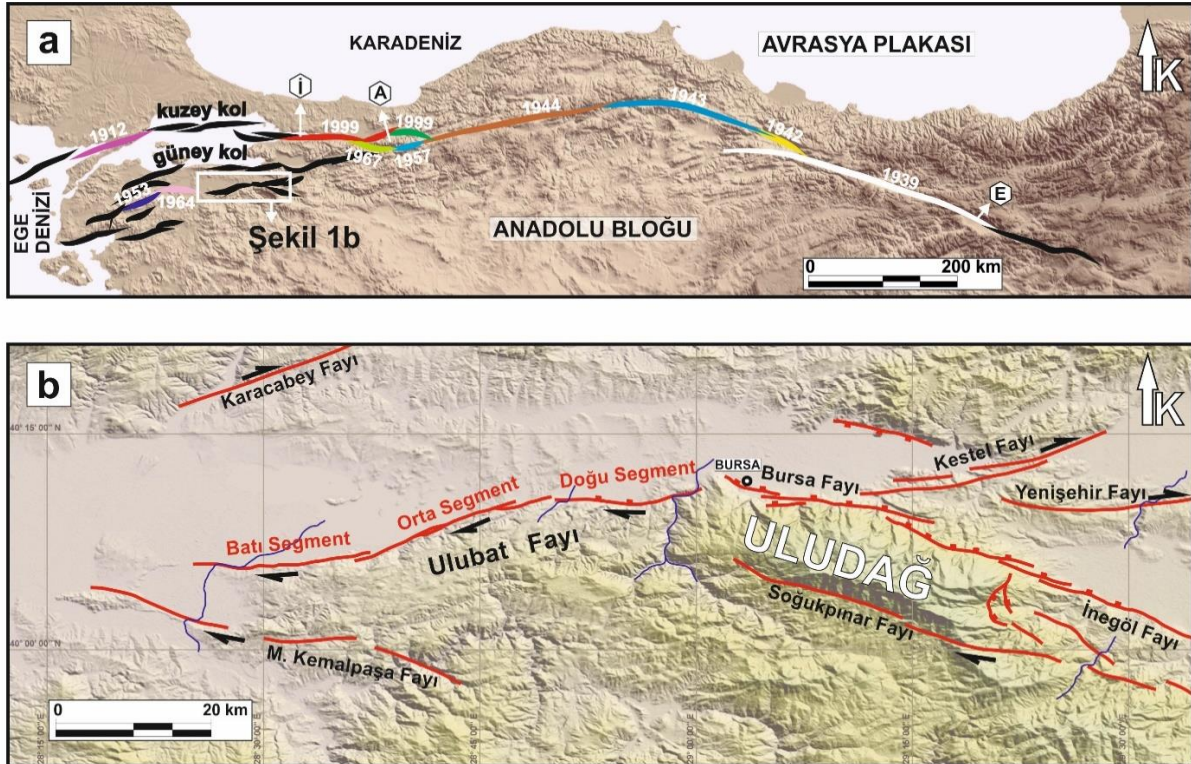
Volkan Karabacak

Email:

karabacak@ogu.edu.tr

1. GİRİŞ

Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Anadolu Bloku ve Avrasya Plakası arasındaki sınırı oluşturan yaklaşık D-B uzanımlı, sağ yanal karakterde kıtasal ölçekli bir deformasyon kuşağıdır. Genel geometrisi doğu ve orta kesimlerinde nispeten basit bir görünüm sunan ve dar bir zona sıkışan KAFZ, Almacık Yükselimi batısında güneybatı yönünde ayrılan kolları ile bu özelliğini kaybetmektedir (Şekil 1a). 20'nci yy.'da art arda meydana gelen büyük depremlerle ün kazanmış fay zonu en doğuda Erzincan yakınlarından batıda İzmit Körfezi (Marmara Denizi) içlerine kadar ürettiği yüzey kırıkları ile kendini göstermiştir (Şekil 1a). Söz konusu uzanım, kendisine doğal bir laboratuvar niteliği kazandıran bu yüzey kırıkları ile aktif fay çalışmalarının odak noktası olmuştur. Bununla birlikte, Erzincan ile İzmit Körfezi arasındaki uzanımı ile karşılaştırıldığında, batıda Marmara Denizi güneyine doğru saçılan kolların karakteristik özellikleri ve deprem üretme potansiyelleri bilinmezliklerini korumaktadır.



Şekil 1: a) Kuzey Anadolu Fay Zonu genel geometrisi ve üzerinde 20'nci yy.'da oluşan yüzey kırıkları (İ: İzmit Körfezi, A: Almacık Yükselimi, E: Erzincan) b) Çalışma alanı Kuvaterner fayları. Faylar Emre ve diğ. (2011a,b ve c), Ozalp ve diğ. (2013), Selim ve diğ. (2013), Selim ve Tuysuz (2013), Seyitoglu ve diğ. (2016), Ozaksoy (2018), Ozaksoy ve diğ. (2018)'den faydalanılarak yeniden haritalanmıştır (Taban yükseklik modeli SRTM-3arc-second dijital verisi kullanılarak üretilmiştir.)

Almacık Yükselimi batısında KAFZ ana uzanımından güneybatı yönünde ayrılan kollar Marmara Denizi güneyine geçmekte, Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB) kuzey kesimi boyunca Ege Denizi'ne uzanmaktadır. Güney Marmara'da yer alan Uludağ Yükselimi, BAGB ile KAFZ doğrultu atımlı hareket alanı arasında özel bir konuma sahiptir ve KAFZ güney kollarını en güneyden sınırlamaktadır (Sengor ve diğ. 2005, Okay ve diğ. 2008, Ozalp ve diğ. 2013, Selim ve Tuysuz 2013) (Şekil 1). Ulubat, Bursa ve İnegöl fayları batıdan doğuya bir yay geometrisi ile bu yükseliminin kuzeyini sınırlamaktadır (Barka ve Kadinsky-Cade 1988, Ozalp ve diğ. 2013) (Şekil 1b). Yakın geçmişte Ulubat Fayı batı ucunda (27 Şubat 1855, M=7.3) ve Bursa Fayı boyunca (11 Nisan 1855, M=6.3) meydana geldiği öne sürülen 2 büyük depremin varlığı (Sieberg 1932, Ambraseys ve Finkel 1991, Barka 1997, Eyidogan ve diğ. 1997), bu

zondaki fay segmentlerinin yüzey kırığı üretme potansiyellerini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, Uludağ Yükselimi kuzeyindeki fayların deprem davranışları üzerine net bilgiler bulunmamaktadır.

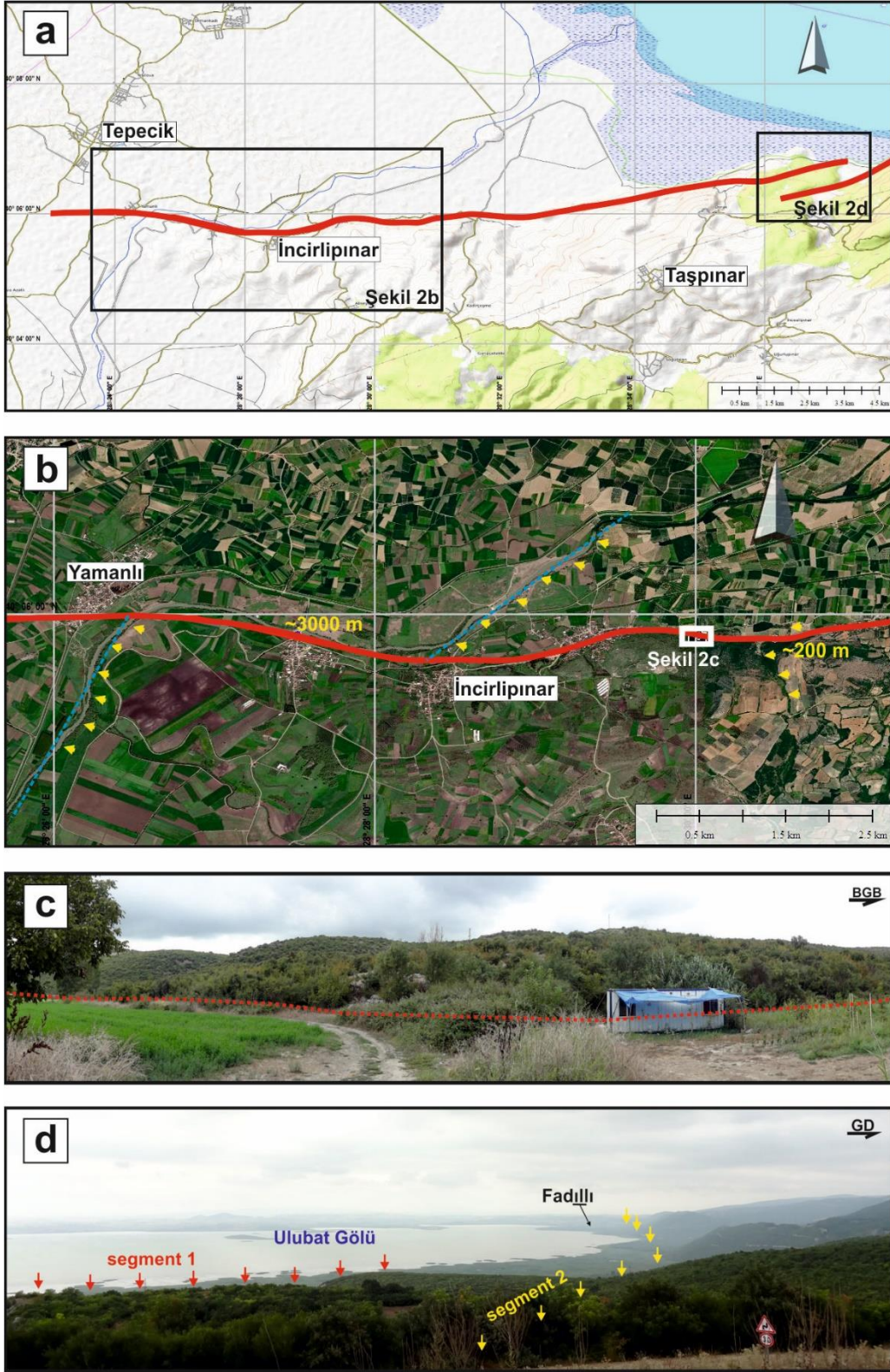
Bu çalışmada, Uludağ Yükselimi'ni kuzeybatısından sınırlayan alanda, KAFZ güney kollarının en güneydeki üyelerinden, Ulubat Fayı'nın bazı karakteristik özelliklerinin (geometrisi ve deprem davranışı) ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda Ulubat Fayı fizyografik yer değiştirme özellikleri ve jeolojik/morfolojik belirteçlerden yararlanılarak arazide haritalanmıştır. Yaklaşık DKD-BGB uzanımlı Ulubat Fayı geometrik karakteristiklerine göre 3 segmente ayrılmıştır. Ulubat Fayı boyunca ilk paleosismolojik hendek çalışmaları yürütülmüş, orta ve doğu segmentlerde son 16 bin yılda en az 6 eski deprem izi ayırt edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Ulubat Fayı'nın Uludağ Yükselimi kuzeyinde önemli bir aktivite üstlendiğini göstermektedir.

2. FAYLANMAYA İLİŞKİN ARAZİ GÖZLEMLERİ

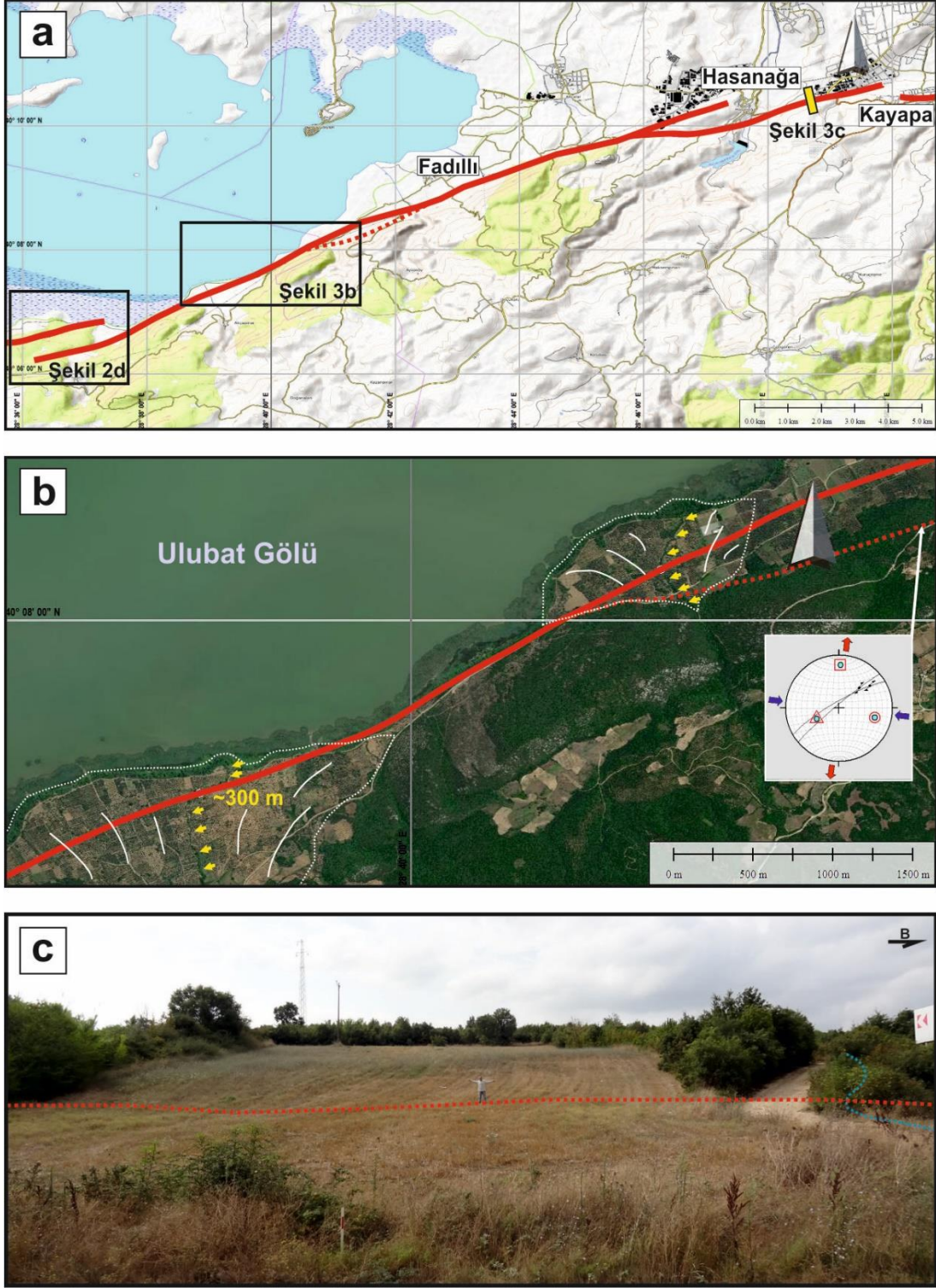
Ulubat Fayı, Ulubat Gölü güneybatısından başlayarak Bursa İli batısına (Nilüfer İlçesi) kadar uzanmaktadır (Şekil 1b). Doğan ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada 45 km uzunluğunda haritaladıkları fayı batıdan doğuya Doğancı, Fadıllı ve Çalı olmak üzere 3 alt geometrik segmente ayırmışlardır. Selim ve Tuysuz (2013) ise bu segmentlerden batı ve orta segmentleri Ulubat Fayı'na dâhil ederek, batıdaki segmenti Yumurcaklı segmenti olarak adlandırmışlardır. Aynı çalışmada, Doğan ve diğ. (2005) tarafından Çalı olarak adlandırılan en doğu segmenti ise Kayapa-Çalı ve Misiköy şeklinde iki segmente ayırarak Bursa Fayı'na dâhil etmişlerdir. Emre ve diğ. (2011b) Ulubat Fayı'nı Doğan ve diğ. (2005) çalışmasına benzer şekilde haritalamıştır. Son olarak Ozaksoy (2018) yaptığı haritalamada benzer segmentasyonu benimsemiş, bununla birlikte en doğu segmenti Selim ve Tuysuz (2013)'ün Bursa Fayı'na dâhil ettiği fay parçaları ile daha doğuya uzatmıştır.

Bu çalışmada, literatürde bulunan farklı yorumlar göz önünde bulundurularak, Ulubat Fayı tarafımızdan detaylı arazi verileri ile yeniden haritalanmıştır. Buna göre 54 km uzunluğunda olan DKD-BGB doğrultulu fay uzanımı, genişlemeli sıçrama alanları ile birbirinden ayrılan ve ayırt edici geometrik ve kinematik özellikler sunan 3 farklı segmentten oluşmaktadır. Literatürdeki kargaşayı arttırmamak adına bu segmentler Batı, Orta ve Doğu uzanım şeklinde adlandırılmıştır. Segmentlerin uzunluğu sırasıyla 18, 21 ve 15 km'dir (Şekil 1b).

Batı segmenti Ulubat Gölü güney-güneybatısında doğrusal olarak yaklaşık D-B doğrultusunda uzanmaktadır (Şekil 2a). Fay boyunca sağ yanal hareketin izleri genç dere yataklarında belirgindir. Örneğin; segmentin batı kesiminde Mustafa Kemalpaşa Deresi fay boyunca Yamanlı ve İncirlişar Köyleri arasında $3\pm 0,1$ km sağ yanal olarak ötelenmektedir (Şekil 2b). Güney bloğun birkaç yüz metre yükseldiği morfoloji, segmentin bir miktar düşey bileşene de sahip olabileceğine işaret etmektedir (Şekil 2c). Segment en doğu ucunda Ulubat Gölü'ne kadar ulaşmaktadır (Şekil 2a). Bu uzanım boyunca kesintisiz tek bir kol olarak devam eden segment en doğusunda göl kenarında yaklaşık 500 metre güneye sıçramaktadır (Şekil 2d). Bu sıçrama alanı, doğu yönünde fay gidişindeki dikkat çekici değişim nedeniyle segment sınırı olarak değerlendirilmiştir. Sıçrama alanının her iki tarafındaki segmentler (Batı ve Orta segment) arasında yaklaşık 20° 'lik açı farkı bulunmaktadır (Şekil 1b).

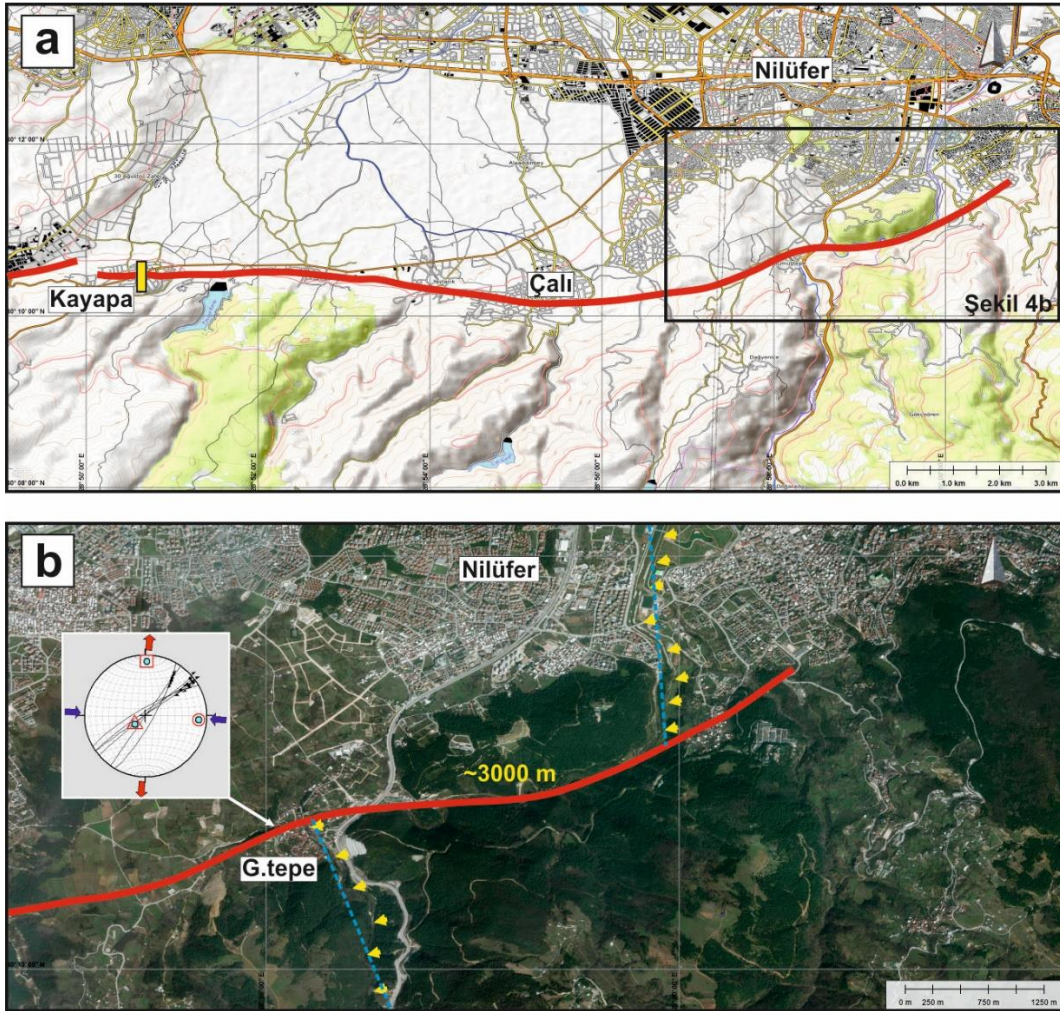


Şekil 2: a) Ulubat Fayı Batı segmentinin genel uzanımı (Tabanlık Open Topo Map veri tabanından alınmıştır.) b) Segmentin batı ucunda sağ yanal faylanmaya işaret eden dere yatağı ötelenmeleri (Tabanlık için World Imagery görüntüsü kullanılmıştır.) (Sarı oklar dere yatağını, mavi kesikli çizgi ise ötelenme ölçümünde kullanılan dere yatağı genel gidişini göstermektedir.) c) Batı segment üzerinde Incirli pınar Köyü doğusunda fay morfolojisi (Kırmızı kesikli çizgi olası fay uzanımını göstermektedir.) d) Batı (1) ve Orta (2) segmentlerin sıçrama alanı (oklar fay uzanımlarına işaret etmektedir.)



Şekil 3: a) Ulubat Fayı Orta segmentinin genel uzanımı (Tabanlık Open Topo Map veri tabanından alınmıştır.) (Sarı dikdörtgen Hasanağa Hendeği konumunu göstermektedir.) b) Segment boyunca güncel dere yatağı ötelenmeleri (Tabanlık için World Imagery görüntüsü kullanılmıştır.) c) Hasanağa Sanayi bölgesinde hendek alanı fay morfolojisi (Kırmızı kesikli çizgi Hasanağa hendek kazısında kesilen fay uzanımını, mavi kesikli çizgi ise fay uzanımı üzerinde sağ yanal olarak yerdeğiştiren bir dere yatağını göstermektedir.)

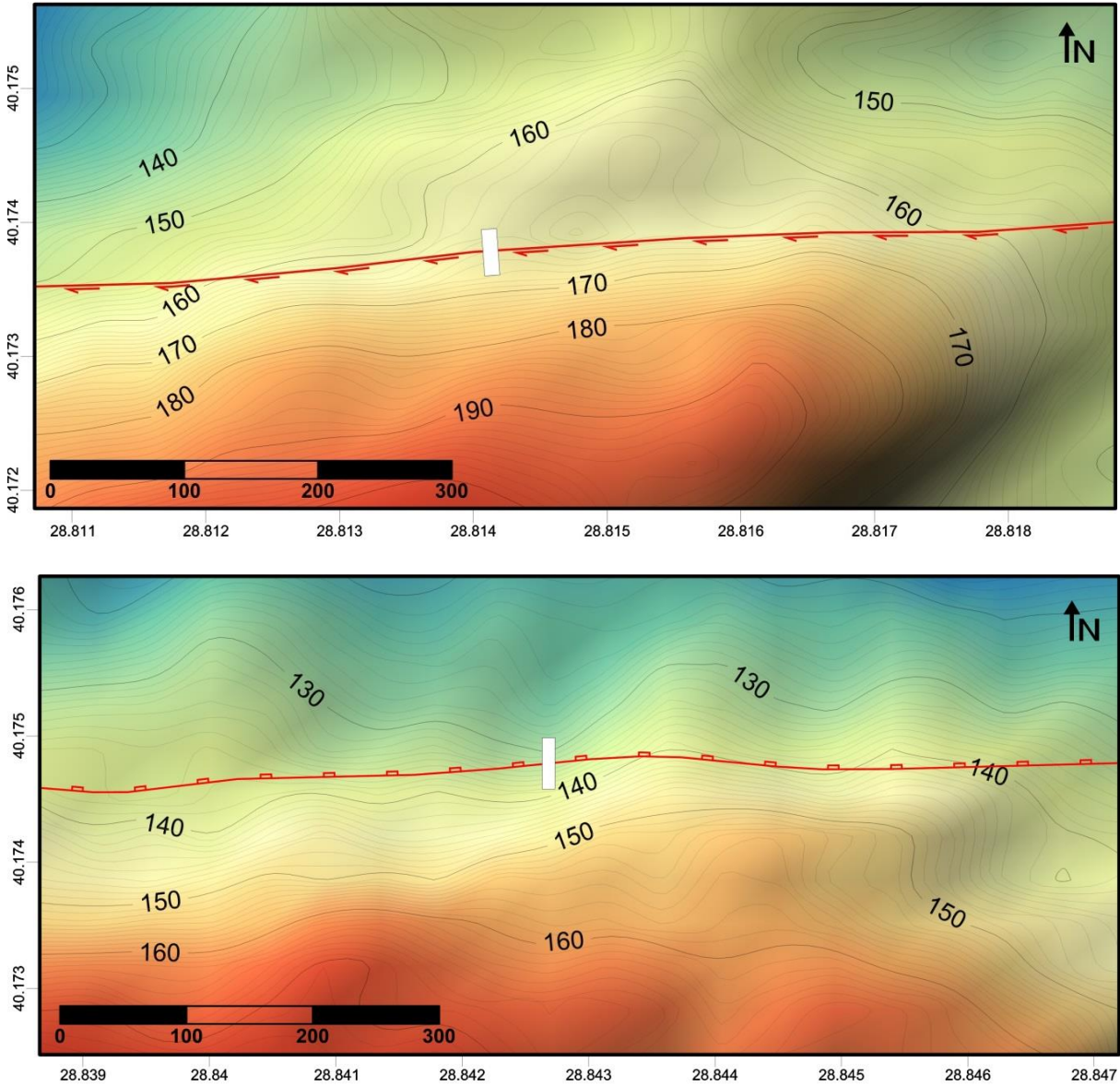
Orta segment KD-GB doğrultusunda yaklaşık 21 km uzunluğa sahiptir (Şekil 3a). Batı segmentten güneye sıçrama ile ayrılan uzanım KD yönünde yaklaşık 6 km boyunca Ulubat Gölü kenarını sınırlamakta ve doğrusal olarak Hasanağa Köyü yakınlarına kadar devam etmektedir (Şekil 3a). Segment, çökelişi devam eden alüvyal fanları kesmektedir (Şekil 3b). Uzanımı boyunca gözlemlenen güncel dere yatağı ötelenmeleri ve fay düzlemi kinematik verileri segment üzerindeki hareketin baskın şekilde doğru yönünde olduğunu ispatlamaktadır (Şekil 3b, c). KD kesiminde çatallanan Orta segmentin güneyde kalan kolu, Ulubat baseni ile Nilüfer baseni arasında bariyer görevi gören topografik yükselme alanına kadar uzanmaktadır (Şekil 1b). Bu alanda güneydoğuya sıçrayan fay uzanımı tekrar D-B gidiş kazanmaktadır. Kayapa yakınlarındaki sıçrama alanı her iki tarafındaki uzanımların gidişindeki yaklaşık 20°'lik ve fayın daha doğuda oblik karakter kazanması nedeniyle segment sınırı olarak değerlendirilmiştir. Doğu segment Nilüfer baseni güneyinde D-B yönünde güneye doğru yay şekilli geometriye sahiptir (Şekil 4a). Arazide yaklaşık 15 km takip edilebilen uzanımın düşey yönlü hareket bileşenine işaret eden fay sarplığı morfolojisi oldukça belirgindir. Bununla birlikte segment doğu ucunda sağ yan hareketin baskın olduğu bir geometri kazanmaktadır. Bu alanda Nilüfer Deresi fay tarafından kesilerek $3\pm 0,1$ km sağ yan ötelenmektedir (Şekil 4b).



Şekil 4: a) Ulubat Fayı Doğu segmentinin genel uzanımı (Tabanlılık Open Topo Map veri tabanından alınmıştır.) Sarı dikdörtgen Kayapa Hendeği konumunu göstermektedir.) b) Segmentin doğu ucunda sağ yan faylanmaya işaret eden Nilüfer Deresi üzerindeki ötelenme (Tabanlılık için World Imagery görüntüsü kullanılmıştır.) (Sarı oklar dere yatağını, mavi kesikli çizgi ise ötelenme ölçümünde kullanılan dere yatağı genel gidişini göstermektedir.)

3. PALEOSİSMOLOJİK FAY KAZILARI

Ulubat Fayı aktivitesinin delillendirilmesi ve eski deprem kronolojisinin analitik sonuçlarla belgelenmesi amacıyla Orta ve Doğu segmentler boyunca paleosismolojik fay kazıları yapılmıştır. Geleneksel paleosismolojik hendek çalışmaları, çok sayıda deprem kaydına ulaşabilecek ölçekte ince ve/fakat her bir depremi ayırt edebilecek ölçekte kalın sedimaner çökel arşivine odaklanmaktadır. Bu anlamda uygun olabileceği öngörülen ve morfolojik olarak faylanmanın uzun dönemli tercih ettiği düşünülen iki alan belirlenmiştir (Şekil 5a, b). Orta segment üzerinde gerçekleştirilen Hasanağa hendek çalışması ve Doğu segment üzerinde gerçekleştirilen Kayapa hendek çalışması aşağıda anlatılmıştır.



Şekil 5: a) Hasanağa ve b) Kayapa hendek alanlarının topoğrafik haritaları (AsterGDEM v2 dijital verisi kullanılarak üretilmiştir.)

3.1) Hasanağa Hendeği

3.1.1) Stratigrafi

Hasanağa hendeği kuzeye bakan bir yamaç üzerinde, birkaç metrelik ani sarplığı kesecek şekilde açılmıştır (Şekil 3c, Şekil 5a). Olası fay uzanımına dik olarak K-G yönelimli kazılan hendek yaklaşık 16 metre uzunluğa sahiptir. Derinliği ortalama 3 metredir. Hendek duvarlarında tane boyu, renk ve içerik bakımından yapılan değerlendirmelerle toplam 11 farklı birim ayırt edilmiştir (Şekil 6, Tablo 1). Stratigrafik olarak ayırtlanan birimlerden en güneyde yer alanlar anakaya ve buna ait ayrışma zonu olarak tanımlanırken (p, q ve r birimleri), daha genç birimler sedimanter çökel özelliği taşımaktadır (a-g). Sedimanter paketler yamaç eğimine uygun şekilde kuzeye düşük eğimli olarak çökelmiştir.

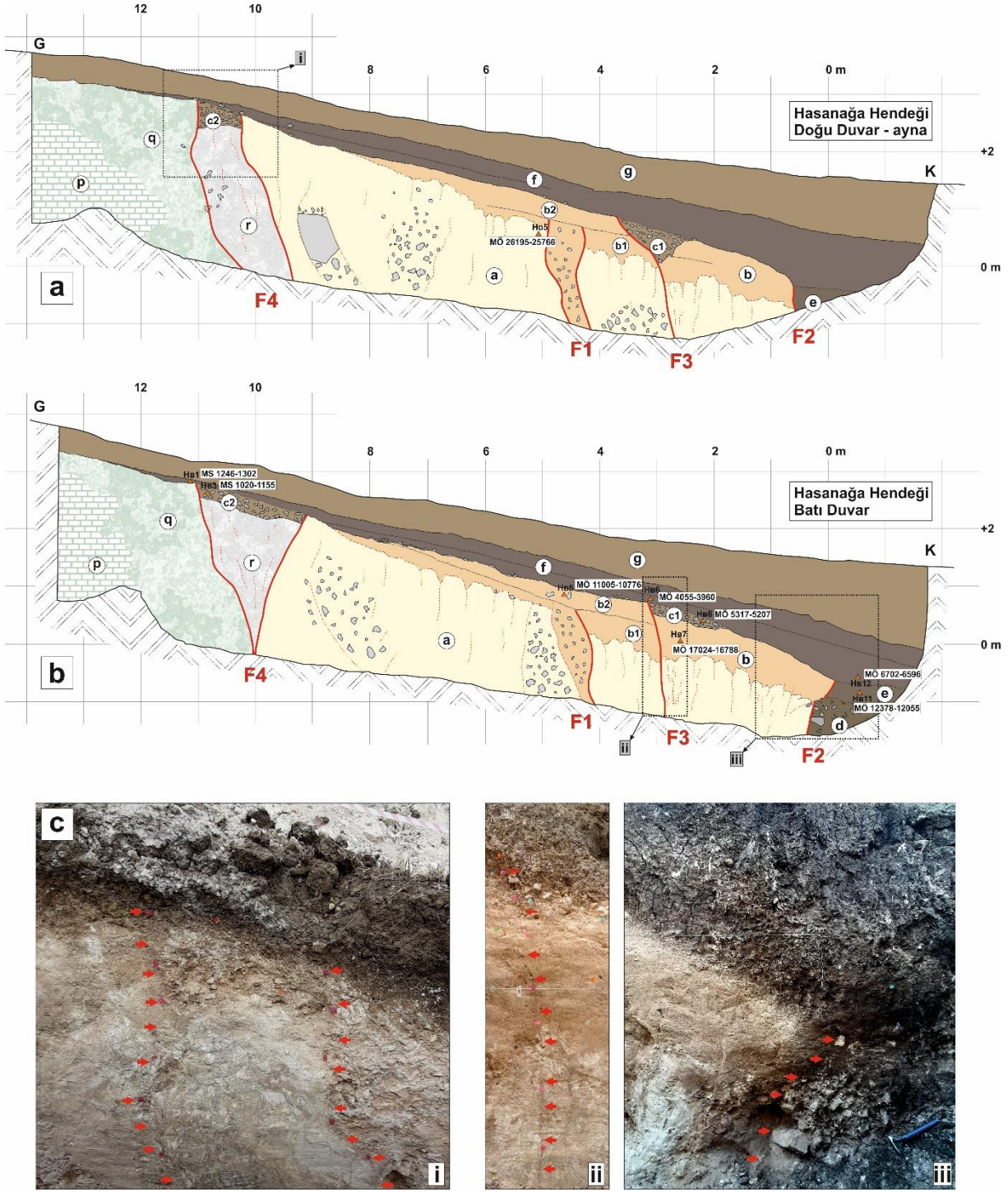
3.1.2) Yapısal ilişki

Hasanağa hendeğinde 0 ve 11'inci metreler arasında 4 ayrı kırık zonu varlığı dikkati çekmektedir (Şekil 6). Yüzeje yakınlığı ve stratigrafik olarak genç birimlerle olan kesme ilişkilerine göre bu zonlar F4, F3, F2 ve F1 şeklinde adlandırılmışlardır. 9 ile 11'inci metreler arasında konumlanan F4 zonu dike yakın iki ana kırık kolundan oluşmakta ve en güneydeki ana kaya birimleri ile daha kuzeydeki sedimanter paketlerin dokanağını kontrol etmektedir. İki kol hendek batı duvarında tabanda birleşmektedir. F4 zonu yüzeje en yakın kırıkları içermekte ve yüzeyin yaklaşık 50 cm altına kadar ulaşmaktadır. Alt kesimlerde *q*, *r* ve *a* birimlerini sınırlayan zon en üstte olasılıkla kolüvyal bir çökeli tanımlayan *c2* birimini sınırlamakta ve *f* birimi tarafından örtülmektedir. Zon içerisinde kalan *r* biriminin iç yapısı deformasyon izleri barındırmaktadır.

F3 zonu tek bir kırıktan oluşmaktadır. *a* ve *b* birimlerini kesen kol 65-80 derece kuzeye eğimli bir geometri sunmaktadır. *b* birimi üst yüzeyinde kuzey blok yaklaşık 20 cm düşey yönde yer değiştirmiş bir görünüme sahiptir. Bu alanda fay önünde kolüvyal çökeller birikmiştir (*c1*). Bu çökeller hendek doğu duvarında dolgusu görünümü sunmaktadır. F3 zonu yüzeyden yaklaşık 1 metre aşağıda F4 zonuna benzer şekilde *f* birimi tarafından örtülmektedir.

F2 zonu en kuzeyde görece daha yaşlı sedimanter birimler (*a* ve *b*) ile genç birimlerin (*d* ve *e*) sınırını oluşturmaktadır. Ana kol bu birimleri sınırlayan tek bir fay kırığından oluşmaktadır. Bununla birlikte bu kolun güneyinde kalan yakın kesimlerinde yaşlı birimler içerisinde yoğun deformasyon zonları (*a* ve *b* birimlerinde kılcal kırıklar) dikkati çekmektedir. Geometrik olarak dike yakın konumlanan zon, batı duvarda özellikle *b* birimini sınırladığı kesimde kuzeye eğimli bir görünüm kazanmaktadır. Bu geometri, fayın aktivitesi ile güney bloğun bir miktar yükselmiş olduğunu göstermektedir. Faylanma sırasında yükselen *b* birimi ise olasılıkla ön tarafında oluşan sarplık yönünde deforme olarak bir miktar hareket etmiştir. Fayın kuzey kısmında ise görece daha genç bir çökel olan *d* ve *e* birimleri bulunmaktadır. Bir senaryoya göre daha genç birimlerden en az bir tanesi (*e* birimi) kolüvyal çökel olarak çökelmiş olma ihtimaline sahiptir. Diğer yandan, genç birimler daha yaşlı olanlar ile önceki fay aktiviteleri ile yanyana getirilmiş ve F2 üzerindeki son depremde bir kez daha hareket etmiş olabilirler. Her iki durumda da F2 zonundaki son kırılma *e* birimi ile yaşıt veya daha genç olmalıdır. Bu zon *f* birimi tarafından örtülmektedir.

F1 zonu *a* birimini kesmekte ve *b* birimi içerisinde sonlanmaktadır. Doğu ve batı duvarda bu fayın sonlandığı seviye ayırt edilmiş ve büyük oranda benzer özellikler taşıyan *b1* ve *b2* birimleri tanımlanmıştır. Bu durum F1 zonu üzerindeki hareketin *b* birimi çökeli sırasında gerçekleşmiş olduğunu göstermektedir. F1 zonu genel anlamda dike yakınbir geometri sunmaktadır. Benzer özellikli 2 koldan oluşan zon içerisinde breşimsi dolgular mevcuttur. Zon üst kesimlerinde yüzeyden 1,5 metre aşağıda sonlanmaktadır.



Şekil 6: Hasanağa Hendeği a) Doğu duvar yorumlanmış logu (ayna görünümü) b) Batı duvar yorumlanmış logu c) Batı duvar karelejlanmış hendek fotoğrafları (Fotoğraf yerleri log üzerinde belirtilmiştir.)

Tablo 1: Hasanağa ve Kayapa hendekleri stratigrafik birim tanımlamaları (Birimler stratigrafik ilişkiler göz önünde bulundurularak her bir hendek için en altta yaşlıdan üstte gence doğru sıralanmıştır.)

Hendek	Stratigrafik birim	Açıklama
HASANAĞA	g	Bitkisel toprak
	f	Yer yer orta çakıl içeren koyu kahve renkli kil
	c2	Olası kolüvyal çökel (silt matriksli, orta boy, köşeli çakıl)
	c1	Kolüvyal çökel (silt matriksli, orta boy, köşeli çakıl)
	e	Kalışılı kil
	d	Yarı/tam yuvarlanmış orta/iri çakıl
	b2	Yer yer ince çakıl içeren kaba kumlu kahve renkli silt
	b1	Kaba kumlu açık kahve renkli silt
	a	Yer yer ince kumlu kesimlere sahip sarımtırak-beyaz karbonatlı kil, silt
	r	Yer yer karbonat yumruları içeren krem-beyaz kil
	q	Ana kaya ayrışma/bozunma zonu (yer yer beyazımsı karbonat yumruları içeren yeşilimsi kil)
	p	Ana kaya (kireçtaşı)
KAYAPA	d	Bitkisel toprak
	c	İnce çakıllı kahve renkli silt
	b2	Yoğun karbonat yumruları içeren ince çakıllı açık kahve renkli silt
	b1	Karbonatlı kızılsımsı kahve renkli killi silt
	a	Üst kesimlerinde yarı/tam yuvarlanmış orta/iri çakıl içeren, sarımtırak karbonatlı kil, silt, ince kum

3.1.3) Olay kronolojisi

Hasanağa hendeği duvarlarında ayırt edilen yapısal ilişkileri tarihlendirmek amacıyla stratigrafik seviyelerden 9 ayrı örnekleme yapılmıştır (Tablo 2). *a*, *b*, *b2*, *c1*, *c2*, *e*, *f* birimlerinden yapılan yaş analizleri stratigrafik gözlemleri ve olası yaş ilişkilerini doğrular niteliktedir. Bu yaş sonuçlarına göre F4 zonundaki kolüvyal çökel MS 1020-1155 (HB-3) yıllarına tarihlenmiştir. F4 kırığını örten *f* biriminden alınan yaş sonucu (MS 1246-1302, HB-1), bu zonun günümüzden yaklaşık 900 yıl önce meydana gelmiş bir depremle kırılmış olabileceğini göstermektedir. Bu olay tarihsel kaynaklarda aktarılan 26 Kasım 1143 Bursa (M=6.0) depremi (Ergin ve diğ. 1967, Ambraseys ve Finkel 1991) ile örtüşmektedir.

F3 kırığı önünde çökelen kolüvyal çökel MÖ 5317-5207 (HB-8) yıllarına tarihlenmiştir. Bu kırığı örten *f* biriminden alınan yaş sonucu (MÖ 4055-3960, HB-6), F3 fayının günümüzden yaklaşık 7 bin yıl önce meydana gelmiş bir depremle kırılmış olabileceğini göstermektedir.

F2 fayı *b2* biriminden genç (MÖ 11005-10776'dan sonra, HB-5), *e* birimi ile yaşıit veya daha genç niteliktedir (MÖ 12378-12055'den sonra, HB-11) ve *f* birimi tarafından örtülmektedir. HB-12 örneği (MÖ 6702-6596) fayın üst sınırını örten çökelleri tarihlemektedir. Bu durum F2 fayının günümüzden yaklaşık 9-12 bin yıl önceki aralıkta kırılmış olma ihtimalini göstermektedir. Bununla birlikte, F2 ve F3 fayları arasındaki kronolojik sıralama açık şekilde ayırt edilemediğinden bu iki kırığın aynı olay esnasında gelişmiş olma ihtimali az da olsa bulunmaktadır.

F1 fayı ise *a* biriminden gençtir ve *b* birimi ile eş yaşlıdır. *b1-b2* sınırında üstten HB-5 (MÖ 11005-10776) ve aynı zamanda, alttan HB-7 (MÖ 17024-16788) örneği ile sınırlandırılabilir. HB-5 örneği (MÖ 26195-25766) ile alt sınır yaşı doğrulanabilir. Dolayısıyla günümüzden yaklaşık 16 bin yıl önce bir depremle ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte yaş sonuçları arasındaki geniş zaman aralığı, bu tarihlendirmenin hata payını arttırmaktadır.

Eldeki veriler Hasanağa hendek alanı yakınlarında fay zonu üzerinde tekrarlanan depremlerin varlığını göstermektedir. Fay geometrisi bir miktar düşey bileşene sahip (kuzey bloğun düştüğü) doğrultu atımlı faylanmaya işaret etmektedir. En az 4 ayrı depreme ait tarihler bu zonda yaklaşık 3-6 bin yıl aralığında tekrarlanan yüzey kırığı oluştuğunu göstermektedir.

Tablo 2: Hasanağa ve Kayapa hendekleri radyokarbon yaş analiz sonuçları (Elde edilen "geleneksel radyokarbon yaşları" (conventional), toplam izotop dağılımları göz önünde alınarak düzeltilmiş ve Reimer ve diğ. (2013) kalibrasyon veri tabanlarına göre kalibre edilmiştir. Radyokarbon yaşı Takvim yaşına OxCal formatında dönüştürülmüş ve Ramsey (2009)'da verilen olasılık yöntemi kullanılarak en yüksek ihtimalli yaş aralıkları (INTCAL13) belirlenmiştir.)

Hendek	Stratigrafik birim	Örnek No	Geleneksel	Takvim yılına kalibre edilmiş	
			radyokarbon yaşı	radyokarbon yaşı	
			Yaş (GÖ)	Olasılık (%)	Tarih (MÖ/MS)
HASANAĞA	a	HD-5	23890±80	95.4	MÖ 26195-25766
	f	HB-1	720±30	90.3	MS 1246-1302
	c2	HB-3	960±30	95.4	MS 1020-1155
	b2	HB-5	10980±30	95.4	MÖ 11005-10776
	f	HB-6	5210±30	94.4	MÖ 4055-3960
	b	HB-7	15610±50	95.4	MÖ 17024-16788
	c1	HB-8	6260±30	93.5	MÖ 5317-5207
	e	HB-11	12250±40	95.4	MÖ 12378-12055
	f	HB-12	7830±30	92.2	MÖ 6702-6596
KAYAPA	b2	K-0	2420±30	74.9	MÖ 556-402
	c	K-1	1540±30	95.4	MS 426-588
	b2	K-2	2120±30	91.2	MÖ 206-50
	c	K-3	1600±30	95.4	MS 398-539
	b2	K-4	5210±30	94.4	MÖ 4055-3960

3.2) Kayapa Hendeği

3.2.1) Stratigrafi

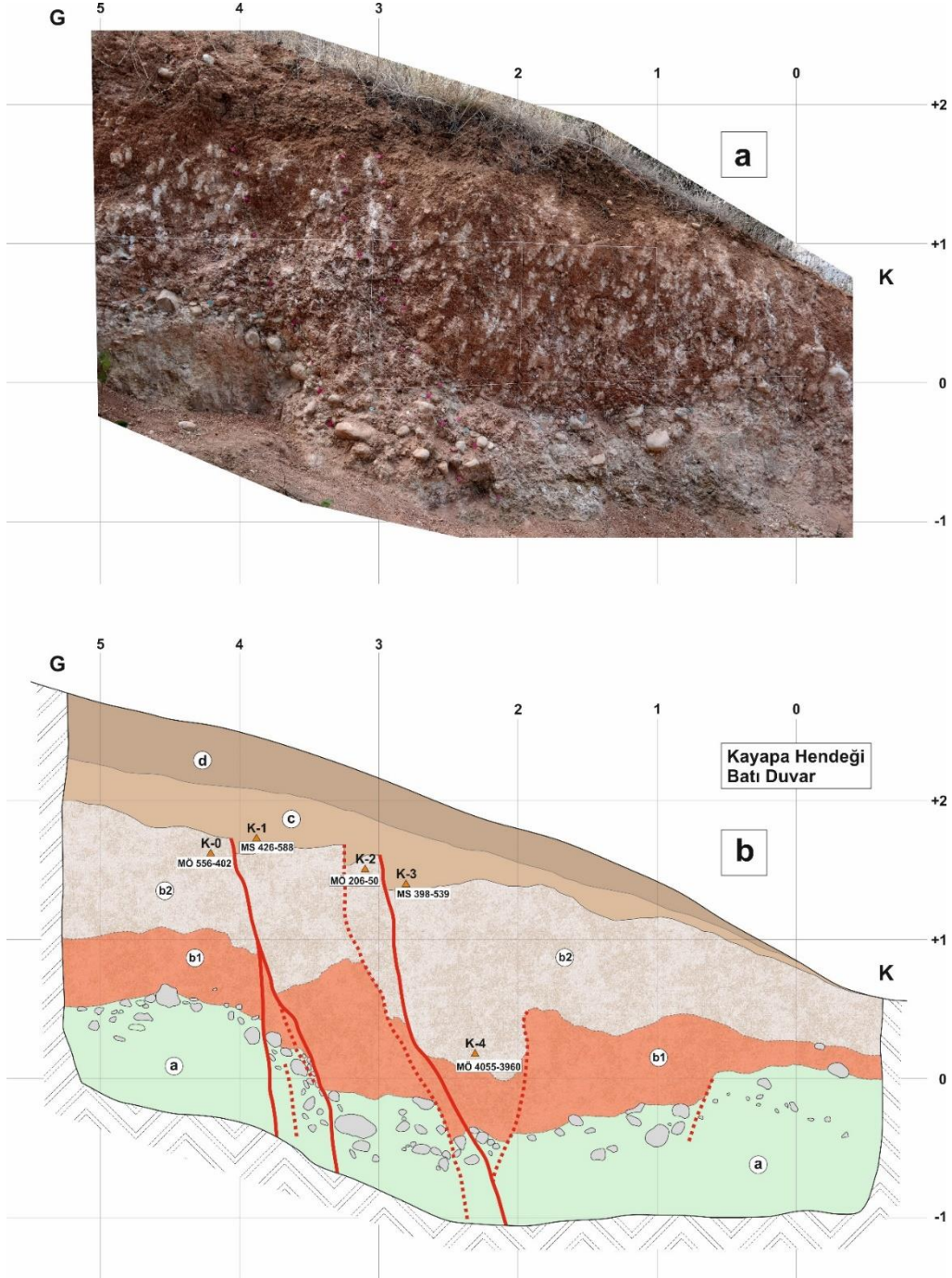
Kayapa hendeği kuzeye bakan düşük eğimli bir yamaç üzerinde, yaklaşık 1 metrelik ani bir sarplığı kesecek şekilde açılmıştır (Şekil 4a, Şekil 5b). Olası fay uzanımına dik olarak K-G yönelimli kazılan hendek yaklaşık 7 metre uzunluğa sahiptir. Derinliği 2 ile 3 metre arasında değişmektedir. Kayapa hendeği batı duvarında tane boyu, renk ve içerik bakımından yapılan değerlendirmelerle toplam 5 farklı birim ayırt edilmiştir (Şekil 6, Tablo 1). Stratigrafik olarak ayırtılan tüm birimler silt ağırlıklı sedimenter çökel niteliği taşımaktadır. Tamamı yamaç eğimine uygun şekilde kuzeye düşük eğimli olarak çökelmiştir.

3.2.2) Yapısal ilişki

Kayapa hendeğinde 2 ve 4'üncü metreler arasında kırık zonu varlığı dikkati çekmektedir (Şekil 7a). Zondaki kırıklar sırasıyla, yaşlıdan gence, *a-b1-b2* birimlerini kesmekte ve yüzeyden yaklaşık 60-70 cm derinde sonlanmaktadır. *c* birimi kırıkları örtmektedir. Kırıklar geometrik olarak benzer özellikler taşımakta ve sentetik olarak konumlanmaktadır. Tamamı yaklaşık 70 derece kuzeye eğimlidir. En kuzeyde ise *b1-b2* sınırında sonlanan bir kırık kuzeye eğimli kollardan en kuzeyde bulunan kırığa antitetik olarak yerleşmiştir. *a* birimi üst seviyelerinde gözlemlenen iyi yuvarlanmış çakılların kırıklar ile temas halinde olduğu kesimlerde uzun eksenleri bunlara paralel şekilde yönlenmektedir. Stratigrafik birimlerde kesme ve yerdeğiştirme özellikleri bir arada değerlendirildiğinde fayların eğim atım bileşenine sahip oldukları söylenebilir.

Tüm kırıklar bir arada değerlendirildiğinde *b2-c* birimleri sınırında kuzey blokta toplam ortalama 40 cm düşey yerdeğiştirme dikkati çekmektedir (Şekil 7b). *b1-b2* birim sınırı ve daha alt sınırlarda (*a-b1* sınırı) ise kuzey blokta toplam düşey yerdeğiştirme ortalama 70-80 cm'ye

ulaşmaktadır (Şekil 7b). *b1-b2* birimleri sınırını geçmeyen antitetik kırık varlığı ve derinlikle artan yerdeğiştirme bu sınır altında mevcut kırıkların birden çok kez kırılmış olabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla *b2-c* sınırında gözlemlenen 40 cm'lik yerdeğiştirme bir depreme ilişkili ise, aynı zonda *b1-b2* ve *a-b1* sınırlarında gözlemlenen 70-80 cm'lik yerdeğiştirme en az 2 depreme işaret etmektedir.



Şekil 7: Kayapa Hendeği Batı duvarı logu a) Karelejanmış hendek duvarı fotoğrafını, b) yorumlanmış hendek logunu göstermektedir

3.2.3) Olay kronolojisi

Kayapa hendeği batı duvarında varlığından şüphelenilen 2 olayın tarihlendirilebilmesi amacıyla uygun olduğu düşünülen kesimlerde 5 adet örnek toplanmıştır (K-0, 1, 2, 3, 4 örnekleri; Şekil 7b, Tablo 2). En genç olayı temsil ettiği düşünülen faylanma *b2-c* birimi sınırında 2 farklı kesimde toplam 4 yaş analizi ile sınırlandırılmıştır. K-0 ve K-1 örnekleri ile sınırlanan faylanma yaklaşık MÖ 400 - MS 426 aralığında bir olayı işaret ederken, aynı sınıra kadar ulaşan güneydeki kol K-2 ve K-3 örnekleri ile tarihlendirilmiştir. Olasılıkla aynı olayı temsil eden bu kırılma ise MÖ 50 ile MS 398 yılları arasında gerçekleşmiştir. Bu analizler, hendekte tarihlenen en genç olayın günümüzden yaklaşık 1800 yıl önce meydana gelmiş bir depremle ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Bu olay tarihsel kaynaklarda aktarılan 03 Mayıs 170 (I=IX) depremi (Soysal ve diğ. 1981) ile örtüşmektedir. Bununla birlikte Soysal ve diğ. (1981) 3 Mayıs 170 olarak katalogladığı depremi Ergin ve diğ. (1967) gibi daha önceki kaynaklardan alıntılamıştır. Kataloglama sırasında araştırmacıların Kyzikos (Güney Marmara) depreminin makrosismik verisi ile 3 Mayıs 181 tarihli iyi bilinen Nikomedeia (İzmit) depremini birleştirerek, hatalı bir olay kaydı ortaya çıkartmış olma ihtimalleri de tartışmalar arasındadır (Cenk Erkmen ile sözlü görüşme). Kyzikos Güney Marmara depreminin ise MS 161 yılının hemen öncesinde (<161) meydana geldiği ve bölgede birçok kentin ciddi hasar gördüğünü veya tamamen yıkıldığı kaydedilmiştir (Guidoboni ve diğ. 1994, Ambraseys 2009). Her iki durumda da hendekte yaş analizleri ile MÖ 50 – MS 398 aralığına sınırlanan olayın MS 170 veya daha büyük olasılıkla MS<161 Güney Marmara depremi ile eşleşme ihtimali oldukça yüksektir.

Bir önceki olay ise *b1-b2* birim sınırının tarihlendirilmesi ile ortaya çıkarılabilir niteliktedir. Bu amaçla söz konusu sınıra en yakın kesimden *b2* birimi tabanını tarihleyen bir örnekleme yapılabilmektedir (K-4 örneği). Bu örnek MÖ 4055-3960 yıllarına tarihlenmiştir. Alınan yaş analizi sonucuna göre günümüzden yaklaşık 6-7 bin yıl öncesinde bir diğer depremin varlığından söz edilebilir.

Yeterli istatistiksel değerlendirme şansı sunmamakla birlikte, elde edilen sonuçlar Ulubat fay uzanımının bu kesimlerinde yaklaşık 4-5 bin yıl ara ile tekrarlanan ve yaklaşık 40 cm düşey yerdeğiştirme meydana getiren depremlerin varlığını ortaya koymaktadır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Ortaya konulan çalışmalar sonucunda (jeolojik-jeomorfolojik arazi gözlemleri, kinematik değerlendirmeler ve paleosismolojik çalışmalar), Ulubat Fayı baskın olarak sağ yanal doğrultu atımlı özellik sunan bir Holosen Fayı olarak tanımlanmıştır. Arazide yaklaşık 54 km takip edilebilen uzanım boyunca Batı, Orta ve Doğu olarak adlandırılan 3 segment tanımlanmıştır. Orta ve Doğu segmentlerde yürütülen paleosismolojik çalışmalar ile son 16 bin yılda en az 6 eski deprem izi ayırt edilmiştir. Geometrik segmentasyon ile uyumlu olan paleosismik davranış her bir segmentte bağımsız kırık gelişimine işaret etmektedir. Tarihsel kayıtlarla ilişkilendirilen yaş sonuçları Ulubat Fayı Doğu ve Orta segmentleri boyunca en son yüzey kırıklarının sırasıyla <161 (veya 170) (I=IX) ve 1143 (M=6.0) depremleri ile oluştuğunu göstermektedir. Batı segmentte henüz paleosismolojik kayıt elde edilememiş olmakla birlikte, tarihsel kayıtlarda 28 Şubat 1855 (M=7.3)'de meydana gelen büyük deprem sırasında bu uzanımın kırılmış olabileceği şeklinde bir görüş birliği bulunmaktadır (örneğin; Öztin ve Bayülke 1990, Ambraseys ve Finkel 1991, Barka 1997). Bu durum Ulubat Fayı boyunca deprem aktivitesinin, son iki bin yılda, KAFZ genel karakterine uygun şekilde batıya göç ettiğini göstermektedir. Dolayısıyla, Bursa yerleşim yerine (Nilüfer İlçesi) en yakın şekilde konumlanan Doğu segment üzerinde yaklaşık 1850 yıllık bir suskunluk bulunmaktadır.

Marmara Bölgesi'nde yapılan Küresel Konumlama Sistemi (KKS) hız ölçümleri ve modellemeleri Uludağ Yükselimi kuzeybatısı boyunca KAFZ güney kolu üzerinde 2,9 - 9,6 mm/yıl sağ yanal faylanma hareketi ve 4,2 - 8,8 mm/yıl normal faylanma hareketinin varlığını ortaya koymaktadır (Meade ve diğ. 2002, Reilinger ve diğ. 2006, Aktug ve diğ. 2009). Bu deformasyonun Balıkesir ve Gemlik yakınlarında konumlanan paralel kollar ile paylaşıldığı göz önünde bulundurulduğunda (Şekil 1a), Ulubat Fayı payına göz ardı edilemeyecek ölçekte bir güncel deformasyon varlığı düşmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Ulubat Fayı'nın Uludağ Yükselimi kuzeyinde önemli bir aktivite üstlendiğini göstermektedir. Yürütülen çalışmalarla elde edilen veriler ışığında Ulubat Fayı segmentlerinin karakteristik özellikleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Doğu segmentte her depremde yaklaşık 40 cm düşey yer değiştirme meydana geldiği tespit edilmiştir. Yaklaşık 1mm/yıllık düşey kayma hızı ile bu yer değiştirme 4 bin yıllık periyotlarda deformasyon birikimi gerektirmektedir. Bu durum paleosismolojik gözlemlerin ve çıkarımların bölgedeki güncel KKS hız verileri ile (Gemlik, Gençali, Zeytinbağ, Karacabey gibi en az 3-4 paralel kol üzerine dağılan 1-2 mm/yıl sağ yanal ve normal kayma hızı) tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

KAFZ ana uzanımı boyunca deprem tekrarlanma aralığı 100-1200 yıl aralığında önerilmekle birlikte, bu periyot bazı kesimlerinde 100-300 yıl aralığına kadar düşmektedir (örneğin, Fraser 2009, Fraser ve diğ. 2010, Hartleb ve diğ. 2006, Klinger ve diğ. 2003, Kozacı 2008, Rockwell ve diğ. 2009, Karabacak ve diğ. 2019). Dahası Hartleb ve diğ. (2006) ve Kozacı (2008) bu tekrarlanmanın aynı periyotlarda gerçekleşmediğini öne sürerken, Fraser (2009) bu periyodun iki farklı döngüde gerçekleşmiş olabileceğini belirtmiştir. Bununla birlikte, Güney Marmara'da uzanan KAFZ güney kolları üzerindeki deprem davranışı KAFZ'nun diğer kesimleri ile karşılaştırıldığında belirsizliğini korumaktadır. Bu kollar boyunca son yıllarda artan sayıda paleosismolojik çalışmalarda farklı deprem davranış tipleri ortaya konulmuştur. Örneğin; Yenice-Gönen Fayı (Kurcer ve diğ. 2008) üzerinde 660 yıl ve Havran-Balıkesir Fayı (Sozbilir ve diğ. 2016a) üzerinde 1000-2000 yıl deprem tekrarlanma aralığı önerilmiştir. Manyas Fayı (Kurçer ve diğ. 2017) ve Orhaneli Fayı (Ozaksoy ve diğ. 2018) üzerinde deprem tekrarlanma aralığı önerilememiştir. Edremit Fayı (Sozbilir ve diğ. 2016b), Mustafa Kemalpaşa Fayı (Kop ve diğ. 2016) ve Bekten Fayı (Ozalp ve diğ. 2016) üzerinde ise sistematik bir deprem tekrarlanma aralığının önerilemeyeceği bildirilmiştir. Ozalp ve diğ. (2013) tarafından Gemlik Fayı'nda üretilen paleosismolojik veriler, Geyve ve İznik Fayları ile birlikte tartışılmış ve bu fayların tekrarlanma periyodu düzenli olmayan büyük depremler ürettiği şeklinde yorumlanmıştır.

Bu çalışmada ortaya konulan arazi delilleri Ulubat Fayı'nın geometrik özellikleri ile birbirinden ayrılan 3 farklı segmentten oluştuğunu göstermektedir. Yeterli istatistiksel değerlendirme şansı sunmamakla birlikte, son 16 bin yıllık paleosismik kayıtlar, Ulubat Fayı'nın bağımsız segmentlerinde tekrarlanma periyodu farklılıklarının varlığını ortaya koymuştur. Orta segmentde yaklaşık 3-6 bin yıl ara ile tekrarlanan depremler, Doğu segmentte 4-5 bin yıllık bir periyotta tekrarlanmaktadır. Bununla birlikte, ulaşılan kayıtlarda günümüzden yaklaşık 7 bin yıl önce en az iki segmentin (Orta ve Doğu) bir arada kırılmış olabileceğine yönelik deliller de elde edilmiştir. Bu durum, KAFZ güney kollarının birçoğunda (Geyve, İznik, Gemlik, Edremit, Mustafa Kemalpaşa, Bekten, Manyas ve Orhaneli Fayları) tartışma konusu olarak ön plana çıkan paleosismolojik davranış modeli ile benzerlik göstermektedir ve Ulubat Fayı segmentlerinin deprem davranışının düzenli olmadığı şeklinde yorumlanabilir. Sonuç olarak bu çalışmada ortaya konulan paleosismolojik veriler, Güney Marmara'da KAFZ kolları boyunca yayınlanmış veriler ile birlikte değerlendirildiğinde; (1) KAFZ güney kolunu oluşturan segmentlerin karakteristik deprem davranışı sunmadığını, (2) bu düzensizliğin fay zonunun bölgedeki çok parçalı geometrisinden kaynaklı olabileceğini kanıtlamaktadır.

Tablo 3: Ulubat Fayı segmentlerinin karakteristik özellikleri (Segmentlerin üretebileceği deprem büyüklüğü, yerdeğiştirme ve fay uzunlukları kullanılarak Wells ve Coppersmith (1994) tarafından önerilen diyagramlar temelinde hesaplanmıştır.)

Segment	Haritalanan uzunluk (km)	Geometrik özellikleri			Deprem tekrarlanma aralığı (binyıl)	Son büyük deprem (yüzeysel kırığı faylanması)		Her bir depremde yer değiştirme miktarı (cm)	Üretebileceği deprem büyüklüğü (M)	
		jeolojik-jeomorfolojik gözlemler	kinematik değerlendirmeler	paleosismolojik çalışmalar		tarihsel kayıt	paleosismolojik çalışmalar		tek segment	birarada kırılma
Batı	18	sağ yanal	---	---	---	1855 (M=7.3)*	---	---	6.5	7.1
Orta	21	sağ yanal	sağ yanal	doğrultu atımlı	3 - 6	1143 (M=6.0)**	MS 1020-MS 1155	---	6.7	
Doğu	15	oblik	sağ yanal	eğim atımlı normal	4 - 5	<161*** veya 170 (I ₀ =IX)****	MÖ 50 - MS 398	40	6.4	

* (Öztin ve Bayülke 1990, Ambraseys ve Finkel 1991, Barka 1997), ** (Ergin ve diğ. 1967, Ambraseys ve Finkel 1991), *** (Guidoboni ve diğ. 1994, Ambraseys 2009), **** (Soysal ve diğ. 1981)

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP) tarafından UDAP-G-18-01 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Çalışma sırasında toplanan organik çökeller Beta Analytic, Inc., laboratuvarlarında tarihlendirilmiştir. Yazarlar hakem sürecinde yapıcı değerlendirmelerinden dolayı Selim Özalp ve ismi bilinmeyen diğer hakeme teşekkür eder. Ayrıca, basım öncesi halinde makaledeki tarihsel deprem verilerine yönelik görüşlerini paylaşan Cenk Erkmen'e teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Aktug B., Nocquet, J.M., Cingoz A., Parsons A., Erkan Y., England P., Lenk O., Gurdal M.A., Kilicoglu A., Akdeniz H., Tekgul A., 2009. Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: limits to block-like behaviour, *J Geophys Res.* 114, 1-22.

Ambraseys N.N., 2009. Earthquakes in the Mediterranean and middle East (A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900). Cambridge University Press Cambridge 2009.

Ambraseys N.N., Finkel C.F., 1991. Long-term seismicity of Istanbul and the Marmara Sea region, *Terra Nova* 3, 527-39.

Barka A.A., 1997. Neotectonics of the Marmara Region, Active Tectonics of the northernwestern Anotolia-the Marmara poly-project, ETH, Zurich, 55-87.

Barka A.A., Kadinsky-Cade K., 1988. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity, *Tectonics* 7, 663-684.

Doğan A., Emre Ö., Yıldırım C., 2005. Uluabat Fayı: Kuzeybatı Anadolu'nun güncel kinematiklerinde sıkışmalı bir doğrultu atımlı fay örneği. Eskişehir Fay Zonu ve İlişkili Sistemlerin Depremselliği Çalıştayı, Osmangazi Üniversitesi, 28-30 Nisan 2005, Eskişehir.

Emre Ö., Doğan A., Duman T.Y., Özalp S., 2011a. 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Bursa (NK 35-12) Paftası. Seri No: 9, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.

Emre Ö., Doğan A., Özalp S., Yıldırım C., 2011b. 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Bandırma (NK 35-11b) Paftası. MTA 1:250.000 Ölçekli Diri Fay Haritaları Serisi, Seri No: 3, 55 s., Ankara-Türkiye.

Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., 2011c. 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Kütahya (NJ 35-4) Paftası. Seri No: 10, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.

Ergin K., Güçlü U., Uz Z., 1967. Earthquake Catalogue of Turkey and Nearby Regions (from 11 AD to 1964 BC). ITU Mine Faculty Press, İstanbul.

Eyidoğan H., Akinci A., Polat O., 1997. The characteristics of site, source and regional attenuation in the vicinity of Bursa city, northwestern Turkey. In: Cakmak A.S., Erdik M., Durukal E. (eds) Proceedings of 8th international conference on soil dynamics and earthquake engineering, İstanbul, 32-33.

Fraser J.G., 2009. Four new paleoseismic investigations on the North Anatolian Fault, Turkey, in the context of existing data, PhD thesis. Belgium, Brussels: Univ. Libre de Bruxelles. 284 pp.

Fraser J.G., Vanneste K., Hubert-Ferrari A., 2010. Recent behavior of the North Anatolian Fault: Insights from an integrated paleoseismological data set, *Journal of Geophysical Research* 115, B09316.

Guidoboni E., Comastri A., Traina G., 1994. Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to the 10th century. Istituto Nazionale di Geofisica. Rome 1994.

Hartleb R.D., Dolan J.F., Kozacı O., Akyuz H.S., Seitz G.G., 2006. A 2500-yr-long paleoseismologic record of large, infrequent earthquakes on the North Anatolian fault at Cukurcimen, Turkey, *Bulletin of the Seismological Society of America* 118(7-8), 823-840.

Karabacak V., Uysal I.T., Mutlu H., Unal-Imer E., Dirik R.K., Feng Y.-X., Akiska S., Aydogdu I., Zhao J.-X., 2019. Are U-Th dates correlated with historical records of earthquakes? Constraints from co-seismic carbonate veins within the North Anatolian Fault Zone, *Tectonics* 38 (7), 2431-2448.

Klinger Y., Sieh K., Altunel E., Akoglu A., Barka A.A., Dawson T., 2003. Paleoseismic evidence of characteristic slip on the western segment of the North Anatolian Fault, Turkey, *Bulletin of the Seismological Society of America* 93(6), 2317-2332.

Kop A., Ozalp S., Elmaci H., Kara M., Duman T.Y., 2016. Active Tectonic and Paleoseismological Features of the Western Section of Mustafakemalpaşa Fault; Bursa, NW Anatolia, *Geodinamica Acta* 28 (4), 363-378.

Kozacı Ö., 2008. Constancy of strain release rates along the North Anatolian Fault, PhD thesis, 174 pp. Los Angeles: Univ. of South. Calif.

Kurçer A., Chatzipetros A., Tutkun S.Z., Pavlides S., Ates O., Valkaniotis, S., 2008. The Yenice-Gönen active fault (NW Turkey): Active tectonics and palaeoseismology, *Tectonophysics* 453, 263-275.

Kurcer A., Ozaksoy V., Ozalp S., Uygun-Guldoğan C., Ozdemir E., Duman T.Y., 2017. The Manyas Fault Zone (Southern Marmara Region, NW Turkey): Active Tectonics and Paleoseismology, *Geodinamica Acta* 29 (1), 42-61.

Meade B.J., Hager B.H., McClusky S.C., Reilinger R.E., Ergintav S., Lenk O., Barka A., Ozener H., 2002. Estimates of seismic potential in the Marmara region from block models of secular deformation constrained by GPS measurements, *Bull Seismol Soc Am.* 92(1), 208-215.

Okay A.I., Satir M., Zattin M., Cavazza W., Topuz G., 2008. An Oligocene ductile strike-slip shear zone: The Uludağ Massif, northwest Turkey—Implications for the westward translation of Anatolia, *GSA Bulletin* 120, 893-911.

Ozaksoy V., 2018. On the distinction of tectonic and nontectonic faulting in palaeoseismological research: a case study from the southern Marmara region of Turkey, *International Journal of Earth Sciences* 107, 1777-1788.

Ozaksoy V., Elmaci H., Ozalp S., Kara M., Duman T.Y., 2018. Holocene activity of the Orhaneli Fault based on palaeoseismological data, Bursa, NW Anatolia. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 156, 1-16.

Ozalp S., Emre O., Dogan, A., 2013. The segment structure of Southern Branch of the North Anatolian Fault and paleoseismological behaviour of the Gemlik Fault, NW Anatolia. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 147, 1-17.

Ozalp S., Kurcer A., Ozdemir E., Duman T.Y., 2016. The Bekten Fault: The paleoseismic behaviour and kinematic characteristics of an intervening segment of the North Anatolian Fault Zone, Southern Marmara Region, Turkey, *Geodinamica Acta* 28 (4), 347-362.

Özting F., Bayülke N., 1990. Historical earthquakes of İstanbul, Kayseri and Elazığ, Earthquake Research Department, General Directorate of Disaster Affairs, Ministry of Public Works and Settlement Report, Ankara, 22 s.

Ramsey B.C., 2009. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337-360.

Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Karam G., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *J. Geophys. Res.* 111, B5, B05411.

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey B.C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliðason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J., 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP, *Radiocarbon* 55(4), 1869-1887.

Rockwell T., Ragona D., Seitz G., Langridge R., Aksoy M. E., Uçarkus G., 2009. Palaeoseismology of the North Anatolian Fault near the Marmara Sea: Implications for fault segmentation and seismic hazard. In K. Reicherter, A.M. Michetti, & P.G. Silva (Eds.), Palaeoseismology: Historical and prehistorical records of earthquake ground effects for seismic hazard assessment, *Geol. Soc. Spec. Publ.* 316, 31-54.

Selim H.H., Tuysuz O., 2013. The Bursa-Gönen Depression, NW Turkey: a complex basin developed on the North Anatolian Fault, *Geological Magazine* 150 (5), 801-821.

Selim H.H., Tuysuz O., Karakas A., Tas K.O., 2013. Morphotectonic evidence from the southern branch of the North Anatolian Fault (NAF) and basins of the south Marmara sub-region, NW Turkey, *Quaternary International* 292, 176-192.

Sengor A.M.C., Tuysuz O., Imren C., Sakıncı M., Eyidoğan H., Gorur N., Le Pichon X., Rangin C., 2005. The North Anatolian Fault: A New Look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 37-112.

Seyitoglu G., Kaypak B., Aktug B., Gurbuz E., Esat K., Gurbuz A., 2016. An alternative route for the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, NW Turkey. *Geological Bulletin of Turkey* 59 (2), 115- 130.

Sieberg A., 1932. Untersuchungen über Erdbeben und Bruchschollenbau im östlichen Mittelmeer, G. Fischer Verlag, Jena.

Soysal H., Sipahioğlu S., Kolçak D., Altınok Y., 1981. Türkiye ve çevresinin deprem katalogu, MÖ 2100-MS 1900 (Earthquake catalogue of Turkey and surroundings, 2100 BC-1900 AD). TUBITAK Yayınları (TBAG 341), 99 s.

Sozibilir H., Ozkaymak C., Uzel B., Sumer O., Eski S., Tepe C., 2016a. Palaeoseismology of the Havran-Balıkesir Fault Zone: evidence for past earthquakes in the strike-slip-dominated contractional deformation along the southern branches of the North Anatolian fault in northwest Turkey, *Geodinamica Acta* 28, 4, 254-272.

Sozibilir H., Sumer O., Ozkaymak C., Uzel B., Guler T., Eski S., 2016b. Kinematic analysis and palaeoseismology of the Edremit Fault Zone: evidence for past earthquakes in the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Biga Peninsula, NW Turkey, *Geodinamica Acta* 28, 4, 273-294.

Wells D., Coppersmith K., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 974-1002.