



Bursa İli Yerleşim Alanlarının Deprem Tehlikesi: Ulubat, Bursa ve İnegöl Diri Faylarının Paleosismolojik Özellikleri
Earthquake Hazard in Urban Areas of Bursa Province: Paleosismological Properties of the Ulubat, Bursa and İnegöl Active Faults

Volkan Karabacak^{1*} , Taylan Sançar² 

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

² *Munzur Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, Tunceli, Türkiye*

• Geliş/Received: 18.02.2025 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 06.04.2025 • Kabul/Accepted: 07.04.2025
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 20.04.2025 • Baskı/Printed: 30.04.2025

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Bu çalışma, Bursa ve çevresindeki diri fay uzanımlarının segment bazında ayrıntılı haritalanmasını ve paleosismolojik veriler ışığında deprem davranışlarının kapsamlı analizini konu almaktadır. Bursa İli, yoğun nüfus ve sanayi altyapısıyla Türkiye'nin stratejik ekonomik merkezlerinden biridir; dolayısıyla bölgenin deprem riski açısından bütüncül değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir.

Ulubat Fayı'nın doğu segmentine yönelik paleosismolojik analizler, yaklaşık 1855 yıldır sismik olarak suskun bir dönem geçirdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, Bursa İli Nilüfer bölgesinde gelecekte meydana gelebilecek büyük bir depremin potansiyeline işaret etmektedir. Bursa kent merkezinde gerçekleştirilen hendek çalışmaları, Bursa Fayı'nın son 12 bin yılda en az altı yüzey kırığı ürettiğini ve bu depremlerin yaklaşık 2000 yıllık periyotlarla tekrarlandığını ortaya koymuştur. Ayrıca, İnegöl Fayı'nda yürütülen hendek çalışmaları, fay boyunca son 12 bin yılda en az beş yüzey kırığının meydana geldiğini ve son büyük depremin yaklaşık 2500 yıldan daha öncesinde gerçekleştiğini göstermektedir. Elde edilen veriler, Bursa ve İnegöl faylarının eş zamanlı ya da kısa aralıklarla kırılarak birbirini tetikleme potansiyeline sahip olduğunu vurgulamıştır. Bu anlamda, 1855 Bursa depremine bağlı oluşan yüzey kırığının, İnegöl Fayı üzerinde gerilim birikimini tetiklemiş olabileceği değerlendirilmiştir. Bu durum, İnegöl Fayı üzerinde 2500 yıllık sismik suskunluk dönemi ardından her an yüzey kırığı meydana getirebilecek bir deprem ($M=6,2-6,9$) olma olasılığının yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Tüm bulgular, Bursa ve çevresindeki fayların bölgenin depremselliği açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymakta; özellikle Bursa ve İnegöl faylarının ardışık kırılmalar yoluyla yüksek deprem tehlikesi oluşturduğu gerçeğini güçlendirmektedir. Bu kapsamlı analizler, bölgenin sismotektonik dinamiklerinin daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Paleosismoloji, Bursa, diri fay, sismik tehlike.

Abstract: This study provides a detailed mapping of active fault segments in Bursa and its surrounding regions, along with a comprehensive analysis of seismic behavior derived from paleoseismological data. As one of Türkiye's strategic economic centers with a dense population and industrial infrastructure, Bursa requires a holistic seismic risk assessment for effective disaster preparedness and mitigation.

Paleoseismological analyses of the eastern segment of the Ulubat Fault indicate that it has been in a seismic quiescence period for approximately 1855 years. This prolonged period of inactivity highlights the potential for a

* Yazışma / Correspondence: karabacak@ogu.edu.tr

large earthquake in the future around the Nilüfer Region of Bursa. Trench investigations conducted in Bursa city-centre reveal that the Bursa Fault has produced at least six surface ruptures over the past 12000 years, recurring approximately every 2000 years. Additionally, trench studies on the İnegöl Fault indicate that the İnegöl Fault has produced at least five surface ruptures over the last 12000 years, with the most recent major earthquake occurring more than 2500 years ago. Obtained results emphasize the potential for the Bursa and İnegöl faults to rupture simultaneously or in close succession, possibly triggering one another. Thus, the surface rupture caused by the 1855 Bursa earthquake is evaluated to have potentially triggered stress accumulation along the İnegöl Fault. This situation reveals a high probability of a surface-rupturing earthquake ($M=6.2-6.9$) occurring at any time on the İnegöl Fault, after 2500 years of seismic silence.

Overall, these findings underscore the critical role of the faults in Bursa and its surroundings within the regional seismicity. In particular, the potential for sequential ruptures along the Bursa and İnegöl faults presents a significant earthquake hazard. This comprehensive analysis contributes to a deeper understanding of the seismotectonic dynamics of the region, providing valuable insights for seismic hazard assessment and risk mitigation efforts.

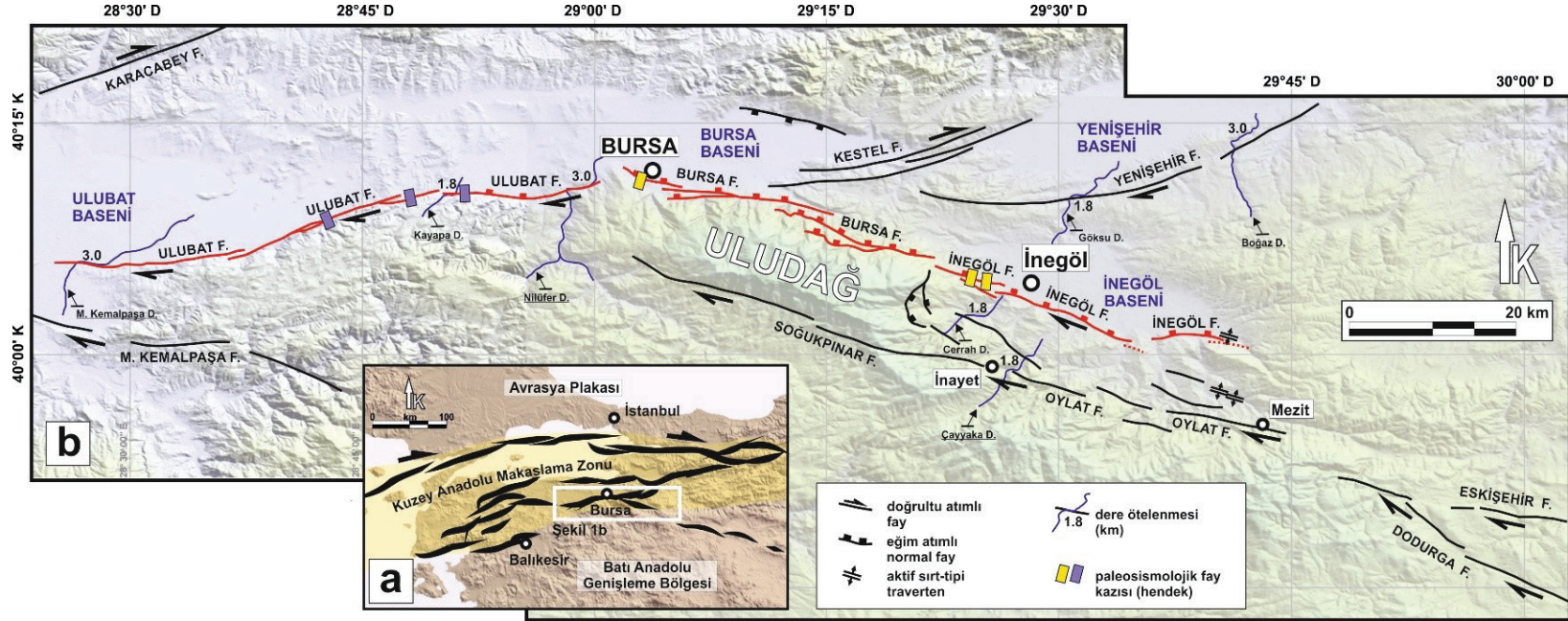
Keywords: Paleoseismology, Bursa, active fault, seismic hazard.

GİRİŞ

Güney Marmara Bölgesi'nde konumlanan Uludağ yükselimi, Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB) ile Kuzey Anadolu Makaslama Zonu (KAMZ) arasında özel bir tektonik konuma sahiptir. Aynı zamanda Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)'nun güney kollarını en güneyden sınırlamaktadır (Şengör vd., 2005, Okay vd., 2008, Özalp vd., 2013, Selim ve Tüysüz 2013) (Şekil 1a). Önceki çalışmalarda, Uludağ yükseliminin kuzey-kuzeydoğusunda konumlanan Bursa ve İnegöl fayları bazı araştırmacılar tarafından Eskişehir Fay Zonu ile de ilişkilendirilmiştir (örneğin McKenzie 1978, Okay 1984, Şengör vd., 1985, Şaroğlu vd., 1987, Barka vd., 1995, Emre vd., 2013, 2018 Seyitoğlu ve Esat 2022). Bununla birlikte, güncel çalışmaların ortak görüşü bu fayların KAFZ'nin etkisi altında şekillendiğini öne sürmektedir (Şengör 1979, Şengör vd., 1985, Barka ve Kadinsky Cade 1988, Barka 1992, Seyitoğlu vd., 2016). Örneğin bu bölge Şengör vd., (2005) tarafından KAMZ içerisine dahil edilmiştir. Bölgenin neotektonik resmini net şekilde ortaya koyan son çalışma ise Karabacak vd., (2022) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Uludağ kuzey kesimini kontrol eden Ulubat, Bursa ve İnegöl faylarının KAFZ güney kolunu oluşturan segmentlerle benzer gerilme rejimi içerisinde geliştiği belirtilmiş ve en az 500 bin yıl önce KAFZ güney kolunun bölgeye

ulaşması ile eş zamanlı aktive olduğu ortaya konulmuştur.

Güney Marmara Bölgesi'nde gerçekleştirilen GNSS ölçümleri ve modellemeler ile Uludağ yükseliminin kuzey kesiminde, KAFZ güney kolu üzerinde, 2,9 - 9,6 mm/yıl yanal ve 4,2 - 8,8 mm/yıl düşey hız hesaplanmıştır (Meade vd., 2002, Reilinger vd., 2006, Aktuğ vd., 2009). Bu deformasyonların Balıkesir ve Gemlik yakınlarında yeralan KAFZ kolları ile paylaşıldığı göz önünde bulundurulduğunda (Şekil 1a), Uludağ kuzeyini denetleyen fayların güncel deformasyona etkileri bakımından önemli bir role sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ulubat, Bursa ve İnegöl fayları batıdan doğuya bir yay geometrisi ile Uludağ yükseliminin kuzeyini sınırlamaktadır (Barka ve Kadinsky-Cade 1988, Özalp vd., 2013) (Şekil 1b). Ayrıca tarihsel dönem deprem kaynaklarına göre 27 Şubat 1855'te Ulubat Fayı'nın batı ucunda meydana gelen ($M=7,3$) ve 11 Nisan 1855'te Bursa Fayı boyunca oluşan ($M=6,3$) yıkıcı depremler (Sieberg 1932, Ambraseys ve Finkel 1991, Barka 1997, Eyidoğan vd., 1997), bu zondaki fay segmentlerinin yüzey kırığı üretme potansiyellerini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, literatürde yeralan çalışmalarda, Uludağ yükselimi kuzeyindeki fayların paleosismolojik davranışlarına ilişkin detaylı ve sistematik bulgular sınırlıdır (örneğin Karabacak vd., 2021).



Şekil 1. a) Kuzeybatı Anadolu'nun başlıca neotektonik bölgeleri ile çalışma alanının konumunu gösteren harita. Siyah çizgiler diri fay uzanımlarını belirtmektedir (taban haritası SRTM-3arc-second dijital verisi kullanılarak üretilmiştir). **b)** Bursa ve yakın çevresinde diri fay uzanımları. Faylar Emre vd., (2011a, 2011b ve 2011c), Özalp vd., (2013), Selim vd., (2013), Selim ve Tüysüz (2013), Seyitoğlu vd., (2016), Özaksoy (2018), Karabacak vd., (2021)'den faydalanılarak tarafımızdan arazide haritalanmıştır (taban haritası Aster GDEM dijital verisi kullanılarak üretilmiştir). Siyah çizgiler Kuvaterner, kırmızı çizgiler ise Holosen aktivitesi kanıtlanan diri fayları göstermektedir. Sarı dikdörtgenler bu çalışmada, mavi dikdörtgenler ise Karabacak vd., (2021) çalışmasında gerçekleştirilen hendek lokasyonlarını göstermektedir.

Figure 1. a) Map showing the main neotectonic regions of Northwest Anatolia and the location of the study area. Black lines indicate active fault extensions (base map generated using SRTM-3arc-second digital data). **b)** Active fault extensions in Bursa and its vicinity. Faults were mapped by us based on Emre et al. (2011a, 2011b and 2011c), Özalp et al. (2013), Selim et al. (2013), Selim and Tüysüz (2013), Seyitoğlu et al. (2016), Özaksoy (2018), and Karabacak et al. (2021) (base map produced using Aster GDEM digital data). Black lines indicate Quaternary and red lines indicate active faults with proven Holocene activity. Yellow rectangles indicate trench locations in this study, and blue rectangles indicate trench locations in the study of Karabacak et al. (2021).

Bu çalışmada, Bursa İli ve çevresindeki önemli yerleşim merkezlerinde deprem tehlikesi açısından kritik öneme sahip ve Uludağ yükseliminin kuzey sınırını oluşturan Ulubat Fayı, Bursa Fayı ve İnegöl Fayı'nın karakteristik özelliklerinin (fay geometrisi, segment yapısı, kinematığı ve deprem davranışı) detaylı olarak ortaya konması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, diri fay uzanımları jeolojik ve jeomorfolojik belirteçler kullanılarak haritalanmış, Ulubat Fayı, Bursa Fayı ve İnegöl Fayı boyunca gerçekleştirilen paleosismolojik hendek çalışmaları ile segment bazında deprem davranış özellikleri (gerçekleşen son depremin tarihi, depremlerin tekrarlanma aralığı ve oluşabilecek maksimum deprem büyüklüğü) ortaya konulmuştur.

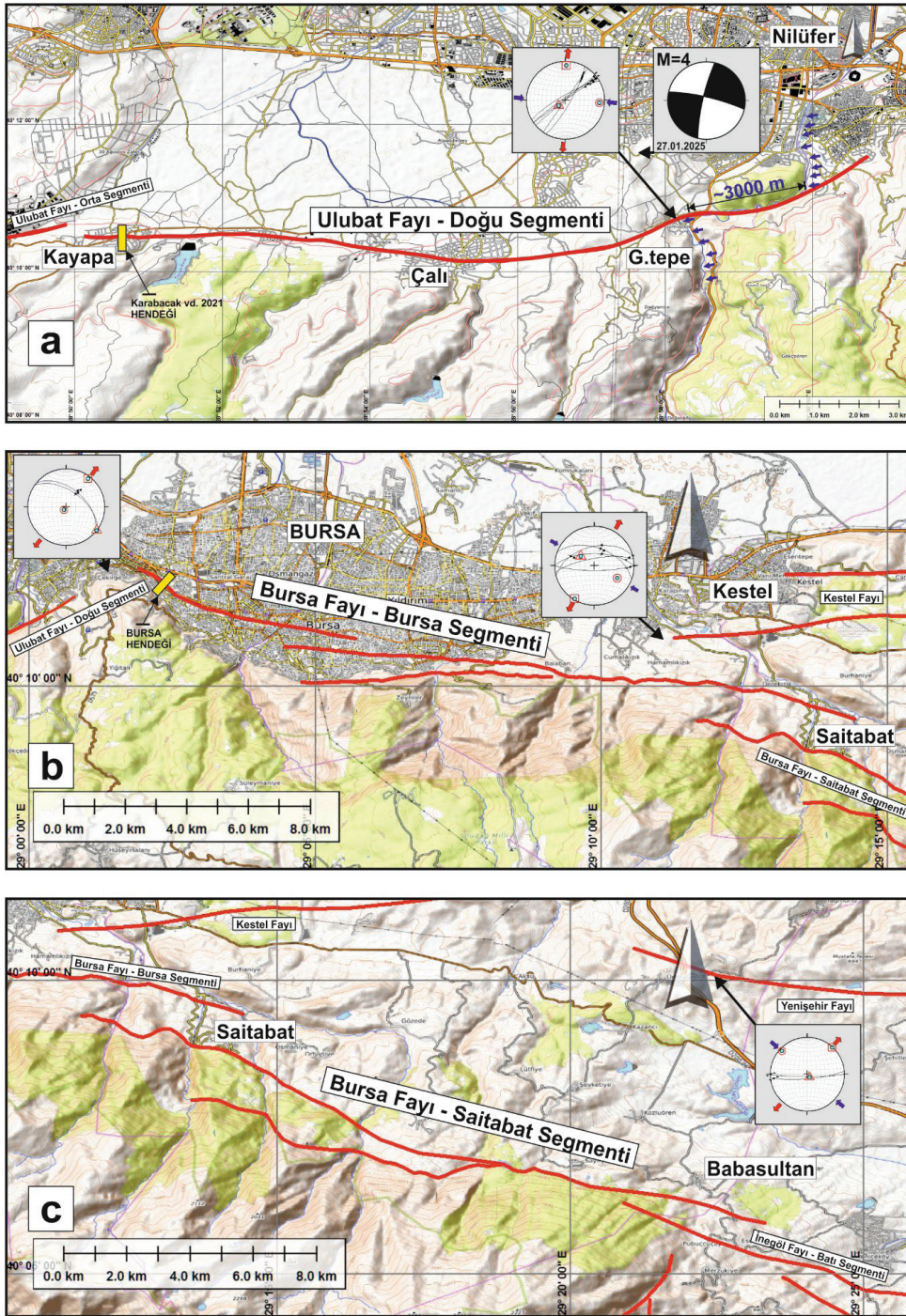
DİRİ FAYLARA İLİŞKİN BULGULAR

Bu çalışmada ortaya konulan diri faylara ilişkin jeolojik, jeomorfolojik arazi gözlemleri ve kinematik değerlendirmeler, gerçekleştirilen paleosismolojik çalışmalara temel oluşturacak düzeyde aşağıda sıralanmıştır. Bu kapsamda Ulubat Fayı ve segmentlerine ilişkin veriler Karabacak vd., (2021) çalışması, Soğukpınar Fayı ve Oylat Fayı verileri ise Alçıçek vd., (2023) çalışması temel alınarak yeniden sunulmuştur.

Ulubat Fayı yaklaşık 54 km boyunca arazide takip edilebilen, baskın olarak sağ yanal doğrultu atımlı bir Holosen fayıdır. Karabacak vd., (2021) tarafından geometrik özelliklerine ve sismolojik davranışına göre üç farklı segmente ayrılmaktadır (*Batı, Orta ve Doğu segmentleri*) (Şekil 1b). Ulubat Gölü'nün güney-güneybatısında yer alan *Batı segmenti*, yaklaşık 18 km uzunluğunda D-B doğrultusunda uzanır ve baskın sağ yanal hareket izleri (örneğin Mustafa Kemalpaşa Deresi'nde $3\pm 0,1$ km ötelenme) ile düşey bileşenli bir hareketi gösterir (Şekil 1b). Bu segment, doğu ucunda Ulubat Gölü kenarında 500 m güneye sıçrama

yaparak Orta segmentten ayrılır ve 20° 'lik bir aç farkı oluşturur (Şekil 1b). *Orta segment*, KD-GB yönünde 21 km uzunluğa sahiptir ve başlıca doğrultu atımlı hareket sergiler; KD'da çatallanarak güneyde topografik bir yükselime ulaşır ve Kayapa yakınlarında 20° lik bir sıçrama ile Doğu segmentine geçiş yapar (Şekil 1b ve 2a). *Doğu segmenti* ise D-B yönünde yay şeklinde uzanır, yer yer düşey hareket bileşenleri gösterirken doğu ucunda Nilüfer Deresi'nde $3\pm 0,1$ km sağ yanal ötelenme ile baskın yanal atım karakterinin izlerini sergiler (Şekil 2a).

Bursa Fayı, Uludağ yükseliminin kuzey sınırını oluşturan eğim atımlı normal bir fay olup, kuzeyindeki Bursa havzasının tektonik kontrolünü sağlamaktadır (Şekil 1b). Fay, yaklaşık 33 km uzunluğunda olup, DGD-BKB doğrultusunda uzanmaktadır ve iki temel segmente ayrılmaktadır: *Bursa ve Saitabat segmentleri*. *Bursa segmenti*, 21 km uzunluğa sahip olup (Şekil 2), batıda Uludağ yükseliminin kuzeye doğru kama şeklinde uzandığı bir bariyerle, Ulubat Fayı-Doğu segmenti arasında yaklaşık 4 km'lik bir ayraç oluşturmaktadır (Şekil 2b). Bursa şehir merkezini kapsayan batı uzanımı, KD-GB yönelimli segment geometrisi ve belirgin fay düzlemleriyle genişlemeli tektonik rejiminin izlerini taşımaktadır. Bu kesimde fay, şehir merkezinde yaklaşık birbirine paralel üç morfolojik kol boyunca izlenebilmekte ve doğuya doğru tek kol halinde devam ederek Saitabat Köyü kuzeyinde son bulmaktadır (Şekil 2b). *Saitabat segmenti*, Saitabat yakınlarında yaklaşık 1,3 km güney yönlü bir sıçrama ve 10° güney sapması göstererek, benzer bir geometri ile 18 km boyunca uzanmaktadır. Bursa ve Saitabat segmentleri, yaklaşık 3,5 km genişliğinde havzaya doğru basamaklı bir geometri oluşturmaktadır. Her iki segmentte de normal faylanma morfolojisi belirgindir. Saitabat segmenti, Babasultan civarına kadar izlenebilmekte ve doğuda İnegöl Havzası'nda sonlanmaktadır (Şekil 2c).



Şekil 2. a) Ulubat Fayı Doğu segmenti, **b)** Bursa Fayı Bursa segmenti ve **c)** Bursa Fayı Saitabat segmenti genel haritası (tabanlık Open Topo Map veri tabanından alınmıştır). Mavi oklar Nilüfer Çayı sağ yanal yerdeğiştirmesini, sarı dikdörtgenler hendek alanlarını göstermektedir.

Figure 2. General map of the Bursa Fault: **a)** Bursa segment and **b)** Saitabat segment (basemap was taken from the Open Topo Map database). Blue arrows show the right lateral displacement of Nilüfer Stream, whereas yellow rectangles show the trench areas.

Uludağ yükseliminin güneyini sınırlandıran Soğukpınar Fayı sağ yanal doğrultu atım karakteri sergilemekte olup, D-GD yönünde Uludağ yükselimi eksenini verev şekilde kesmektedir (Şekil 1b). Bu fayın D-GD yönündeki izi İnayet Köyü güneydoğusundan itibaren aynı doğrultuda devam ederek, erken dönemde normal faylanmaya ait deliller sunan sağ yanal doğrultu atımlı Oylat Fayı boyunca devam etmektedir. Bölgesel tektonik çerçevede, Soğukpınar ve Oylat fayları, İnegöl Neojen Havzasının güney sınırını oluşturan ve havzanın gelişiminde temel rol oynayan başlıca yapısal unsurlar olarak değerlendirilmektedir (Alçıçek vd., 2023).

Normal faylanma geometrisine sahip Bursa Fayı Saitabat segmenti doğuda İnegöl Havzası batı ucuna kadar uzanarak Babasultan Köyü yakınlarında sonlanır (Şekil 1b). Daha güneyde Babasultan doğusunda ise yaklaşık KB-GD doğrultusunda 33 km uzunluğundaki İnegöl Fayı konumlanır (Şekil 1b ve 3). İnegöl Havzası içerisinde Neojen ve Kuvaterner çökellerinin sınırını kontrol eden İnegöl Fayı geometrik uzanımı ve oblik faylanmaya işaret eden kinematik özellikleri ile Bursa Fayı'ndan ayrılır. Doğuya ilerledikçe sağ yanal doğrultu atımlı bir yapıya dönüşerek tektonik rejimdeki değişimi yansıtır.

İnegöl Fayı arazide belirgin morfolojik izlerle takip edilebilen üç geometrik segmente ayrılır (Şekil 3). *Batı segment* Babasultan Köyü güneyinden Cerrah Köyü batısına kadar toplam 8,5 km uzanmaktadır (Şekil 3a). Bu segment boyunca sağ yanal dere ötelenmeleri belirgindir ve ötelenme miktarı, Yeniceköy Deresi üzerinde 450 m'ye ulaşmaktadır. Morfolojisi belirgin olan Batı segment 2 fay kazısı ile paleosismolojik olarak incelenmiştir. Daha doğuda *Orta segment* olarak isimlendirilen segment toplamda en az 16 km uzunluğa sahiptir ve çizgisel tek gidişlidir (Şekil 3b). Güneydoğusunda sağa sıçrayarak yaklaşık 2 km'lik bir çizgisellik sunarak sonlanmaktadır. Kinematik veriler geç dönemde segmentin sağ yanal bileşene sahip oblik atımlı

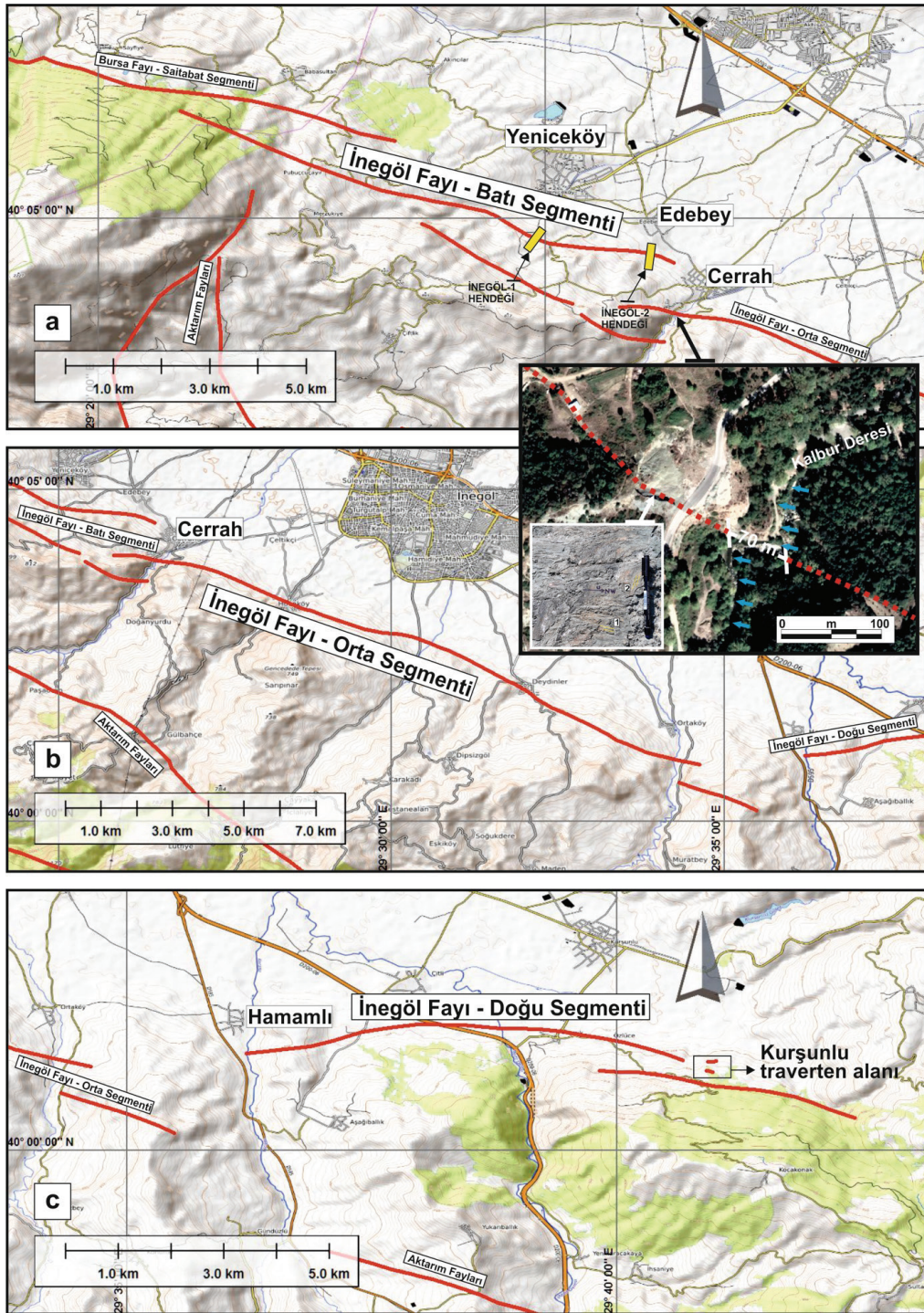
normal karaktere evrildiğini göstermektedir (Alçıçek vd., 2023). Orta segmenti dik olarak katederek İnegöl havzasına doğru akan Kalbur Dere yatağında gözlenen yaklaşık 70 m'lik sağ yanal yerdeğiştirme bu segment boyunca ölçülen maksimum yanal yerdeğiştirme miktarıdır (Şekil 3b). İnegöl Fayı'na ait *Doğu Segment*, Hamamlı köyü yakınlarında (29°36' boylamından doğuya) başlayarak birbirine paralel/yaklaşık paralel 2 kol halinde kuzeye dışbükey bir yay geometrisi sunar (Şekil 3c). Yaklaşık doğu-batı uzanımlı kuzey kol, Kurşunlu (Bakmaca) traverten sahası yakınlarında sonlanırken güney kol GD yönünde Neojen çökelleri içerisinde Rüştüye ve Eski Karacakaya traverten sahalarında sonlanmaktadır (Şekil 1b).

Saitabat segmentinin doğu ucunda Bursa ve Oylat Fayları arasında ikincil fay uzanımları bulunmaktadır. Ana deformasyonu üstlenecek ölçekte uzanımına sahip olmayan ve normal faylanma geometrisine sahip Bursa Fayı ile doğrultu atımlı Oylat Fayları arasında oblik konumlanan bu kırıklar olasılıkla İnegöl havza oluşumunun başlangıcından itibaren genişlemeyi sağlayan ve baskın açılma geometrisi sunan ikincil yapılardır. Bu anlamda ana faylar arasında deformasyon aktarımını sağlayan bir rampayı kırarak şekillendirdikleri öngörülebilir. Bu özellikleri ile bu kırıklar, Alçıçek vd., (2023) tarafından aktarım fayları olarak tanımlanmıştır.

PALEOSİSMOLOJİK FAY KAZILARI

Bursa Hendeği

Bursa Hendeği, Bursa Fayı'nın doğu bölümünde yer alan Bursa Segmenti'nin şehir merkezi içerisindeki en kuzey kolu üzerinde yer almaktadır (Şekil 1b ve 2b). Bursa il merkezinde yer alan Reşat Oyal Parkı içinde, doğal görünümü insan etkisi ile bozulmuş, yaklaşık 5 metre yüksekliğe sahip olan kuzeye eğimli fay sarplığının önünde açılmıştır (Şekil 4a ve b).



Şekil 3. İnegöl Fayı. a) Batı, b) Orta ve c) Doğu segmentleri genel haritası (tabanlı Open Topo Map veri tabanından alınmıştır).

Figure 3. General map of the İnegöl Fault: a) Western segment, b) Central segment and c) Eastern segment (basemap was taken from the Open Topo Map database).

Fay uzanımına dik olarak KKD-GGB doğrultusunda kazılan hendek yaklaşık 8 metre uzunluğunda ve ortalama 2.5 metre derinliğindedir. Bursa hendeğinin GD duvarı detaylı şekilde çalışılarak loglanmıştır (Şekil 4b). Hendek duvarlarında tane boyu, renk ve içerik bakımından yapılan stratigrafik değerlendirmeler sonucunda toplam sekiz farklı birim ayırt edilmiştir (Çizelge

1). Bu birimler, sedimanter çökel özellikleri göstermekte olup a-g harfleriyle belirtilmiştir. En üstte bulunan “h” birimi ise otopark alanına serilen stabilizasyon malzemesidir. Sedimanter paketler çalışma alanındaki yamaç eğimine paralel olarak kuzeydoğu yönünde düşük eğimli olarak çökelmiştir.



Şekil 4. a) Bursa Fayı'na ait Bursa Segmenti üzerinde şehir merkezinde açılan Bursa Hendeği (bakış yönü batıdır, kırmızı oklar olası diri fay uzanımına ait morfolojik çizgiselliği işaret etmektedir), **b)** Bursa Hendeği doğu duvarından bir görünüm. Kırmızı çizgiler Holosen yüzey kırıklarını (normal fay) göstermektedir.

Figure 4. a) The Bursa trench excavated in the city center along the Bursa Fault (view towards the west); red arrows indicate morphological lineaments associated with the possible active fault trace. **b)** East wall of the Bursa trench; red lines mark Holocene surface ruptures interpreted as normal faults.

Çizelge 1. Hendeclere ait birim açıklamaları. (Birimlerin süperpozisyon ilişkilerine göre alttan üste doğru, sırasıyla yaşlıdan gence doğru sıralanmıştır)

Table 1. Unit descriptions from the trench walls. (According to the superposition relations of the units, they are listed from bottom to top, from oldest to youngest.)

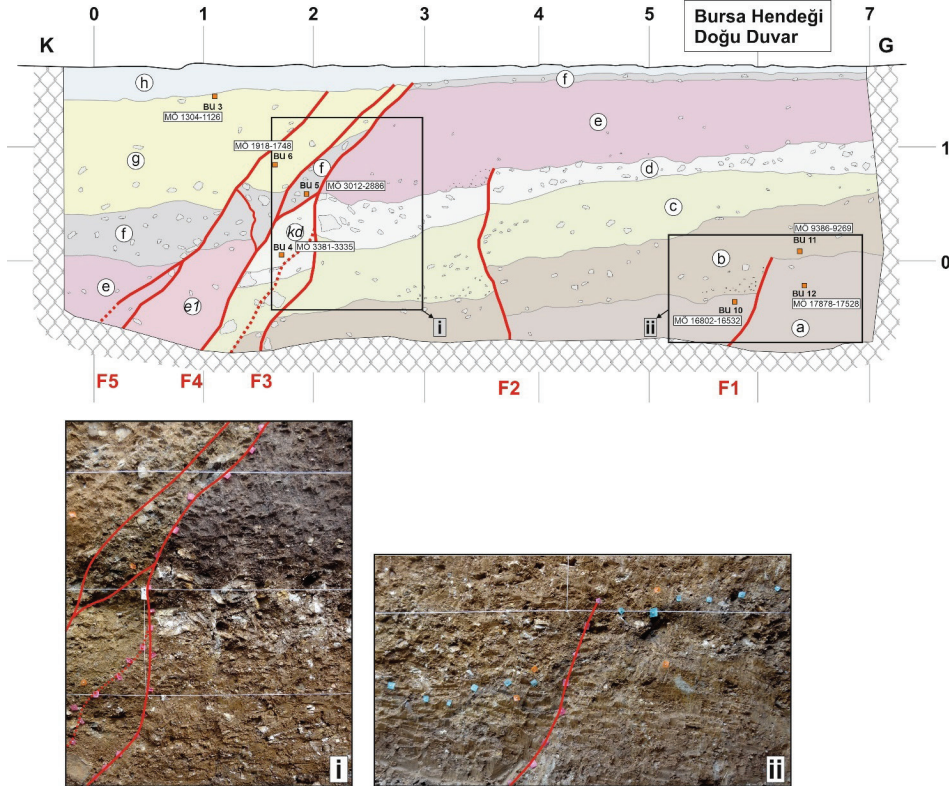
	Stratigrafik birim	Açıklama
Bursa Hendeği	h	Stabilizasyon malzemesi (yapay dolgu)
	g	Sarımsı kahve ince kumlu silt
	f (f1)	Bol miktarda orta çakıl içeren açık kahve silt (f1 fay zonunda makaslanmış ilksel iç yapısını kaybetmiş f'den türemiş birimdir)
	e (e1)	Yer yer ince çakıl içeren kırmızımtırak silt (e1 fay zonunda örselenmiş ilksel iç yapısını kaybetmiş e biriminden türemiş birimdir)
	kd	Çoğunlukla "d" biriminden türemiş koluvyum
	d	Kil-ince kum matriksli köşeli ince-orta boy beyazımtırak çakıl
	c	Köşeli çakıllar içeren açık kahverengi silt
	b	Bol miktarda ince çakıl içeren turuncumsu kahve silt
	a	İnce çakıllı kil
İnegöl-1 (Yeniceköy) Hendeği	k	Bitkisel toprak
	j	Yarı köşeli orta boy çakıllar içeren açık kahverengi silt
	i	Sarımsı kahverengi ince-orta çakıllı silt
	h	Orta-iri boy köşeli-yarı köşeli çakıllar içeren kremi silt
	g	Sarı killi silt
	f	Yer yer köşeli çakıllar içeren açık kahve kumlu silt
	e	Açık sarı ince çakıllı silt
	d	Kahverengi killi silt
	c	Sarımsı kahve silt
	b	Kahvemsî-kırmızı silt matriksli ince çakıl
İnegöl-2 (Edebey) Hendeği	a (a1, a2, a3)	Kırmızımtırak kil-silt matriksli yarı köşeli orta-ince çakıl (a1'den 3'e çakıl boyutu incelmekte)
	f	Bitkisel toprak
	e2	Yarıköşeli çakıllar içeren kahverengi ince çakıllı kaba kum
	e1	İnce çakıllı kahverengi kaba kum
	d2	Koyu gri orta çakıllı seyrek kumlu kil-silt
	d1	Açık gri seyrek kumlu kil-silt
	c	Yarı köşeli çakıllar içeren kahverengi kaba kumlu silt
	b3	Sarımsı silt seviyeleri içeren grimsi-kahve bol kalışli seyrek kumlu silt
	b2	Sarımsı silt seviyeleri içeren açık gri bol kalışli seyrek kumlu silt
	b1	Kahverengi bol kalışli ince kumlu silt
	a	Yer-yer orta-ince yarı köşeli çakıl içeren koyu gri kil

Bursa hendeğinde 5 ana kırık zonunun varlığı dikkati çekmektedir (Şekil 5). Jeolojik birimlerdeki süperpozisyon ve kesen-kesilen ilişkilerine göre en yaşlıdan gence bu zonlar F1, F2, F3, F4 ve

F5 şeklinde adlandırılmışlardır. Hendeğin 5. ile 6. metreleri arasında konumlanan F1 kırığı, yüzeyin yaklaşık 160 cm altına kadar ulaşmakta ve stratigrafik olarak en yaşlı konumdaki "a"

birimini kesmektedir. Bu kırık boyunca “a” birimi üst sınırında 40 cm’lik düşey yerdeğiştirme izlenmektedir. F1 kırığı “b” birimi tarafından örtülmektedir. Hendek duvarının orta kesiminde bulunan F2 kırığı, tabandan itibaren 4 birimi kesmektedir. Yaklaşık dik bir geometriye sahip kırık boyunca daha derinde “a” ve “b” birimlerindeki düşey yerdeğiştirme miktarı (30 cm), yüzeye daha yakın konumdaki “c” ve “d” birimlerindeki düşey yerdeğiştirmelerin iki katıdır. Daha üstteki “c” ve “d” birimlerindeki yerdeğiştirmenin bir sismik olayla ilişkilendirildiği durumda, alt seviyelerdeki “a” ve “b” birimlerinin en az 2 kez kırıldığı yorumu yapılabilir. Bununla birlikte, “a” ve “b” birimlerini birlikte kesen bu eski olay, yalnızca “a” birimini kesen F1 fayı üzerindeki olaydan farklıdır. Hendek duvarında en genç faylanmalar kuzey kesimde öbeklenmiştir. Genel anlamda

eğim atımlı normal fay karakteristiği gösteren F3, F4 ve F5 kırıkları birbirleri ile uyumlu ve yaklaşık 60 derece kuzeydoğuya eğimlidirler. Bu 3 kırık hendekteki tüm birimleri keserek yüzeye kadar ulaşmaktadır. Eğer F3 fayının en son kestiği birim sınırı “d” birimi üst yüzeyi olarak kabul edilirse, bu olayın F2 fayındaki genç yerdeğiştirme ile eş zamanlı gerçekleştiği değerlendirilir. Bu durumda “kd” birimi bu depremin kolüvyumu olarak yorumlanabilir. F2 ve F3 fayını eşzamanlı kıran olayın düşey yerdeğiştirme miktarı toplam 40 cm olarak hesaplanmıştır. F4 ve F5 faylarının üst kısmı yüzeyde insan müdahalesi ile tıraşlanmış olmasına rağmen “e” ve “f” birimlerinde gözlenen yerdeğiştirme izleri, bu fayların geçmişte 3 ayrı yüzey faylanması olayı ürettiğine işaret etmektedir. Bu olaylar, yaklaşık 150 cm toplam düşey yerdeğiştirme oluşturmuştur.



Şekil 5. Bursa Hendeği doğu duvarının yorumlanmış logu ve hendek fotoğrafları.

Figure 5. Interpreted log of the east wall of the Bursa trench and photos from the trench.

Hendek duvarında stratigrafik seviyelerden 7 ayrı numuneden Karbon-14 yaş analizi yapılmıştır (Çizelge 2). “a, b, kd, f, g” birimlerinden yapılan yaş analizleri hendek içerisindeki stratigrafik gözlemleri ve göreceli yaş ilişkilerini doğrular niteliktedir. Bu analiz sonuçlarına göre F1 kırığını örten “b” biriminin alt sınırı MÖ 9300'lere (BU11) tarihlenmiştir. “a” birimini temsil eden BU10 ve BU12 numunelerinin tarihlendirme sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde hendekte gözlemlenen en eski depremin günümüzden yaklaşık 12-13 bin yıl önce meydana gelmiş olabileceğini göstermektedir. F2 kırığında gözlemlenen eski olay “b” birimini de kesmektedir. BU11 ve BU4 yaş analizleri, bu depremin MÖ 9269 ile MÖ 2501 yılları arasında gerçekleştiğine işaret etmektedir. Aynı kırıktaki genç olay ise kesen-kesilen ilişkisine göre, olasılıkla F3 kırığındaki ilk olay ile eş yaşlı olmalıdır. “kd” birimi bu olayın oluşturduğu kolüvyum olarak değerlendirildiğinde, BU4 etiketli numunenin Karbon-14 yaş tayini sonucu, depremin MÖ 3381'den hemen önce meydana geldiğini göstermektedir. F4 kırığında en az iki ayrı olayın izleri gözlenmektedir. F4 kırığının yüzeye doğru daha güneye dallanan, F3 kırığının üst kesimini kullanarak yüzeye uzanmakta ve “f” birimini keserek öteleme oluşturmaktadır.

Bu durum hendekte gözlemlenen 4 numaralı olayın MÖ 3012-2886 (BU5) tarihinden sonra meydana geldiğini göstermektedir. Aynı kırığın (F4) diğer ucu ise “g” birimi içerisinden yüzeye ulaşarak bir sonraki olayı (5 numaralı) temsil etmektedir. “g” biriminden alınan BU3 ve BU6 örneklerinin Karbon-14 yaş tayini bu olayın MÖ 1126'dan sonra meydana geldiğini açıkça göstermektedir. En genç kırık olarak yorumlanan F5, olasılıkla Bursa'yı etkilediği bilinen MS 1855 depremi ile ilişkilidir. Eldeki veriler, Bursa Fayı üzerinde, son 12000 yılda, en az 6 ayrı yüzey

faylanmasına neden olan yıkıcı depremlerin meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Hendek içerisinde gözlenen fay geometrisi ve litolojilerdeki yerdeğıştirmeler, kuzeydoğu bloğunun düştüğüne ve Bursa Fayı'nın eğim atımlı normal karakterine işaret etmektedir. Elde edilen bulgulara göre, Bursa Fayı'nın havzaya (kuzeydoğuya) doğru gençleşmekte ve yaklaşık 2000 yılda bir tekrarlanan yıkıcı depremler üretmektedir. Her bir depremde ortalama 50 cm'ye ulaşan düşey yerdeğıştirmeler meydana gelmektedir. Bunlara ek olarak “f” ve “kd” birimlerinden elde edilen (MÖ 3381 ile MÖ 2886 arası) Karbon-14 yaş analiz sonuçları dikkate alındığında “e” ve “f” birimlerinde gözlenen gözlenen yaklaşık 152 ± 10 cm'lik toplam düşey yerdeğıştirme Bursa Fayı üzerinde en az $0,30 \pm 0,04$ mm/yıl düşey kayma hızını ortaya koymaktadır.

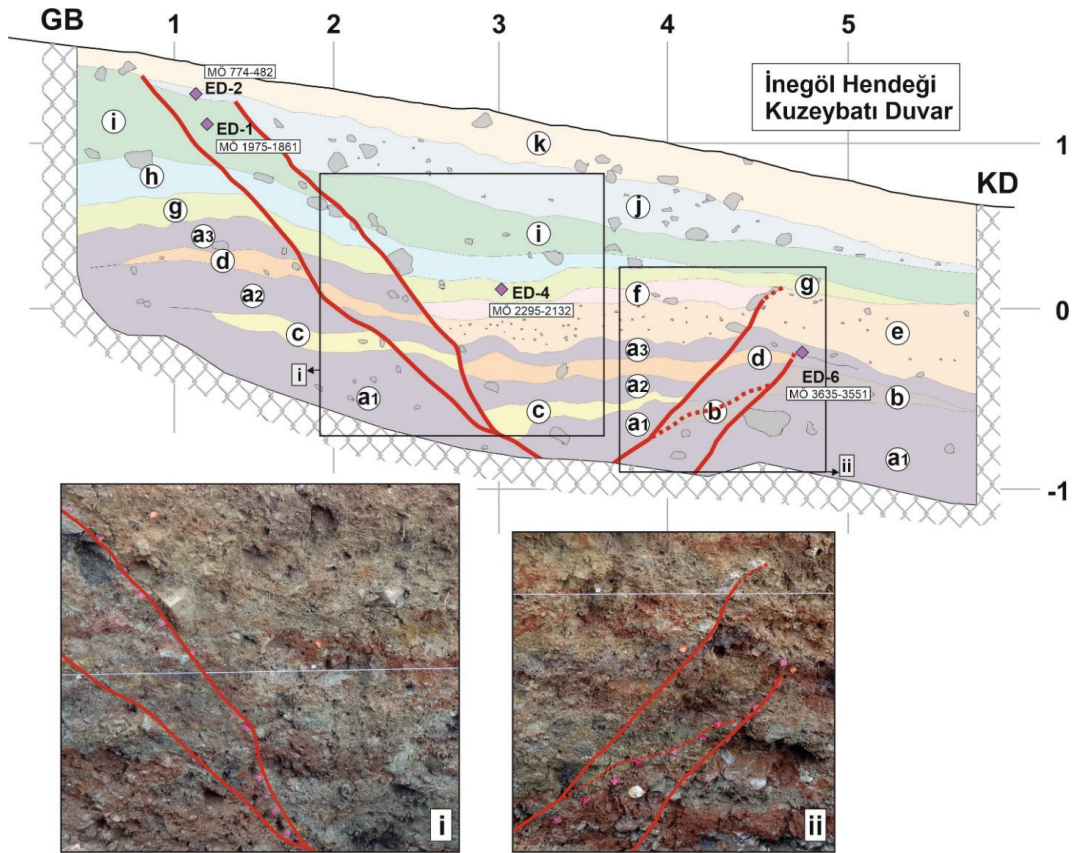
İnegöl-1 (Yeniceköy) Hendeği

İnegöl Fayı'na ait Batı Segmenti üzerinde, İnegöl'e bağlı Yeniceköy yerleşim yeri güneyinde yer almaktadır (Şekil 1b ve 3a). Bu alanda, BKB-DGD uzanımlı ve çizgisel gidişli sarpıklarla belirgin fay morfolojisi üzerinde yaklaşık KD-GB uzanımlı bir hendek kazısı gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). Toplam 7 metre uzunluğuna sahip fay kazısının derinliği ortalama 2 metredir (Şekil 7). Hendeğin doğu duvarı çökmüş, ilk anda stabil kalan batı duvar loglanmış ve detaylı çalışılmıştır. Hendek logunda toplam 11 farklı stratigrafik birim ayırt edilmiştir (Çizelge 1). Sedimanter çökel özellikleri taşıyan bu birimler (“a”dan “k”ya) genel olarak, yer yer orta boy köşeli ve yarı-köşeli çakıllar içeren kil, silt ve kum ardalanması görünümündedir. Sedimanter paketler, yamaç eğimine uyumlu olarak kuzeye doğru düşük eğimli olarak çökelmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. İnegöl-1 (Yeniceköy) Hendeği kazı lokasyonu (arka planda İnegöl Havzası ve İnegöl İlçesi görünmektedir; bakış yönü KKD).

Figure 6. Location of the İnegöl-1 (Yeniceköy) trench excavation. The İnegöl Basin and the İnegöl settlement are visible in the background (view direction: NNE).



Şekil 7. İnegöl-1 (Yeniceköy) Hendeği kuzeybatı duvarının yorumlanmış logu ve hendeğ fotoğrafları.

Figure 7. Interpreted log of the northwest wall of the İnegöl-1 (Yeniceköy) trench and photos from the trench.

İnegöl hendeğinde ilk 3 metre içerisinde kuzeye eğimli bir ana kırık zonu belirgin şekilde izlenmektedir. Bu alanda yüzeye doğru çatallanan kırık zonu, bir ana fay ve bu faydan güney yönünde ayrılan bir sentetik koldan oluşmaktadır. Ana kırık zonu 50 derece kuzeye eğimli bir normal fay geometrisi sergilemekte olup, kuzey blok aşağı yönde hareket etmektedir. Hendeğin kuzeyinde gözlemlenen ve güneye eğimli 2 ayrı kırık ise ana fayın antitetik kolları görünümünü sunmaktadır. Bu iki antitetik kırık, en az iki ayrı depreme işaret etmekte; ancak üst seviyelere kadar ulaşmamış olmaları (en genci g birimi tarafından örtülmüştür), son deprem sırasında bu kolların hareket etmediğini veya yeni bir antitetik kırık gelişmediğini göstermektedir. Ana kırık zonu, hendekteki tüm stratigrafik birimleri keserek, bitkisel toprak birimi (k) alt sınırına kadar ulaşmaktadır. Ana kırığın kestiği sedimanter çökellerde meydana getirdiği düşey yerdeğiştirme üstteki birimlerde (g, h, i, j) yaklaşık 40 cm olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte daha alttaki birimlerde (a, c, d) yerdeğiştirme miktarı toplam 60 cm'ye ulaşmaktadır. Bu veriler, hendekte en az ve olasılıkla üç farklı yüzey faylanmasının izlerini ortaya koymaktadır.

İnegöl hendeğinde toplam 4 farklı seviyeden Karbon-14 yaş analizi yapılmıştır (Çizelge 2). “a, g, i, j” birimlerinden toplanan örneklerin yapılan yaş tayini analizleri hendek içerisindeki stratigrafik gözlemleri ve göreceli yaş ilişkilerini doğrular niteliktedir. Analiz sonuçlarına göre, en kuzeyde tanımlanan ve üzerinde yer alan a3 birimi tarafından örtülen antitetik fayın, olasılıkla MÖ 3600'lü yıllardan önce kırıldığı değerlendirilmiştir. Daha genç olan antitetik fay ise, bu fayı örten “g” biriminden elde edilen (ED4) yaş analizine göre, MÖ 2300 ile 3500 yılları arasında meydana gelen bir depremle ilişkili olmalıdır. Ana kırık zonunda gözlemlenen en son yüzey faylanması, bu fayı alttan ve üstten sınırlandırılan ED1 ve ED2 yaşları ile tarihlendirilmiştir. Bu verilere göre, söz konusu depremin MÖ 500'lerden

hemen önce meydana geldiği anlaşılmaktadır. Eldeki veriler İnegöl Fayı'nın tekrarlanan yüzey kırıkları ürettiğini ve batı segmenti boyunca baskın olarak eğim atımlı normal fay karakteri sergilediğini ortaya koymaktadır. Mevcut gözlem ve bulgulara göre, fayın yaklaşık 2000-2500 yıllık aralıklarla tekrarlanan yüzey kırıkları geliştirdiği ve her bir depremde 20 ile 40 cm arasında değişen düşey yerdeğiştirmeler oluşturduğu değerlendirilmektedir. Mevcut paleosismolojik kayıtlar son yüzey kırığının günümüzden 2500 yıl önce oluşmuş olabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, İnegöl Fayı üzerinde, en az 20 cm düşey yerdeğiştirme üretebilecek potansiyel bir depremin, sismik döngü dinamikleri çerçevesinde, kısa vadede meydana gelme riskinin oldukça yüksek olduğunu güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır.

İnegöl-2 (Edebey) Hendeği

İnegöl Fayı'na ait Batı Segment boyunca, İnegöl'e bağlı Edebey Mahallesi güneyinde, yaklaşık KKD-GGB uzanımlı hendek kazısı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3a). Hendek yaklaşık 2,5 metre derinliğine sahiptir. Kazı alanı, meyve ağaçları ile örtülü olduğundan, yüzey bozulmasının en aza indirilebilmesi amacıyla kazı genişliği minimum seviyede tutulmuş ve hendek uzunluğu 8 metre ile sınırlandırılmıştır. Hendek logunda toplam 7 farklı stratigrafik birim ayırt edilmiştir (Çizelge 1). Hendek, yaklaşık kuzeydoğu yönünde uzanan yayvan bir vadinin batı çökel düzlüğünde konumlanmaktadır. Hendeğin duvarlarında gözlenen birimler, belirgin sedimanter çökel özellikleri sergilemektedir. Çökellerin iç yapılarındaki güney yönlü belirgin olmayan tabakalanmalar ve çakıl imbrikasyonları izlenmektedir. Bu iç yapı özellikleri birimlerin çapraz tabakalanma özellikleri taşıyan ince taneli çökel katmanlarından oluştuğunu ortaya koymakta ve bunların flüvyal malzeme karakterini güçlendirmektedir.

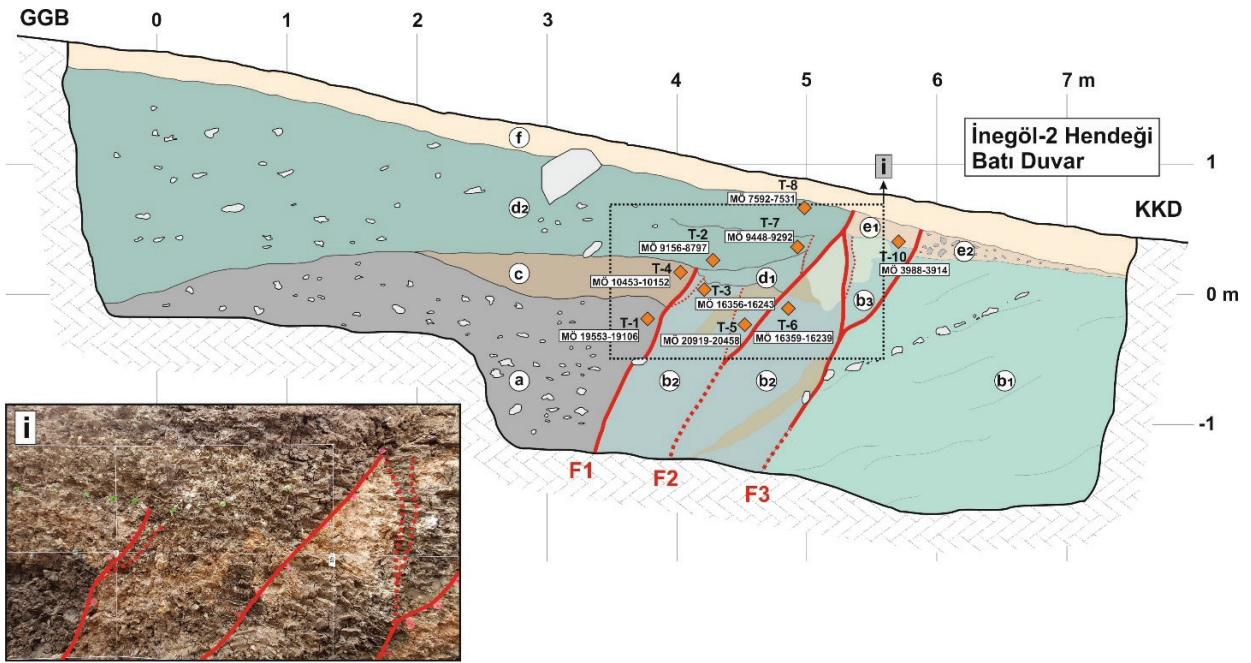
Çizelge 2. Hendeklere ait radyokarbon yaş tayini analiz sonuçları, geleneksel radyokarbon yaşlarının (conventional) toplam izotop dağılımları dikkate alınarak düzeltilmesiyle elde edilmiştir. Bu düzeltmeler, Reimer vd., (2013) tarafından hazırlanan kalibrasyon veri tabanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen radyokarbon yaşları, OxCal formatında takvim yaşına dönüştürülmüş ve Ramsey (2009) tarafından önerilen olasılık yöntemi kullanılarak en yüksek ihtimalli yaş aralıkları belirlenmiştir. Kalibrasyon işlemi, INTCAL13 eğrisi esas alınarak yapılmış ve analiz sonuçları güven aralıklarıyla birlikte sunulmuştur.

Table 2. Radiocarbon dating results from the trenches were obtained by calibrating conventional radiocarbon ages using total isotopic composition, thereby accounting for isotopic fractionation. These corrections were made using calibration databases prepared by Reimer et al. (2013). The radiocarbon ages obtained were converted to the calendar age in the OxCal format, and the most probable age ranges were determined using the probability method proposed by Ramsey (2009). The calibration process was based on the INTCAL13 curve, and the analysis results were presented with confidence intervals.

Hendek	Stratigrafik birim	Örnek No	Geleneksel radyokarbon yaşı (GÖ)	Takvim yılına kalibre edilmiş radyokarbon yaşı	
				Olasılık (%)	Tarih (MÖ/MS)
Bursa Hendeği	g	BU-3	3000±30	89,5	MÖ 1304-1126
	kd	BU-4	4600±30	45,4	MÖ 3381-3335
				44,4	MÖ 3501-3431
	f	BU-5	4310±30	95,4	MÖ 3012-2886
	g	BU-6	3510±30	95,4	MÖ 1918-1748
	a	BU-10	15340±50	95,4	MÖ 16802-16532
	b	BU-11	9880±30	94,8	MÖ 9386-9269
	a	BU-12	16260±40	95,4	MÖ 17878-17528
İnegöl-1 (Yeniceköy) Hendeği	i	ED-1	3550±30	67,7	MÖ 1975-1861
	j	ED-2	2480±30	94,9	MÖ 774-482
	g	ED-4	3780±30	92,9	MÖ 2295-2132
				44,6	MÖ 3635-3551
				30,1	MÖ 3452-3377
	b	ED-6	4730±30	20,6	MÖ 3541-3497
İnegöl-2 (Edebey) Hendeği	d2	T-8	8520±30	95,4	MÖ 7592-7531
	d2	T-2	9580±30	95,4	MÖ 9156-8797
	d2	T-7	9910±30	95,4	MÖ 9448-9292
				59,0	MÖ 10453-10152
	c	T-4	10440±40	19,2	MÖ 10661-10586
				17,2	MÖ 10549-10476
				53,6	MÖ 3988-3914
	b3	T-10	5130±30	42,0	MÖ 3978-3944
				39,9	MÖ 3877-3804
	b2	T-3	14980±40	79,5	MÖ 16356-16243
				68,2	MÖ 16335-16266
	b2	T-6	14980±50	73,4	MÖ 16359-16239
				66,7	MÖ 16343-16257
	b2	T-5	18670±60	95,4	MÖ 20919-20458
				85,8	MÖ 19553-19106
	a	T-1	17660±50	68,2	MÖ 19763-19602

İnegöl-2 Hendeğinin iki duvarı ayrıntılı olarak incelenmiş, olay bütününi iyi şekilde yansıttığı düşünülen batı duvarı detaylı şekilde loglanmıştır (Şekil 8). Bu incelemelere göre hendek duvarlarında yaklaşık 3. ve 6. metreler arasında 3 ana kırıktan oluşan bir fay zone ayırt edilmiştir. Kırıklar genel olarak yüksek açılı, güneye eğimli ve yer yer düşeye yakın geometriye sahiplerdir. Zonun en güneyinde yeralan ve F1 olarak adlandırılan süreksizlik, “a” ve “c” birimlerini kuzeyinden sınırlandırmakta ve yüzeyin yaklaşık 80 cm altında “d2” birimi tarafından örtülmektedir. “d2” birimi yaklaşık 1 m kuzeyde, F2 kırığı tarafından kesilmektedir. Bu kırık stratigrafik olarak “b2” birimi içerisinde konumlanmakta ve yüzeye yakın kesimde bitkisel

toprak (f) tarafından örtülmektedir. F2 kırığının yüzeye yakın kesiminin kuzeyinde gözlenen “e1” birimi bu fay tarafından kontrol edilen kolüvyal bir çökel olarak yorumlanmıştır. F3 kırığı ise sırasıyla “b1” ve “b2-b3” birimlerinin sınırını oluşturarak yüzeye yakın kesimde “e1” birimini kesmektedir. Ayrıca, F3 kırığının kuzeyinde bulunan “e2” birimi, kolüvyal bir kama (colluvial wedge) özelliği sergilemektedir. Stratigrafik birimlerde düşey yönde belirgin bir yerdeğiştirme ayrımı yapılamamış olmakla birlikte, fayların kuzeye doğru gençleştiği belirlenmiştir. Fayların düşeye yakın geometrileri ve stratigrafik ilişkileri, bölgede olasılıkla doğrultu atımın baskın olduğu bir faylanma karakterini işaret etmektedir.



Şekil 8. İnegöl-2 (Edebey) Hendeği batı duvarının yorumlanmış logu ve hendek fotoğrafı.

Figure 8. Interpreted log of the west wall of the İnegöl-2 (Edebey) trench and photo from the trench.

İnegöl-2 hendeğinde toplam 9 adet Karbon-14 yaş analizi yapılmıştır (Çizelge 2). “a, b2, b3, c ve d2” birimlerinden elde edilen yaş analizleri, stratigrafik gözlemlerle uyumlu olup, olası yaş ilişkilerini doğrular niteliktedir. Yapılan analiz sonuçlarına göre, hendeğin en güneyinde yer alan F1 fayı, en eski olayı temsil etmektedir. Bu kırık alttan T-3 ve T-4 yaşları ile, üstten ise T-2 ve T-7 yaşları ile iyi şekilde sınırlandırılmıştır. Bu veriler, F1 fayında meydana gelen yüzey kırığının MÖ 10152 ile MÖ 9448 yılları arasında gerçekleşen bir depremle ilişkili olabileceğini göstermektedir. F2 fayı, en üst seviyede T-8 yaşı ile tarihlenen “d2” biriminin çökmesinden sonra çalışmış olmalıdır. Ayrıca, F2 fayının yüzeye yakın kesimi, daha kuzeydeki F3 fayından ayrılan bir kol tarafından tekrar kullanılmıştır. Bu fay kolunun kuzeyinde yer alan kolüvyal dolguda yapılan yaş analizi (T-10 yaşı) kolüvyumun alt kesimini tarihlemiş ve bu olayın MÖ 3988 – 3914 yılları hemen öncesinde meydana gelen bir depremle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. F3 fayından ayrılan kolun, F2 fayından sonra oluşmuş bir yüzey kırığı olma ihtimali, T-8 ile T-10 yaşları arasındaki zaman farkı göz önünde bulundurulduğunda, F2 fayının MÖ 7531 ile MÖ 3988 yılları arasında en az bir kez daha kırıldığını düşündürmektedir. Bu bulgu, F2 fayının çok evreli bir faylanma geçmişine sahip olduğunu ve aynı fay düzleminin farklı dönemlerde yeniden aktifleştğini ortaya koymaktadır. İnegöl-2 hendeğinde tespit edilen en genç faylanma ise F3 fayı tarafından temsil edilmektedir. F3 fayı, stratigrafik olarak en üstte yer alan “e1” birimini sınırlandırmaktadır. Bu yüzey kırığı ile ilişkili olarak gelişmiş “e2” kolüvyumu, faylanmayı üstten sınırlandıracak kesin bir yaş sunmamış olmakla birlikte, yapılan stratigrafik değerlendirme, bu depremin MÖ 3914 sonrası bir sismik olayla ilişkili olduğunu güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır.

Bu çok evreli faylanma dizisi, İnegöl-2 hendeği boyunca, özellikle F2 ve F3 faylarının uzun bir jeolojik zaman dilimi boyunca farklı

dönemlerde etkinleştğini ve yüzey kırıkları ürettiğini göstermektedir. Bu bulgular, İnegöl Fayı’nın karmaşık bir sismik geçmişe sahip olduğunu ve farklı dönemlerde meydana gelen depremlerle sürekli olarak yeniden aktive olduğunu kanıtlamaktadır.

TARTIŞMA

Bursa ili çevresinde yürütülen paleosismolojik hendek çalışmalarından elde edilen bulgular, Uludağ Yükselimi’nin kuzeyini sınırlayan fayların bölgenin sismotektonik dinamikleri ve depremselliği üzerinde kritik bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır. Gerçekleştirilen ayrıntılı paleosismolojik analizler sonucunda, her bir fay boyunca elde edilen veriler ve bu veriler temelinde yorumlanan fayların karakteristik sismik davranışları, bölgedeki tektonik rejimin evrimi ve deprem tekrarlama potansiyeli açısından önemli ipuçları sunmaktadır.

Karabacak vd., (2021) tarafından Ulubat Fayı boyunca yürütülen ve Ebu uzanım boyunca Orta ve Doğu segmentlerde paleosismolojik ilk verileri sunan çalışmalar, son 16 bin yılda en az altı eski deprem izinin varlığını ortaya koymuştur. Bu çalışma kapsamında tarihsel kayıtlarla ilişkilendirilen yaş verileri Ulubat Fayı’na ait Doğu ve Orta segmentler boyunca en son yüzey kırıklarının sırasıyla MS <161 (veya MS 170) (I=IX) ve MS 1143 (M=6,0) depremleri ile oluştuğunu ortaya çıkartmıştır. Batı segmentine ilişkin ise doğrudan bir paleosismolojik ortaya konulamamıştır. Bununla birlikte, tarihsel kaynaklar 28 Şubat 1855 (M=7,3) tarihinde meydana gelen büyük depremin bu segment boyunca yüzey kırığı oluşturmuş olabileceğine işaret etmektedir (örneğin; Öztin ve Bayülke 1990, Ambraseys ve Finkel 1991, Barka 1997). Bu bulgular Ulubat Fayı boyunca deprem aktivitesinin, son iki bin yıllık süreçte, batıya doğru göç ettiğini ve Bursa’nın Nilüfer ilçesine en yakın konumda yeralan Doğu segmentte

yaklaşık 1855 yıllık bir sismik suskunluk dönemi olduğunu ortaya koymuştur (Karabacak vd., 2021). Dahası, 27 Ocak 2025 tarihinde Nilüfer’de meydana gelen $M=4,0$ büyüklüğündeki depremin lokasyonu ve mekanizması (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi kayıtları) tarafımızdan arazi gözlemleri ile ortaya konulan fay uzanımı ve kinematığı ile oldukça uyumludur (Şekil 2a). Bu durum, bölgenin potansiyel deprem riski açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Bursa Fayı boyunca yürütülen çalışmalar, eğim atımlı normal faylanmanın açık delillerini ortaya koymuştur. Toplam 39 km uzunluğa sahip olan Bursa Fayı boyunca iki segment ayırt edilmiştir. Bursa segmenti (21 km) ve Saitabat segmenti (18 km) olarak adlandırılan bu segmentler, normal faylanma geometrisi sergilemektedir. Bursa segmenti üzerinde yürütülen paleosismolojik çalışmalar ile, son 12 bin yılda en az 6 ayrı yüzey faylanmasının varlığı ayırt edilmiştir (Çizelge 3). Elde edilen bulgular, kuzey bloğunun düşmesiyle karakterize edilen eğim atımlı normal faylanmanın, fay boyunca kuzey yönünde gençleştiğini açıkça ortaya koymaktadır. Tarihlendirilen eski depremler geçmişte meydana gelen yüzey faylanma olaylarının yaklaşık 2000 yıllık aralıklarla tekrarlandığını ve her bir depremde yaklaşık 50 cm’ye ulaşan düşey yerdeğiştirmelerin meydana geldiğini göstermektedir. Yerdeğiştirmelerin yaş analizi Bursa Fayı düşey kayma hızının en az $0,30 \pm 0,04$ mm/yıl olduğunu delillendirmektedir. Bursa Fayı üzerindeki son yüzey faylanması ise lokasyondaki aşınma nedeniyle kesin olarak tarihlendirilememiştir. Ancak tarihsel kayıtlarda bu uzanımın 11 Nisan 1855 tarihinde meydana gelen büyük deprem sırasında kırılmış olabileceğine yönelik genel bir görüş birliği bulunmaktadır (Örneğin Sandison, 1885; Sieberg, 1932 ve Barka, 1997). Bu nedenle, bu çalışmada Bursa hendeği içerisinde gözlenen son yüzey kırığı, genel kabul gören değerlendirmeler doğrultusunda 1855 Bursa depremi ile ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte,

Bursa şehir merkezinin yaklaşık 10 km güneyinde yeralan Soğukpınar Fayı ve doğu uzanımındaki Oylat Fayı da diri faylanmaya ilişkin deliller sunmaktadır ve şehri etkileyebilecek büyüklükte deprem üretme potansiyeline sahiptir. Örneğin, bu uzanım üzerindeki güncel 1,8 km’ye ulaşan ve fay kinematikleri ile uyumlu sağ yanal yerdeğiştirmeler (Çayyaka Deresi, Şekil 1b) ve Karabacak vd., (2022) tarafından yapılan fay düzlemi tarihlendirmeleri fayların Geç Kuvaterner aktivitesine önemli deliller sunmaktadır. Bu durum, 11 Nisan 1855 Bursa depreminin yalnızca Bursa Fayı’na atfedilmesinin eksik bir açıklama olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, bu fay sistemleri üzerinde paleosismolojik araştırmaların yürütülmesi, 1855 depreminin hangi fay üzerinde meydana geldiğine ilişkin yüksek çözünürlüklü ve güvenilir kanıtlar sağlanması açısından kritik önemdedir. Dahası Bursa Fayı’nda meydana gelen bir depremin çevredeki faylara gerilim transferi yapabileceği gözönünde bulundurulduğunda bölgenin sismik tehlike analizlerinin bilimsel temellere dayandırılması anlamında bu depremin kaynak fayının kesinleştirilmesi önemlidir.

Çizelge 3. Bursa Fayı üzerinde kazılan hendekte tarihlendirilen olay seviyeleri ve yorumlanan olası eski deprem tarihleri.

Table 3. Dated event horizons identified in the trench excavated along the Bursa Fault and the interpreted timing of possible paleoearthquakes.

Olay	Olayları sınırlayan örnekler*	Olası deprem (yıl, GÖ)
6	MS 1855 ?	170
5	BU3, BU6 - MS 1855 arası	500-3000
4	BU5 - BU3, BU6 arası	3000-4500
3	BU4 - BU5 arası	~5500
2	BU11 - BU4 arası	5500-11000
1	BU10, BU12 - BU11 arası	12000-13000

*Örneklere ait radyokarbon analiz sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

İnegöl Fayı, batı kısımlarında, eğim atımlı normal faylanma bileşeni de gözlemlenen, baskın olarak sağ yanal doğrultu atımlı bir fay karakteri sergilemektedir. Bu uzanım batıda Babasultan Köyü yakınlarından itibaren güneye (sağa) doğru sıçramalı bir hat izlemekte, havzanın uzun eksenini boyunca devam ederek doğuda Mezit yakınlarında Oylat Fayı'na yaklaşarak sonlanmaktadır. Bu uzanım boyunca geometrik olarak üç segment tanımlanmıştır. İnegöl Fayı'nın batı segmenti boyunca yapılan paleosismolojik çalışma sonuçları Yeniceköy Hendeği'nde 3, Edebey Hendeği'nde ise 4 ayrı yüzey faylanmasının delillerini sunmaktadır (Şekil 7 ve 8, Çizelge 4). Yeniceköy Hendeği'nde, fay uzanımı boyunca gidiş yönünde sağa bükümlenen bir alanda, KB-GD gidişli morfoloji üzerindedir ve sağ yanal bir fay uzanımında sağa bükümle ilişkili lokal bir açılma alanında eğim bileşenin baskın olduğu delilleri sunmaktadır. Bu hendek alanında gelişen eğim atımlı normal fay kırıklarının 20-40 cm arasında değişen düşey yerdeğiştirme ürettiği gözlenmiştir. Buna karşılık, fayın genel gidişine uygun bir morfolojide (BKB-DGD) açılan Edebey Hendeği'nde doğrultu atımlı faylanmaya işaret eden bir fay geometrisi ortaya konulmuştur. Paleosismolojik bulgular, heriki hendeğin aynı fay segmenti üzerinde yer alması ve yaş tayini analizi hata payları içerisinde aynı olay

kayıtlarını içermesi nedeniyle, İnegöl Fayı'nın son 12 bin yıl içerisinde en az 5 yüzey kırığı ürettiğini ve son yüzey kırığının 2500 yıldan daha önce oluşmuş olabileceğini göstermektedir (Çizelge 4). Bu beş yüzey kırığına ait olası deprem tarihleri dikkate alındığında, İnegöl Fayı boyunca deprem tekrarlanma aralığının 1500 ile 3000 yıl arasında değiştiği tespit edilmiştir (Çizelge 4).

Karabacak vd., (2021) tarafından ortaya konulan paleosismik kayıtlar, Ulubat Fayı'nın bağımsız segmentlerinde tekrarlanma periyodu farklılıklarının varlığını ortaya koymuştur. Araştırmacılara göre bu durum, KAFZ güney kollarının birçoğunda (Geyve, İzmit, Gemlik, Edremit, Mustafa Kemalpaşa, Bekten, Manyas ve Orhaneli Fayları) paleosismolojik verilerle ön plana çıkan düzensiz davranış modeli ile benzerlik göstermektedir ve Ulubat Fayı segmentlerinin deprem davranışının düzenli olmadığı şeklinde yorumlanmıştır. Bu çalışmada tarafımızdan ortaya konulan paleosismik veriler ise İnegöl ve Bursa Faylarının, Ulubat Fayı'ndan farklı olarak, düzenli aralıklarla deprem ürettiğini ve yorumlanan tüm sismik olayların zamanlamasının kendi aralarında güçlü bir korelasyon sunduğunu göstermektedir. Buna göre Bursa ve İnegöl Fayları sırasıyla yaklaşık 2000 ve 2500 yıl aralıklarla yüzey kırığı geliştiren büyük deprem üretmektedir (Çizelge 5).

Çizelge 4. İnegöl Fayı üzerinde kazılan hendeklerde tarihlendirilen olay seviyeleri ve yorumlanan olası eski deprem tarihleri.

Table 4. Dated event horizons and interpreted timing of possible paleoearthquakes from trenches excavated along the İnegöl Fault.

Olay	Olayları sınırlayan örnekler*		Olası deprem (yıl, GÖ)
	İnegöl-1 (Yeniceköy) Hendeği	İnegöl-2 (Edebey) Hendeği	
5	ED1 – ED2 arası		~2500
4	T10, ED6 – ED4 arası		4500-5500
3	T10 – T10, ED6 arası		6000-6500
2	T2, T7, T8 – T10 arası		8000-9500
1	T3, T4 – T2, T7 arası		11500-12000

*Örneklere ait radyokarbon analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

İnegöl Fayının hemen doğusunda konumlanan Eskişehir Fayı ise Batı ve Orta Segmentlerinde sırasıyla 2500 ve 3000 yıl aralıklarla tekrarlanan depremlere ait paleosismolojik kayıtlar sunmaktadır (Elma vd., 2024 ve 2025).

Bu durum, Uludağ yükselimi batısındaki fay segmentlerinin (Ulubat Fayı segmentleri) KAFZ güney kolu uzanımlarına benzer şekilde düzensiz deprem davranışı sergilerken, bunlardan farklı olarak Uludağ yükselimi kuzeyi ve doğusunda konumlanan fayların (Bursa ve İnegöl Fayları) Eskişehir Fayı segmentlerine benzer şekilde karakteristik deprem davranışı sundukları ve düzenli aralıklarla deprem ürettiklerini kanıtlamaktadır.

Çizelge 3 ve 4'te sunulan eski deprem kayıtları Bursa ve İnegöl Faylarının birarada çalışmış ve eski dönemde bazı olaylar sırasında eş zamanlı yüzey kırığı üretmiş olabileceği izlenimini vermektedir (örneğin 5500 ve 12000 yıl önce). Bununla

birlikte, Bursa ve İnegöl Fayları paleosismolojik verileri ile ortaya konulan her bir olaydaki yerdeğiştirme miktarları (sırasıyla 50 ve 20-40 cm) ve fay uzunlukları ile birlikte değerlendirildiğinde, fayların ayrı ayrı daha küçük depremler üretmiş olma olasılıkları da oldukça kuvvetli bir başka senaryo olarak ileri sürülebilir. Örneğin; Wells ve Coppersmith (1994) tarafından oluşturulan ampirik eşitliklere göre, bu çalışmada elde edilen yerdeğiştirme miktarları ve segment bazında oluşabilecek yüzey kırığı uzunlukları birbiriyle uyumludur ve $M > 6,2$ büyüklüğünde bir depreme işaret etmektedir (Çizelge 5). Bu durum Bursa ve İnegöl Faylarının birbirini tetikleyen ardışık depremler üretmiş olabileceğini göstermektedir. Her durumda Bursa ve İnegöl Fayları geometrik uzunluk ve kosismik yerdeğiştirme nitelikleri ile birlikte değerlendirildiğinde kendi başlarına 6,2 ile 6,9 arasında, veya birarada (çoklu) kırılma ile maksimum 7,2 büyüklüğünde deprem üretme potansiyeline sahiptir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Ulubat, Bursa ve İnegöl Fayları'nın karakteristik özellikleri ve deprem senaryoları (deprem büyüklükleri elde edilen yerdeğiştirme verileri ve haritalanan fay uzunlukları kullanılarak Wells ve Coppersmith (1994) tarafından önerilen diyagramlar temelinde hesaplanmıştır.)

Table 5. Characteristic features and earthquake scenarios of the Ulubat, Bursa and İnegöl Faults (earthquake magnitudes were calculated based on the diagrams proposed by Wells and Coppersmith (1994) using the obtained displacement data and mapped fault lengths.)

Segment	Haritalanan uzunluk (km)	Geometrik özellikleri	Deprem tekrarlanma aralığı (-yıl)	Son büyük deprem sonrası geçen süre (-yıl)	Kırık gelişimi senaryolarına bağlı üretebileceği deprem büyüklüğü (M)		
					tek segment	çoklu segment	çoklu fay
Ulubat	Batı	18	sağ yanal	---	170	6,5	
	Orta	21	sağ yanal	3000 – 6000	880	6,7	7,1
	Doğu	15	sağ yanal / oblik nomal	4000 – 5000	1855	6,4	
Bursa	Bursa	21	eğim atımlı normal	2000	170	6,6	
	Saitabat	18	eğim atımlı normal	?	?	6,5	6,9
İnegöl	Batı	8,5	sağ yanal / oblik nomal	1500 – 3000	2500 – 2800	6,2	
	Orta	19	sağ yanal	?	?	6,6	
	Doğu	9	sağ yanal / oblik nomal	?	?	6,2	

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Uludağ yükselimi kuzeyini sınırlandıran Bursa Fayı, Ulubat Fayı ve İnegöl Fayına ilişkin kapsamlı paleosismolojik ve jeolojik analizler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5 elde edilen veriler ışığında ortaya konulan Ulubat, Bursa ve İnegöl Fayları'nın karakteristik özelliklerini ve kırık gelişimi senaryolarına bağlı üretebilecekleri deprem büyüklüklerini özetlemektedir. Çalışma bulguları, bölgenin aktif tektonik süreçler altında bulunduğunu ve yüksek sismik tehlike potansiyeline sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

Ulubat Fayı'nda tarafımızdan gerçekleştirilen önceki çalışmalar (Karabacak vd., 2021), fayın doğu segmentinde yaklaşık 1855 yıldır bir sismik suskunluk dönemi yaşandığını ortaya çıkarmıştır. Bu durum, gelecekte Bursa İli Nilüfer bölgesini etkileyecek bir depremin meydana gelme olasılığını artıran önemli bir tektonik işaret olarak değerlendirilmiştir.

Bursa Fayı üzerinde yürütülen paleosismolojik çalışmalar, Bursa şehir merkezindeki Reşat Oyal Parkı'nda açılan hendek verilerine dayanmıştır. Bu kazıda elde edilen stratigrafik veriler, son 12 bin yılda en az altı ayrı yüzey kırığı olayının meydana geldiğini ortaya koymuştur. Yüzey kırığı üreten depremler, yaklaşık 2000 yıllık periyotlarla tekrarlanmış, her bir olayda ortalama 50 cm'lik düşey yerdeğişim tespit edilmiştir. Ayrıca, stratigrafik yaş analizleri ile doğrudan tarihlendirilememekle birlikte, en son yüzey kırığının 11 Nisan 1855 Bursa depremiyle ilişkili olabileceği yorumlanmıştır. Ancak, Bursa yerleşim alanına yakın konumlu ve diri fay niteliği taşıdığı bilinen Soğukpınar ve Oylat fayları da bu depreme kaynaklık etme potansiyeline sahiptir.

İnegöl Fayı boyunca yürütülen iki önemli hendek çalışması, İnegöl Fayı boyunca son 12 bin yılda en az beş yüzey kırığının meydana geldiğini, deprem tekrarlanma aralığının 1500-3000 yıl aralığında değiştiğini ve son büyük

depremin yaklaşık 2500 yıl önce gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, Bursa ve İnegöl faylarında gözlenen sismik korelasyon, bu iki fayın ardışık depremler üreterek birbirini tetikleyebileceğini ortaya koymaktadır. 1855 depreminin Bursa Fayı boyunca gerçekleşmiş olma olasılığı ve çevre faylara gerilim transferi yapabileceği hususu da gözönünde bulundurulduğunda, İnegöl Fayı üzerinde 2500 yıllık sismik suskunluk dönemi ardından her an yüzey kırığı meydana getirebilecek bir deprem ($M=6,2-6,9$) olma olasılığının yüksek olduğu değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen paleosismolojik bulgular, BAGB ile KAMZ arasında özel bir tektonik konuma sahip Uludağ yükselimi kuzeyini sınırlayan fayların, bölgesel ölçekte farklılıklar sunan deprem davranışlarını ilk kez ortaya koymuştur. Buna göre Uludağ yükselimi batısında KAFZ güney kolu boyunca etkin olan düzensiz deprem davranışının etkin olduğu; yükselimin kuzey ve doğu kesimlerinde ise Eskişehir Fayı boyunca da sergilenen sistematik deprem tekrarlanma davranışının etkin olduğu kanıtlanmıştır. Sergiledikleri farklı deprem davranış tiplerine rağmen, Uludağ yükselimi çevresini kontrol eden faylar Güney Marmara Bölgesi'nin sismotektonik çerçevesini oluşturan temel bileşenlerdir ve ciddi bir deprem tehlikesi potansiyeli taşımaktadır. Özellikle Bursa Fayı, İnegöl Fayı ve Ulubat Fayı'nın potansiyel olarak üretebileceği büyük depremler, bölgedeki yoğun yerleşim merkezleri için önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Bu bağlamda, sismik tehlike analizlerinin, fay davranışlarına ilişkin güncel veriler doğrultusunda yeniden ele alınması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

EXTENDED SUMMARY

This study systematically investigates the tectonic characteristics and paleoseismological behavior of the Bursa, Ulubat, and İnegöl faults associated with the Uludağ uplift in the Southern Marmara

Region. The Uludağ uplift holds a critical position between the Western Anatolia Extensional Province (WAEP) and the North Anatolian Shear Zone (NASZ), marking the southernmost boundary of the southern branches of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) (Şengör et al., 2005; Okay et al., 2008; Özalp et al., 2013; Selim and Tüysüz, 2013) (Figure 1a). Previous studies suggested that the Bursa and İnegöl faults might be related to the Eskişehir Fault Zone (McKenzie, 1978; Okay, 1984; Şengör et al., 1985; Şaroğlu et al., 1987; Barka et al., 1995; Emre et al., 2013, 2018; Seyitoğlu and Esat, 2022). However, recent research has demonstrated that these faults developed under the influence of the southern branch of the NAFZ (Şengör, 1979; Şengör et al., 1985; Barka and Kadinsky-Cade, 1988; Seyitoğlu et al., 2016; Karabacak et al., 2022). GPS measurements along the southern branch of the NAFZ, north of Uludağ, indicate a right-lateral strike-slip displacement of 2.9–9.6 mm/year and a normal faulting component of 4.2–8.8 mm/year (Meade et al., 2002; Reilinger et al., 2006; Aktuğ et al., 2009). This deformation is distributed among the NAFZ branches around Balıkesir and Gemlik (Figure 1a). The arcuate geometry of the Ulubat, Bursa, and İnegöl faults, extending from west to east, delineates the northern boundary of the Uludağ uplift (Barka and Kadinsky-Cade, 1988; Özalp et al., 2013) (Figure 1b). Historical records highlight the surface rupture potential of these faults, as evidenced by the 27 February 1855 ($M=7.3$) earthquake at the western end of the Ulubat Fault and the 11 April 1855 ($M=6.3$) earthquake along the Bursa Fault (Sieberg, 1932; Ambraseys and Finkel, 1991; Barka, 1997; Eyidoğan et al., 1997). However, systematic findings regarding the paleoseismological behavior of the faults north of Uludağ remain limited.

Field investigations have revealed the geological, geomorphological, and kinematic characteristics of the Ulubat, Bursa, and İnegöl faults. The Ulubat Fault is a predominantly right-lateral strike-slip Holocene fault, which is divided into three segments: Western, Central, and

Eastern. Paleoseismological studies conducted by Karabacak et al. (2021) identified evidence of at least six prehistoric earthquakes on the Central and Eastern segments over the past 16000 years. The most recent surface rupture on the Eastern segment is attributed to the <161 (or 170) ($I=IX$) earthquake, while the rupture on the Central segment corresponds to the 1143 ($M=6.0$) earthquake. Although no direct paleoseismological record is available for the Western segment, historical sources indicate that the 28 February 1855 ($M=7.3$) earthquake produced a surface rupture along this segment (Öztin and Bayülke, 1990; Ambraseys and Finkel, 1991; Barka, 1997). Additionally, a seismic quiescence period of approximately 1855 years has been identified on the Eastern segment, which is considered a critical finding for assessing the region's potential seismic hazard.

The Bursa Fault, forming the northern boundary of the Uludağ uplift, is a normal fault with a dip-slip component extending approximately 33 km in a WNW-ESE direction. The fault is divided into two segments, Bursa and Saitabat, with the Bursa segment extending 21 km and creating a ~4 km gap between the eastern segment of the Ulubat Fault. This segment, encompassing the city center of Bursa, is traced along NE-SW-oriented fractures indicative of an extensional regime. The eastern extension of the fault terminates as a single strand near Saitabat Village, while the Saitabat segment extends approximately 18 km, featuring a 1.3 km southward step-over and a 10° southward deflection. The two segments overlap within a 3.5 km wide relay zone, exhibiting low-angle normal faulting morphology. The Saitabat segment can be traced eastward up to the vicinity of Babasultan, terminating within the İnegöl Basin.

The İnegöl Fault extends approximately 33 km in a NW-SE direction and is divided into three segments: Western, Central, and Eastern. The Western segment exhibits right-lateral displacements of up to 450 meters along the Yeniceköy Stream, with two trench excavations

revealing evidence of right-lateral faulting. The Central segment, at least 16 km long, comprises two strands, short and long. A 70-meter right-lateral displacement observed along the Kalbur Stream represents the maximum lateral offset along this segment. The Eastern segment extends in a northward convex arc, traceable along the travertine fields of Kurşunlu (Bakmaca), Rüştüye, and Eskikaracakaya. The secondary transfer faults between the İnegöl and Oylat faults have been interpreted as evidence of extensional tectonic movements supporting the opening regime of the basin. All these findings have significantly contributed to understanding the geological and paleoseismological behavior of the Uludağ uplift and its surrounding active faults.

The Bursa Trench, located in Reşat Oyal Park in the city center of Bursa, represents a geomorphological structure whose natural appearance has been altered by human intervention (Figure 4a, b). The trench was excavated in an NNE-SSW direction, perpendicular to the possible fault trace, with a length of 8 meters and a depth of 2.5 meters, and its SE wall was logged in detail (Figure 4b). Stratigraphic analyses identified a total of eight units (a-g) distinguished by grain size, color, and composition, with the uppermost unit “h” identified as parking lot stabilization material (Table 1). The sedimentary packages were notably deposited with a low-angle inclination towards the northeast. Five main fault zones (F1-F5) were identified in the trench stratigraphy (Figure 5). The F1 fault cuts through the oldest unit “a” with a vertical displacement of 40 cm, which is overlain by unit “b.” The F2 fault cuts through four units, showing 30 cm of vertical displacement in the lower levels (a, b) and a lower displacement in the upper levels (c, d), indicating at least two rupture events in the lower stratigraphic levels. Faults F3, F4, and F5, observed in the northern section of the trench, dip 60° to the northeast and cut through all units, reaching the surface. The F3 fault cuts the youngest unit “d”, indicating its synchronicity with the younger displacement observed along the F2 fault. Faults F4 and F5

collectively produced approximately 150 cm of vertical displacement, indicating three distinct surface rupture events in the past. Age analyses from seven distinct stratigraphic levels confirmed the stratigraphic observations (Table 2). Unit “b”, which overlies the F1 fault, was dated to 9300 BCE based on the BU11 analysis, indicating that the oldest earthquake on this fault occurred 12000–13000 years ago. The older event on the F2 fault was dated between 9269 and 2501 BCE based on BU11 and BU4 analyses, while the younger event was contemporaneous with the F3 fault rupture, as indicated by the BU4 analysis, dating this event to just before 3381 BCE. Two separate events observed on the F4 fault occurred after 3012–2886 BCE and after 1126 BCE, based on BU5, BU3, and BU6 analyses, respectively. The F5 fault, representing the most recent surface rupture, has been associated with the AD 1855 Bursa earthquake. Overall findings indicate that at least six distinct surface rupture events have occurred along the Bursa Fault over the past 12000 years. The fault exhibits a dip-slip normal faulting characteristic, generating earthquakes approximately every 2000 years, with an average vertical displacement of 50 cm per event. Age analyses from the “f” and “kd” units have yielded an annual vertical slip rate of 0.30 ± 0.04 mm/year.

A trench excavation oriented in an NNE-SSW direction south of the Yeniceköy settlement in İnegöl revealed a distinct fault morphology (Figure 6). The trench, measuring 7 meters in length and 2 meters in depth, was analyzed in detail along its western wall due to the collapse of the eastern wall. Stratigraphic analyses identified a total of 11 units (a–k), characterized by sedimentary deposition features comprising alternating layers of clay, silt, and sand (Table 1). The low-angle northward inclination of the sedimentary packages and the presence of an indistinct channel geometry in the central section of the trench wall were notable (Figure 7). A primary fault zone was clearly observed within the trench. This zone comprises a north-dipping (50°) normal fault with a downthrown northern

block and a synthetic splay fault. Two antithetic faults in the northern section of the trench, while indicative of at least two separate earthquakes, were assessed as inactive during the most recent earthquake due to their lack of surface rupture. The main fault zone cuts through all stratigraphic units, extending to the lower boundary of unit "k", producing approximately 40 cm of vertical displacement in the upper units (g, h, i, j) and a total of 60 cm in the lower units (a, c, d). These findings indicate evidence of at least three distinct surface rupture events within the trench. A total of four age analyses (from units "a, g, i, j") were conducted, and the results corroborated the stratigraphic observations (Table 2). The antithetic fault farthest north was overlain by unit a3, indicating that this fault ruptured prior to 3600 BCE. The younger antithetic fault was associated with an earthquake dated between 2300 and 3500 BCE, based on the ED4 analysis from unit "g". The most recent surface rupture in the main fault zone occurred just before 500 BCE, as indicated by the ED1 and ED2 age analyses. These findings reveal that the İnegöl Fault is a dip-slip normal fault that produces recurrent surface ruptures. Paleoseismological data suggest that the fault has a recurrence interval of approximately 2000–2500 years, with each earthquake generating 20–40 cm of vertical displacement. Furthermore, current records strongly indicate a high likelihood of a potential earthquake producing 20–40 cm of vertical displacement in the near future, given that the last surface rupture occurred approximately 2500 years ago.

A trench excavation oriented approximately NNE-SSW was conducted along the İnegöl Fault, south of Edebey District in İnegöl (Figure 3). To minimize surface disturbance, the trench width was kept limited, with a depth of 2–2.5 meters and a length of 8 meters. A total of seven stratigraphic units (a–k) were identified in the trench log, composed of fine-grained fluvial deposits with cross-bedding. Weak southward bedding and gravel imbrications were observed in the deposits, supporting their fluvial origin (Table 1). A fault

zone containing three main fractures was identified in the trench walls (Figure 8). The fractures, dipping southward with near-vertical geometries, indicate a strike-slip faulting character in the region. The F1 fault, situated at the southernmost part of the trench zone, delineates units "a" and "c" along its northern boundary and is overlain by unit "d2" approximately 80 cm below the surface. The F2 fault is located within unit "b2" and is overlain by unit "f" near the surface. North of the F2 fault, unit "e1", interpreted as fault-controlled colluvial deposits, was observed. The F3 fault forms the boundary between units "b1" and "b2-b3" and cuts unit "e1" near the surface. Additionally, unit "e2", exhibiting colluvial wedge characteristics, was observed north of the F3 fault. The faults exhibited a northward younging pattern, with no appreciable vertical displacement observed. A total of nine age analyses were conducted (from units "a, b2, b3, c, d2"), yielding results consistent with stratigraphic observations (Table 2). According to the obtained age analyses, the F1 Fault, identified as the oldest surface rupture, was constrained by T-3 and T-4 ages (10152–9448 BCE). The F2 Fault became active after the deposition of unit "d2" and was subsequently reactivated by a splay branching off from the F3 fault. The T-10 age analysis from the colluvium beneath this fault splay indicated that the associated earthquake occurred before 3988–3914 BCE. Considering the difference between the T-8 and T-10 ages, the F2 fault is inferred to have ruptured at least once more between 7531 and 3988 BCE, indicating a multi-phase faulting history. The F3 Fault, bounding the uppermost unit "e1", represented the most recent surface rupture. Although unit "e2" colluvium did not provide a precise age, stratigraphic assessments indicated that this earthquake occurred after 3914 BCE. This multi-phase faulting sequence demonstrates that the F2 and F3 faults along the İnegöl-2 trench were activated at different periods over long geological timescales, producing surface ruptures. The findings strongly indicate that the İnegöl Fault has a complex seismic history and

has been repeatedly reactivated by earthquakes occurring at different periods.

Paleoseismological investigations conducted in Bursa Province have significantly contributed to the understanding of the seismotectonic dynamics of the Uludağ Uplift and its surrounding active fault systems. Comprehensive analyses of the Bursa and İnegöl Faults have provided critical insights into their seismic behaviors, tectonic regime evolution, and earthquake recurrence intervals. The Bursa Fault, divided into the Bursa Segment (21 km) and the Saitabat Segment (18 km), exhibits low-angle dip-slip normal faulting with six surface ruptures over the past 12000 years, each producing approximately 50 cm of vertical displacement (Table 3). Sources such as Sandison (1885), Sieberg (1932), and Barka (1997) suggest a possible link between the 1855 earthquake and the Bursa Fault; however, paleoseismological evidence remains inconclusive due to erosion. Identifying the source fault of the 1855 earthquake is crucial for accurate seismic hazard assessments and for mitigating future seismic risks. Therefore, conducting active tectonic studies, particularly paleoseismological investigations, along the Bursa, Soğukpınar, and other nearby faults is of great importance. The potential involvement of the Soğukpınar Fault highlights the complexity of fault interactions in the region, indicating that stress transfer between faults could trigger seismic events. Similarly, the İnegöl Fault demonstrates both right-lateral strike-slip and dip-slip normal faulting, with a recurrence interval ranging from 1500 to 3000 years, generating vertical displacements of 20-40 cm per event (Table 4). Paleoseismological data from trenches at Yeniceköy and Edebey reveal a multi-phase seismic history with at least five surface ruptures over the past 12000 years. The observed correlations between seismic events along the Bursa and İnegöl Faults emphasize their role within a regional seismotectonic system, where stress transfer mechanisms could trigger successive earthquakes.

Integrating stratigraphic analyses, trench data, and age dating, this study presents robust evidence of multi-phase fault activities (Table 5). These findings not only enhance our understanding of the seismotectonic framework of the Uludağ Uplift but also underscore the necessity for continuous paleoseismological research and updated seismic hazard assessments. The high seismic hazard potential identified for densely populated urban centers such as Bursa and İnegöl highlights the need for continuous monitoring, comprehensive risk assessments, and the implementation of advanced earthquake risk mitigation strategies. The dynamic interaction between these faults underscores the complexity of the region's tectonic setting and highlights the critical importance of interdisciplinary research in mitigating earthquake risks.

KATKI BELİRTME

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, Aynur Dikbaş ve Çağlar Özkaymak'a teşekkür eder.

ORCID

Volkan Karabacak  <https://orcid.org/0000-0003-2581-7984>

Taylan Sançar  <https://orcid.org/0000-0002-2500-9787>

KAYNAKLAR / REFERENCES

- Aktuğ, B., Nocquet, J. M., Cingoz, A., ... & Tekgül, A. (2009). Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: limits to block-like behaviour. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B10), 1-22. <https://doi.org/10.1029/2008JB006000>
- Alçıçek, M. C., Karabacak, V., Okay, A. I. ve Kaya, T. T. (2023). *İnegöl Havzası'nın Stratigrafisi*

- ve Tektono-Sedimanter Gelişimi (KB Anadolu), (Proje no: 119Y208). TÜBİTAK 1001 Projesi Final Raporu.
- Ambraseys, N. N, Finkel, C. F. (1991). Long-term seismicity of Istanbul and the Marmara Sea region. *Terra Nova*, 3(5), 527-539. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00188.x>
- Barka A. A. & Kadinsky-Cade K. (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7(3), 663-684. <https://doi.org/10.1029/TC007i003p00663>
- Barka, A. (1992). The North Anatolian Fault Zone. *Annales Tectonicae*, 6, 164-195.
- Barka, A., Reilinger, R., Şaroğlu, F. & Şengör, A. M. C. (1995). The İsparta angle: its importance in the neotectonics of the eastern Mediterranean region. Pişkin, Ö., Ergün, M., Savaşın, M.Y. & Tarcan, G. (Ed.). IESCA-1995 Proceedings da, 3-17.
- Barka, A. A. (1997). *Neotectonics of the Marmara Region, Active Tectonics of the northernwestern Anotolia-the Marmara poly-project*, ETH, Zurich, 55-87.
- Elma, İ., Özçelik, B., Karabacak, V., Özkaymak, Ç., ve Sümer, Ö. (2024). Eskişehir Fayının İnönü-Oklubalı Segmentine ait İlk Paleosismolojik Bulgular. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 6(2), 349-368. <https://doi.org/10.46464/tdad.1465558>
- Elma İ., Safarov M. A., Karabacak V., Özkaymak Ç. ve Sümer Ö. (2025). Eskişehir Fayı'nın Uzun Dönem Kayma Hızı ve Paleosismolojisi. 77. *Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri Kitabı*, 14-21 Nisan 2025, MTA, Ankara.
- 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.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. & Şaroğlu, F. (2013). *Active fault map of Turkey with an explanatory text 1:1.250.000 scale*. General Directorate of Mineral Research and Exploration Special Publication Series 30, Ankara, Turkey.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H. & Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3229-3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Eyidogan, 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.
- Karabacak, V., Sancar, T., Sağlam Selçuk, A. & Büyükdeniz, Y. (2021). Paleoseismicity of the Ulubat Fault: Inferences on Seismic Behaviour of the Southern Branch of the North Anatolian Fault Zone, South Marmara. *Turkish Journal of Earthquake Research* 3(1), 1-19. <https://doi.org/10.46464/tdad.909358>
- Karabacak, V., Sançar, T., Yıldırım, G. & Uysal, I. T. (2022). When did the North Anatolian fault reach southern Marmara, Turkey?. *Geology*, 50(4), 432-436. <https://doi.org/10.1130/G49726.1>
- McKenzie, D. (1978). Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt. The Aegean Sea and Surrounding regions. *Geophysical Journal International*, 55(1), 217-254. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb04759.x>
- Meade, B.J., Hager, B.H., McClusky, S. C., ... & Özener, H. (2002). Estimates of seismic potential in the Marmara region from block models of secular deformation constrained by GPS measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 208-215.
- Okay, A. I. (1984). Kuzeybatı Anadolu'da yer alan metamorfik kuşaklar. *Ketin Sempozyumu*, 20-21 Şubat 1984, *Türkiye Jeoloji Kurumu Yayını*, 83-92.
- Okay, A. I., Satır, M., Zattin, M., Cavazza, W., Topuz, G. (2008). An Oligocene ductile strikeslip shear zone: the Uludağ massif, northwestern Turkey

- Implications for the westward translation of Anatolia. *Bulletin of the Geological Society of America*, 120, 893-911. <https://doi.org/10.1130/B26229.1>
- Özaksoy, 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 (Geologische Rundschau)*, 107, 1777-1788. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1571-9>
- Özalp, 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.
- Öztin 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 p.
- Ramsey B. C. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337-360. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033865>
- Reilinger, R., McClusky S., Vernant P., ... & Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5), Article B05411. <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
- 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., Hafflidason 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. https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Sandison, D. (1855). Notice of the Earthquakes at Brussa. *The Quaternely Journal of the Geological Society of London*, 11, 543-544.
- 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. <https://doi.org/10.1017/S0016756812000945>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.022>
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. & Boray, A. (1987). *Türkiye'nin aktif fayları ve depremsellikleri* (Rapor No: 8174). Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 394s. Ankara (yayımlanmamış).
- Şengör, A. M. C. (1979). The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. *Journal of the Geological Society London*, 136, 269-282. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.136.3.0269>
- Şengör, A. M. C., Görür, N. & Şaroğlu, F. (1985). Strike-slip deformation basin formation and sedimentation: Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In Biddle, K. T. & Christie-Blick, N. (Eds.), *Strike-slip faulting and basin formation. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publications* 37, pp 227-264.
- Şengör, A. M. C., Tüysüz, O., Imren, C., Sakıncı, M., Eyidogan, H., Görür, N., Le Pichon, X., Rangin, C. (2005). The North Anatolian Fault: A New Look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 37-112.
- Seyitoğlu G., Kaypak B., Aktug B., Gurbuz E., Esat K. & Gurbuz A. (2016). A hypothesis for the alternative southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Northwest Turkey. *Geological Bulletin of Turkey*, 59(2), 115- 130. <https://doi.org/10.25288/tjb.298155>
- Seyitoğlu, G. & Korhan, E. (2022). Uludağ Extensional Metamorphic Core Complex: Preliminary Field Observations. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 169, 49-61. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1029034>
- Sieberg, A. (1932). Erdbebengeographie. In Gutenberg, B. (Ed.), *Handbuch der Geophysik, Band IV* (pp. 527-1005). Berlin: Bornträger.
- Wells D. L. & Coppersmith K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002