

**İSTANBUL KARA ALANINDAKİ OLASI DİRİ FAYLARIN ARAŞTIRILMASI  
VE ÖNCELİKLİ HEYELANLI ALANLARDA ÇOK DİSİPLİNLİ  
ARAŞTIRMALAR YAPMAK SURETİYLE HEYELAN TESPİT VE İZLEME  
YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ PROTOKOLÜ**

## **YÖNETİCİ ÖZETİ**

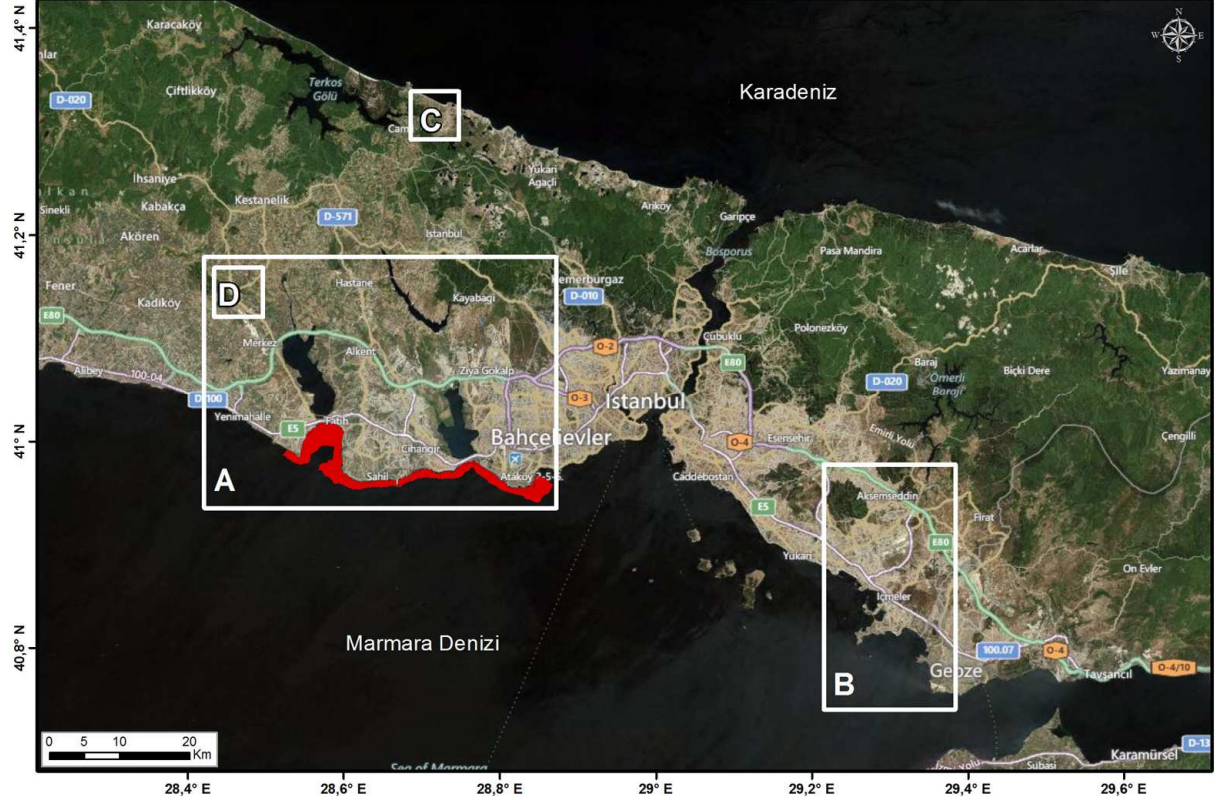
### **Projenin Amacı ve Kapsamı**

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü (DEZİM) ve TÜBİTAK MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü (YDBE) işbirliğinde, İstanbul kara alanındaki olası diri fayların araştırılması, Büyükçekmece-Ataköy arasındaki kalan sığ deniz tabanı morfolojisinin belirlenmesi, öncelikli heyelanlı alanlarda çok disiplinli araştırmalar yapmak suretiyle heyelan tespit ve izleme konusunda yöntemlerin geliştirilmesi amacıyla,

- İstanbul Metropoliten alanı içerisinde yer alan ve aktifliğinden şüphe edilen faylar (Büyükçekmece-Küçükçekmece arası ve Tuzla-Kartal arası) sismolojik/jeodezik yöntemlerle araştırılmıştır.
- Deniz/kara geçiş zonu ayrıntısının heyelanlar açısından ortaya konması için Büyükçekmece-Ataköy arasındaki kalan sığ deniz tabanı morfolojisinin (20 metre su derinliğine kadar) saptanmasına yönelik araştırmalar gerçekleştirilmiştir.
- Öncelikli heyelan alanlarında (Yeniköy ve Çatalca-İzzettin Yolu heyelanları) heyelan tespit ve izleme konusunda etkinliği yüksek ama ülkemizde yaygın olarak kullanılmayan çok disiplinli yöntemler uygulanmıştır. Bu uygulamalardan elde edilen bilgilerle, heyelanların araştırılmasına ve izlenmesine yönelik yöntemler irdelenmiş, avantajları ve dezavantajları ortaya konmuştur.
- Heyelanlı alanlarda yapılacak çalışmalarda referans alınacak bir metodoloji oluşturulmuş, yöntemler sınıflandırılmıştır.
- Öncelikli heyelan alanlarından elde edilen tüm veriler kullanarak, heyelanların gelişim evreleri modellenmiştir.
- Öncelikli alanlarda yapılacak her türlü yapım çalışması öncesi ve sonrasında dikkat edilmesi gereken iyileştirme amaçlı somut önlemlere yönelik öneriler görüş alınan yetkin uzmanlarca tanımlanmıştır.
- Bölgedeki depremler hakkında sürekli gözlemler içeren jeokimya ve mikrosismoloji çalışmaları ile elde edilen bilimsel bulgulara dayalı bilgilerin, İBB DEZİM'e ve AKOM'a sürekli akışı sağlanarak orta vadede afet koordinasyon ve teyakkuza yönelik bilgi edinmesi sağlanmıştır.

## Proje Araştırma Alanlarının Genel Coğrafik Konumu

Şekil 1’de, proje kapsamında, gerçekleştirilen farklı araştırmaların uygulama alanları topluca verilmiştir. İstanbul il sınırları dahilinde her bir çerçeve içerisinde kalan dört farklı araştırma alanında gerçekleştirilen çalışmalar, izleyen bölümlerde detaylı olarak verilmiştir.



**Şekil 1** Proje kapsamında çalışılan, tüm kara alanlarını (A,B,C,D çerçeveleri ile) ve sığ deniz alanını (kırmızı renkle) gösterir harita.

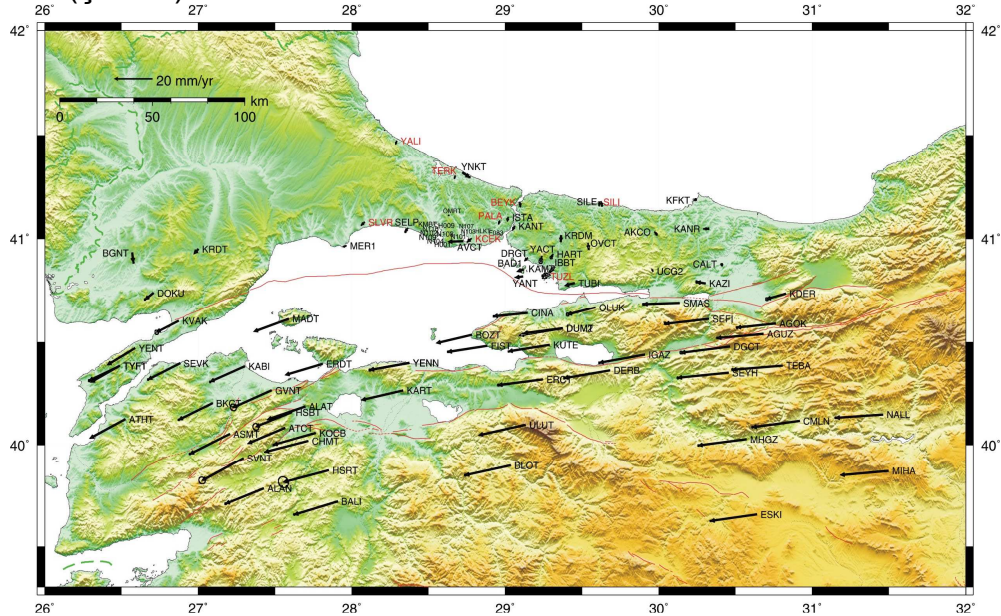
İstanbul Avrupa yakasında Büyükçekmece ve Küçükçekmece ilçeleri arasında (Şekil 1, A), Anadolu yakasında ise Tuzla ve Kartal ilçeleri arasında (Şekil 1, B) gözlenen sismik aktivite nedeniyle bu proje çerçevesinde aktif fayların izlenmesi amacıyla, mikrosismoloji çalışmaları yürütülmektedir. Büyükçekmece koyu ve Ataköy marina arasında kalan sığ denizel (0-20 m) alanlarda (Şekil 1, kırmızı alan), karada gözlenen heyelanların deniz içi devamının araştırılmasına yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Yeniköy ve Çatalca çalışma alanlarında (Şekil 1, C ve D) ise, heyelanların izlenmesi tekniklerinin geliştirilmesi amacıyla, kara alanlarında gözlenen heyelanlar araştırılmıştır.

## Genel Değerlendirme

Proje, üç ayrı temel konuyu içeren bir şemsiye proje şeklinde kurgulanmış olup, izleyen kısımda elde edilen ana sonuçlar gruplanarak maddeler halinde değerlendirilmiştir:

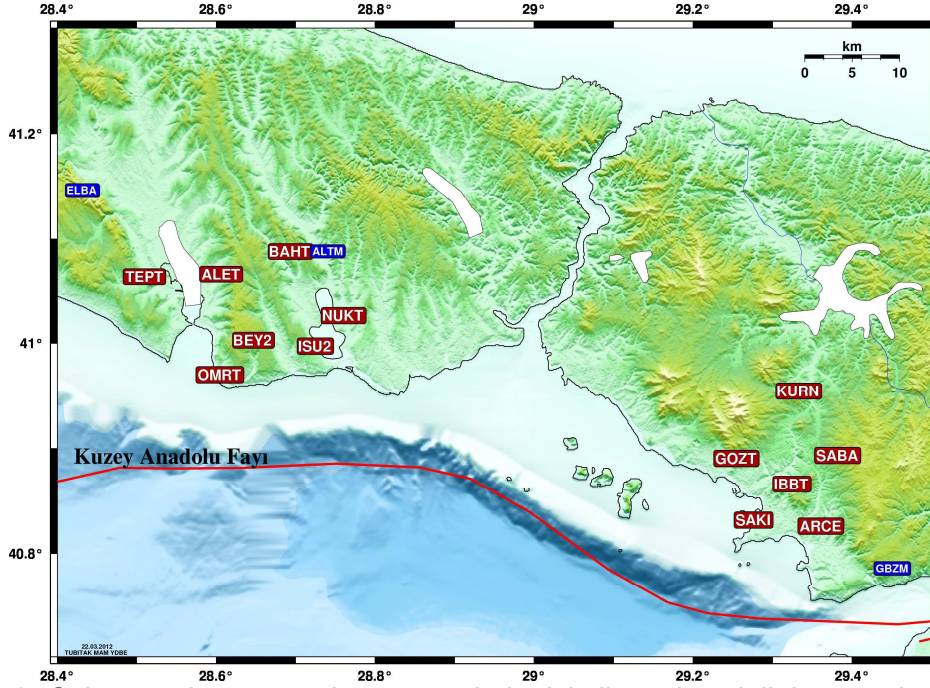
### 1) İstanbul kara alanındaki aktivitesinden şüphe edilen fayların araştırılmasına yönelik genel değerlendirmeler

- Projenin başında İBB DEZİM için gerçekleştirilen daha önceki projeler (*Marmara Bölgesi'nde Depreme Yönelik Yeni Metotların Uygulanması 2001-2003; Marmara Bölgesi'nde Deprem Kestirimi Çalışmaları, 2004; Gebze-Kartal Sismik Zonu Deprem Riski ve Sismik Tehlike Değerlendirmesi 2003-2005; Marmara Bölgesinin Deprem Aktivitesinin Çok Disiplinli Yöntemlerle İzlenmesi ve İstanbul Kıyı Şeridi/Kıta Sahaneliği Zeminine Olası Etkilerinin Araştırılması 2007-2008*) kapsamında oluşturulmuş olan GPS gözlem ağı genişletilerek, Büyükçekmece'nin batısı ile Küçükçekmece'nin doğusu ve Tuzla bölgesindeki olası süreksizlikleri tanımlayabilecek şekilde 22 noktalık yerel bir ağ oluşturulmuştur. Yeni noktalar oluşturulurken, verilerin İBB tarafından farklı çalışmalarda kullanabilmesi amacıyla, İstanbul nirengi ağına ait pilyelerden de yararlanılmıştır. Elde edilen veriler, sistematik olarak ölçüm kampanyaları sonrası analiz edilerek Marmara Bölgesi hız alanındaki değişimler kontrol altına alınmıştır. Projede analiz edilen nokta sayısı 101'dir (Şekil 2).



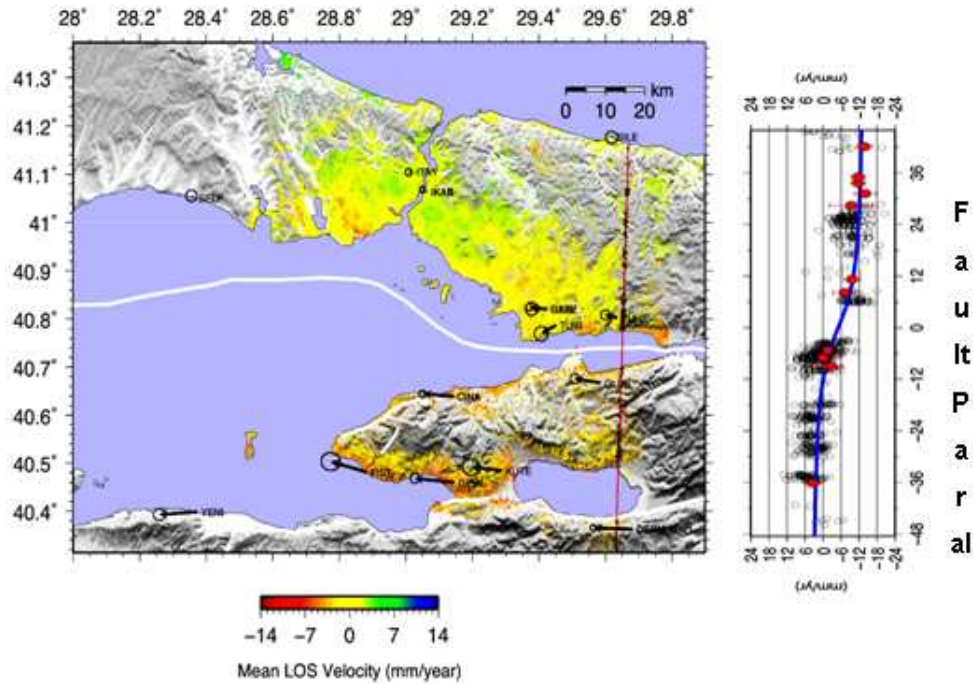
**Şekil 2** Avrasya'ya göre GPS verilerinden hesaplanan Marmara güncel yatay hız alanı (Kırmızı renkli noktalar ISKI UKBS GPS ağına ait noktalardır.)

- Büyükçekmece-Küçükçekmece ve Tuzla-Kartal arası, tüm proje süresince kesintisiz olarak 16 sismoloji istasyonu ile mikro ölçekteki (büyüklük > 0.5 ML) deprem aktivitesini ortaya koymak üzere izlenmiştir (Şekil 2).



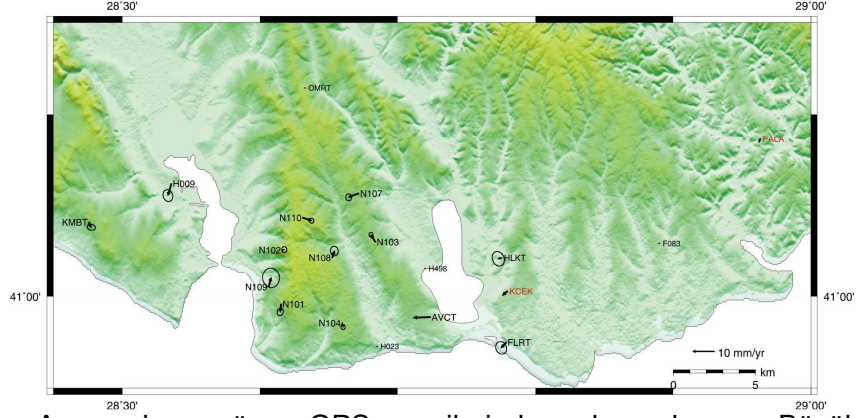
**Şekil 3** Çalışma alanı ve yakın çevresinde işletilen sismoloji istasyonları. Proje kapsamında kurulan deprem istasyonları bordo, TÜRDEP Projesi kapsamında işletilen geniş-bant deprem istasyonları ise mavi renkte gösterilmiştir.

- İstanbul'daki deformasyon değişimlerini görüntüleyebilmek amacıyla yapılan PSInSAR çalışması için, arşiv (ERS1/2) ve güncel (ENVISAT) veriler analiz edilmiştir. Sonuçlar, sürekli GPS istasyonlarından elde edilen zaman serileri ile entegre edilerek kontrol edilmiştir (Şekil 4).



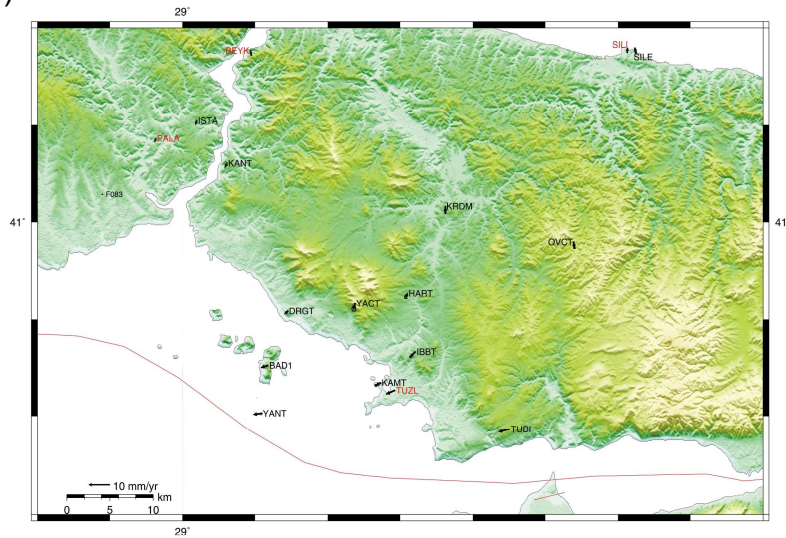
**Şekil 4** 1992-1999 aralığı için elde edilen PSInSAR sonuçları ile 1988-1999 aralığına ait GPS hız alanının harita üzerinde (sol panel) ve K-G kesit üzerinde (sağ panel) gösterimi. Harita üzerindeki kırmızı çizgi, kesitin alındığı lokasyonu göstermektedir.

- GPS ve InSAR sonuçlarına göre, Marmara'nın kuzeyindeki en fazla deformasyona uğrayan alanın Büyükçekmece-Küçükçekmece arası olduğu görülmektedir. Bölgede yaptığımız tüm çalışmalardan bildiğimiz üzere, bu bölgedeki deformasyonların ana kaynağı, genelde denizde haritalanan fayların karadaki uzantıları üzerinde gelişen heyelanlı alanlardır (Ergintav ve diğ., 2011). Gözlenen yüzey değişimlerinin olası nedenleri, litolojik değişimler (örneğin suya doygun seviyelerin üzerlerindeki zayıf malzemeyi kaydırması gibi) ve bu faylardaki küçük boyuttaki aktivitelerin heyelanları tetiklemesi olarak tanımlanabilir (Şekil 5).



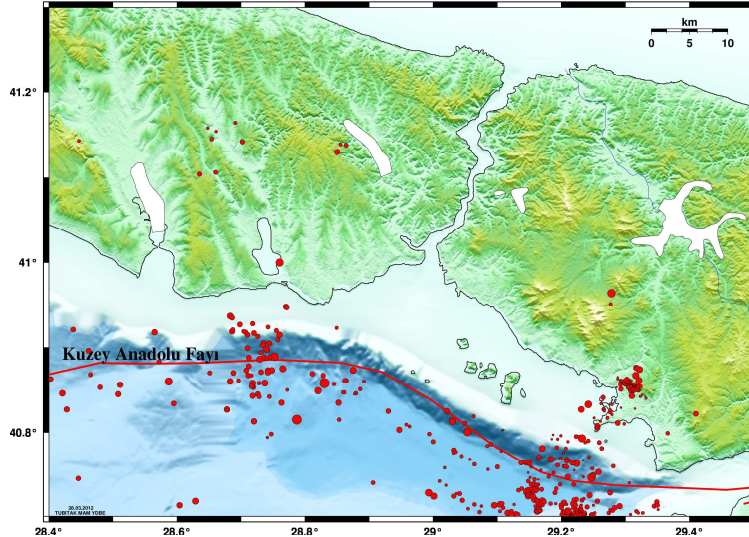
**Şekil 5** Avrasya'ya göre GPS verilerinden hesaplanan Büyükçekmece-Küçükçekmece arasına ait güncel yatay hız alanı (Kırmızı renkli noktalar ISKI UKBS GPS ağına ait noktalardır). Hız vektörü olmayan ölçüm noktalarında üçten az ölçüm yapılmış olup, bu sebeple, bu noktalar için hız üretilmemiştir.

- Tuzla civarında GPS ve PSInSAR ile saptanan yamulma anomalileri baskın olarak, 1999 depremleri sonrası bölgede hâlihazırda devam eden deprem sonrası deformasyonlarla ilgilidir. Elde edilen sonuçlar, Kuzey Anadolu Fayı (KAF)'nın kuzey koluna yakın alandaki elastik yükleme ve uzak alandaki deprem sonrası değişimlerin bileşkesi olarak görülmektedir (Şekil 6)



**Şekil 6** Avrasya'ya göre GPS verilerinden hesaplanan Tuzla bölgesine ait güncel yatay hız alanı (Kırmızı renkli noktalar ISKI UKBS GPS ağına ait noktalardır.)

- 1999 depremleri öncesi ve sonrası için GPS ve PSInSAR sonuçlarının birlikte analizi bölgede 1999 depremi sonrası beklendiğinin aksine önemli bir gerilme artışı olmadığını göstermektedir. Bunun nedeni olarak raporda farklı olasılıklar tartışılmıştır. En kuvvetli olasılık, 1999 kırığının batı ucu olan Adalar segmentinde krip olayının gözlenmesi veya sığ kilitleme derinliğinin olması olarak ortaya çıkmaktadır. Adalar segmenti civarındaki düşük deprem aktivitesi, krip olasılığını desteklemektedir. Konuya kesinlik kazandırılması için, Marmara Denizi içindeki fay segmentleri civarında jeodezik kontrol noktalarının oluşturulması ve deniz tabanı sismolojik gözlem istasyonlarının sayısının bölge özelinde artırılması gereklidir.
- Proje döneminde en fazla sismolojik aktivitenin gözlemlendiği alan, Tuzla bölgesidir. Bu bölgedeki depremlere ait birleşik fay düzlemi çözümüne uygun olası bir aktif faya ait bulguya arazide rastlanmamıştır. Bununla birlikte, deprem kümesinin bulunduğu bölgede Prof. Dr. İhsan Ketin (Ocak 1990 - Nisan 1991) tarafından yapılan jeoloji haritasında olası bir fay gösterilmektedir. Bu bölgedeki depremler, bu fayla ilişkili olabilir ancak daha ileri bir yorum yapabilmek için yeterli bilimsel kanıtlar bulunabilmelidir. Ancak bölgenin sağ yanal doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fay sisteminin kontrolünde olduğu düşünüldüğünde, ikincil yapıların görülebileceği bir gerçektir. Temel olarak, Tuzla bölgesinde iki adet fay düzlemi elde edilmiştir. Bilindiği gibi salt sismoloji verilerinden düğüm düzlemlerinden hangisinin fay düzlemi olduğu anlaşılamamaktadır. Eğer fay düzlemi kuzeye eğimli ve BKB-DGD doğrultulu düğüm düzlemine ait ise, bu çözüm sağ yanal “Riedel (R)” yapısına uygundur. Diğer yandan, eğer fay düzlemi K-G sol yanal faylanma veren düğüm düzlemi ile ilişkili ise, “anti-Riedel (R’)” yapısına uymaktadır. Bölgedeki aktivitenin sağlıklı yorumlanabilmesi için gözlemlerin devam ettirilmesi gerekmektedir.



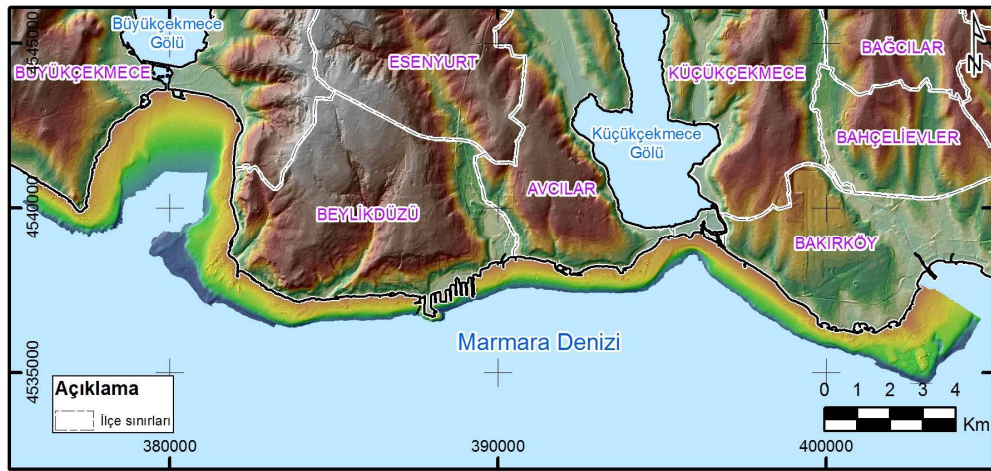
**Şekil 7** Çalışma alanı ve yakın çevresinin Haziran 2009 – Mayıs 2012 tarihleri arasındaki depremselliği ( $M_L > 0.5$ ). Dairelerin yarıçapı depremlerin  $M_L$  büyüklükleriyle orantılıdır.

- Küçükçekmece-Büyükçekmece arasındaki sismik aktivite çok düşük olup, önemli bir kısmı denizde meydana gelmiştir. Karada gözlenen az miktardaki depremlerin bir kısmının, Küçükçekmece Fayı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Proje süresince gözlenen aktivite için, bölgeye yönelik

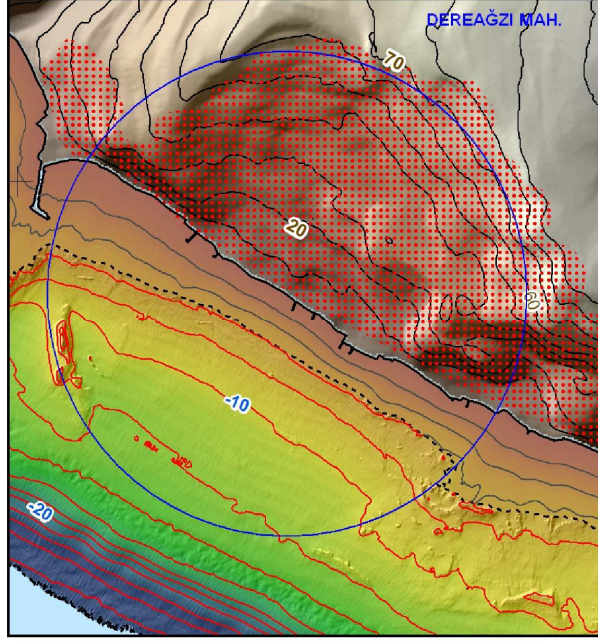
sağlıklı fay düzlemi çözümü elde edilememiştir. Ayrıca, depremler belirli bir dizilim ve dağılım göstermediğinden birleşik fay düzlem çözümü de yapılamamıştır. Bu bölgedeki aktivitenin sağlıklı belirlenebilmesi için gözlemlerin devam ettirilmesi gerekmektedir. Deniz tabanı sismolojik gözlem istasyonlarının sayısının bölge özelinde artırılması ile denizdeki aktivitenin kaynağına yönelik daha net bulgular elde etmek mümkün olacaktır.

## 2) Büyükçekmece-Ataköy arasındaki kalan sığ deniz tabanı morfolojisinin (20 metre su derinliğine kadar) saptanmasına yönelik araştırmaların genel değerlendirilmesi

- Proje kapsamında, ilk defa olarak Büyükçekmece-Ataköy arasındaki kısmın sığ batimetrisi belirlenmiştir (Şekil 8)



- Şekil 8 Büyükçekmece-Bakırköy arası yakın kıyı alanlarında gerçekleştirilen Çok Işınlı Derinlik Ölçer çalışmasından elde edilmiş verilerin işlenmesi sonucunda 1x1 m çözünürlükte hazırlanmış batimetri haritası.
- Deniz/kara geçiş zonu ayrıntısı, özellikle heyelanlar açısından ortaya konmuş, farklı yapısal unsurlar tanımlanmıştır. Örneğin, Büyükçekmece Gölü ile Büyükçekmece Körfezi'nin birleşme alanına ait batimetri haritası incelendiğinde, farklı bir topoğrafik değişimin varlığı göze çarpmaktadır. Bu topoğrafik yapının, Büyükçekmece Gölü'nden, özellikle taşkın zamanlarında, Büyükçekmece Körfezi'nin kuzey kıyılarına giren sedimanların yayılım alanını temsil ettiği yorumu yapılmıştır. Tipik bir yelpaze şeklini yansıtan bu yapı, araştırma alanının birçok yerinde farklı şekillerde ve büyüklüklerde gözlenebilmektedir. Gözlenen bu alan, bölgede bulunan iki liman arasında yer almaktadır. Bu limanların bölgeye gelen fazla sediman girdilerinden etkilenmiş olabilecekleri düşünülmektedir.
- Heyelanların gerek karasal topoğrafyaya ve gerekse deniz tabanına yapmış olduğu etkiler örneklenmiş (Şekil 9), heyelanlar veya deniz aşındırması sonucunda, kıyıda meydana gelen malzeme (toprak) kaybının olduğu alanlar belirlenmiştir.



**Şekil 9** Detay çalışılan sahalara bir örnek. Dereağzı Mahallesi'nde meydana gelmiş bulunan eski bir heyelanın deniz tabanında meydana gelen olası etki alanı

- Tsunami tehlikesinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda temel veri seti batimetridir. Özellikle sığ kesimlerdeki morfolojik değişimler, tsunami sonrası olabilecek dalga yüksekliğini dramatik boyutta değiştirmektedir. Bu çalışma sonucunda elde edilen batimetri verisi ile bölgeye ait tsunami tehlike modellerinin yenilenmesine gerek vardır.
- Elde edilen veriler CBS ortamında sorgulanabilecek ve farklı projelere altlık oluşturacak şekilde teslim edilmiştir.

### **3) Öncelikli heyelanlı alanlarda çok disiplinli araştırmalar yapmak suretiyle heyelan tespit ve izleme konusunda yöntemlerin geliştirilmesi çalışmalarına ait genel değerlendirme**

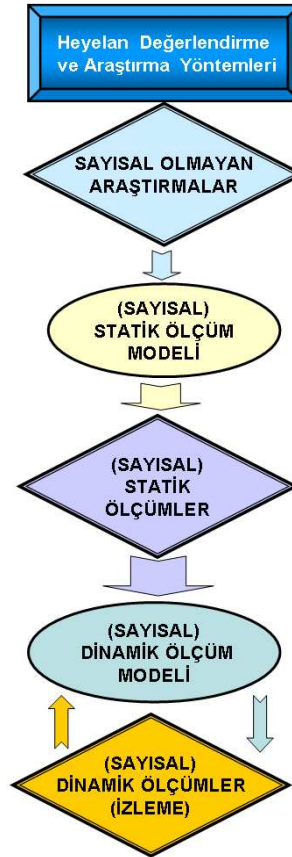
- Öncelikli olarak ele alınan Yeniköy ve Çatalca araştırma alanları birbirlerinden uzak konumda olsalar da, gerek zemin yapısı ve gerekse meteorolojik koşullar açısından benzer özelliklere sahiptirler. Bu alanları birbirlerinden ayıran en belirgin özellik, Yeniköy heyelanlı alanının, kuzeyinde bulunan Kara Deniz'in etkisi altında ve Çatalca heyelanlı alanının ise kuzeydoğusunda bulunan Karasu Nehri'nin etkisi altında şekillenmesidir.
- Yeniköy ve Çatalca çalışma sahalarındaki topoğrafya değişimleri, kayma izleri ve heyelan topoğrafyası oluşturulan jeodezik gözlem ağlarında, periyodik (mevsimsel değişimleri örnekleyecek şekilde) ve sürekli gözlemler yapılarak izlenmiştir. Toplanan verilerle bölgedeki topoğrafya değişimleri için sistematik yamulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ele alınan problemin zamansal ve alansal kontrolü gerçekleştirilmiştir.

- Çatalca ve Yeniköy'de heyelanlara ait derinlik bilgilerini ortaya koymak amacıyla toplam 7.6 km sismik yansıma çalışması yapılmıştır. Sismik verilerin analizine yönelik sığ ve derin kısımlar için farklı iki veri işlem yaklaşımı geliştirilmiş ve sonuçlar heyelanlı alanların derinlik boyutunu kontrol etmek amacı ile yorumlanmıştır. Elde edilen bulguları desteklemek amacıyla yüzey dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW), sismik kesitlere ait atış verilerindeki yüzey dalgaları ele alınarak her iki saha içinde gerçekleştirilmiştir. Elektrik kesitleri alınarak, yaygın kullanılan bu yöntemin heyelan sahalarındaki etkinliği sorgulanmıştır.
- Yeniköy araştırma alanında 6, Çatalca araştırma alanında ise 8 adet inklinometre kuyusunun konumları jeolojik, jeodezik ve sismik çalışmalarla belirlenerek oluşturulmuştur. Her iki bölgede açılan kuyulardan 5'er adetinde sürekli gözlem çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Geriye kalan, Yeniköy araştırma alanında 1 adet ve Çatalca araştırma alanında 3 adet kuyuda ise periyodik ölçümlerle izleme çalışmaları yapılmıştır.
- Yeniköy ve Çatalca'da sürekli gözlem yapılan 5'er adet kuyunun içine yerleştirilen inklinometre dizinleri yardımıyla heyelanlardaki deformasyonların, derinliğin fonksiyonu olarak sürekli izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Dizinlerdeki inklinometre elemanlarının yerleri, derinlerdeki farklı yapısal değişimleri kontrol edecek şekilde konumlandırılmıştır. Her bir kuyuda 3 ile 5 arası değişen elemanlar kullanılmıştır. Yerinde 1dk aralıklarla toplanan inklinometre verilerinin, bir web arayüzünden 1 saatlik örneklemelerle izlenmesi ve İBB' nin bu verileri anında takip edebilmesi sağlanmıştır.
- Çatalca ve Yeniköy'de Time Domain Reflectivity (TDR) ölçümleri, inklinometre ölçümlerini destekleyecek şekilde ucuz ve pratik bir yöntem olarak uygulanmıştır. TDR' ın bu proje kapsamındaki kullanımı, ülkemizde konuyla ilgili ilk uygulama örneğini oluşturmaktadır.
- Çatalca ve Yeniköy'de karot alarak zemin kontrolü yapmak üzere inklinometre kuyularının yakınına açılan bazı kuyular, su seviyesi gözlemi yapılmasına olanak sağlayacak şekilde düzenlenmiştir. Çatalca'da 4 ve Yeniköy'de 2 adet su gözlem kuyusunda, aylık ölçümler gerçekleştirilmiştir.
- Heyelanlı alanlarda kayıt altına alınan topoğrafik değişimlerin takibi amacıyla gerçekleştirilen yamulma analizi sonuçları, su seviyesi değişimleri ve Yeniköy ve Çatalca'da proje kapsamında kurulan sayısal meteoroloji istasyonlarından elde edilen veriler ışığında sorgulanmıştır. Genel olarak, heyelanların baskın olduğu yerler, topoğrafik eğimin kontrolü altındadır.
- Mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan SPAC Dizin ve H/V Mikrotremör analiz yöntemlerinin heyelanlı sahalardaki problemlerin çözümüne katkısını sorgulamak, derinlikle S hızı değişimlerini ortaya koymak ve olası kayma potansiyeli yüksek olan zayıf zonları tanımlamak amacıyla, Yeniköy'de SPAC Dizin ve H/V Mikrotremör analizleri ile

Çatalca'da H/V analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular sismik yansıma ve elektrik sonuçları ile uyumludur.

- İnclinometre ve TDR gözlemlerine ek olarak yeni bir yaklaşım ile heyelanların izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Manyetik olmayan bir kaba yerleştirilen sayısal bir pusula, periyodik olarak gözlenen inclinometre kuyuları boyunca özel tekerleri ile indirilerek derinliğin fonksiyonu olarak kuyuların burulması (diğer deyişle yamulmanın açısal değişimi) izlenmiştir. Bu sayede, birbirine dik (sadece 90°) doğrultularda izlenebilen deformasyonların kesintisiz olarak tüm açılarda (0-360° arası) saptanmasına yönelik yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistem; YDBE tarafından proje kapsamında tasarlanmıştır.
- Heyelanların araştırılmasına ve izlenmesine yönelik yöntemler irdelenmiş, avantajları ve dezavantajları ortaya konmuştur. Heyelanlı alanlarda yapılacak çalışmalarda referans alınması amaçlanan bir metodoloji oluşturulmuş (Tablo 1), yöntemler (Tablo 2) sınıflandırılmıştır. Oluşturulan sınıflandırma, etkin kullanım açısından broşür formatında verilmiş ve bu rapordan bağımsız olarak kullanılabilmesi sağlanmıştır. Metodolojinin her bir adımı uygulayıcıya yardımcı olacak şekilde maddeler halinde detaylandırılmıştır. İstendiğinde şartname olarak da kullanmak mümkündür. Öncelikli çalışma sahaları, tanımlanan bu metodolojinin izlenmesi ile çalışılmıştır.

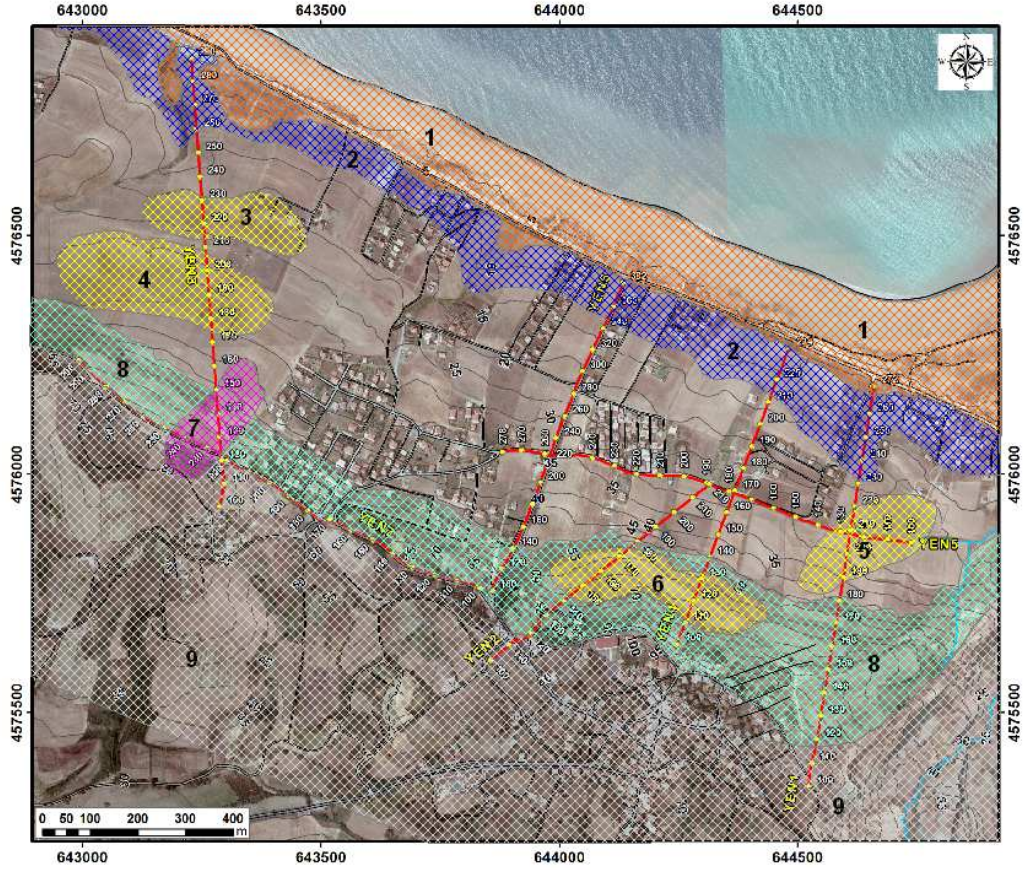
**Tablo 1** Heyelan değerlendirme ve araştırma yöntemleri akış grafiği.



**Tablo 2** Proje kapsamında heyelanların araştırılmasında kullanılan yöntemler

| HEYELANLARIN ARAŞTIRILMASINA YÖNELİK PROJE KAPSAMINDA KULLANILAN YÖNTEMLER |               |         |                   |                |                       |        |                                               |      |             |           |              |                                 |                     |             |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------|---------|-------------------|----------------|-----------------------|--------|-----------------------------------------------|------|-------------|-----------|--------------|---------------------------------|---------------------|-------------|
| Jeodezi/Uzaktan Algılama                                                   |               |         |                   | Jeofizik       |                       |        |                                               |      |             | Jeoteknik |              | Destek Gözlemler                |                     |             |
| GPS                                                                        | Total Station | PsinSAR | Optik Uydu Verisi | Sismik Yansıma | İki Boyutlu Özdiirenç | PS log | Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW) |      | Mikrotremör | Sismoloji | İnclinometre | Time Domain Reflectometry (TDR) | Yeraltı Su Seviyesi | Meteoroloji |
|                                                                            |               |         |                   |                |                       |        | H/V                                           | SPAC |             |           |              |                                 |                     |             |
|                                                                            |               |         |                   |                |                       |        |                                               |      |             |           |              |                                 |                     |             |

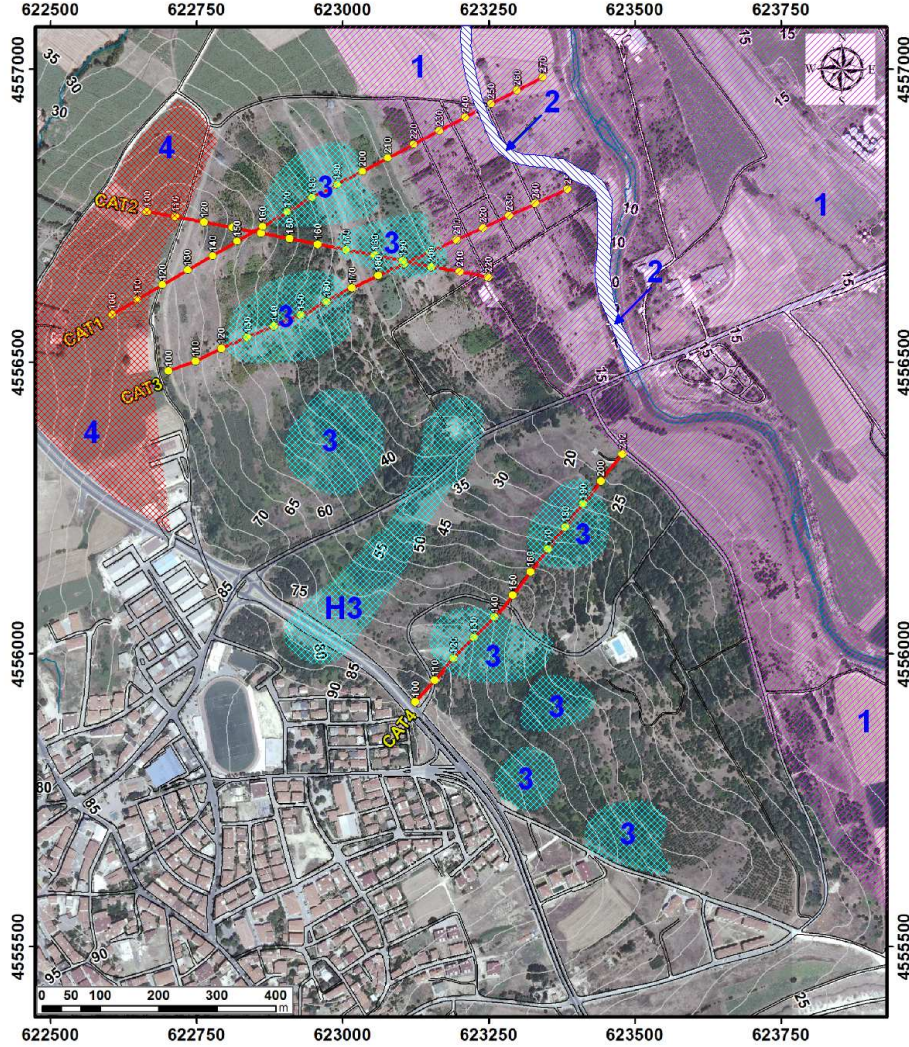
- Yeniköy araştırma alanında gerçekleştirilen uzun dönem gözlemlerin sonrasında, bölgenin aldığı yağış dönemleriyle, heyelanların ve toprak akmalarının meydana gelme dönemler arasında yakın bir ilişkinin var olduğu tespit edilmiştir. Gerek heyelanlı alanlarda gerçekleştirilen GPS ölçümleri ve gerekse kuyu içi inclinometre çalışmaları sonrası saptanan toprak kayması ve akması, hem yağışlı dönemlerle hem de bu dönemlerle paralel gelişen yer altı su tablasının yükselme dönemleriyle yakın ilişki içerisinde. Ayrıca, denizin dalga ve akıntı rejimlerinin etkisiyle kıyı aşındırılmakta, alt kısmı oyulan kıyı şeritinde göçmeler, devrilmeler yaşanmakta ve kıyı çizgisi değişmektedir.
- Yeniköy araştırma alanında yapılan çalışmalarda ortamın heterojen bir yapı gösterdiği ve heterojenitenin olasılıkla bölgedeki eski heyelanlarla (veya toprak akmalarıyla) ilgili karmaşık malzeme birikimlerinden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca bu sahada yapılan sismik yansıma profillerine ait mevcut kesitlerdeki yerel ve sığ anomaliler dışında, derinlerde tabakalanmış yapıların yatay ve yataya yakın olduğu açık bir biçimde gözlemlenmektedir. Elde edilen veriler yüzeyde açık olarak gözlenen kumlu/killi seviyelerin, yağışların kaymayı tetiklemesi ile sığ kaymalar ve akmalar oluşturduğu ve bu değişimlerin bölgedeki topoğrafyayı kontrol ettiğini göstermektedir. Sahada yapılan çalışmalarda hareketlerin genelde yüzeye yakın kumlu ve siltli seviyelerde gerçekleştiği gözlenmiştir. Kaymanın bu aşamada üst seviyelerde minimal düzeyde yüzeyel akma (Creep) şeklinde olduğu; bunun altındaki kesimlerde ise büyük olasılıkla yeraltı suyunun çatlaklı birimler ile etkileşimi sonucunda gelişen, genellikle küçük miktarlarda ve değişen birim sınırları ile uyumlu sünük davranışlar gösterdiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 10** Yeniköy siğ sismik yansıma verisinden elde edilen yapısal ve stratigrafik unsurların alansal dağılımlarını gösterir harita. Kısaltmalar metin içinde verilmiştir.

- Şekil 10 üzerinde, Yeniköy bölgesin temsil eden bazı temel yapısal ve stratigrafik unsurların alansal dağılımları haritalanmıştır. Haritada 1 ile gösterilen alan, güncel plaj kumullarının dağılım alanlarını temsil etmektedir. Daha sonra gelen ve kıyı boyunca uzanan alan ise 2 ile gösterilmiştir. Bu alan sismik yansıma kesitlerinde onlap yapısına ait üstü örtülü eski kumsal alanların dağılımını temsil etmektedir. Araştırma alanının en üst kesimlerinde 9 olarak haritalanan alan ise, ters eğimli olarak GB yönüne ve GD da yer alan maden ocağına doğru olan kayma alanlarını temsil etmektedir. Siğ sismik yansıma kesitleri üzerinde gözlenen duraysızlık yüzeylerinin (heyelan alanları) alansal dağılımlarını temsil eden bölgeler ise, haritada 3, 4, 5 ve 6 olarak gösterilmiştir. Bölgenin yüksek eğimli alanlarını sınırlayan KB-GD yönündeki 8 alanı ise, Yeniköy içerisinde duraysızlığın en fazla gözlemlendiği alanları tanımlamaktadır. 7 alanı ise, kaşık şeklinde kayma ile ilişkili yerel boyutta küçük bir heyelan alanını temsil etmektedir.
- Çatalca araştırma alanında üst seviyelerdeki birimlerin daha alt seviyelerdeki birimlere göre çok daha fazla deforme olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kesitlerde gözlenen düşey süreksizliklerin siğ kotlardaki toprak kaymalarından ve/veya olası eski heyelanlardan kaynaklanan geçişler de olabileceği belirtilmektedir. Güncel heyelanlara ait tüm sahayı kontrol eden

genel bir kayma düzlemi gözlenmemiş olup derinlerde gözlenen değişimlerin paleo-heyelanlarla ilgili olma olasılığının yüksek olduğu ifade edilmiştir. Yüzeyde gözlenen kumlu ve killi seviyelerin özellikle yağışla doygun hale gelmesi nedeniyle akma yapılarını tetiklediği ve sığ heyelanların oluşumuna neden olduğu belirlenmiştir. Kayma hareketleri, bu aşamada yeraltı suyunun da etkisi ile yüzeye yakın seviyelerde akma ve sığ heyelanları daha aşağıdaki seviyelerde ise genellikle ihmal edilebilir miktarda sünek davranışları işaret etmektedir.



**Şekil 11** Çatalca sığ sismik yansıma verisinden elde edilen yapısal ve stratigrafik unsurların alansal dağılımlarını gösterir harita.

- Bölgeye ait uydu görüntüleri ve sismik yansıma kesitleri incelendiğinde, bölgede ki hakimiyetini uzun dönemdir sürdürdüğü bilinen Karasu Deresi'ne ait eski bir nehir yatağının varlığı saptanabilmektedir (Şekil 11, 2 no' lu alan). Şekil 1'de, 1 no' lu alan olarak belirlenmiş olan taşkın alanına gelen malzemeler, taşkın dönemlerinde sel sularınca, Büyükçekmece Körfezine taşınmaktadır. Böylece, taşkın alanı sınırlarında yeni duraysızlık alanları yaratılmış olmaktadır. Bu alanlara, yüksek irtifalardaki malzemelerin tekrar uygun koşullar oluştuğunda kayma ve akma şeklinde

birikmeleriyle doldurduğu görülmektedir. Bu döngünün tekrarlaması Çatalca heyelanlı alanının gelişimini kontrol etmektedir. Arazi gözlemleri ve sismik yansıma kesitleri incelendiğinde hem yüzeysel akma ve kayma alanlarının varlığı hem de derin kayma yüzeylerinin varlığı tespit edilmiştir. Haritada, 3 ile yeşil renkle taralı alanlar duraysızlık açısından en zayıf alanları göstermektedir. Bu alanların içerisinde yer alan H3 alanı halen aktif olduğu gözlenen ve geniş bir alanı kaplayan heyelanı tanımlamaktadır. Bunun yanı sıra, haritada 4 numarayla gösterilen alan ise, topoğrafyadaki eğimin yerel olarak değişmesi nedeniyle beklenen kayma yönünün tersi yönde çalışan bir kırık sisteminin varlığını işaret etmektedir.

- Öncelikli heyelan alanlarından elde edilen tüm veriler kullanılarak, heyelanların gelişim evreleri modellenmiştir. Bu çalışmalara göre, Yeniköy bölgesinin günümüzdeki topoğrafyasına ulaşmasında ve dönem dönem yaşanan zemin kaymalarında, Yeniköy araştırma alanının kuzeydoğusunda konumlanmış bulunan Kara Deniz'in etkisi büyüktür. Kara Deniz'in kıyısız alanda gerçekleştirmiş olduğu uzun süreli aşındırma ve taşıma etkisinin sonucunda bölge bugünkü duraysızlık durumuna ulaşmıştır. Bölgede yaşanan zemin hareketlerinin en temel yöntemle kontrol altına alabilmek için, öncelikli olarak, Kara Deniz'in bölgenin kıyısız alanındaki aşındırma etkisini kontrol altına almak ve aynı zamanda karasal alandan deniz alanına malzeme taşınımının önüne geçmek gerekmektedir. Çatalca araştırma alanı için ise bölgenin kuzeydoğusunda konumlanmış bulunan Karasu Deresi'nin ve bu derenin döküldüğü Marmara Denizi'nin deniz seviyesinin etkisi büyüktür. Karasu Deresi'nin vadi kenarlarında gerçekleştirmiş olduğu uzun süreli aşındırma ve taşıma etkisinin sonucunda bölge bugünkü duraysızlık durumuna ulaşmıştır. Bölgede yaşanan zemin hareketlerinin en temel yöntemle kontrol altına alabilmek için, öncelikli olarak, Karasu Deresi'nin aktığı yatağın kontrol altına alınması ve taşkın dönemlerinde vadi kenarlarını aşındırarak bölgeden malzeme taşınımının önüne geçilmesi önerilmektedir. Ayrıca, heyelanlı alanlarının ıslahı ile yağışlı dönemlerde, yamaçlardan sel ve yıkama sonrasında malzeme gelmesinin önüne geçilmesi, bölgenin ıslahı için gerçekleştirilmesi gereken en öncelikli önlemlerdendir.
- Öncelikli alanlarda yapılacak her türlü yapım çalışması öncesi ve sonrasında dikkat edilmesi gereken iyileştirme amaçlı somut önlemlere yönelik öneriler yetkin uzmanlardan da katkı alınarak tanımlanmıştır. Her durumda üretilebilecek tekil veya çoğul çözüm önerilerinin teknik uygulanabilirlik ve ekonomik maliyet açısından sorumlu idareler tarafından değerlendirilmesi ve uygun çözümün hayata geçirilmesi gerekmektedir. Tablo 3' de önlemler için farklı olasılıklara yönelik örnek bir sınıflandırma verilmiştir.

Tablo 3 Şev stabilizasyonuna yönelik öneri tedbir özetleri (Hunt, 2007)

| İYİLEŞTİRME YÖNTEMİ                          | KOŞULLAR                        | GENEL AMAÇ (ÖNLEYİCİ VEYA İYİLEŞTİRİCİ)                |
|----------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Şev/Yamaç Geometrisinde Değişiklikler</b> |                                 |                                                        |
| Yükseklik azaltması                          | Rotasyonel Kaymalar             | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| Eğim Azaltması                               | Tüm Zemin ve Kayalar            | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| Topuk yükleme                                | Zeminler                        | Erken aşamalarda iyileştirici                          |
| <b>Yüzey Sularının Kontrolü</b>              |                                 |                                                        |
| Ağaçlandırma                                 | Zeminler                        | Önleyici                                               |
| Çatlak doldurma                              | Zemin/Kaya                      | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| Drenaj Sistemleri                            | Zemin/Ayrışan kaya              | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| <b>Sızıntı suların Kontrolü</b>              |                                 |                                                        |
| Derin kuyular                                | Kaya Kütleleri                  | Geçici iyileştirme                                     |
| Düşey gravite drenleri                       | Zemin/Kaya                      | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| Yatay drenler                                | Zemin/Kaya                      | Önleyici/Erken ve orta dönemde iyileştirici            |
| Galeriler                                    | Kaya/Sağlam Zeminler            | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| Deşarj kuyuları veya topuk kanalları         | Zeminler                        | Erken aşamalarda iyileştirici                          |
| Kanal drenajları                             | Zeminler (Kazı/Dolgu)           | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| Şilte drenaj yapıları                        | Zeminler (Dolgular)             | Önleyici                                               |
| Electro-ozmos                                | Zeminler (Siltler)              | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici: Geçici         |
| Kimyasal                                     | Zeminler (Killer)               | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| <b>Tutucu Yapılar</b>                        |                                 |                                                        |
| Beton pabuçlar                               | Kaya                            | Önleyici                                               |
| Kaya Bulonları                               | Eklemlili ve Makaslanmış Kaya   | Önleyici/Blok kaymasına karşı iyileştirici             |
| Beton şeritler ve bulonlar                   | Sık Eklemlili veya Yumuşak Kaya | Önleyici                                               |
| Kablo ankraj                                 | Eğimli Kaya tabakaları          | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| Tel kafes                                    | Dik Kaya Yamaçlar               | Düşmelerle karşılaşma olasılığı                        |
| Beton enerji kırıcılar                       | Orta Eğimli Yamaçlar            | Kayan veya yuvarlanan bloklar ile karşılaşma olasılığı |
| Püskürtme Beton                              | Yumuşak veya Eklemlili Kaya     | Önleyici                                               |
| Kaya payanda/dolgu                           | Sağlam Zemin/Yumuşak Kaya       | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| Gabyon duvar                                 | Sağlam Zemin/Yumuşak Kaya       | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |
| Beton kafes duvar                            | Orta Sağlam Zemin               | Önleyici                                               |
| Donatılı toprak duvar                        | Zemin/Ayrışan kaya              | Önleyici                                               |
| Beton ağırlık duvarı                         | Zemin/Kaya                      | Önleyici                                               |
| Ankrajlı beton perde duvar                   | Zemin/Ayrışan kaya              | Önleyici/Erken ve orta dönemde iyileştirici            |
| Kazık                                        | Zemin/Ayrışan kaya              | Önleyici/Erken aşamalarda iyileştirici                 |

## İleriye Yönelik Öneriler

Proje kapsamında yapılan çalışmaların bir kısmı süreklilik gerektiren ölçümleri içermektedir. Diğer bir kısmı ise, yeni çalışmalar için başlangıç teşkil edecek boyuttadır. Bu kısımda, olası yeni çalışmalara altlık teşkil edecek öneriler aşağıda tanımlanmıştır.

- Büyükçekmece-Küçükçekmece ve Tuzla-Kartal arasındaki aktif fayların varlığını sorgulamak amacı ile oluşturulan sismolojik ve GPS gözlem ağların çalıştırılmasına devam edilmelidir. Üç yıllık proje süresi, aktivitenin varlığını sorgulamak için yeterince uzun değildir.
- KAF'ın adalar segmenti civarındaki düşük deprem aktivitesinin nedenlerini ve krip olasılığını sorgulayabilmek için Marmara Denizi içindeki fay segmentleri civarında jeodezik kontrol noktalarının oluşturulması ve OBS sayısının bölge özelinde artırılması gereklidir. Bu çalışma beklenen İstanbul depreminin büyüklüğünün belirlenmesi için gereklidir.
- Gerçekleştirilen batimetri çalışmasının, İstanbul kıyı şeridinin tümünü aynı kalitede kapsayacak şekilde yaygınlaştırılması gerekmektedir. Hâlihazırda, proje kapsamında elde edilen veri, İstanbul'un kıta sahanlığının sığ kesimlerinin ancak %10-15'ini kapsamaktadır.
- Yapılmış Tsunami çalışmaları yeni batimetri ve sığ sismik verileri kullanılarak güncellenmelidir.
- Kıyı boyunca yapılacak inşaat çalışmalarına yönelik planlamaların etkin biçimde yapılabilmesi için karada yapılan mikrobölgelendirme benzeri çalışmaların kıta sahanlığının sığ kesimlerinde de yapılması gerekmektedir.
- Heyelanlı sahaların çalışılması için oluşturulan metodoloji, konu ile ilgili temel bir şartname için referans doküman olarak kullanılmalıdır. Yapılacak ihaleler için etkin bir değerlendirmeye yönelik eğitim programları ve danışmanlık sistemi kurulmalıdır.
- Heyelanlı alanların analizi için etkinliği gösterilen yöntemlerin kullanımının yaygınlaşması için uygulamalı eğitim programları oluşturulmalıdır.
- LIDAR gibi, ülkemizde henüz yaygın kullanılmamış yeni yöntemlerinde etkinliği sürekli olarak sorgulanmalı, eldeki yöntem sayısı yeni tekniklerle sürekli olarak zenginleştirilmelidir.
- PSInSAR sonuçlarına göre İstanbul'da en fazla deformasyonların olduğu bölgeler (Büyükçekmece-Ataköy arası) sürekli inklinometre ve GPS sistemleri ile kontrol altına alınmalı ve İstanbul geneli için heyelanlara yönelik erken uyarı sistemi kurulmalıdır.
- Erken uyarı sisteminden gelecek bilgiler sayesinde, heyelan tehlikesinin azaltılmasına yönelik proaktif önlemler devreye alınmalıdır.

- Heyelanlara yönelik erken uyarı sistemi ile depremlere yönelik oluşturulan erken uyarı sistemi entegre edilerek, afetlere yönelik etkin insan gücü ve kaynak kullanımı sağlanmalıdır.

**Kaynaklar**

Ergintav, S., Demirbağ, E., Ediger, V., Saatçılar, R., İnan, S., Cankurtaranlar, A., Dikbaş, A. and Baş, M., 2011. Structural framework of onshore and offshore Avçılar, İstanbul under the influence of the North Anatolian fault. *Geophysical Journal International*, 185: 93–105. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.04941.x

Hunt, R.E., *Geologic Hazards (1997) A Field Guide for Geotechnical Engineers*, Taylor & Francis Group, LLC, 334 s.