

JEOTERMAL ALANLARDA ÇÖKME - DEPREMSELLİK VE SAR GİRİŞİMÖLÇER ÇALIŞMALARI

Özde BADUR

ÖZET

Çalışmada, çökme ve deprensellik sebepleri araştırılmış olup, problemlerin jeotermal alana etkileri üzerinde durulmuştur. Jeotermal alanların kullanımı sırasında, akışkan üretimi, re-enjeksiyon ve enjeksiyon işlemleri jeotermal rezervuarda bir takım değişimlere neden olur. Rezervuar basıncı, sıcaklığı değişir, bunların sonunda hacim küçülmesi ve mikro-depremlerin sayısında artış olmakta, üretim yapılan bölgelerde çökmeler oluşabilmektedir. Çökme ve deprensellik deneyimine sahip Wairakei, Tauhara ve Ohaaki (Yeni Zelanda), Cerro Prieto ve Geysers (Kaliforniya, USA) jeotermal alanları ve yüzey çökmesinin SAR Girişimölçer ile belirlenmesi incelenmiştir. Ülkemizde giderek yaygınlaşan ve bir çoğu yerleşim merkezlerinin içinde yer alan jeotermal sahalarda, benzer olayların gerçekleşme olasılığına dikkat çekmek ve konunun tartışılmasını sağlamak için bu çalışma hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji, Çevresel problemler, Çökme, Deprensellik, Mikro-depremler, SAR Girişimölçer.

ABSTRACT

In this study, causes of subsidence and earthquakes are surveyed and these problems' effects on geothermal fields are emphasized. During the usage of geothermal fields, changes in the geothermal reservoir occur due to the fluid extraction, reinjection and injection operations. The reservoir pressure, temperature is changed, then volume decreased and amount of micro-earthquakes increased, subsidence can be occur in the production areas. Geothermal fields which have faced earthquake and subsidences be fare like Wairakei, Tauhara and Ohaaki (New Zealand), Cerro Prieto and Geysers (California) and monitoring of the land subsidence by SAR Interferometry are worked. In this study, in the geothermal areas gaining popularity and located many of the settlements where we draw attention possibility of the realization of similiarly events and this study is prepared to provide of the discussion mentioned.

Key Words: Geothermal Energy, Environmentals Impacts, Subsidence, Sismicity, Micro-sismicity, SAR Interferometry.

1.GİRİŞ

Jeotermal enerji yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu sıcaklıkları atmosferik sıcaklığın üzerinde olan ve çevresindeki yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, tuzlar ve gazlar içerebilen sıcak su, buhar ve gazdan oluşan akışkandan elde edilen enerji olarak tanımlanabilir. Bunun yanında herhangi bir akışkan içermeden "kızgın kuru kayaç (hot dry rock)" tan da bazı teknik yöntemlerle yeraltındaki ısısından yararlanılması jeotermal enerji kaynağı olarak görülmektedir.

Yenilenebilir, sürdürülebilir ve çevre dostu olarak tanımladığımız jeotermal enerjinin kullanımının avantajları olduğu kadar, dezavantajları olduğu göz ardı edilmemelidir. Bu dezavantajları çevresel problemler; hava, su ve fiziksel etki olarak üç grupta incelemiş olup çalışmamızın amacı doğrultusunda çökme ve depremsellik problemleri üzerinde durulmuştur.

2. JEOTERMAL ALANLARDA ÇÖKME VE DEPREMSELLİK

Yeraltındaki tabakaları oluşturan jeolojik kayaçların doğal ya da yapay yollarla fiziksel-kimyasal özelliklerini değiştirmesi ve düşey yöndeki hareketliliği söz konusudur. Bu değişimler ve hareketlilik sonucunda meydana gelen alt tabakalardaki boşlukların oluşması ile yeryüzünde aşağıya doğru “çökme” şeklinde yüzey deformasyonu gözlenmektedir. Jeotermal alanlarda meydana gelen yüzey çökmesi;

- Üretim sırasında çekilen jeotermal akışkan miktarına yakın miktarda akışkanın tekrar geri basılamaması,
- Zamanla akışkan miktarının azalmasından kaynaklı sıcaklık ve basınç kaybı,
- Rezervuarı oluşturan kayaçların sıkıştırılabilir özelliğine bağlı olarak sıcaklık kaybından dolayı tabakalarda meydana gelen hacimsel küçülme/büzüşme,
- Bu kayaçların aynı zamanda yüksek geçirgenliğe sahip olması (yüksek porozite) ile ilişkilidir.

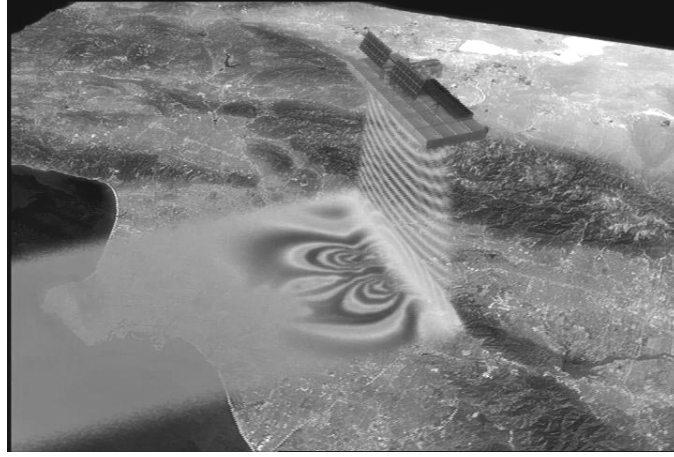
Yerkabuğundaki kırılmalar ile ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yer yüzeyini sarsma olayına “deprem” denir. Doğal depremler yerkürenin bir parçasıdır. Jeotermal alanlarda şu ana kadar can ve mal kaybına neden olan, jeotermal kaynaklı herhangi bir deprem meydana gelmemesine rağmen yine de bu riski göz ardı edilmemelidir. Jeotermal sistemlerde işletmeden kaynaklanan sarsıntılar daha çok “kışkırtılmış/indüklenmiş depremsellik” olarak nitelenebilir. Jeotermal alanlarda çekim ve tekrar basma işleminden dolayı düşük ve orta şiddete sahip birçok mikro-deprem meydana gelmektedir. Jeotermal alanlardaki mikro-depremlerin nedenleri şöyle sıralanabilir:

- Rezervuardan doğal beslenme miktarından fazla miktarda akışkan çekiminden kaynaklı yeraltındaki kütle miktarının azalması,
- Rezervuara soğuk suyun basılması sonucu kızgın olan kayaçların bir anda enerjilerini kaybetmesi,
- Basılan akışkan basıncının, normal basıncı artırması sonucu, fay ve çatlakların karşılıklı yüzeyleri arasındaki sürtünme direncini azaltması,

Sıcak kuru kaya sistemlerinde mikro deprem yaratma riski en yüksek olan işlem hidrolik çatlama. Çatlama sırasında sismik olaylar sürekli gözlenir. Düşük basınç, küçük debi ve düşük hacimli sıvı enjeksiyonu ve kısa enjeksiyon süresi ile başlayan geliştirme süreci hedefine ulaşıncaya kadar sistematik artışlarla sürdürülmektedir.

3. SAR GİRİŞİMÖLÇER

Jeodezi ile ilgili olarak 30-40 yıl içerisinde büyük değişimler meydana gelmiştir. İlk olarak ölçümlerin yapıldığı alanlar büyümüştür [1]. Uyduların kullanılmaya başlanması, küresel referans sistemlerinin tanımlanmasını ve kullanılmasını mümkün kılmıştır. Küresel Konumlama Sisteminin (GPS) ortaya çıkması ile birlikte jeodezi için yeni bir çağ açılmıştır [1].



Resim 1. SAR ile Uzaydan Görüntü Algilama

Jeodezi bilimi, zamana bağlı olarak meydana gelen değişimleri yani deformasyonları farklı tekniklerle belirleyebilmektedir. Yeryüzündeki deformasyonların belirlenebilmesi için halen GPS tabanlı sistemler ile açılçerler, elektromanyetik mesafe ölçerler veya hassas nivelman gibi diğer konvansiyonel jeodezik ölçme sistemleri mevcuttur. Jeodezik tekniklerin birçoğu yeryüzü deformasyonunun belirlenmesi için tekrarlı yersel ölçmelere ihtiyaç duymaktadır [2].

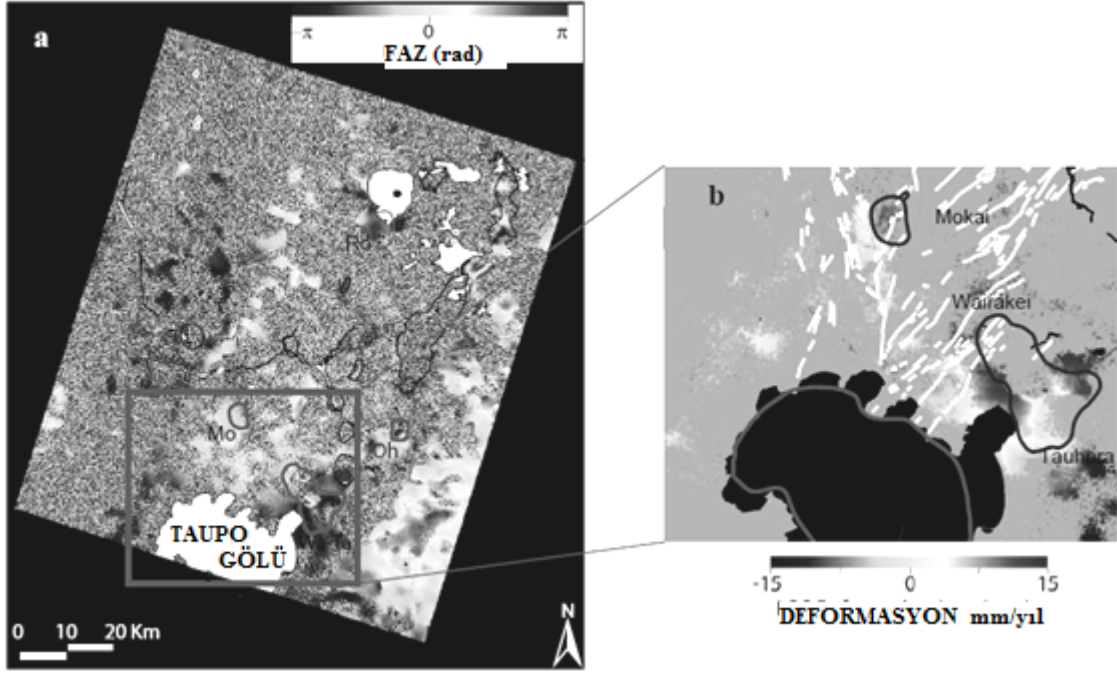
Fakat bunlar nokta tabanlı ölçme sistemleri olup geniş alanların ölçülmesinde maliyeti çok fazladır. Yapay Açıklıklı Radar Girişimölçer (INSAR), yeryüzü topoğrafyasını ve deformasyonun belirlenmesi için yeni bir jeodezik tekniktir ve yersel ölçümlere ihtiyaç duymaz. Yapay Açıklıklı Radar (SAR) elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde çalışan aktif bir uzaktan algılama sistemidir. Bu sistem bir uçağa veya uyduya monte edilmiş şekilde elektromanyetik dalgalar yayınlam ve yeryüzündeki nesnelere geri yansıyan bu dalgaların genliklerini ve fazlarını kaydeder. Bu bağlamda SAR sistemi karmaşık sayılardan meydana gelen görüntüler oluşturur.

Deprem, su, petrol veya doğal gaz gibi yeryüzü deformasyonları, karmaşık sayılardan oluşan SAR görüntülerinin deformasyon öncesinde ve deformasyon sonrasındaki faz bilgilerinin karşılaştırılması ile belirlenebilir. Bu yöntem Yapay Açıklıklı Radar Girişimölçer olarak bilinir. Diğer jeodezik yöntemler düzensiz olarak dağılmış ve kesikli ölçüler sağlarken, INSAR, SAR görüntülerinin kapsadığı binlerce kilometrelik alan içerisinde piksel tabanlı deformasyon bilgisi sağlamaktadır [3].

3.1 Jeotermal Deformasyonlar

Jeotermal alanlardaki yüzey deformasyonu, GPS, Yapay Açıklıklı Radar Girişimölçer ve uydunun sensörlerinden gelen veriler kullanılarak gözlemlenmektedir [1]. InSAR, üretim yapılan jeotermal alanların altındaki yüzey deformasyonunun kaynağı olan yeraltı akışkanındaki hacim ve basınç değişimlerini belirleyebilmekte ve üretim sürecince gözlemleyebilmektedir [4].

Wairakei-Tauhara jeotermal alanlarının tümünde akışkan çekimi meydana gelmektedir. 1950 yıllarında gelişimini tamamlamış ve 16m'den fazla çökme kaydedilmiştir. 1990 yıllarında akışkan ve re-enjeksiyon başlamış ve çökme oranları o zamandan bu yana yavaşlatılmıştır ancak durdurulamamış ve 80mm/yıl'a varan oranlar InSAR kullanılarak ölçülmüştür. Çökme Rotorua ve Ohaaki jeotermal alanlarında da gözlenmiştir [5].

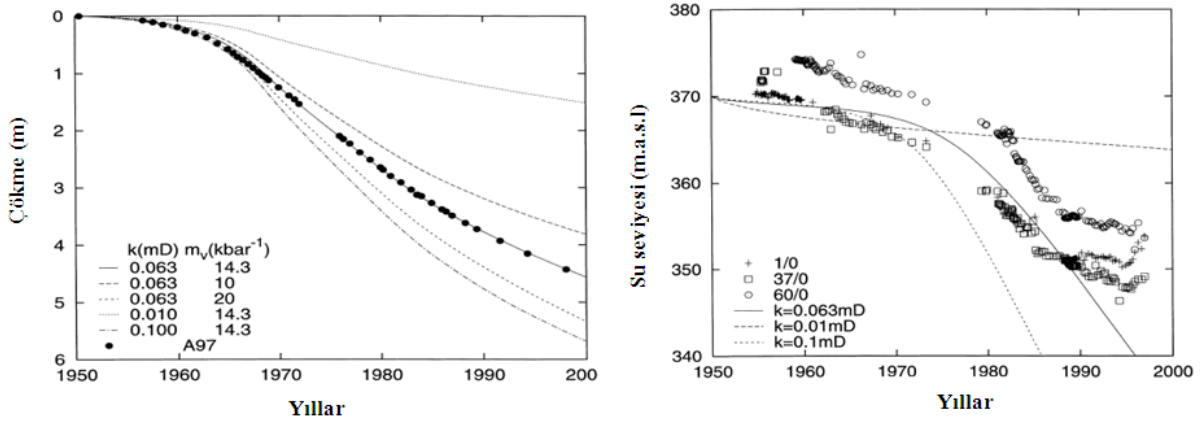


Resim 2. (a) ERS girişimölçer 05/03/99 – 23/07/99. Ayrıca, beyaz renk gölleri ve siyah renkli çerçeve jeotermal alanların ana hatlarını göstermektedir. Renk değişim göstergesi, uyduya olan uzaklığındaki artışı (yani çökmeyi) temsil etmektedir. Deformasyona uğrayan alanlar, (Mo) Mokai, (Wa-Ta) Wairakei-Tauhara, (Oh) Ohaaki, (Ro) Rotorua'nın ana hatlarının kırmızı ile gösterildiği bölgeler ölçülmüştür. **(b)** ERS girişimölçer: 29/01/99 – 27/08/99, 05/03/99 – 23/07/99, 09/04/99 – 01/10/99 ve 18/06/99 - 14/01/00. Renk değişim göstergesi, uyduya olan uzaklığındaki artışı (yani çökmeyi) temsil etmekte, fay izi kırmızı, göl ve nehirler siyah, Wairakei-Tauhara ve Mokai jeotermal alanlarının sınırları ise mavi renk ile gösterilmiştir [5].

4. ÇÖKME VE DEPREMLERİN GÖRÜLDÜĞÜ ALANLAR, SAR GİRİŞİMÖLÇER ÇALIŞMALARI

4.1. Wairakei Jeotermal Alanı

Wairakei jeotermal alanı Yeni Zelanda üzerinde bulunan büyük jeotermal alanlardan biridir. Wairakei jeotermal alanında 1958 yılında Jeotermal Elektrik Santralinin kurulumu tamamlanmış, 1998 yılına kadar büyüklüğü 14 m'den fazla çökme meydana gelmiştir [6]. 1958 yılında kurulan Wairakei Elektrik Santrali ilk yirmi yılında rezervuarda akışkan çekiminden kaynaklanan yaklaşık 20 barlık bir düşüş meydana gelmiştir [7]. Aynı zamanda Wairakei-Tauhara jeotermal alanlarında InSAR Girişimölçer ile yüzey çökmesi ile ilgili çalışmalar yapılmış ve yüzey çökmesinin 16 m'den fazla olduğu belirlenmiştir [5].



Şekil 1: (a) Wairakei A97 kuyusu için yıllara göre çökme miktarı, **(b)** Wairakei jeotermal alanında yıllara göre su seviyesi değişimi [6].

Üretim kuyuları çamur taşı ve pomza breş yapılarının bulunduğu Huka-Falls Formasyonu ile ilişkili sığ üst kayaç boyunca delinmiştir. Üst kayacın kalınlığı batı kısmında 30-90 m arasında değişirken, kuzey kısmında 150-200 m arasında değişmektedir ve en büyük çökmenin ise üst kayacın en kalın olduğu tabakalara karşılık gelen yüzeyde meydana geldiği düşünülmektedir. Testler çamur taşı ve pomza breş tabakasının sıkıştırılabilirliğinin çökme için yüksek oranda etkili olduğu belirtilmiştir [8].

İlk elektrik ünitelerinin devreye girmesinden yaklaşık 20 yıl sonra, atık suyu nehre boşaltan kanal çökmüştür. Elektrik üretimi için bu sahada akışkan çekimi yapılmış ve rezervuar su seviyesi zamanla azaldığı gözlenmiştir [9,10]. Bu azalım sığ derinliklerde basınç düşümünün olduğu çökme çukurlarında sıkıştırılabilir kayaç olan “pomza breş” ve “çamur taşından” kaynaklandığı tekrar belirlenmiştir [9,10].

Jeotermal rezervuarda su seviyesinin azalmasından dolayı rezervuar kendini besleyememiş ve sıcaklığı düşmüştür. Kayaçların soğurulması ile birlikte sıkıştırılabilir ve yüksek gözenekliliğe sahip olan kayaçlar büzülür. Wairakei jeotermal alanında da bu hacimsel küçülmeye HFF içindeki sıkıştırılabilir tabakaların neden olduğu çökmenin çok düşük geçirgenliğe sahip olan ve HFF'nin tabanında yer alan tabakalardan kaynaklandığı belirtilmiştir. [11,12,13,14].

Meydana gelen çökme sonucunda, bütün santral durdurulmuş ve tamir işlemi üç gün sürmüştür. Kanal hala çalışmakta ancak atık suyun %40'ı nehre boşaltılmakta, %50'sinden fazlası re-enjeksiyon yapılmaktadır [8], ayrıca hem atık suyun boşaltıldığı drenaj kanallarında hem de yakındaki anayolda çatlaklar meydana gelmiş, boru hatları sıkışarak burkulma ve kopmalara neden olmuştur.



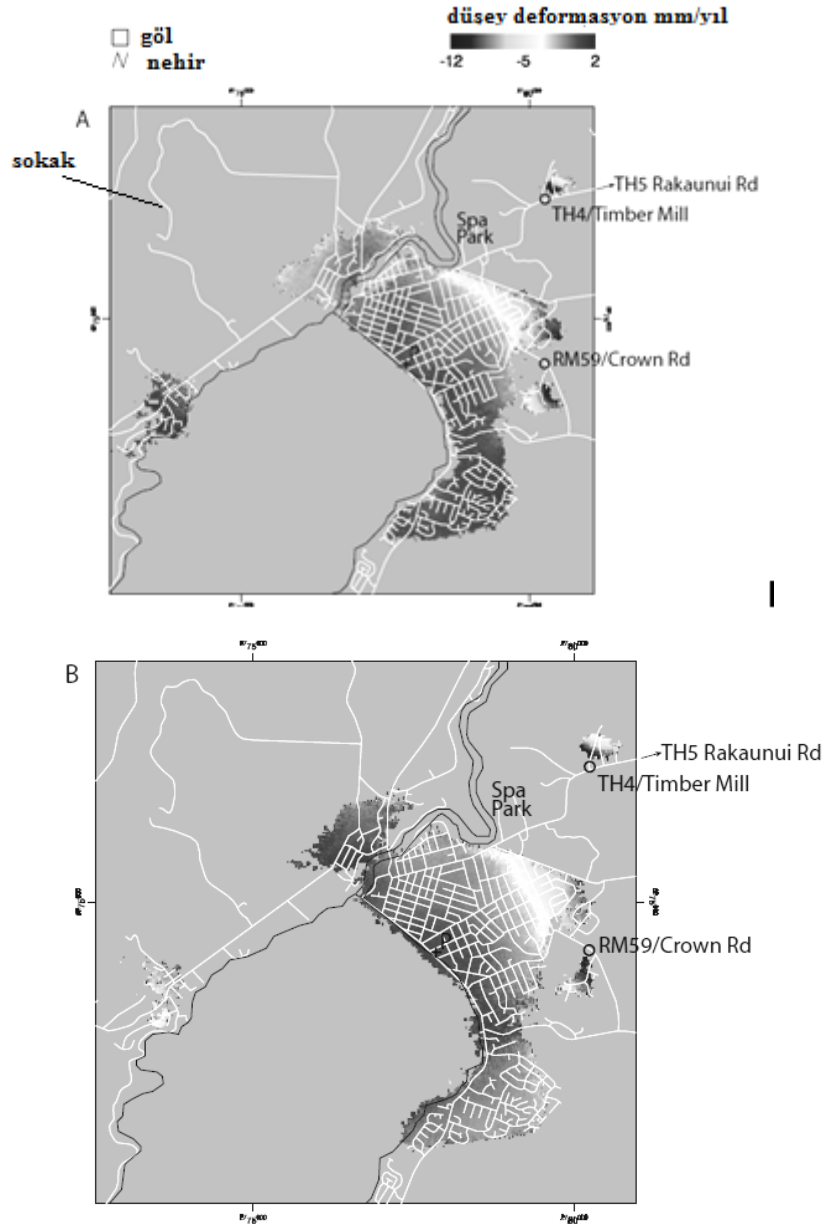
Resim 3. Maksimum Çökme Bölgesine Yakın Wairakei Sulama Kanalı (sıcak-su drenaj kanalı) [8].

4.2. Tauhara Jeotermal Alanı

Geniş volkanizma ve depremsellik karakterize edilen Yeni Zelanda da Taupo Volkanik bölgesi, yeryüzündeki en büyük ve sık sık aktif olan riyolit magmatik sistem olarak tanımlanmıştır [15]. Tauhara jeotermal alanında ise 1997 yılında Termal Otelin inşaatı tamamlanmış ve jeotermal akışkan üretimi yapılmaya başlanmıştır. 1997 yılından itibaren yapılan çalışmalarda yeni çökme bölgesi Taupo kentsel bölgesi içinde gelişmiştir [15]. Çökmenin mekanizmasını ve gelişimini anlamak önemliydi, çünkü Taupo bölgesindeki binalarda ve diğer yapılarda etkili olan Wairakei'de ki üretimden uzakta ve Tauhara'da yeni bir elektrik santralının kurulumu planlanmıştı [15]. 1987-1997 yılları arasında merkeze yakın sınırdaki RM59 bölgesindeki çökme oranları yaklaşık 11 mm/yıl'dır [15]. 1997 ve 2001 yılları arasında RM59'da ki oranlar 60mm/yıl'a kadar artmıştır [15].

Çökme çukuru, anomali şeklinden kaynak derinliğinin modellenmesinde temel alınan yaklaşık 30-60m derinlikteki tortullar, döküntü breş ve hidrotermal bozunmuş ignimbrite tabakalarının sıkışması olduğu belirtilmiştir [16,8].

Tauhara alanında 1999, 2001, 2004, 2006 ve 2007 yıllarında jeotermal çökme alanları belirlenmeye çalışılmış ve bunlar haritalandırılmıştır. İlk çökme merkezi Termal Otel yanında bulunan Termal Otele ait Park içindedir. Yapılan sürekli çalışmalarda 2000 yılında yeni bir çökme merkezi daha bulunmuştur. Crown Road olarak adlandırılan bu bölge yerleşim birimi olmasından dolayı büyük bir ilgiye neden olmuş ve araştırmaların yapılması için üç kuyu delinmiştir. Tauhara jeotermal alanında 1990 yılına kadar toplam maksimum çökme oranı 50-65 mm/yıl olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte Termal Otel alanındaki çökme miktarı 1953-2005 yılları arasında 2.6m olduğu ± 5 cm doğrulukla ölçülmüştür [17].



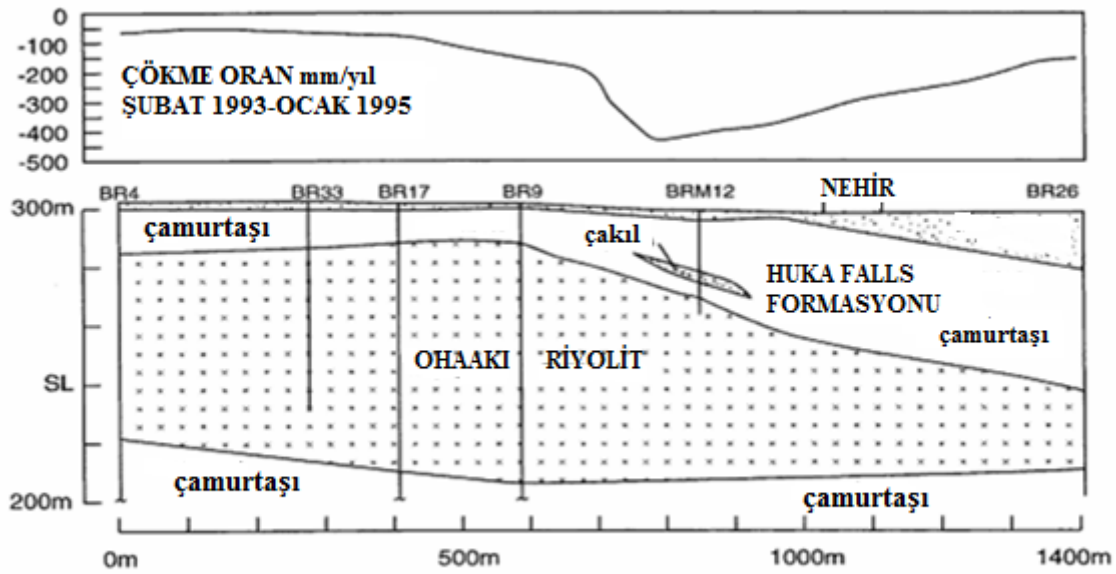
Şekil 2. Uzun Dönem Girişimölçer Çiftinin Kümelenmesinden Taupo Eyaletindeki Deformasyon. (a) 24/05/96-27/08/99 dönemlerindeki ortalama deformasyon, (b) 20/10/00-14/11/03 dönemindeki ortalama deformasyon. Negatif değişimler çökmeyi gösterir. Deformasyon değerleri, varsayılan sabit P noktasına göre verilmiştir [7].

Yapılan SAR görüntüleme çalışmalarında, Taupo'nun güney ve kuzey kısımları ile karşılaştırıldığında 12 mm/yıl oranında çökme Taupo'nun doğusunda bulunmaktadır. Çökme şehrin kuzey sınırına kadar devam etmektedir. İlişkili deformasyon oranlarında 1996–1999 ve 2000–2003 yıllarında önemli bir değişim olmamıştır ve bu yapının konumu kuzeyde jeotermal çökmenin temel bölgesinin genişlemesi olasılığı ve Taupo'nun kuzey-doğu eteklerinde bilinen buhar yüzey alanı ile ilişkili olma ihtimali iddia edilmiştir.

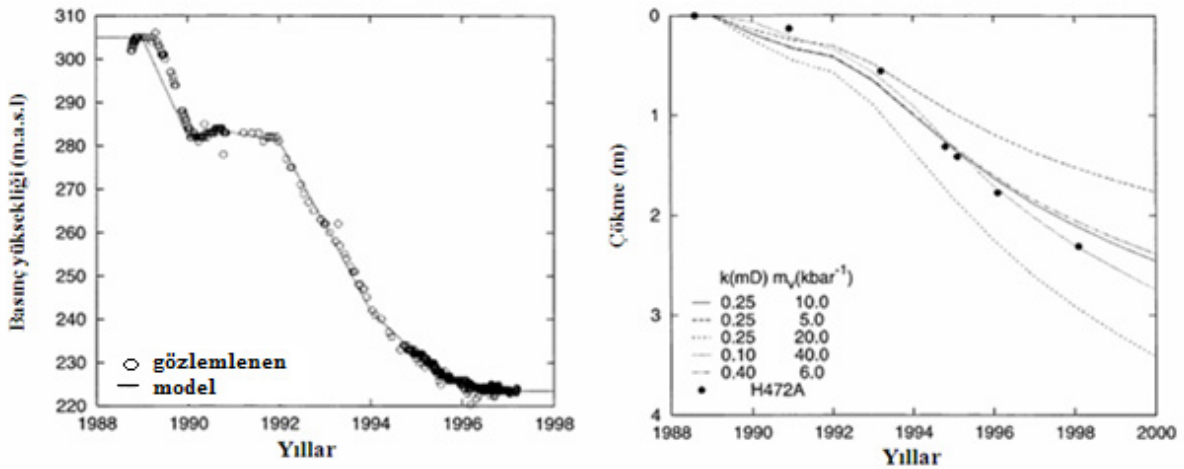
4.3. Ohaaki Jeotermal Alanı

Ohaaki jeotermal alanı Yeni Zelanda'nın Taupa volkanik alanı üzerinde bulunmaktadır ve 1960 yılında sondaj işlemleri ve testler yapılmaya başlanmıştır. 1988-1990 yılları arasında Jeotermal Elektrik Santralinin kurulumu tamamlanmıştır. Waikato Nehrinden bu alana su basımının gözlenen çökme çukurlarına yakın olduğu belirlenmiştir. Maksimum çökme oranı ise 500mm/yıl ölçülmüştür. Çökmenin sebebinin ayrıntılı bir biçimde araştırılması sonucunda bu sahada basınç düşümü (su seviyesi azalması) ile çökme arasındaki ilişki incelenmiştir. Wairakei-Tauhara jeotermal alanlarda meydana gelen çökmenin sebeplerinin aynısını söyleyebiliriz. Derinden alınan karot ölçümleri sonucunda %60 yüksek geçirimliliğe sahip sıkıştırılabilir çamurtaşının neden olduğu bilinmektedir [18].

Ohaaki jeotermal alanında çökmenin en çok gözlemlendiği BRM-12 üretim kuyusunun, riyolit yapının üzerinde bulunan çamurtaşının yüzeye daha yakın ve daha kalın olduğu bölgelerde meydana geldiği görülmüştür (Şekil 3). Bu alandaki akışkan üretimi sonucu, çamurtaşı tabakasının kalın olduğu yüzeylerde daha fazla çökme miktarı ölçülmüştür.

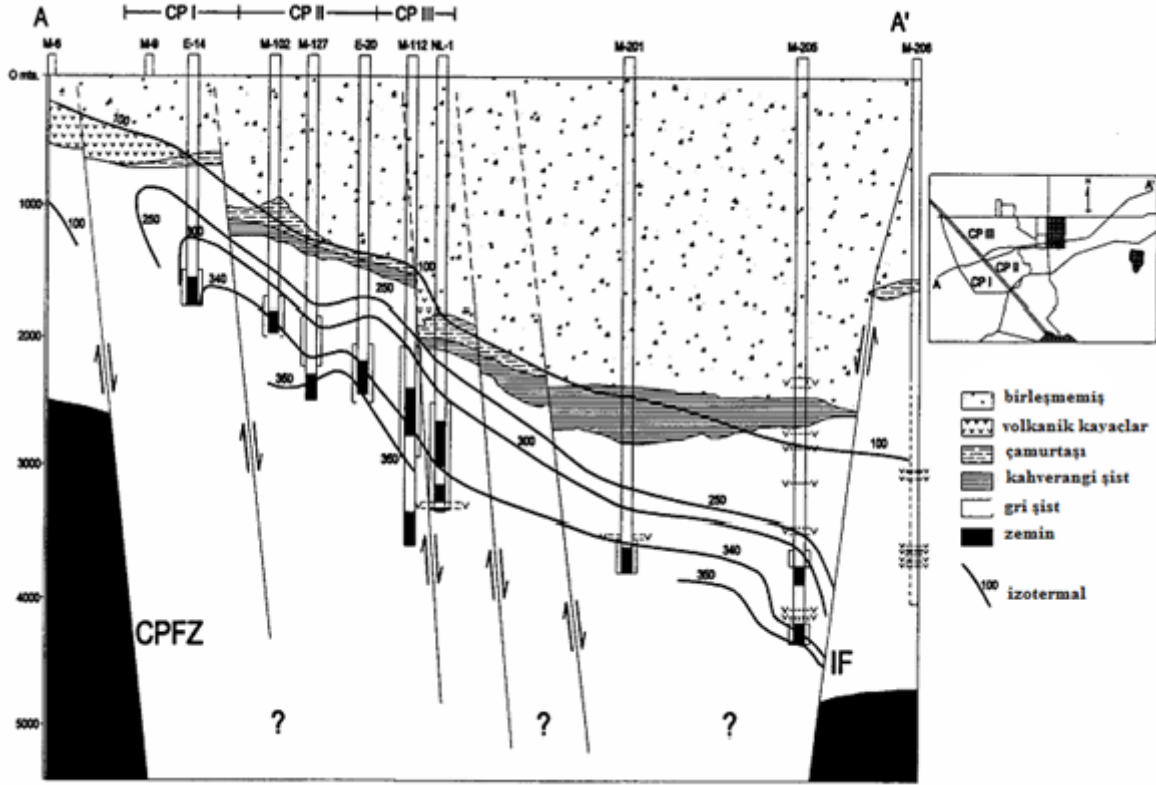


Şekil 3: Ohaaki Jeotermal Alanındaki Çökme Miktarı ve Jeolojik Yapısı [2]



Şekil 4: Ohaaki Riyolit Yapı İçindeki (a) su seviyesi, (b) çökme miktarı [19]

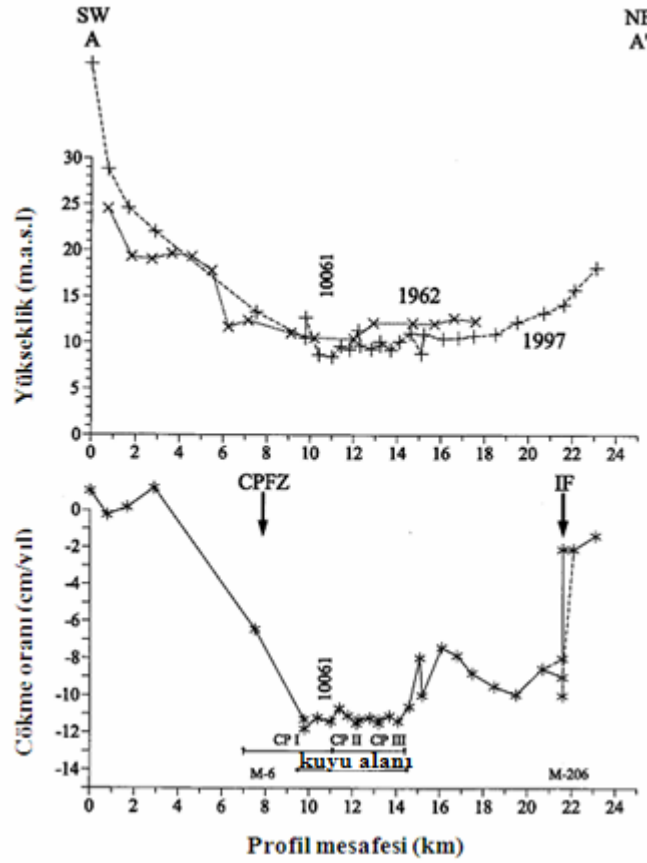
Enjeksiyon oranlarındaki değişim ile deprem kayıtları karşılaştırıldığında, kış mevsimi süresince akışkan çekiminin artışından 6-8 ay sonra meydana gelen depremsellik, geçen 8 yıldan fazla zamandır meydana gelen depremselliğin 5 katı olduğu gözlenmiştir [25]. Su rezervuarlarında akışkan çekiminden dolayı indüklenen depremsellik; basınç dağılımının, akışkan çekim oranlarının ve rezervuardaki su seviyesinin değişimi ile ilgili olduğu ortaya konulmuştur [26].



Şekil 6. Cerro Prieto Jeotermal Alanın Jeolojik Kesiti [25].

Gravite ölçümleri, akışkan çekimi ile meydana gelen çökme ve sıkışma, kimyasal değişimler, kütle çekiminin etkisi gibi belirli gravite değişimleri için Kaliforniya Devlet Üniversitesi tarafından 1978 yılında Cerro Prieto alanında gerçekleştirilmiştir [27]. 1979 yılına kadar önemli gravite değişimlerinin olmadığı raporlanmıştır ve bu olayın rezervuara suyun geri basımından kaynaklandığı düşünülmüştür. 1981-1983 yılları arasında çökme gravitenin arttığı alan üzerine yoğunlaşmıştır. Bu olay, çoğu akışkan çekiminden kaynaklı, soğuk suyun basımı sonucu rezervuarın soğuması, kütle dağılımı, kayaç büzüşmesi gibi çeşitli farklı mekanizmalarla açıklanabilmektedir [26].

1977–1997 yılları arasında alanın merkezindeki çökme oranı her büyük çekimden sonra artmıştır [1]. Maksimum çökme oranı (12cm/yıl) üretim kuyuları ile çakışmıştır ve çökme büyük oranda aktif tektonik aktiviteden kaynaklanmıştır. Alandaki çökmenin temelde akışkan çekimi sonucu olduğu iddia edilmektedir. Çökme, SAR Girişimölçer ile ölçülmüş ve jeotermal akışkan üretimi olarak yorumlanmıştır [28, 29].



Şekil 7. (a) Yeryüzü yüksekliği ve (b) Şekil %AA boyunca çökme oranı. Kesikli çizgi SLP sonuçlarını gösterir. CPFZ – Cerro Prieto fay bölgesi, IF- Imperial fay, CPI, CPII, CPIII- üretim bölgeleri. Negatif değerler aşağıya doğru olan hareketi belirtmektedir [25].

4.5. Geysers Jeotermal Alanı

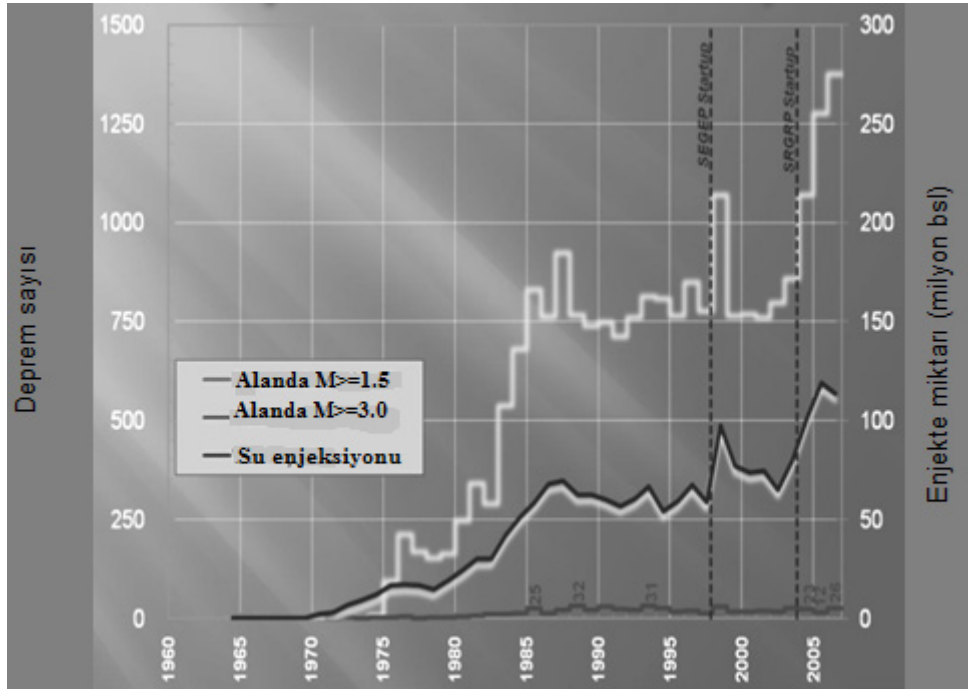
ABD-Kaliforniya'da ki San Andreas fay sisteminde bulunan ve 19 adet elektrik santraline sahip dünyanın en büyük jeotermal sahasıdır. Saha 1960 yılında 12 MWe kapasteli bir ünite ile üretime başlamış, 1987 yılında ise buhar üretimini 112 milyar kg ve elektrik üretimini 1500 MWe ile zirve değerine ulaştırmıştır. Ancak bundan sonra Geysers alanında hızlı bir üretim düşüşü gözlenmiştir. Bu noktada % 25 re-enjeksiyon oranı hesaplanmış ve bunun sonucunda üretimin sadece % 33'ünün elde edilebildiği görülmüştür. Rezervuar enerjisini akışkana veremediği için zamanla kendini ısıtmakta ve aşırı kızgın, kuru hale gelmiştir. Bu durumun çözümü için akışkan enjekte edilmesi ve tekrar üretimin artırılması sağlanması gerekiyordu. Problemin çözümü için kondense suyu ve mevsimsel akan derelerden yararlanılması gündeme gelmiş ve kondense suyunun kullanılması düşünülmüş ancak dere-göl-denizden su çekiminin yasak olması nedeni ile başka bir çözüm yolunun araştırılması zorunlu hale gelmiştir [30]

Aynı döneme denk gelen bir başka problemde Sonoma ve Lake County'nin işlenmiş derecedeki atık sularının değerlendirilmesi konusudur [30]. Yıllardır bu sorunun çözülmemesi üzerine bu iki problemin birleştirilerek uygun bir çözüme gidilmiştir. Sonuç olarak 1997 yılında Sonoma County'den 42 km uzunluğunda boru hattı döşenerek enjeksiyon işlemi yapılmıştır. Çalışmalar bu bölgelerde ilk defa kamu ve özel şirket dayanışmasını göstermiş ve diğer bölgelere de örnek olmuştur. 2003 yılında Santo Rosa'nın da boru hattı tamamlandığında Geysers sahasına yaklaşık 1,25 milyon kg akışkan enjekte edilmiştir. Çalışmalar ile birlikte halen sahada enjeksiyon %85 durumuna getirilmiştir [30]. Aralık 2008'in sonunda, Geysers'de üretim 2.394 milyar kg buhara ulaştı ve enjekte edilen miktar 954 milyar kg olmuştur. Bundan sonraki dönemde üretimin %100'ünden daha fazla re-enjeksiyon yapılsa

bile, toplam yerine konulan akışkan miktarının hiçbir zaman %100'e ulaşamayacağı tahmin edilmektedir [30].

Geysers jeotermal alanındaki mikro-depremlerin, soğuk su enjeksiyonu ile buhar çekiminden kaynaklandığı birçok çalışma sonucunda belirlenmiştir [3]. Geysers'de Amerikan Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS) Ulusal Lawrence Berkley Laboratuvarı (LBNL) ve Calpine'in tarafından işletilmekte olan üç dizi sismik gözlem istasyonu bulunmaktadır. İki tane güçlü hareket dedektörü Geysers sahasının güney ucuna yerleştirilmiş ve bu istasyonların verileri USGS'in internet sayfasından indirilebilir ve anlık görülebilir şekilde hazırlanmıştır. Birçok gaz ve petrol işletmesinde, yaratılan deprensellik, üretim ve önemli derecede basınç azalması ile ilgilidir. Ancak, Geysers sahasındaki deprenselliğin büyük bir kısmı rezervuara enjekte edilen akışkanın rezervuar kayacı hızla soğutmasından kaynaklanan gerilimle (stress) ilişkilidir. Geysers sahası birçok deprem meydana gelmekte ve yıllık şiddeti 1.5'den büyük binlerce mikro-deprem kaydedilmektedir. Mikro-depremlerin çok azı hissedilecek kadar büyüktür, en büyüğü 4.5 şiddetindedir [30].

Mikro depremlerin sayısı SEGEP ve SRGRP boru hatları ile enjeksiyon yapılmasıyla daha da artmıştır. Şiddeti ($M \geq 3$) olan depremlerin sayısı hemen hemen aynı kalmıştır [30]. Bu depremler aynı zamanda rezervuar hakkında en zengin bilgi kaynağını sağlamaktadır.



Şekil 8. Geysers Jeotermal Alanındaki Enjeksiyon – Deprensellik İlişkisi [22]

Geysers sahasında yapılan diğer bir araştırma da yüzeyde oluşan çökme konusudur [31]. Çökme ile rezervuar basıncının düşmesi arasında bir ilişkinin olabileceği çalışmaları gündeme gelmiş ve büyük miktarlardaki akışkanın yer değiştirmesi sonucu hacimsel sıkışmanın fazla olmasına sebep olduğu belirlenmiştir [2]. Rezervuar akışkanının çoğunu geçirimsiz kaya ortamı içinde sıvı fazda depolamaktadır. Buharın bulunduğu rezervuara bir anda soğuk su basılmış ve böylece ısınsının büyük miktarını faz değişimi ile absorbe etmiştir. Rezervuar, sıcaklığını kaybederken, soğuyan rezervuarı oluşturan sıkıştırılabilir volkanik kayalar büzölmüş ve hacimce küçölmüştür [2]. Yeraltındaki jeotermal akışkanın kullanıldığı alanlarda meydana gelen boşluklar sonucunda, 1977–1996 yılları arasında 0,192 m büyüklüğünde yüzey çökmesi meydana gelmiştir. Bu süre zarfında birçok aktif buhar çekiminin yapıldığı yerde meydana gelen çökme ile karşılaştırıldığında mevcut çökmenin daha büyük ölçekli olduğu dikkat çekmiştir. Sonuç olarak, su baskın alanlarda buhar baskın alanlara nazaran daha fazla yüzey çökmesinin meydana geldiği yargısına varılmıştır.

SONUÇ

Jeotermal enerjinin kullanıldığı birçok sahada çökme problemi görülmekte ve bu risk araştırılmaktadır. İncelenen Wairakei, Tauhara, Ohaaki, Cerro Prieto ve Geysers jeotermal alanlarında benzer nedenlerden dolayı çökme ve deprensellik problemleri gözlemlenmiş, çökmenin sadece üretim sırasında akışkan çekimi nedeni ile meydana gelen basınç düşümünden kaynaklanmadığını aynı zamanda akışkan enjektisi sırasında da artışının net bir şekilde gözlemlendiği belirtilmiştir.

Re-enjeksiyon çökmeden kaçınmanın garantisi olmamasına rağmen, rezervuar akışkan basıncını devam ettirmek için uygulanmalıdır. Günümüzde, hem bu riski minimize etmek hem de rezervuarın ömrünü uzatmak için jeotermal rezervuar çalışmaları içinde re-enjeksiyon oldukça yaygın gelişmelerden biri olmuştur.

Jeotermal sahanın kullanımı sırasında rezervuarı oluşturan jeolojik yapıların özelliklerinin bilinmesi, akışkan üretiminden kaynaklı yer altındaki tabakalarda meydana gelebilecek değişimlerin ayrıntılı bir biçimde araştırılması gerekmektedir. Araştırmalarımız sırasında, örnek çalışmalarda SAR Girişimölçer tekniği ile çökmenin uydudan elde edilen verilerle belirlenmesi ve hatta miktarının ölçülmesini mümkün kılmıştır.

Jeotermal alanda çökme ve depremler sonucunda,

- Yenilenebilir, sürdürülebilir ve temiz enerji olarak tanımladığımız enerjiler arasında olan jeotermal enerjinin bu problemlerden dolayı yararlı özelliklerini kaybetmesi,
- Jeotermal entegre sistemlerinin kullanıldığı alanlarda bu problemlerden dolayı sistemin ekipmanlarına zarar verebilmesi,
- Eğer bir jeotermal kullanım alanı üzerinde veya yakınlarında yerleşim birimi var ise bu alanda depremlerin görülmesi, bölge halkına huzursuzluklar yaşatabilmesi, daha da önemlisi evlerde oluşabilecek ufak/büyük çaptaki hasarlar,
- Jeotermal alandaki çökmeden dolayı çevresel kirlilik gibi olumsuzluklar gözlemlenebilir.

Ülkemizde jeotermal enerjinin farklı amaçlarla kullanıldığı sahalar çoğunlukla yerleşim biriminin içinde veya yakınlarında bulunmaktadır. Jeotermal sahalarımızda ciddi çökme ve deprensellik deneyimine sahip olmamasına rağmen, bu risk gözardı edilmemelidir. Özellikle Balçova-Narlıdere jeotermal alanı, binlerce konutun altında yer almakta, büyük bir hastane ve iki üniversite kampüsünü taşımaktadır. Özellikle çökme olayı sahada önemli sorunlara yol açabilecektir. Öncelikle bu alanla ilgili olarak, bir izleme çalışması hemen başlatılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] GLOWACKA E., GONZALEZ, J.J., Major Eartquakes in Mexicali Valley and its Relationship eith Tectonics, Sismicity and Fluid Operation in the Cerro Prieto geothermal Field, Pure Appl. Geophy. 156, 591–614, 1995.
- [2] LOFGREN, B.E., Monitoring crustal deformation in the Geyser-clear Lake region. In researcn in the Geysers-Clear Lake geothermal area, northern California. Geological Survey Professional paper 1141, United States Government printing Office),1981.
- [3] MAJER, E.L., PETERSON, J.E., The Impact of Enjection and Seismicity at The Geysers, California geothermal field, Internal Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44,10790-1090, 2007.
- [4] FOXALL. B., AND VASCO D., Inversion of Synthetic Aparture Radar Interferograms for Sources of Production-Related Subsidence at the Dixie Valley Geothermal Field, Submitted to Journal of Vlocanology and geothermal Research.
- [5] HOLE. J.K., HOOPER A., WADGE G., STEVENS N.F., Measuring Contemporary Deformation In The Taupo Volcanic Zone, New Zealand, Using Sar Interferometry
- [6] ALLIS. R.G., AND ZHAN. X., Predicting subsidence at Wairakei and Ohaaki geothermal fields,New Zealand, Geothermics 29, 479-494, 2000.

- [7] HOLE, J., STEVENS, N.F., BROMLEY, C., WADGE, G., Subsidence at the Wairakei-Tauhara geothermal field, New Zealand from 1996-2003 measured by ERS interferometry
- [8] BROMLEY, E.Y., CURRIE, S.A., Analysis of subsidence at Crown Road, Taupo; a consequence of declining groundwater. In 25th New Zealand Geothermal Workshop, (Taupo,NZ), 2003.
- [9] ALLIS, R.G., Changes in heat flow associated with exploitation of Wairakei geothermal field. New Zealand. New Zealand Journal Geology and Geophysics 24, 1-19, 1981.
- [10] GLOVER, R.B., HUNT, T.M., SEVERNE, C.M., Ohaaki pool. Proceeding 18th NZ Geothermal Workshop, 77-84, 1996.
- [11] ALLIS, R.G., BARKER, P.F., Update on Subsidence at Wairakei. Proceeding 12th New Zealand Geothermal Workshop, 365-370, 1982.
- [12] LAWLESS, J., OKADA, W., TERZAGHI, S., USSHER, G., WHITE, P.J., GILBERT, C., Two-dimensional subsidence modelling at Wairakei-Tauhara geothermal New Zealand. Geothermal Resources Council transactions 27, 761-764, 2003.
- [13] LAWLESS, J., OKADA, W., TERZAGHI, S., WHITE, P.J., New 2D subsidence modelling applied to Wairakei-Tauhara, In: Proceedings of the 23rd New Zealand, pp.105-111, 2001.
- [14] WHITE, P.A., Simple modelling of the effects of the effects of exploitation on hot springs, Geysers Valley, Wairakei, New Zealand. Geothermics 34, 184-204, 2005.
- [15] WILSON, C.J.N., HOUGHTON, B.F., MCWILLIAMS, M.O., LANPHERE, M.A., WEAVER, S.D., BRIGGS, R.M., 1995, Volcanic and structural evolution of Taupo Volcanic Zone, New Zealand: review. Journal of Volcanology and geothermal research, 68(1-3), 1-28)
- [16] BROMLEY, C.J., MANVILLE, V.R., VE ALLIS, R.G., Subsidence at Crown Road, Taupo, latest finding. In Programme and Abstract, Geological Society of New Zealand/New Zealand geophysical Society/ 26th New Zealand Geothermal Workshop combined conference "GEO3", (Taupo, NZ: Geological Society of NZ), Misc. Publ. 117A, 12-13, 2004.
- [17] BROMLEY, C.J., Groundwater changes in the Wairakei-Tauhara geothermal system, Geothermics 38, 134-144, 2009.
- [18] ALLIS, R.G., ZHAN, X., CAREY, B., Modelling of subsidence at Wairakei and Ohaaki fields. Proceedings 19th NZ Geothermal Workshop, 18-23, 1997b.
- [19] ALLIS, R.G., CAREY, B., DARBY, B., READ, S., ROSENBERG, M., WOOD, C.P., Subsidence at Ohaaki Field, New Zealand, Proceedings 19th Geothermal Workshop, 10-17, 1997a.
- [20] BENNET, R.A., RODI, W., REILINGER, R.E., Global Positioning System Constrains on Fault Slip Rates in Southern California and Northern Baja, Mexico, J. Geophys. Res. 101(B10), 21,493-21,960, 1996.
- [21] GLOWACKA, E., SARYCHIKHINA O., NAVA, F.A., Subsidence and Stress Changes in the Cerro Prieto Geothermal Field, B.C., Mexico, Pure Applied Geophysics, 162, 2095-2110, 2005.
- [22] MAJER, E.L., MCEVILLY, T.V., Seismology Studies at the Cerro Prieto Geothermal Field, 1978-1982, Proc. Fourth Symp. On the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, Comision Federal de Electricidad, 145-152, 1982.
- [23] GLOWACKA, E., NAVA, F.A., Major Earthquakes in Mexicali Valley, Mexico, and Fluid Extraction at Cerro Prieto Geothermal Field, Bull. Seismol. Soc. Am. 86 (1A), 93-105. 1996.
- [24] FABRIOL, H., MUNGUÍA, L., Seismic Activity at the Cerro Prieto Geothermal Area (Mexico) from August 1994 to December 1995, and Relationship with Tectonics and Fluid Exploitation, Geophys. Res. Lett. 24 (14), 1807-1810, 1997.
- [25] GLOWACKA, E., GONZALEZ, J., FABRIOL, H., Recent Vertical Deformation in Mexicali Valley its Relationship with Tectonics, Seismicity, and the Exploitation of the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico, Pure and Applied Geophysics, 156 (1999) 591-614., 1999
- [26] WYMAN, R.M., 1983, Potential Modeling of Gravity and Leveling Data over Cerro Prieto Geothermal Field, M.Sc. Thesis, Department of Geology, California State University, Long Beach, 79pp.)
- [27] GRANNELL, I.R.B., TARMAN, D.W., CLOVER, R.C., LEGGEWIE, R.M., ARONSTAM, P.S., KROLL, R.C., EPPINK, J., 1979, Precision Gravity Studies at Cerro Prieto – The Second Year. Proc. Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, 329-331)
- [28] CARNEC, C., FABRIOL, H., Monitoring and Modeling Land Subsidence at the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, Using SAR Interferometry, Geophys. Res. Lett. 26(9), 121-1214. ve Hassen, R.F., 2001, Radar Interferometry (Kluwer Academic Publisher, Netherlands 2001), 1999.



- [29] HASSEN, R., Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic Publishers Dordrecht, ISBN-10:0792369459, p328 ,2001.
- [30] KHAN M.A., Geysers jeotermal sahası, Re-enjeksiyon başarı hikayesi, Teskon Bildiri Kitabı, p269-276,2009.

ÖZGEÇMİŞ

Özde BADUR

1986 yılı Bornova doğumludur. 2007 yılında Celal Bayar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde lisans eğitimini tamamlamış ve Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeotermal Enerji Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2010-Mart ayından itibaren yüksek lisansına devam ettiği programda Araştırma Görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir.