



Sahaya Özgü Yer Hareketinin Tarihi Yığma Yapıların Doğrusal Olmayan Dinamik Davranışı ve Sismik Kırılabilirliği Üzerindeki Etkisi

The influence of Site Specific Ground Motion on the Nonlinear Dynamic Response and Seismic Vulnerability of Historical Masonry Structures

Özden Saygılı¹

¹Yeditepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26 Ağustos Yerleşimi, Kayışdağı Cad.
34755 Ataşehir, İstanbul, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 08/08/2023

Kabul / Accepted: 22/03/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 06/06/2023

Son Versiyon/Final Version: xx/xx/xxxx

Öz

Sismik olarak aktif bölgelerde yer alan ve çok sayıda tarihi yığma anıta sahip ülkelerde bu yapıların korunması büyük önem taşımaktadır. Bu yapıların korunması ve bakımı kültürel, ekonomik ve sosyal bir ihtiyaç olduğundan, tarihi yığma yapıların sismik performansının değerlendirilmesi ele alınması gereken çok önemli bir konudur. Bu tür yapıların yatay deprem yükleri altındaki davranışı, dolgu ve dolgunsuz duvarların etkileşimi nedeniyle karmaşıktır. İstanbul'daki tarihi ve aletsel depremlerin ardından, bu yapıların deprem yüklerine karşı savunmasızlığını gösteren çok sayıda ciddi hasar ve göçme meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmada, İstanbul'un Üsküdar semtinde bulunan Rumi Mehmed Paşa adlı tarihi bir kâgir yapının sismik performansı araştırılmıştır. 3DEC programı kullanılarak tarihi yığma türbenin üç boyutlu sayısal modeli Ayrık Elemanlar Yöntemi (AEY) ile oluşturulmuştur. Bu tarihi yapının sismik performansını değerlendirmek için 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne uygun 11 deprem yer hareketi seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Statik, modal ve birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem kayıtları altında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Bu çalışma, ayrıık eleman modellerinin yığma yapıların performans değerlendirilmesi için uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kuvvetli yer hareketleri altında, ayrıık eleman modelinin beklenen hasar seviyeleri ve göçme mekanizmaları hakkında bir fikir verdiği görülmektedir. Çalışma, yığma yapıların sismik davranışının yapısal tasarım özelliklerine çok bağlı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler

"Sismik kırılabilirlik, Kültürel miras, Olasılıksal sismik tehlike analizi, Ayrık elemanlar yöntemi"

Abstract

There are countries with a significant number of historic masonry monuments located in seismically active areas and the preservation of these structures is of great importance. Because the preservation and upkeep of these structures is a cultural, economic, and social need, seismic performance evaluation of historical masonry structures is a crucial issue to address. The behavior of such structures under lateral seismic loads is complicated because of the interaction of the grouted and ungrouted masonry. A wide number of severe damages and collapses have been observed after historical and instrumental earthquakes in Istanbul, highlighting the vulnerability of these structures to seismic loads. This research investigates the seismic performance of a historical masonry structure named Rumi Mehmed Pasha located in the city center of Istanbul (Turkey). A three-dimensional Discrete Element Model (DEM) of the historical tomb was created in 3DEC. Eleven earthquake ground motions compatible 2018 Turkish Building Seismic Code were selected and scaled to evaluate the seismic performance of the numerical model. Static, modal, and nonlinear dynamic analyses were performed. This study shows that discrete element models are very appropriate tools for the safety evaluation of masonry structures. Furthermore, under strong ground motions, the DEM model provides an insight into the levels of damage and the collapse patterns to be expected. The study shows that the seismic behavior of masonry structures is very dependent on their structural design features.

Key Words

1. Giriş

Rumi Mehmed Paşa Türbesi, İstanbul Boğazı'nın Anadolu kıyısında, Üsküdar semtinde bulunan Rumi Mehmed Paşa Cami Külliyesi'nin bir parçasıdır (Tchernega 2018)(Şekil 1). Türbenin kesin yapım tarihi bilinmemekle birlikte, yaklaşık inşa tarihi cami külliyesinin inşasıyla bağlantılıdır. Bazı kaynaklara göre türbe, Rumi Mehmed Paşa'nın ölümünden sonra yaptırılmıştır (Babinger 1992, Goodwin 2003, Kafescioğlu 2009). Sekizgen bir plana sahip olan türbenin duvarları kesme taş, moloz taş ve tuğla ile örülmüştür. Boşluklar harçla doldurulmuştur. Dış yüzey beyaz/açık gri renkli ince kesme taş ile kaplanmıştır. Duvarların iç yüzeyi moloz taş ve tuğladan yapılmıştır. Taşların kabaca kesilmiş olduğu, küçük yuvarlak parçalardan büyük dikdörtgen bloklara kadar çeşitli boyutlarda olduğu görülmektedir. Yaşanan depremlerden ve çevresel koşullardan kaynaklı yapının dış cephesinde bazı yapısal çatlaklar ve hasarlar bulunmaktadır.



Şekil 1. Rumi Mehmed Paşa Türbesi (Tchernega 2018).

Kuzey Anadolu Fay (KAF) zonunda özellikle son deprem serilerinin dikkate değer analizleri, KAF'ın Marmara Denizi bölümünün gerilme birikimine eğilimli olduğunu ortaya koymaktadır. Önümüzdeki 30 yıl içinde KAF boyunca büyük bir deprem olasılığının %50 olduğunu göstermektedir (Şengör vd. 2005). Jeolojik ve paleosismolojik veriler, son 103-105 yılda KAF üzerindeki kayma hızının 15-22 mm/yıl olduğunu göstermektedir (Hubert-Ferrari vd. 2000, Kozacı vd. 2009, Rockwell 2009). GPS çalışmaları, fay zonu boyunca kayma hızını 15–25 mm/yıl olarak göstermektedir (McClusky vd. 2000, Meade 2002). Son çalışmalarda, KAF bölgesi boyunca doğudan batıya 25 mm/yıl'dan 17 mm/yıl'a yavaşlayan bir eğilim olduğu görülmektedir (Reilinger vd. 1997, Tatar vd. 1995). Bu çalışma, beklenen Marmara depreminin etkilerini en aza indirmek amacı ile Tarihi Rumi Mehmed Paşa türbesinin yapısal performansını bölgenin sismik aktivite özelliklerini de dikkate alarak araştırmayı hedeflemektedir. Çalışmanın ilk aşamasında yer hareketinin belli bir yerde ve belli bir zaman periyodu içerisinde meydana gelme olasılığının belirlenmesi için olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmıştır. Olasılıksal tehlike analizinde depremlerin zamansal oluşumları için hafızalı veya hafızasız şeklinde iki farklı tahmin modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada deprem oluşumunun hafızasız olduğu bir tahmin modeli olarak, depremlerin zaman içindeki oluşumlarını birbirinden bağımsız kabul eden Poisson modeli kullanılmıştır. Bu modele göre bir depremin olma olasılığı, zaman aralığının uzunluğu ile doğru orantılıdır ve kısa bir zaman aralığında birden fazla olayın oluşma olasılığı ihmal edilebilir küçüklüktedir. Çalışmanın bu aşamasında seçilen inceleme bölgesinde etki yaratabilecek her bir kaynaktan oluşabilecek her büyüklük ve her uzaklıktaki depremin oluşturacağı her bir senaryo için yer hareketi seviyesi ve her bir parametre için yer hareketi seviyesindeki yıllık aşılma olasılıkları belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar kullanılarak yapının bulunduğu bölgenin yer hareketi düzeyi, deprem büyüklüğü, yerel zemin koşulları gibi özellikler dikkate alınarak hedef tasarım spektrumu ile uygun olacak yer hareketi kayıtları seçilmiştir. Ayrık elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan sayısal modelde zaman zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, kültür varlığının devamlılığına, aynı zamanda ekonomik olarak da tarihi yapıların korunmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Çalışma Bölgesinin Tektonik Yapısı

Anadolu Levhası, Arap ve Afrika Levhalarının Avrasya ile çarpışma bölgesinde ve Alp Himalaya sismik kuşağı üzerinde bulunmaktadır. Arap ve Afrika Levhalarının Avrasya ile çarpışması Anadolu levhasının batıya doğru hareketine yol açmakta ve batıda açılma doğuda sıkışma oluşturmaktadır. Marmara Bölgesi, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) tarafından meydana gelen doğrultu atımı ve Batı Anadolu'da kuzey güney yönlü açılma rejiminin etkisindedir. Türkiye'nin batısında bulunan Mudurnu'dan doğusunda yer alan Karlıova'ya kadar devam eden KAFZ, Mudurnu'da üç kola ayrılmakta ve Marmara Bölgesi'nden geçmektedir. Saros Körfezi'nin batısında başlayan açılma rejimi Ege Denizi'nin kuzeyinden Yunanistan'a kadar devam etmektedir (Barka 1992, Görür vd. 1997, Yaltırak ve Okay 2000, Anastasia ve Louvari 2001). Karmaşık bir tektonik yapıya sahip olan bu bölgede KAFZ, Marmara Denizi'nde kuzey ve güney olmak üzere iki koldan oluşmaktadır. Kuzey kolu KAFZ'nin etkisindedir ve bu kol üzerinde, 1100 m derinlik üzerinde, Çınarcık Havzası, Orta Marmara Havzası ve Tekirdağ Havzası bulunmaktadır (Le Pichon vd. 2001, Imren vd. 2001). Türkiye'nin kuzeybatısındaki açılma ve doğrultu atımlı rejimin bilinmesi Marmara Denizi'ndeki havza gelişiminin ve mekanizmasının anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu rejim ile ilgili çeşitli araştırmacılar farklı görüşler ortaya atmıştır. Seyitoğlu ve Scott (1991) tarafından Batı Anadolu'daki açılma rejimi erken Miyosen döneminde başladığı ve halen devam ettiği öne sürülürken, Koçyiğit vd. (1999) tarafından, Batı Anadolu'daki açılma rejimi erken Miyosen döneminden beri aktif olduğu, ancak erken Pliyosen dönemindeki sıkışma ile yarıda kesildiği ortaya konmuştur. KAFZ'nin yaşı ile ilgili ortak fikir ise, Geç – Orta Pliyosen dönem olduğudur. Kuzey Marmara havzası 70 km genişliğindeki iki doğrultu atımlı fay arasında yer almaktadır. Bu havza her ikisi de benzer büyüklükte (M 7.4) olan son depremler sırasında tamamen sağ yanal hareketle ve net yüzey yırtılması ile kırılmıştır. Bu depremlerden biri Marmara Denizi'nin batısında Çanakkale Boğazı'nı parçalayan 1912 Ganos depremi; ikincisi 1999 yılında Marmara Denizi'nin doğusunda kırılan İzmit depremidir. Daha küçük ölçekte, kuzey Marmara'daki eğik fay sistemi, Marmara'nın geri kalanından daha güçlü olan ve aktif çökmeye sahip üç derin havzayı sınırlayan daha küçük basamaklardan oluşmaktadır. Alternatif tektonik çalışmaların bir kısmı Marmara'daki genişlemenin, yerel çek-ayır gerilme ile değil, Ege'deki yaygın genişleme ile ilişkili olduğunu vurgulanmaktadır (Parke vd. 2002). Ancak yeni gözlemler bu tür görüşleri desteklememektedir. Bölgesel ölçekteki jeoloji, morfoloji ve GPS sonuçları, Marmara Denizi bölgesinin sonlu deformasyonunda önemli bir rol oynadığı için önemli Ege uzantısını hariç tutmaktadır. Başka bir çalışma grubu, Marmara boyunca uzanan tek bir fay üzerinde alternatif olarak saf doğrultu atımı önererek hâlihazırda aktif olan genişlemeyi reddetmektedir (Le Pichon vd. 2001). Bu fay için art arda karmaşıklığı artan farklı geometriler önerilmiştir (Le Pichon vd. 2001, Imren vd. 2001). Ayrıca doğrultu atımlı faylanmanın, KAF'nin Marmara Denizi'ndeki büyük bir tektonik yeniden yapılanma ile eş zamanlı olarak bölgeyi yakın zamanda (200 bin) geçeceği iddia edilmiştir. Dolayısıyla, bu bölgedeki KAF üzerindeki hareket, yalnızca küçük bir toplam kayma (4 km sağ yanal kayma) üretmiştir (Şengör vd. 2005). Le Pichon vd. (2001) tarafından önerilen saf doğrultu atımlı fayın yorumuna uygun olarak, rijit bir "Marmara bloğu" tanımlayan kinematik modeller çıkarılmıştır. Bu modeller, GPS vektörlerine iyi bir uyum üretirken, kinematik olarak o fayın iyi bilinen hareketiyle ve bölge için mevcut en iyi kısıtlı deprem mekanizmasıyla (1999 İzmit depremi; Mw 7.4) tutarsız olduğu görünmektedir. Çünkü genişlemeli Marmara basamağı içinde elde ettikleri saf doğrultu atımlı hareket, doğrultu atımlı İzmit fayı boyunca büyük bir sıkıştırma üretmektedir (5–6 mm/yıl'a kadar). Ancak tek başına GPS verileri kesin bir değerlendirme sonucu sağlamamaktadır. GPS vektörlerine iyi bir uyum sağlayan, ancak aynı zamanda Marmara bölgesindeki net kinematik kısıtlamaları da içeren modellerin çek-ayır uzatma ve kaymalı bölümlenme gerektirdiği gösterilmiştir (Flerit vd. 2004). 1912 Ganos ve 1999 İzmit depremleri, normal ve sağ yanal hareketi birleştiren, kuzey Marmara boyunca adım atan 160 km uzunluğundaki birbirine bağlı denizaltı fay segmentlerini kapsamaktadır. Daha önce, bu denizaltı uzantısının 20. yüzyılda yırtılmadığı ve bu nedenle kuzey Marmara bölgesindeki tektonik yüklemene muhtemelen eşit derecede yüksek olacağı varsayılmıştı (Hubert-Ferrari vd. 2000). Ancak 1912 ve 1999 depremlerinin her ikisinin de Marmara Denizi'ne uzandığı görülmektedir. İzmit depremi için, denizaltı batı ucu, jeodezisi, özellikle İzmit Körfezi'ni çevreleyen kara alanlarındaki uzak alan yüzey deformasyonunu belgeleyen SAR interferometrisi ile oldukça iyi bir şekilde çözülmüştür. Yırtılma, 2 m'den sıfıra doğru sivrilen kayma ile Hersek yarımadasının en fazla 30 km batısında Marmara Denizi'ne yayılmıştır. 1912 Ganos depremi için karadaki yırtılmanın doğrudan gözlemleri esas olarak Mihailovich tarafından rapor edilmiştir (Mihailovich 1927). Hasar dağılımını ve saha gözlemlerini kullanan daha sonraki revizyonlar yırtılmanın bilinmeyen ölçüde olsa da Marmara Denizi'ne doğru yayıldığını göstermektedir (Ambraseys and Finkel 1987). Nitekim büyük tarihi depremlerin (1509, 1719, Mayıs 1766, Ağustos 1766, 1894) kuzey Marmara Denizi'nin altında kısmen veya tamamen parçalandığı öne sürülmüştür. Ancak denizaltı kopma geometrileri ve konumlarına ilişkin somut kanıtlar eksiktir. Genel olarak 18. yüzyıl istifinin KAF'nin bu bölümünü tamamen kırdığı ve bu nedenle o zamandan beri tektonik yüklemenin biriktiği ve Kuzey Marmara havzasında önemli bir kırılma ile rahatlamadığı varsayılmaktadır (Le Pichon vd. 2001). Bu görüş, büyük tarihi depremlerin olası yerlerini yeniden değerlendiren ve orta ve batı Marmara'da çok daha uzun bir durgunluk olduğunu öne süren Ambraseys ve Jackson (2002) tarafından sorgulanmıştır.

17 Ağustos 1999 İzmit depremi, 1939 Erzincan depreminden bu yana Kuzey Anadolu fayı boyunca batıya göç eden depremlerin yedinci depremidir. 17 Ağustos 1999 İzmit depreminin kırılma bölgesi, her biri 1-4 km genişliğinde basamaklar bırakılarak ayrılan beş geometrik parçadan oluşmaktadır. Basamak alanları İzmit Körfezi'ndeki göller veya havzalar ile ifade edilmektedir. Çek-ayır alanlarda doğrultu atımlı segmentleri birbirine bağlayan normal faylar boyunca maksimum 235 cm düşey öteleme oluşmuştur. Bu ötelemenin, İzmit-Gölcük havzası ve Karamürsel havzasındaki açık denizlerde daha fazla olabileceği düşünülmektedir (Barka 1992). GPS çalışmaları Kuzey Anadolu fayının bu bölümündeki kayma hızının yaklaşık 23 mm/yıl olduğunu ve bu miktarın yaklaşık 20 mm/yılının kuzey kolu tarafından alındığını göstermektedir (McClusky vd. 2000). Kuzey kolun bu bölümünde bilinen son büyük artçı deprem 1719 depremidir. O zamandan beri bu segmentte 5-6 m'lik kayma birikmiş olabileceği düşünülmektedir. Yüzeyde ölçülen maksimum kayma, Gölcük'te 470 cm ve Arifiye yakınlarında 520 cm, 1719'dan bu yana biriken miktarla karşılaştırılabilir. 1719 depreminden sonra 1754, Mayıs 1766 ve Ağustos 1766 depremleri, Adapazarı'ndan Saros Körfezi'ne kadar olan kuzey kolunun segmentleri boyunca Marmara Denizi'ni bir sıra halinde geçerek tam bir kopmaya neden olmuştur.

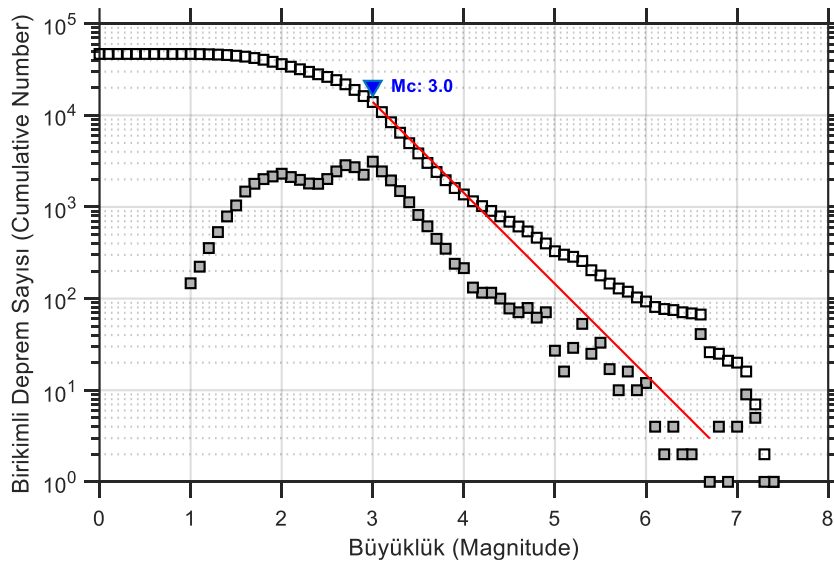
2. Çalışma Bölgesinin Depremselliği

Tarihsel (aletsel olmayan) depremlerin tanınması, çeşitli tarihi belge ve kaynaklardan ve saha gözlemlerinden elde edilmiştir. Ancak, belirlenen şiddet ve büyüklükler çok doğru değildir ve yalnızca bölgenin sismisitesinin bir açıklamasıdır. Bu bağlamda, tarihi depremlerin incelenmesi, bir fay boyunca meydana gelen depremlerin dönüş periyodu gibi önemli faktörlerin belirlenmesinde etkili olabilir. Tarihsel depremler konum, şiddet ve büyüklük açısından çok daha yüksek belirsizliğe sahip olsa da bölgedeki sismisite hakkında genel bir bakış elde etmek için faydalıdır. Bu depremlerden bazıları yüzeysel kırıklarla ilişkilendirilirken, bazılarında yüzeysel kırığı oluştuğuna dair bir kanıt bulunmamıştır. Tarihsel depremlerden en önemlileri ve Marmara Denizi ve çevresinin tektonik özelliklerini ortaya çıkaracak nitelikteki depremleri 1509, 1766, 1894 tarihlerinde oluşanlardır. Marmara Denizi'ndeki son depremler sırasıyla Mayıs 1766 ve 1894'te Orta Marmara Denizi ve Çınarcık havzasında meydana gelmiştir. Tarihsel dönem içerisinde, KAF zonundan 46 büyük depremin meydana geldiği tahmin edilmektedir ve bu depremlerin çoğu Marmara bölgesinde yoğunlaşmaktadır (Ambraseys and Jackson 2002). Bu veriler 967 ile 1050 yılları arasında Merkez KAF boyunca ve 1719 ile 1766 yılları arasında Batı KAF boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Aletsel depremler, bilgileri sismik cihazlarla elde edilen depremlerdir. Yirminci yüzyılın ilk on yıllarına ait aletsel verilerde depremin merkez üssü, büyüklüğü, derinliği ve zamanıyla ilgili çeşitli hatalar bulunmaktadır. Aletsel hataları bilimsel yöntemlerle düzeltilen depremlere düzeltilmiş depremler denir. Cihazların tamamlanması ve sismik istasyon sayısının artması ile özellikle büyük depremlerde bu hatalar azalmıştır.

KAFZ'nun kuzey kolunda meydana gelen depremlerin ağırlıklı olarak doğrusal dağılım gösterirken, güney ve orta kolu üzerinde meydana gelen depremlerin daha dağınık olduğu görülmektedir. Bu kollar üzerinde 1953, 1964, 1969, 1983 yıllarında büyük depremler yaşanmıştır. KAFZ üzerinde büyüklüğü 7'den fazla olan depremlerin doğudan batıya doğru göç ettiği yaklaşımları ortaya konulmaktadır (Hubert-Ferrari vd. 2000). Bu depremlerin ilki, 26 Aralık 1939'da Erzincan'da meydana gelmiştir ($M=7.9$). Bununla beraber sırasıyla 1912 yılında Mürefte ($M=7.3$), 20 Aralık 1942 Erbaa – Nixsar ($M=7$), 26 Kasım 1943 Tosya-Ladik ($M=7.2$), 1 Şubat 1944 Bolu-Gerede ($M=7.2$), 26 Mayıs 1957 Bolu-Abant ($M=7.1$), 22 Temmuz 1967 ($M=7.2$) olarak sıralanmışlardır. Gölcük Depremi, 17 Ağustos 1999 $M_w=7.4$ büyüklüğünde meydana gelmiştir. Depremin odak merkezi İzmit Gölcük'tür. Yüzeysel dalgası büyüklüğü $M_s=7.8$ 'dir. Meydana gelen depremin odak derinliği ise 17 km'dir. Deprem 125 km uzunluğunda sağ yanal atımlı bir yüzeysel kırığı meydana getirmiştir. 1999 İzmit depreminin modellenmesi, bu depremin, kuzey kolun batı devamı olan Yalova segmenti ve Marmara Denizi'ndeki diğer segmentler üzerindeki deprem tehlikesini artırdığını göstermektedir (Hubert-Ferrari vd. 2000). Yaklaşık 3 ay sonra 12 Kasım 1999'da $M 7.2$ Düzce depremi olarak kırılan Düzce-Hendek fayının doğu kesiminde Düzce-Bolu segmenti üzerindeki stresi de artırmıştır. 17 Ağustos 1999 İzmit depremi çalışması, GPS kayma oranı, tarihi deprem kayıtları ve Coulomb modellenmesi, Marmara Denizi'nde önemli bir deprem tehlikesi olduğunu göstermektedir (Hubert-Ferrari vd. 2000).

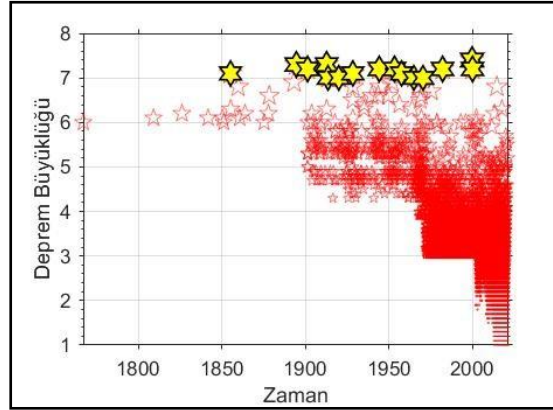
3. Sismik Tehlike Analizi

Bu çalışma MÖ 342-1894 yılları arasında 38° - 45° K enlemleri ile 25° - 33° D boylamlarının sınırladığı Marmara Bölgesinde meydana gelmiş tarihi depremleri ve 1900-2021 yılları arasında meydana gelmiş aletsel depremlerle ilgili bilgileri içermektedir. Deprem kataloğunun oluşturulmasında ulusal, uluslararası ve çalışma alanındaki diğer mevcut kaynaklar kullanılmıştır (Boğaziçi Üniversitesi 2021, Tan vd. 2008, Tan 2021). Tarihi depremlerin şiddet değerlerinin büyüklük değerlerine dönüştürülmesinde Aleksandrova vd. (2019) yaklaşımı kullanılmıştır. Oluşturulan deprem kataloğundaki depremlerin büyüklüklerinin homojenleştirilmesi Kadıroğlu vd. (2016) çalışmasına göre yapılmıştır. Sismik parametrelerin doğru şekilde belirlenmesinin bir aşaması olan deprem kataloğunun tamamlılık analizi, kümesizleştirilmiş katalog ve bölgenin tektonik yapısı dikkate alınarak yapılmaktadır (Şekil 2).

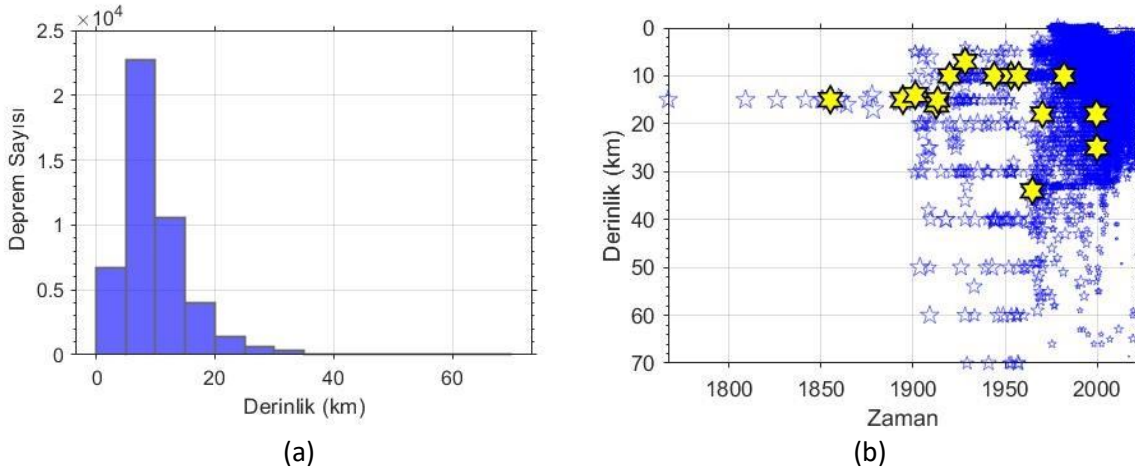


Şekil 2. Deprem Kataloğunun Tamamlılık Analizi.

Sismik bölgelerde meydana gelen her deprem birbirlerini belirli ölçüde tetikleme olasılığına sahiptir ve bu durum depremlerin zamanda ve uzayda kümelenmelerine neden olmaktadır. Bu çalışmada olasılıksal sismik tehlike analizi için Poisson modeli tercih edilmiştir. Bu modele göre sismik kaynakların zamandan bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Kabule göre katalogta yer alan ana depremlerin öncü ve artçı depremlerden ayrıştırılması yani deprem kayıtlarının kümesizleştirilmesi (declustering) gerekmektedir. Kümesizleştirme işlemi için Gardner ve Knopoff (1974) yöntemi kullanılmıştır. Kümesizleştirme (declustering) işlemi uygulanmış deprem katalogu Şekil 3' te verilmiştir. Depremlerin odak derinliğinin belirlenmesinde büyük depremler için odak merkez derinlikleri veya yerel sismik ağların verilerinden elde edilen küçük depremlerin verileri kullanılmaktadır. Bölgedeki bütün depremlerin Deprem büyüklüğünün zamana göre dağılımı ve derinliğe göre dağılımı sırasıyla Şekil 4' te verilmiştir.



Şekil 3. Deprem Büyüklüğünün Dağılımı.



Şekil 4. Bölgedeki Depremlerin (a) Derinliğe ve (b) Zamana Göre Dağılımı.

Bu çalışmada 38-45°K ve 25-33°D koordinatları ile sınırlanan Marmara Bölgesinin depremselliğini araştırmak için magnitüd-frekans ilişkisi belirlenmiş ve tekrarlanma periyodu hesaplanmıştır. Magnitüd-frekans bağıntıları deprem istatistiğinin temelini oluşturmaktadır. Magnitüdün fonksiyonu olarak depremlerin oluş frekansının logaritmiği incelendiğinde, genellikle doğrusal bir ilişki izlediği görülmekte ve bu ilişki

$$\text{Log}N(M) = a - bM \quad (1)$$

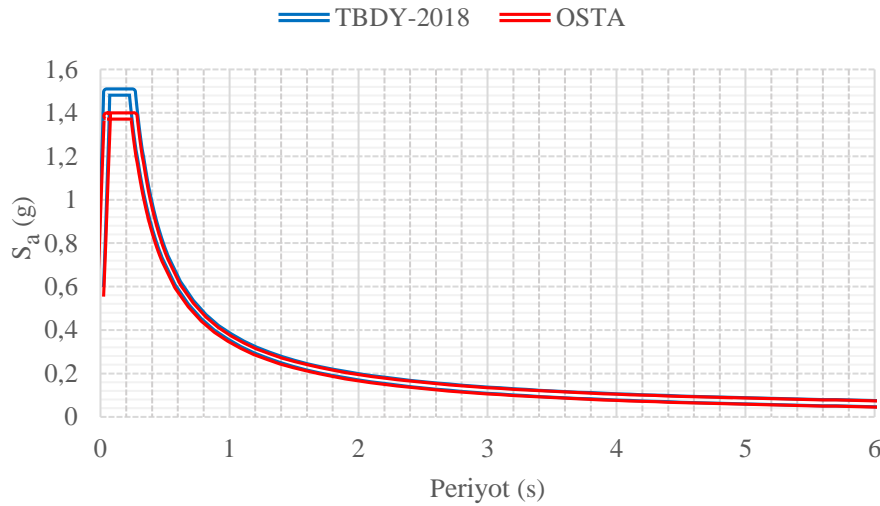
şeklinde ifade edilmektedir. Burada N, birikimli (kümülatif) deprem sayısını, M ise magnitüdü göstermektedir. Olasılıksal sismik tehlike analizinin önemli bir bölümünü bölgenin deprem aktivitesini belirleyen sismik kaynakların belirlenmesi oluşturmaktadır. İnceleme alanında çok sayıda orta ve büyük büyüklükteki depremler en belirgin sismik özelliklerdir. Bu bölgedeki depremlerin odak derinliği düşüktür ve yer kabuğunun üst kısmı ile sınırlıdır. Çalışma alanındaki en büyük deprem, çalışma alanının doğusunda aynı adı taşıyan fay hareketiyle bağlantılı olarak 1999 İzmit 7.4 büyüklüğündeki depremdir. Çalışma alanının batısındaki Ganos Fayının hareketi ile bağlantılı olarak 1912 yılında 7.4 büyüklüğünde benzer bir deprem meydana gelmiştir. Çalışma bölgesindeki fayların modellenmesinde maksimum büyüklük tahmin edilirken fayın gerçekleştirdiği maksimum büyüklükteki depremler ve Öztürk (2014) ve Wells ve Coppersmith (1994) ilişkilerinin verdiği en büyük deprem dikkate alınmıştır. Bu çalışmada tehlike analizleri OpenQuake

yazılımı ile yapılmıştır. Bu program, Evrensel Deprem Modeli Vakfı'nın (GEM) iş birliği içinde deprem tehlikesi ve risk modellemesi için geliştirilmiş açık kaynaklı bir yazılımdır. Türkiye kuvvetli yer hareketi verilerinin Batı ABD verileriyle bir karşılaştırması Erdik vd. (1985) de verilmektedir. Bu çalışmada Türkiye'de kaydedilen en büyük ivme (PGA) değerlerinin Batı ABD verilerinin gözlemlenen dağılımı içinde güvenli bir şekilde yer aldığı gösterilmiştir. Tepki spektrumlarının karşılaştırması Türkiye'nin çeşitli yerlerindeki yer hareketinin ampirik tepki spektrumlarının mühendislik toleransları dahilinde, Batı ABD tabanlı azalım ilişkileri tarafından tahmin edilebileceği belirtilmiştir. Bu olumlu tahmin karşılaştırmalarına dayanarak ve Anadolu'nun Kaliforniya'ya (Kuzey ve Doğu Anadolu Faylarına benzer doğrultu atımlı faylar) ve Nevada'ya (Havza ve Menzil bölgesi Ege Bölgesi'ne benzer) jeolojik ve jeotektonik benzerliği bulunmaktadır.

Mantık ağacı yönteminde azalım ilişkisine, sismik parametrelerinin değerlerine, sismik kaynakların mevcut konumuna ve deprem veri tabındaki her varsayıma, o varsayımın diğerlerine göre doğru olma olasılığını ifade eden öznel olasılık değerleri verilmektedir. Varsayım grupları için hesaplanan birleşik olasılıkların toplamının bire eşit olması ve en iyi tahminlerden oluşan varsayım grubunun birleşik olasılık değerinin de diğerlerinden daha büyük olması gerekmektedir. Her bir varsayım için sismik tehlike analizi yapılarak bulunan aşılma olasılığı, o varsayım grubu için hesaplanan birleşik olasılık değeri ile çarpılmaktadır. Bu çalışma kapsamında verilen deprem büyüklüğü ve uzaklık çiftleri için yer hareketi tahminlerindeki epistemik belirsizlikler, tehlike modelinin yer hareketi tahmin denklemleri (GMPE) seviyesinde bir mantık ağacı aracılığıyla ele alınmıştır. Böylece birleşik olasılık değerleri ile çarpılan aşılma olasılıklarının toplamı ile sismik tehlike değeri elde edilmiştir. Olasılıksal tehlike analizi için bir yer hareketi parametresi olan IM'nin belirli bir x değerini aşma olasılığı toplam olasılık teoremi kullanılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$\lambda(IM > x) = \lambda(IM > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x|m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (2)$$

Bu denklemde $f_M(m)$ ve $f_R(r)$ sırasıyla deprem büyüklüğü ve uzaklığın olasılık yoğunluk fonksiyonlarını ifade etmektedir. Denklemde yer alan, belirli bir yer hareketi parametresi IM'nin, belirli bir uzaklık ve deprem büyüklüğü için belirli bir x değerini aşma olasılığını temsil eden $P[IM > x|m, r]$ ifadesi ise azalım ilişkilerinden elde edilmektedir. Yer hareketi tahmin denklemlerine, mantık ağacı yöntemi ile eşit ağırlıklar uygulanmış ve tekerrür periyotları $T=2475$ yılı temsil eden %5 sönüm oranına sahip elastik ivme spektrumları elde edilmiştir. Zemin $Vs30$ 'a bağımlı tekerrür periyotları için elde edilen sahaya özel deprem spektrumları ile TBDY2018 Deprem Tehlike Haritası spektrumlarının karşılaştırılması Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Zemin $Vs30$ 'a Bağımlı 2475 Yıllık Ortalama Yinelenme Süresi için %5 Sönümlü Eş-Tehlike Spektrumu ile TBDY2018 Deprem Tehlike Haritası Spektrumunun Kıyaslanması.

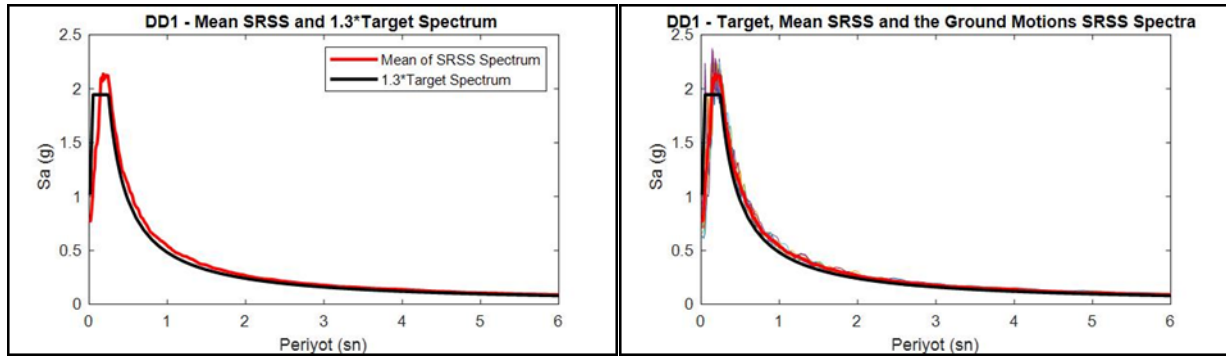
4. Yer Hareketi Seçimi

TBDY 2018'e göre bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında bir veya iki boyutlu ve üç boyutlu deprem hesabında gerekli deprem yer hareketlerinin tanımlanması için kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi ve basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesi veya spektral uyum sağlanacak şekilde dönüştürülmesi gerekmektedir. Ayrıca seçilecek deprem kaydı takımlarının sayısı en az 11 olmalıdır ve aynı depremden seçilecek kayıt veya kayıt takımı sayısı üçü geçmemelidir (TBDY 2018). Bu kurallara uygun olarak, bölgede daha önce meydana gelmiş olan ve sismik tehlike analizinde kullanılan on bir adet yer hareketi seçilmiştir. Tüm kayıtlara ait spektrumların ortalamasının $0,2T_p$ ve $1,5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot

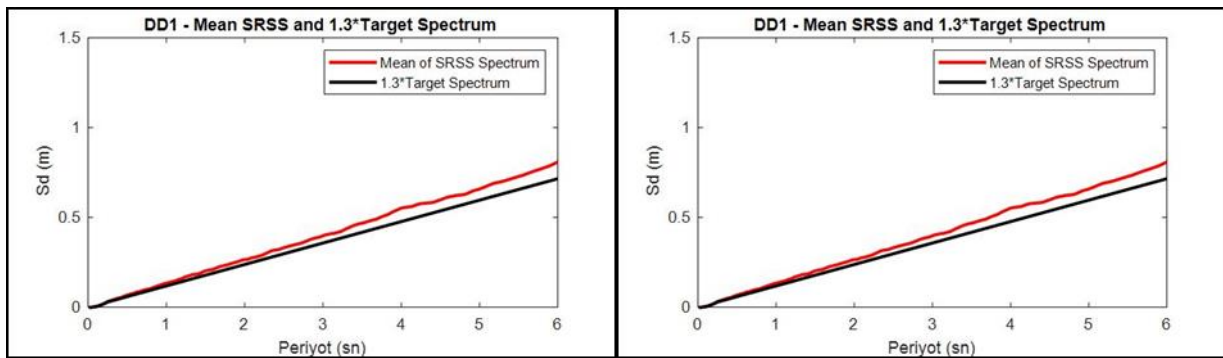
aralığındaki genliklerinden daha küçük olmaması kuralına göre, deprem yer hareketlerinin genlikleri ölçeklendirilmiştir. İki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilmiştir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının $0,2T_p$ ve $1,5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilmiştir. $T=2475$ yıl dönüşüm periyotları için seçilen ve ölçeklendirilen depremlere ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir. 2475 yıllık ortalama yinelenme süresi için %5 sönümlü eş-tehlike spektrumu ile uyumlu 11 adet 2 yönlü deprem yer hareketlerinin spektral ivme (S_a) ve spektral yer değiştirme (S_d) bileşkelerinin ortalamalarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 1. $T=2475$ yıl dönüşüm periyodu için seçilen ve ölçeklendirilen depremlere ait özellikler

No	Deprem	Yıl	Mw	Rrup (km)	Vs30 (m/s)
1	Tabas_ Iran	1978	7.35	2	767
2	Loma Prieta	1989	6.93	9	730
3	Loma Prieta	1989	6.93	18	714
4	Tottori_ Japan	2000	6.61	16	967
5	Northridge-01	1994	6.69	19	706
6	Northridge-01	1994	6.69	16	715
7	Kocaeli_ Turkey	1999	7.51	7	811
8	Chi-Chi_ Taiwan	1999	7.62	26	704
9	Manjil_ Iran	1990	7.37	12	723
10	Hector Mine	1999	7.13	11	726
11	L'Aquila_ Italy	2009	6.3	5	717



Şekil 6. 2475 Yıllık Ortalama Yinelenme Süresi için %5 Sönümlü Eş-Tehlike Spektrumu ile Uyumlu 11 Adet 2 Yönlü Deprem Yer Hareketlerinin Spektral İvme Bileşkelerinin Ortalamalarının Karşılaştırılması.



Şekil 7. 2475 Yıllık Ortalama Yinelenme Süresi için %5 Sönümlü Eş-Tehlike Spektrumu ile Uyumlu 11 Adet 2 Yönlü Deprem Yer Hareketlerinin Spektral Yer Değiştirme (S_d) Bileşkelerinin Ortalamalarının Karşılaştırılması.

5. Rumi Mehmet Paşa Türbesinin Dinamik Davranışı

Yığma yapı türü en eski yapım tekniklerinden biridir. Genel olarak tuğla ve harçtan oluşan kompozit ve heterojen bir yapıya sahipken, kesme taş gibi herhangi bir bağlayıcı malzeme içermeyen yığma yapı türleri de bulunmaktadır. Harç, yığma yapıların çekme ve kesme kuvvetlerine, düzlem dışı veya düzlem içi yüklere karşı mukavemetini belirlemektedir. Yığma yapılarda yapısal elemanların mekanik özelliklerindeki farklılıklar, dış yükler veya zemin oturmaları, sıcaklık değişimleri, büzülme veya geri dönüşü olmayan genleşme veya nem değişiklikleri gibi deformasyonlardan çatlaklar meydana gelebilmektedir. Literatürde sunulan yığma yapılar için nümerik hesap modelleri, temel olarak makro ve mikro modelleme olarak kategorize edilebilen sürekli ve süreksiz sonlu elemanlar analizine dayanmaktadır. Makro modellemede, duvarın mekanik özellikleri, plastisite veya hasar ile ilişkilendirilebilen homojen bir ortam olarak oluşturulmaktadır. Mikro modellemede ise, duvar elemanları (harç ve tuğla) ve tuğla-harç ara yüzü, farklı malzeme özellikleri ve davranış yöntemleri ile temsil edilebilmektedir. Bu yaklaşımda, doğru sayısal tahminler sağlanmasına rağmen, birçok girdi parametresi ve büyük ölçekli modellerde analiz süresi gibi yöntemin uygulanabilirliğini olumsuz yönde etkileyen faktörler bulunmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için yığma birimleri temsil eden sürekli bloklar ve tuğla-harç ara yüz elemanları oluşturulmaktadır. Ayrık elemanlar yaklaşımı olarak tanımlanan bu yöntemin en büyük avantajları yığma bloklar ile harç arasında meydana gelen çatlakların tahmin edilmesini sağlaması ve bloklar arasında meydana gelen dönmeleri ve deformasyonları ölçebilmesidir.

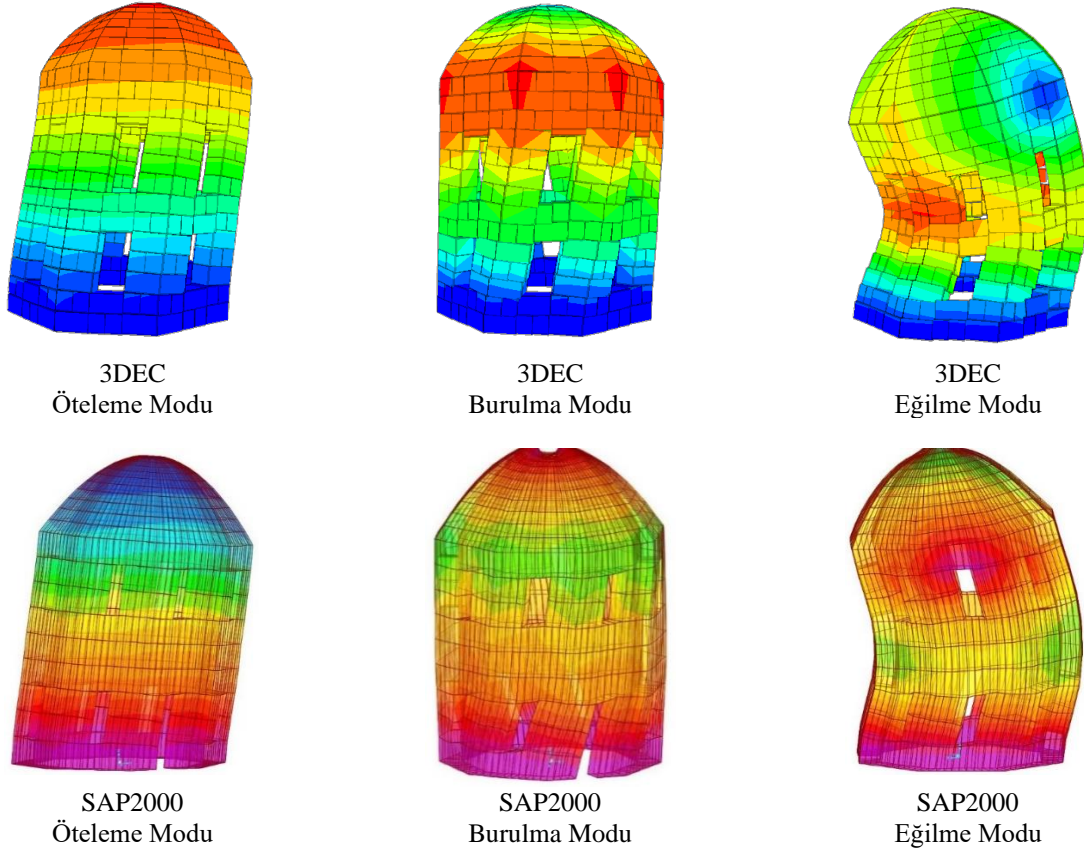
Rumi Mehmed Paşa Türbesinin kubbesi 25x25x18 cm boyutlarında tuğladan yapılmıştır. Çatı bölümü, her iki tarafta yarım parabolik bir eğri ile kesişen aşağı bakan yarım daireden oluşmaktadır. Dış yüzey çamur ve kurşun levhalarla kaplıdır. Kurşun levhaların şeritleri çevresel olarak yerleştirilmiş ve birleşme yerlerinde katlanmıştır. Çatı, bronz bir hilalin yerleştirilmesi gereken zirvede yarı küresel detayla taçlandırılmıştır. Yerden zirveye maksimum seviye +9.62 metredir. Ana gövde sağlam kaya temeller üzerine oturmaktadır. Giriş cephesinde olduğu gibi, sekizgen türbenin her cephesinde duvarın orta eksenine göre konumlanmış birer alt ve bir üst pencere bulunmaktadır. Tüm kotlarda dış duvarlarda görünür yapısal çatlaklar mevcuttur. Çatlaklar, tamburdan başlayarak zemin seviyesine kadar açıklıktan geçen duvarların orta ekseninde de görülmektedir. Bu çalışmada üç boyutlu nümerik model, yığma duvar modellerinde yaygın olarak kullanılan ve ayrık elemanlar yöntemi programı olan 3DEC ile oluşturulmuştur (Saygılı 2019, Saygılı ve Lemos 2019, 2020, 2021, Erdoğan vd. 2020). 3DEC programı, süreksizliklerin bloklar arasındaki ara yüzler olarak ele alındığı, ayrı blokların bir topluluğu olarak süreksiz ortamı temsil etmektedir (Itasca 2016). Bu program blokların büyük yer değiştirmelerine ve dönüşlerine izin vermekte, böylece yapısal göçme mekanizmasının simüle edebilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, deformasyon ve göçme modlarının süreksizlikler boyunca kayma veya ayrılma tarafından oluşmasına izin veren rijit bloklar kullanılmıştır. Nümerik modelde, bloklar rijit olduğundan, yapının global deforme olabilirliğini temsil eden blokların ara yüzünde normal ve kesme rijitliği parametreleri tanımlanmıştır. Elastisite modülü (E) ve kayma modülü (G), normal (k_N) ve kesme (k_S) rijitliği değerlerini hesaplamak için kullanılmıştır. Duvarların ve kubbenin Elastisite modülü (E) benzer tarihlere bölgede yapılmış yığma yapılardaki malzeme özelliklerini ve türbede bulunan mevcut yapısal hasarları dikkate alarak sırasıyla 3.5 GPa, ve 0.5 GPa olarak belirlenmiştir. 3DEC yazılımında tekrarlanan hesaplamalar, ara yüzlerde Newton'un ikinci yasası ve düğüm noktalarında kuvvet-yer değiştirme yasası kullanılarak yapılmaktadır. Düğüm noktalarına etki eden toplam normal ve kesme kuvvetleri, hem ara yüz kuvvetleri, hem de bloğa etki eden gövde kuvvetleri dikkate alınarak her bir zaman adımında hesaplanmaktadır. Her bir düğüm noktasında oluşan kuvvetler belirlendikten sonra Newton'un ikinci hareket yasası uygulanmaktadır. Birbirini takip eden iki zaman adımı arasında, her bir elemanın ivmesi, hızı ve yer değiştirmesi hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımda, blokların hareket denklemlerini entegre etmek için kullanılan rijit bir bloğun kütle merkezi için üç öteleme hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$m\ddot{u}_i + \alpha \dot{m}\dot{u}_i = f_i \quad (3)$$

burada \ddot{u}_i , blok merkezinin yer değiştirme vektörü; m , blok kütlesi; ve α , sistemdeki enerji kayıplarını sürtünme yayılımının ötesinde yeniden üreten kütle orantılı viskoz sönümlenme parametresidir. Elastik kuvvetler, kendi ağırlığı da dâhil olmak üzere uygulanan kuvvetlerin ve ilgili blok yer değiştirmelerinin bir fonksiyonu olan temas kuvvetlerinin toplamı olan kuvvet vektörü f_i 'ye dâhil edilmektedir. Euler denklemleri, bloğun ana eylemsizlik eksenlerinde temsil edilen üç serbestlik derecesini kontrol etmektedir:

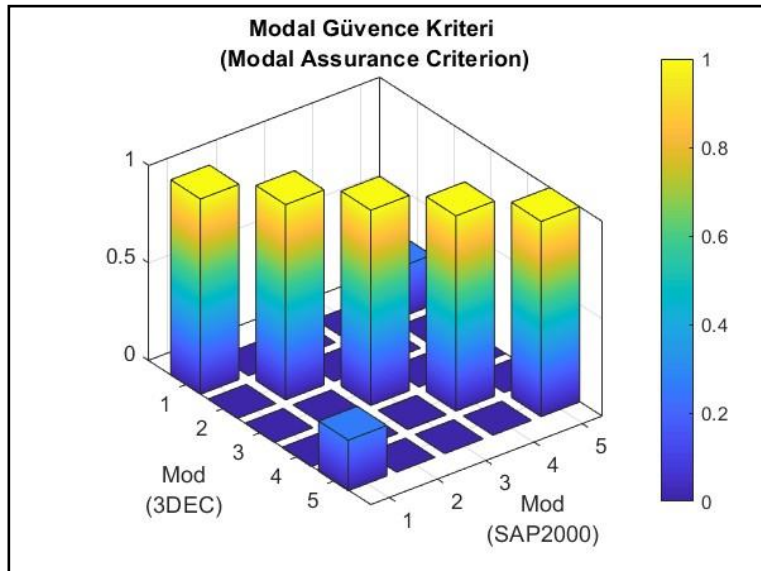
$$\begin{aligned} I_1\dot{\omega}_1 + \alpha I_1\omega_1 + (I_3 - I_2)\omega_3\omega_2 &= m_1 \\ I_2\dot{\omega}_2 + \alpha I_2\omega_2 + (I_1 - I_3)\omega_1\omega_3 &= m_2 \\ I_3\dot{\omega}_3 + \alpha I_3\omega_3 + (I_2 - I_1)\omega_2\omega_1 &= m_3 \end{aligned} \quad (4)$$

burada ω_i dönme hızı vektörü; I_i , atalet momenti; m_i , momentlerin toplamıdır. Çalışmanın bu aşamasında ayrık elemanlar modeline ek olarak türbenin makro modelleme stratejisi kullanılarak sonlu elemanlar modeli de SAP2000 programı ile oluşturulmuştur. SAP2000 ve 3DEC modellerinde yapı zemin bağlantısı tam rijit kabul edilmiştir. İlk olarak, hem süreklilik hem de süreksizlik yaklaşımları kullanılarak oluşturulan sayısal modellerin doğal frekansları ve titreşim modlarını hesaplamak için öz değer (eigenvalue) hesaplamaları yapılmıştır. Yapının öteleme, burulma ve eğilme modu Şekil 8 'de verilmiştir.



Şekil 8. Öteleme, Eğilme ve Burulma Modlarının Karşılaştırılması.

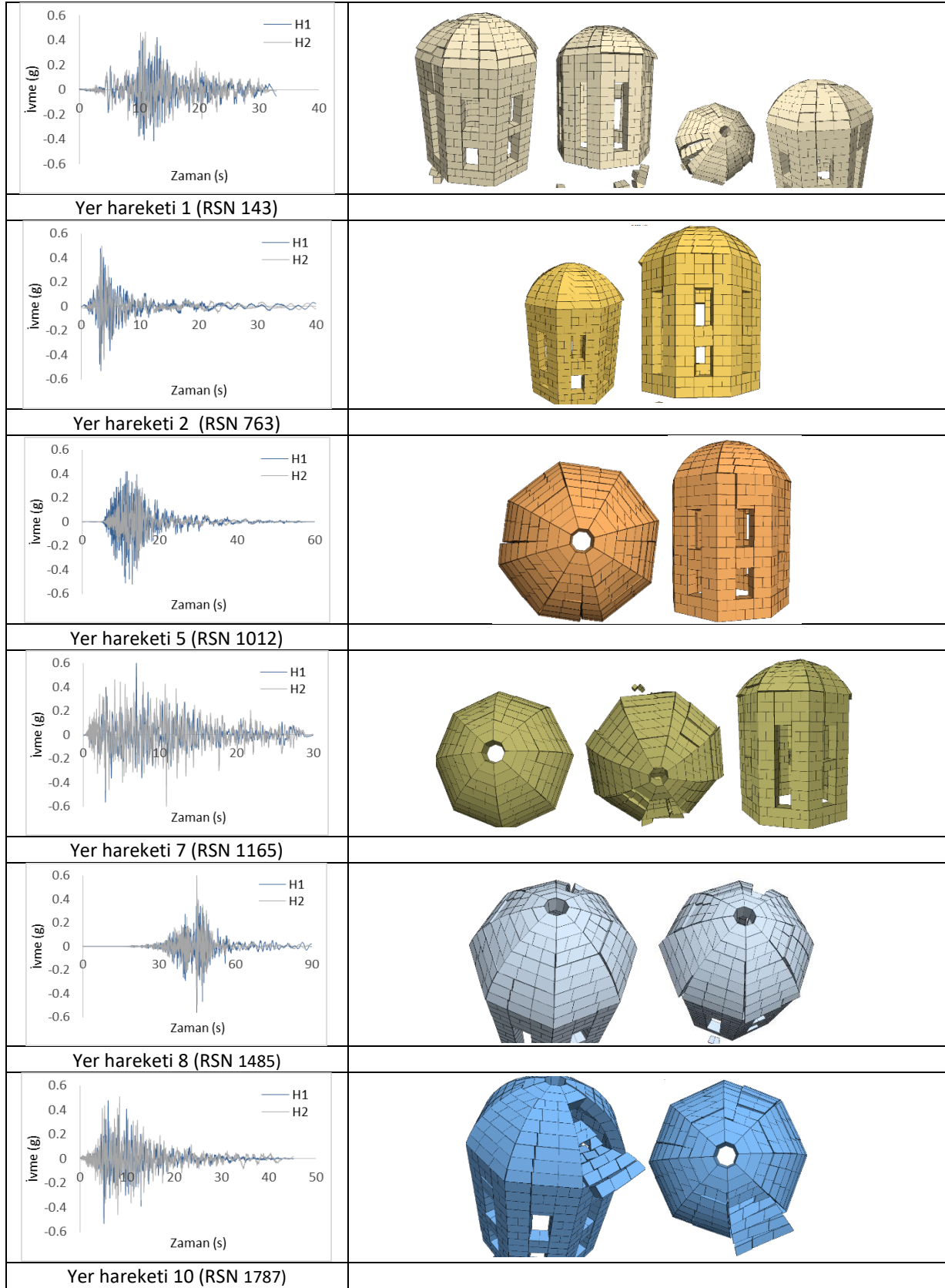
İlk beş mod dikkate alınarak iki sayısal model arasındaki uyumu belirlemek için Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC) uygulanmıştır. 3DEC modelinde tüm deformasyonun elastik düğüm noktalarında toplandığı rijit blok modeli, blok sayısı yeterince büyük olduğundan, Eigen modlarının doğru hesaplanmasını sağlamıştır. Modal analiz sonuçlarında elde edilen frekanslar karşılaştırıldığında ayrık eleman modelinin sonlu elemanlar modeli ile iyi bir şekilde eşleştiği görülmüştür (Şekil 9). Makro modelleme yaklaşımı kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli sadece elastik analizde iki yaklaşım ile oluşturulan modellerin dinamik özelliklerinin karşılaştırılması için kullanılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde, sismik etkinin neden olduğu duvar göçme mekanizmalarını simüle edebilmek için ayrık elemanlar modeli kullanılmıştır.



Şekil 9. Modal Güvence Kriteri Analizi.

6. Sonuçlar

Doğrusal olmayan dinamik analizler, 3DEC programında ölçeklendirilmiş kayıtlar altında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları yığma yapının dönüş periyodu 2475 yıl (yaklaşık 0,5 g) olan depremlerde önemli ölçüde savunmasız olduğunu ve yıkılabileceğini göstermiştir. Birbirine dik yatay doğrultuda uygulanan yer hareketleri altında, Rumi Mehmet Paşa türbesinin blokları arasında büyük yer değıştirmelerin meydana gelmesi ve blokların yerinden çıkmasıyla büyük hasar aldığı gözlenmiştir. Ayrıca, tipik olarak göçme mekanizmasının başladığı kubbede önemli hasarlar gözlemlenmiştir. Şekil 10' da 2018 TBDY' ye uygun olarak, T=2475 yıl dönüşüm periyotları için seçilen ve ölçeklendirilen deprem kayıtlarından altı tanesi altındaki davranışları ve göçme mekanizmaları verilmiştir. Bu depremlerden en büyüklüğü 1999 İzmit depremidir. Seçilen depremlerin süresi yaklaşık 30-90 saniye arasında olup büyüklükleri Mw 6.3 ile Mw 7.51 arasında değışmektedir. Bu yer hareketleri altında yapıda en büyük yer değıştirmeler kubbede oluşmuştur. Pencere ve kapı kenarlarında meydana gelen bloklar arasındaki görelî yer değıştirmelerinin artması ve kubbe blokları arasında oluşan açılmalar ile birlikte göçme yaşanmıştır. Tüm bu doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları yapının bölgede oluşabilecek bu büyüklükteki depremler karşısında savunmasız kalacağını ve göçme yaşanacağını göstermiştir. Bu çalışmanın beklenen hasar seviyeleri ve göçme mekanizması hakkında bir fikir vermesi, ayırık eleman yaklaşımının yığma yapıların güvenlik değılendirmesi için çok uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir. Tarihi yığma yapıların dayanım performans düzeylerinin belirlenmesi ve sismik güvenliğini artırmak için uygulanacak yöntemler hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.



Şekil 10. Seçilen ve Ölçeklendirilen Depremler Kayıtları Altında Yığma Yapının Göçme Mekanizmaları.

Referanslar

- Aleksandrova, I., Solakov, D., Simeonova, S., Raykova, P. (2019). Empirical relations converting seismic intensity to moment magnitude. In 10th Congress of the Balkan Geophysical Society (Vol. 2019, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Ambraseys, N.N., and Finkel., C. (1987). The saros–marmara earthquake of 9 August 1912, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 15: 189-211.
- Ambraseys, N. N., Jackson., J. A. (2002). Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500, *Geophysical Journal International*, 141: F1-F6.
- Anastasia, K., Louvari, E. K. (2001). On active tectonics of the Aegean sea and surrounding land. *Symposia on seismotectonics of the North-Western Anatolia-Aegean and recent Turkish Earthquakes*. Proceeding, pp. 88-95.
- Babinger, F. (1992). *Mehmed the Conqueror and his time*. Princenton: Princenton University Press.
- Barka, A. A. (1992). The North Anatolian Fault Zone, *Annales Tectonicae*, 6: 164-95.
- Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi BDTİM (<http://www.koeri.boun.edu.tr>).
- Erdik, M., Doyuran, V., Akkas, P., Gulkan, P. (1985). Assessment of the Earthquake Hazard in Turkey and Neighboring Regions, *Tectonophysics* 117, 295-344.
- Erdoğan, E., Pulatsu, B., Gaggioli, A., Hoff, M. (2020). Reverse engineering a fully collapsed ancient roman temple through geoarchaeology and DEM. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-21.
- Flerit, F., Armijo, R., King, G., Meyer, B. (2004). The mechanical interaction between the propagating North Anatolian Fault and the back-arc extension in the Aegean. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(3-4), 347-362.
- Gardner, J. K., Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?. *Bulletin of the seismological society of America*, 64(5), 1363-1367.
- Goodwin, G. (2003). *A history of Ottoman architecture*. London: Thames and Hudson.
- Görür, N., Çağatay, M. N., Sakınç, M., Sümengen, M., Şentürk, K., Yaltrak, C., Tchapygala, A. (1997). Origin of sea of Marmara as deduced from Neogene to Quaternary paleogeographic evolution of its frame. *International Geology Review* 39, 342-352.
- Hubert-Ferrari, A., Barka, A., Jacques, E., Nalbant, S. S., Meyer, B., Armijo, R., ... & King, G. C. (2000). Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 Izmit earthquake. *Nature*, 404(6775), 269-273.
- Imren, C., Le Pichon, X., Rangin, C., Demirbağ, E., Ecevitoglu, B., Görür, N. (2001). The North Anatolian Fault within the Sea of Marmara: a new interpretation based on multi-channel seismic and multi-beam bathymetry data. *Earth and Planetary Science Letters*, 186(2), 143-158.
- Itasca Consulting Group, Inc, 2016. 3DEC 5.2 Command Reference. (Minneapolis, Minnesota, USA).
- Kadirioğlu, F.T., Kartal, R.F. (2016). The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900–2012). *Turk J Earth Sci* 25(4):300–310.
- Kafescioğlu, C. (2009). *Constantinopolis/Istanbul*. University Park, Pa.: Pennsylvania State University Press.
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H., Bozkurt, E. (1999). Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 156(3), 605-616.
- Kozacı, Ö., Dolan, J. F., Finkel, R. C. (2009). A late Holocene slip rate for the central North Anatolian fault, at Tahtaköprü, Turkey, from cosmogenic ¹⁰Be geochronology: Implications for fault loading and strain release rates. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1).

- Le Pichon, X., Şengör, A. M. C., Demirbağ, E., Rangin, C., Imren, C., Armijo, R., ... & Tok, B. (2001). The active main Marmara fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(4), 595-616.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., ... & Veis, G. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3), 5695-5719.
- Meade, B. J., Hager, B. H., McClusky, S. C., Reilinger, R. E., Ergintav, S., Lenk, O., ... & Ozener, H. (2002). Estimates of seismic potential in the Marmara Sea region from block models of secular deformation constrained by Global Positioning System measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 208-215.
- Mihailovich, J. (1927). Trusne katastrofe na Mramornome moru', Posebno Izdan, 65 (16): 303.
- Öztürk, S. (2014). A new empirical relation between surface wave magnitude and rupture length for Turkey earthquakes. *Earth Sciences Research Journal*, 18(1), 15-26.
- Parke, J. R., White, R. S., McKenzie, D., Minshull, T. A., Bull, J. M., Kuşçu, I., ... Şengör, C. (2002). Interaction between faulting and sedimentation in the Sea of Marmara, western Turkey. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B11), EPM-2.
- Reilinger, R. E., S. C. McClusky, M. B. Oral, R. W. King, and Toksoz, M. N. (1997). Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone, *J. Geophys. Res.*, 102, 9983– 9999.
- Rockwell, T., Ragona, D., Seitz, G., Langridge, R., Aksoy, M. E., Uçarkus, G., Akbalik, B. (2009). Palaeoseismology of the North Anatolian Fault near the Marmara Sea: implications for fault segmentation and seismic hazard. Geological Society, London, Special Publications, 316(1), 31-54.
- Saygılı, Ö. (2019). Estimation of structural dynamic characteristics of the Egyptian obelisk of Theodosius. *Earthq. Struct.*, 16, 311–320.
- Saygılı, Ö., & Lemos, J. V. (2020). Investigation of the structural dynamic behavior of the Frontinus Gate. *Applied Sciences*, 10(17), 5821.
- Saygılı, Ö., & Lemos, J. V. (2021). Seismic vulnerability assessment of masonry arch bridges. In *Structures* (33, 3311-3323). Elsevier.
- Seyitoğlu, G., Scott B. (1991). Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geological Magazine* 128, 155-166.
- Şengör, A.M.C., Tüysüz, O., İmren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X., and Rangin, C. (2005). The North Anatolian Fault: A New Look: Annual Review of Earth and Planetary Sciences.
- Tan, O., Tapirdamaz, M. C., Yörük, A. (2008). The earthquake catalogues for Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(2), 405-418.
- Tan, O. (2021). A homogeneous earthquake catalogue for Turkey, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21: 2059-73.
- Tatar, O., Piper, J. D. A., Park, R. G. and Gursoy, H. (1995). Paleomagnetic study of block rotations in the Niksar overlap region of the North Anatolian fault zone, central Turkey, *Tectonophysics*, 244, 251– 266.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018(TBDY-2018, Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara.
- Tchernega, N. (2018). Restoration project of the tomb of Rumi Mehmed Pasha and cistern-public kitchen building, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- 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.
- Yalıtırak, C. M., Okay, F. Y. (2000). Kinematics and evolution of the northern segment of the North Anatolia Fault Zone (Ganos Fault) in the area between Marmara and Gulf of Saroz. Tatar, o., Kavak, K. S., Özden. S. (Eds). *Tektonik Araştırma Grubu 3. Toplantısı, Atag-3 Proceedings*. 77-89.