



# Sıvı sönümleyici ile tarihi minarelerin deprem tepkisinin iyileştirilmesinin lineer dinamik analizi

## Linear dynamic analysis of improving earthquake response of historical minarets with liquid damper

Muhammet Ensar YİĞİT<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [ensar.yigit@cbu.edu.tr](mailto:ensar.yigit@cbu.edu.tr), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0161-7144>

### MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 07 Mayıs 2024  
Revizyon 11 Eylül 2024  
Kabul 23 Eylül 2024  
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Akışkanlar mekaniği, Ayarlı Sıvı Sönümleyici, Hidromekanik, Kültürel mirasın korunması, Tarihi Minareler.

### ÖZ

Bu çalışmada tarihi camii minarelerinin yapısal değişikliğe gitmeden uygulanabilecek sıvı sönümleyici modelleri ile sismik tepkilerinin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Literatürde sıvı sönümleyici ile minare davranışının incelendiği çalışmalara pek rastlanmamıştır. Sıvı sönümleyicinin etkisini görebilmek için minarenin mevcut hali ile petek kısmında ve şerefe kısmında sıvı sönümleyici bulunan modeller kıyaslanmıştır. Bu modellerin 1999 Düzce deprem kaydı ile doğrusal dinamik analizleri yapılmıştır. Birleşik Eularian-Lagrangian yaklaşımı ile akışkan-yapı etkileşimi kurulmuş, analiz süresince sudaki çalkantılar izlenmiştir. Analizler sonucunda, sıvı sönümleyici olarak su kütlelerini bütün olarak hareket edecek şekilde modellemek yerine, gözenekli veya çatalı bölmeler şeklinde yapmak sönümlemede daha etkili olduğu görülmüştür. Sıvı sönümleyici olan modellerde göreceki yer değiştirmelerde azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca sönümleme etkisi ve sıvı ağırlığı çekme gerilmelerinde ( $S_{max}$ ) azalmaya sebep olurken basınç gerilmelerinde ( $S_{min}$ ) artışa sebep olmuştur. Tüm modellerde en büyük asal basınç gerilmeleri ve en büyük asal çekme gerilmeleri minarelerin genellikle depremlerde hasar aldığı kaide ile gövde arasındaki bir alanda yoğunlaşmıştır. Analizler, minarenin sıvı sönümleyici ile iyileştirilmesinin depreme dayanıklılığı artırdığını, bu nedenle güçlendirme öncesinde akışkan-yapı etkileşiminin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

### ARTICLE INFO

Article history:

Received 07 May 2024  
Received in revised form 11 September 2024  
Accepted 23 September 2024  
Available online 30 September 2024

Keywords:

Fluid mechanics, Historical Minarets, Hydromechanics, Protection of cultural heritage, Tuned Liquid Damper,

Doi: 10.24012/dumf.1479940

\* Sorumlu Yazar

### ABSTRACT

In this study, the improvement of seismic responses of historical mosque minarets with liquid damper models that can be applied without structural changes was investigated. There are not many studies in the literature examining the behavior of minarets with liquid dampers. In order to see the effect of the liquid damper, the current version of the minaret was compared with the models with liquid dampeners in the upper cylindrical body part and balcony part. Linear dynamic analyzes of these models were made with the 1999 Duzce earthquake record. Fluid-structure interaction was established with the combined Eularian-Lagrangian approach, and water sloshing were monitored. As a result, instead of modeling the water mass to act as a whole as a liquid damper, making it in the form of porous or slatted partitions was more effective in damping. A decrease in relative displacements was observed in models with liquid dampers. In addition, the damping effect and liquid weight caused a decrease in tensile stresses ( $S_{max}$ ) and an increase in compressive stresses ( $S_{min}$ ). In all models, the largest principal compressive stresses and the largest principal tensile stresses are concentrated in an area between the base and the body, where minarets are usually damaged in earthquakes. Analysis shows that retrofitting the minaret with a liquid damper increases earthquake resistance, so fluid-structure interaction should be taken into account before strengthening.

## Giriş

Birçok medeniyete beşiklik etmiş Anadolu coğrafyasında Osmanlı Devleti'nin önemli bir sancak beyliği olan Manisa silueti içerisinde camiler ve bu camilere ait minareler şüphesiz büyük önem taşımaktadır. Minareler estetik ve narin yapıları ile İslam kültürünün müstesna yapılarıdır (Şekil 1.a-b). Yıkıcı depremler sırasında bu kültürel miras eserleri ve binalar yok olma tehlikesi altındadır. Deprem sonrası yapılan keşif araştırmalarının çoğunda, yağma minarelerin yıkıldığı veya ciddi hasar gördüğüne dair raporlar yer almaktadır. Depremlerin ardından minarelerde

çok sayıda çökme ve yapısal hasar meydana gelmiş ve çoğu durumda can kaybı rapor edilmiştir (Şekil 1.c-d). Fakat minarelerin sismik davranışını ve performansını iyileştirme konularında sönümleyici kullanımı hakkında pek fazla araştırma yapılmamıştır. Yağma minarelerin dinamik davranışının anlaşılması, can güvenliğinin artırılması, tarihi anıtsal yapıların korunması ve güçlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Kültürel miras yapılarına müdahale ederken, bunların biçimini bozmayacak veya yapısal davranışlarını büyük ölçüde değiştirmeyecek şekilde olmalı ve geri döndürülebilir olmalıdır. Ayrıca kullanılacak malzemelerin anıtın inşa

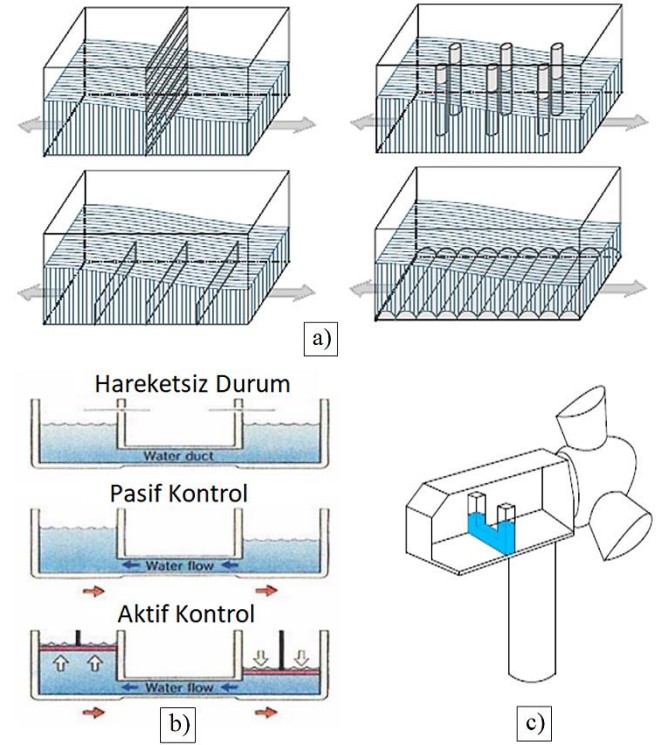
edildiği malzemelerle uyumlu olması gerekir. Geleneksel sismik güçlendirme tekniklerinin çoğunun yukarıdaki koşulları ihlal etmesi gibi bir dezavantajı vardır. Alternatif bir yaklaşım ise kültürel mirasın depremlerin etkilerine karşı sismik direncini arttırmak için yenilikçi sismik koruma sistemlerinin kullanılmasıdır [1], [2].



Şekil 1. Taş/tuğla yığma minare ve yıkılan minare örnekleri, a) Erzurum Muratpaşa Camii [3], b) Ordu Aziziye Yalı Camii [4], c) Bolu Şemsi Ahmet Paşa Camii [2], d) Kahramanmaraş Atik Camii [5].

Son yıllarda, düşük maliyetleri ve kurulum kolaylığı nedeniyle yapıların titreşimini azaltmak için dinamik titreşim sönümleyiciler olarak ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD) tasarımcıların ve araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. Yapılarda birinci mod şeklinin dinamik tepkisi sıklıkla baskın olduğu için TLD'lerin çalkantı frekansı yapıların temel periyoduna göre ayarlanmıştır. TLD kısmen sıvıyla doldurulmuş (genellikle su) bir tanktır (Şekil 2.a). Tipik olarak, gerekli optimum sönümlenme seviyesini elde etmek için tek başına su yetersizdir. TLD'nin sönümlemesini arttırmak için kullanılan yaklaşımlardan biri, tanka akış sönümleme yapıları (bölmeler) yerleştirmektir. Geleneksel TLD'ler (CTLD) yalnızca tek bir çalkantı frekansına ayarlanabilir. Daha yüksek mod şekillerinin dinamik tepkisini kontrol etmek için çoklu ayarlanmış TLD'ler (MTLD) kullanılmaktadır. Ancak birden fazla TLD yüksek

bakım maliyetine ek olarak, daha büyük bir kurulum alanı gerektirir. Daha yüksek sönümlenmenin elde edilmesi, hacimsel verimliliğin artırılması, mimari uygulanabilirliğinin iyileştirilmesi ve geniş bir yapı yelpazesinde kullanılmasına yönelik önemli çalışmalar, pasif ayarlı sıvı damperlerin çeşitli şekillerde gelişmesine yol açmıştır (Şekil 2.b). Binaların, köprülerin, bacaların, rüzgâr türbinlerinin, havaalanı kontrol kulelerinin veya minare vb. yapıların titreşim kontrolü için farklı formlardaki ayarlı sıvı damperlerin kullanımına yönelik araştırma çalışmaları yapılmaktadır (Şekil 2.c) [6].



Şekil 2. Ayarlı sıvı sönümleyicilerin şematik gösterimi, a) farklı depo tasarımları [7], b) aktif-pasif kontrol [8], c) rüzgâr türbinlerinde sıvı sönümleyici örneği [9].

Yığma minareler doğal insan sesiyle okunan ezanın daha uzaklara yayılması için yüksek ve ekonomik olması için ince duvarlı inşa edilmiştir. Bu nedenle enine dayanımları zayıftır. Dinamik yüklere karşı çok hassastır. Yüksek bir vadiyi geçen demiryolu köprüleri, su kemerleri veya otoyol köprüleri gibi davranırlar. Aşağıda literatür taraması sonucu elde edilen güncel çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Hamelin (2007), çalışmasında belirli bir hedef tepki ivmesi için optimum düzeyde bir sönümlenme elde edilebileceğini ancak yapısal tepki bu hedef değerden saptıkça yapı-TLD sisteminin verimliliği önemli ölçüde azalacağını söylemiştir. Verimliliği artırmak için, çalışmasında değişen kayıp katsayısına sahip çitallı bölmelerin uygulanabilirliği araştırmıştır. TLD, pratik olarak en yüksek saatlik yatay yapısal ivme aralığına karşılık gelen bir genlik aralığı için sinüzoidal uyarım altında sarsma masası testlerine tabi tutulmuştur. Bölme kayıplarındaki (CL) değişiklik Keulegan-Carpenter (KC) sayısı ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Bölmelerin geometrisinin serbest yüzey tepkisi, taban kesme kuvvetleri ve enerji dağıtımındaki etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmasında değişen kayıp

katsayısına sahip çıtalı bölmelerin, geniş bir yapısal ivme aralığı boyunca optimuma yakın bir sönümleme seviyesini koruduğunu söylemiştir [10]. Doğangün ve ark. (2008), çalışmada, tarihi taş yığma minarelerin dinamik davranışını araştırmak amacıyla, 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri sırasında kaydedilen iki yer hareketi kullanılarak 20, 25 ve 30 metre yüksekliğinde üç temsili minare modelleri ve analiz etmiştir. Modellerin modal analizleri, yapısal periyotların ve genel yapısal tepkinin minare yüksekliğinden ve giriş hareketinin spektral özelliklerinden etkilendiğini göstermiştir. Minarelerin kritik noktalarında dinamik yer değiştirme ve aksel gerilme zaman geçişleri hesaplamıştır [2]. Türk (2013), çalışmada bir minarenin sismik güvenliğinin mevcut durumda ve önerilen güçlendirme yönteminin uygulanması sonrasında değerlendirilmesi amacıyla sonlu eleman modeli (SEM) ile analiz etmiştir. Güçlendirme yöntemi fiber takviyeli çimentolu matris (FRCM) malzemesi kullanılarak kritik kesitler kaplanması şeklindedir. SEM analizlerinden elde edilen mevcut minarede görünen hasar, minarenin papuç ve geçiş kısmında yer almakta iken kritik kesitlerin etrafına FRCM malzemesi sarıldıktan sonra yapılan analiz sonuçları, bu yöntemin sismik tepki açısından etkili görüldüğünü göstermiştir. Ayrıca diğer güçlendirme teknikleriyle karşılaştırıldığında minare gibi tarihi mirasın korunması açısından estetik çelişkiye yol açmadan uygulanabileceğini söylemiştir [11]. Novo ve ark. (2014), makalesinde, uygun şekilde tasarlandığı takdirde binalardaki deprem tepkilerini azaltabilen, ayarlanmış sıvı sönümleyici (TLD) sisteminin çalışmasına odaklanmıştır. Sönümleme etkisi, tank içindeki akışkanın serbest yüzeyinin salınımı (çalkalanma) dikkate alınarak gerçekleştirildiğini söylemiştir. Tabanında sinüzoidal bir uyarıya maruz kalan, farklı yer değiştirme genliklerine sahip izole bir TLD'nin davranışı sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Çalışmada Güney Avrupa ülkelerindeki modern mimari binaları temsil eden mevcut bir binanın sismik tepkisini iyileştirmede TLD'nin etkinliği de doğrusal dinamik analizlere dayalı olarak değerlendirilmiştir [12]. Hökelekli (2015), Hafsa Sultan Camii ve minaresinin deprem davranışlarını belirlemek amacıyla, öncelikle yapı üzerinde hasar tespiti ve taşıyıcı sistem özelliklerinin belirlenmesi gibi çalışmalar yapmıştır. Ardından, yapıların üç boyutlu (3B) sonlu eleman modelleri oluşturmuş ve deneysel yöntemlerle dinamik karakteristikleri belirlemiştir. Deneysel sonuçları, sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde kullanmıştır. Başlangıç ve iyileştirilmiş modeller üzerine deprem yüklemeleri uygulanarak, yapıların lineer deprem davranışını incelenmiştir. Ayrıca, minarenin doğrusal olmayan davranışının belirlenmesinde Beton Hasar Plastisite (CDP) modeli kullanmıştır [13]. Patil ve Singh (2016), çalışmada, düz tabanlı olan ayarlı sıvı sönümleyicilerin (TLD) deprem sonrasında salınmaya devam ederek yapıyı yordüğünü söylemiştir. Buna alternatif olarak eğimli tabanlı olan bir TLD ile sismik titreşimleri azaltmadaki etkinliğini analiz etmiştir. Eğimli taban TLD'sini analiz etmek için eşdeğer düz tabanlı sıvı sönümleyici kullanılmıştır. TLD'deki yapıyı ve sıvıyı modellemek için sonlu elemanlar yöntemi (SEM) kullanılmıştır. Bilgisayar programlama ile yapının tepkisini, tanktaki sıvı çalkantısını ve birleşik akışkan-yapı etkileşimini incelemek için bir kod geliştirmiştir. Çalışmada elde ettiği gözlemler, eğimli

tabanlı TLD'nin düz tabanlı TLD'ye göre daha az miktarda sıvı kullandığını göstermektedir. Ayrıca eğimli alt TLD'nin verimliliğinin, uygun şekilde ayarlanması durumunda artırılacağı da gözlemlenmiştir [14]. Pekgökgöz ve Taş (2017), çalışmada, betonarme yüksek bir minare üzerinde ayarlı kütle sönümleyici (TMD) sisteminin etkisini incelemiştir. Rüzgâr kuvvetleri, kendini tekrarlayan yer hareketleri ve belirlenen deprem hareketleri altında minarenin dinamik davranışlarını araştırmıştır. Araştırma sonucunda TMD sistemi yerleştirilmiş minarenin kasırga etkisi altında sönüm değerinin normal bir minareye göre yaklaşık olarak 2,4 kat daha büyük olduğunu bulmuştur. Bu durum, sönümleyici sistemin yerleştirilmiş olduğu minarenin yatay yer değiştirmelerinin daha düşük seviyelerde kalmasını sağlamıştır. Ayrıca, TMD'lerin minarenin kendini tekrarlayan yatay yer hareketleri etkisinde yer değiştirme değerini azaltma ve titreşimin sönümlenmesine etkisinin yüksek olduğunu vurgulamıştır. [15]. Günaydın (2018), tarihi yapıların uzun vadeli sürdürülebilirliğinin, yapısal davranışlarının belirlenmesi ve gerekli onarım veya güçlendirme işlemlerinin uygulanmasıyla mümkün olabileceğini belirtmiştir. Yapının yapısal durumunu anlamak ve uygun müdahalelerde bulunmak kadar önemli olan bir diğer faktör ise, uygulanan onarım veya güçlendirme işlemlerinin yapının yapısal davranışına olan etkisidir. Ayrıca çalışmada, tarihi bir minarenin dinamik karakteristiklerini belirlemek için Deneysel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen dinamik özellikler, literatürde bulunan onarım öncesi verileriyle karşılaştırılmış ve olası farklılıkların analizi yapılmıştır. [16]. Hemmatia (2019), çalışmada açık deniz rüzgâr türbinlerinin aşırı titreşim tepkilerinin, ayarlanmış kütle sönümleyiciler (TMD) ve ayarlanmış sıvı sönümleyiciler (TLD) kullanarak değişimini incelemiştir. Elde ettiği sonuçlar, dinamik tepkilerin tüm yapısal kontrol cihazlarıyla büyük ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Ancak TMD'ler operasyonel koşullarda daha verimliyken, TLD'ler durgun haldeyken daha iyi performans gösterdiğini söylemiştir. Ayrıca çalışmada daha büyük bir yüklenme koşulu ile dinamik tepkilerin verimli bir şekilde en aza indirildiği birleşik bir TLCD-TMD sisteminin olasılığını ve verimliliğini araştırılmasını vurgulamıştır [17]. Kamgar (2020), makalesinde zemin-yapı etkileşiminin, modifiye edilmiş ayarlı bir sıvı damper tarafından kontrol edilen tek serbestlik dereceli bir sistemin (Nagasaki havaalanı kulesi) tepkisi üzerindeki etkisi araştırmıştır. Kontrollü yapısal tepkiler farklı zaman adımlarında hesaplanmış ve kontrolsüz yapının tepkileriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak ise, modifiye edilmiş ayarlı sıvı sönümleyici sisteminin sismik tasarımının yapısal tepkileri azaltmada daha etkili olabileceğini söylemiştir [18]. Vafaei (2021) makalesinde, çoklu mod şekillerin titreşimini aynı anda azaltmak için değiştirilmiş bir TLD (MTLD) tanıtmıştır. MTLD'nin verimliliği, ölçekli 3 katlı bir yapı üzerinde gerçekleştirilen çeşitli sarsma masası testleri aracılığıyla göstermiştir. Serbest titreşim testleri, MTLD'nin üçüncü katın yer değiştirme tepkilerinin ortalama karekökünü CTLD'den 1.9 kat daha fazla azalttığını göstermektedir. Ayrıca, birinci rezonans frekansında, MTLD üçüncü katın tepe yer değiştirme tepkisini ve tepe ivme tepkisini CTLD'ye göre sırasıyla %44 ve %42 daha fazla azalttığını söylemiştir [19]. Konar ve Ghosh (2022), çalışmada sıvı sönümleyicilerin

tasarımına odaklanarak, yapısal tepkiyi azaltmak için çeşitli konfigürasyonlardaki ayarlanmış sıvı sönümleyiciler üzerine sistematik bir inceleme yapmıştır. Farklı tipteki ayarlı sıvı damperlerin avantajları ve uygulanabilirliği, gerçek hayattaki kurulumlarıyla birlikte vurgulanmıştır. Ayrıca çeşitli ayarlanmış sıvı sönümleyici şekillerinin geliştirilmesindeki boşluklar ve gelecekteki gelişmelerin kapsamından da bahsedilmiştir [20]. Hu ve ark. (2023), çalışmada havaalanı kontrol kulelerinin rüzgârdan kaynaklanan titreşim kontrolü için sıvı içeren etkili bir çözüm sağlamak amacıyla, yeni bir üçlü sürtünmeli sarkaç ayarlı sıvı sönümleyici (TFPTLD) önermekte ve TFPTLD'lerin tasarımını kolaylaştırmak için kontrol talebi odaklı bir tasarım çerçevesi oluşturmuştur. Önerilen talep odaklı tasarım yöntemini takiben TFPTLD, aynı sıvı kütlmesine sahip geleneksel TLD'lere göre daha yüksek etkinlik, daha büyük frekans bant genişliği ve daha sağlam rüzgâr kaynaklı titreşim kontrolü sergilediğini söylemiştir. Üçlü sürtünmeli sarkaç, küçük bir kurulum alanı gerektirdiği bu da sıvı tanklarının günlük işlevini sürdürmek amacıyla titreşim kontrolü için kapsamlı bir şekilde kullanılabileceğini belirtmiştir [21].

Kapsamlı literatür taramasında, araştırmacıların tarihi moloz taş veya tuğla minarelerin statik ve dinamik analizlerini çeşitli teknikler kullanarak araştırdıkları görülmektedir. Zamanla bu yapılar dış etkenler sonucu sismik tepkileri kötüleşmiştir. Bu durumu iyileştirmek için ayarlı kütle sönümleyici veya tabandan sismik yalıtkan uygulamaları yapıldığı görülmüştür. Doğrudan bir minare üzerinde ayarlı sıvı sönümleyici uygulamasına rastlanmasa da fabrika bacası, türbin kulesi veya köprü ayaklarında uygulamaları vardır. Birleşik Eulerian-Lagrangian yaklaşımı, akışkan-yapı etkileşimini en iyi şekilde temsil eder ve diğer akustik eleman-yapı etkileşimi modellerinde mevcut olmayan özellikler olan kanal içindeki su çalkalanması, potansiyel taşma ve dökülmenin gözlemlenmesine olanak tanır. Bölüm 3'de seçilen tarihi minare, kesme taş ve tuğla birimlerine göre ayarlanmış malzeme modeli kullanmıştır. Mevcut durumuyla birlikte üç farklı model yıkıcı bir deprem kaydı kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## Materyal ve yöntem

### Minare-akışkan etkileşimi için Eulerian-Lagrangian birleşik yaklaşımının formülasyonu

Eulerian-Lagrangian Birleşik Yaklaşımı hem daha geniş mekânsal bağlamı hem de bireysel elemanların davranışlarını dikkate alarak yapılar içindeki karmaşık etkileşimleri araştırmak için kullanışlı bir yöntemdir. Bu kapsamlı analiz, yapıların güvenliği, bütünlüğü ve risk değerlendirmesiyle ilgili bilinçli kararlar alınmasına yardımcı olur. Akışkanlar dinamiği ve sürekli ortam mekaniği bağlamında Euler ve Lagrange tanımları, malzemelerin hareketini ve davranışını analiz etmek için kullanılan iki temel yaklaşımdır [22].

Eulerian tanımlamada odak noktası konumdaki belirli noktalar ve denklemler bu sabit konumlarda gözlemlenen özelliklere göre formüle edilir. Euler yaklaşımı, noktalarda hız, basınç veya sıcaklık gibi değişkenlerin zaman içinde nasıl değiştiğini izler. Buna karşılık Lagrangian tanımlama, bir malzemenin bireysel parçacıklarının veya elemanlarının hareketini takip eder. Burada her parçacık konumda ve

zamanda hareket ederken izlenir. Denklemler, belirli bir zamandaki konumu ve hızı göz önünde bulundurularak, her bir parçacıkla ilişkili özelliklere dayalı olarak formüle edilir [22].

Lagrangian (maddesel) ve Eulerian (uzaysal) zaman türevleri arasındaki bağlantı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{D\Phi}{Dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + v \cdot (\nabla\Phi) \quad (1)$$

Burada,  $\Phi$ : isteğe bağlı çözüm değişkenini,  $v$ : malzeme hızını,  $D\Phi/Dt$ : maddesel türev operatörü ve  $\partial\Phi/\partial t$ : uzaysal zaman türevini temsil eder. Başlangıçta Lagrange çerçevesinde formüle edilen kütle, momentum ve enerjiye ilişkin korunum denklemleri, Benson and Ozakawa, 1997 'da ayrıntılı olarak belirtildiği gibi Euler korunum denklemlerine dönüştürülür [23].

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + v \cdot (\nabla \cdot \rho) + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot (\nabla \cdot v) = \frac{1}{\rho} (\nabla \cdot \sigma) + b \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + v \cdot (\nabla e) = \sigma : D \quad (4)$$

Burada,  $\rho$ : yoğunluğu,  $\sigma$ : Cauchy gerilimini,  $b$ : yapısal kuvvetlerinin vektörünü,  $e$ : şekil değiştirme enerjisini ve  $D$ : şekil değiştirme hızını temsil eder. Euler denklemleri (Denklemler 2 ile 4), kapsayıcı formda aşağıdaki gibi yeniden formüle edilebilir [22], [24]:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial\rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (6)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (ev) = \sigma : D \quad (7)$$

Euler hareket denklemleri (5)-(7) genel formda aşağıdaki gibidir.

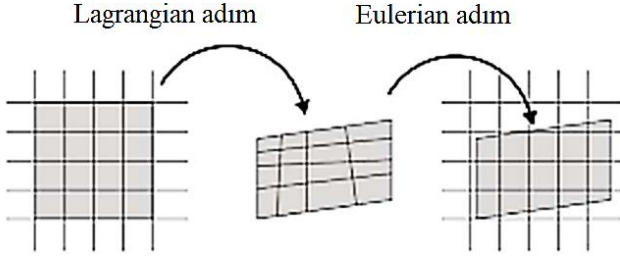
$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla \cdot \phi = S \quad (8)$$

Burada,  $\phi$ : akım fonksiyonunu ve  $S$ : kaynak terimini temsil eder. Denklem (8) iki denkleme bölünür ve referansta açıklandığı gibi operatör bölme kullanılarak sırayla çözümlürse [24]:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = S \quad (9)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla \cdot \phi = 0 \quad (10)$$

elde edilir. Denklem (9), Lagrange adımını ifade eden kaynak terimini içerirken Denklem (10), Euler adımını simgeleyen konvektif terimi içerir. Bu bölme operatörünün görsel bir tasviri Şekil 3'te sunulmaktadır.



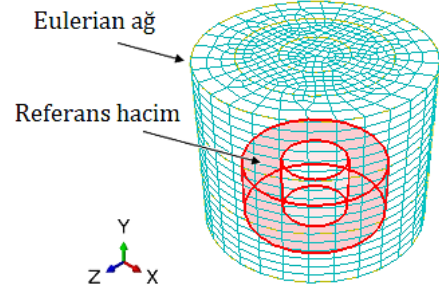
Şekil 3. CEL formülasyonu bölünmüş operatör kullanımı.

Denklemleri (10) çözmek için Lagrangian adımından gelen bozuk ağı, sabit Euler ağına taşınır ve komşu elemanlar arasında aktarılan malzemenin hacmi hesaplanır. Kütle, gerilim ve enerji gibi Lagrangian çözüm parametreleri, bitişik elemanlar arasındaki malzeme akışını sağlayacak şekilde değiştirilir. Sanal iş prensibi, Bathe, 1996 'da anlatıldığı gibi Lagrangian adımında kullanılır [25].

$$\int_v \rho a \cdot \delta u dv + \int_v \sigma : \delta \epsilon dv = \int_s \tau \cdot \delta u dS + \int_v \rho b \cdot \delta u dv \quad (11)$$

Burada,  $\delta u$ : sanal yer değiştirme,  $\delta \epsilon$ : sanal yer değiştirmelerden kaynaklanan sanal şekil değiştirme,  $a$ : uzaysal ivme ve  $\tau$ : yüzeysel çekimi göstermektedir. Lagrangian adımında, güncellenmiş Lagrangian formülasyonunu kullanmak daha uygundur. Çünkü Euler yaklaşımındaki konfigürasyona karşılık gelmekte ve  $t$  zamanındaki referans konfigürasyon seviyesine ayarlanmaktadır. Bununla birlikte, Denklem (11)'de açıklandığı gibi cismin  $t+\Delta t$  'deki konfigürasyonunu tahmin etmek genellikle zordur. Ayrıca,  $t+\Delta t$  'deki Cauchy geriliminin belirlenmesi basit değildir, zira bu sadece  $t$ 'deki Cauchy gerilimine gerilim artışının eklenmesiyle elde edilememektedir. Bu karmaşıklık, malzeme rijit gövde dönmelerine maruz kaldığı için Cauchy gerilim tensörünün bileşenlerinin değişmesi nedeniyle ortaya çıkar. Bu zorlukların pratik olarak üstesinden gelmek için Green-Lagrange gerilim tensörü ve ikinci Piola-Kirchoff gerilim tensörü gibi alternatif gerilim ve gerilim ölçümleri devreye girmektedir. Bu ölçümler, malzemenin deformasyon altındaki davranışını doğru bir şekilde temsil etmek için sanal yer değiştirmeler (Denklem 11) prensibinde kullanılır [26].

Euler ağını içeren simülasyonlar bağlamında malzemelerin varlığını veya dağılımını anlamak için hacim oranı (VF) adı verilen bir parametre tanımlanmıştır [27]. Bu parametre esas olarak Eulerian ağındaki malzemelerin kapladığı hacmin toplam hacme oranını temsil eder. Hesaplamaya başlamak için araştırmacıların başlangıç hacim oranını belirlemeleri gerekmektedir. Bu başlangıç hacim oranı, araştırmacıların malzemelerin dağılımını ve varlığını doğru bir şekilde değerlendirmelerine olanak tanıyan hayati bir referans noktasıdır. Şekil 4 bu referans hacminin görsel bir temsilini sağlayarak araştırmacıların Euler ağı içindeki ilk konfigürasyonu anlamalarına yardımcı olmaktadır [22].

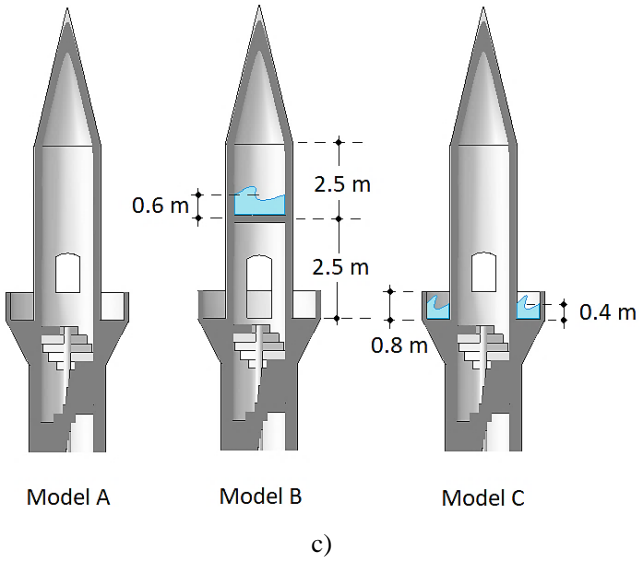
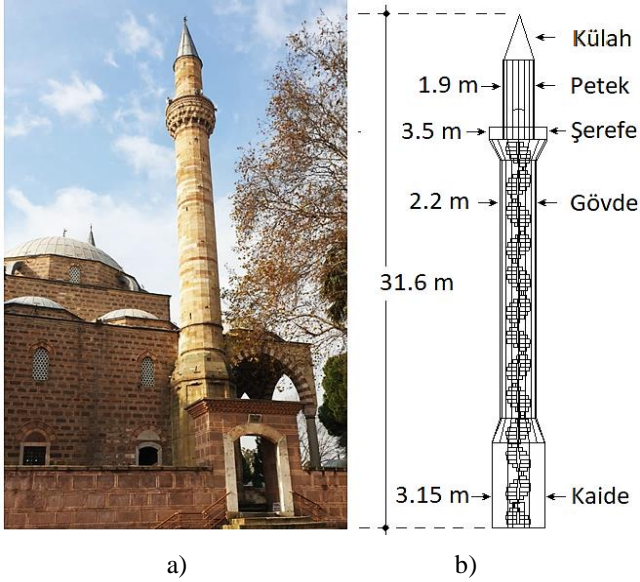


Şekil 4. Sonlu eleman analizinde hacim oranları.

## Durum analizi

### Manisa Sultan Camii minaresi lineer dinamik analizi

Sultan Camii Klasik Osmanlı Külliye Mimarisinin kültür ve sosyal yaşamın görkemli bir örneği olan bu külliye, Kanuni Sultan Süleyman'ın annesi Ayşe Hafsa Sultan tarafından Hicri 929, Miadi 1522' de yaptırılmıştır. Camii ve ona bağlı binaların bazıları 1522'de, hamam 1538'de, darüşşifa ise 1539'da tamamlanmıştır [28]. Şekil 5.a'da bu camii'ye ait minarenin görseli verilmiştir [29]. Bu çalışmada akışkan ile tarihi minarenin deprem tepkisinin iyileştirilmesinin incelenmesi amacıyla Şekil 5.c'de şematik olarak verilen üç farklı model ele alınmıştır. Bunlardan Model A; hali hazırdaki içinde akışkan sönmüleyici olmayan durum, Model B; petek bölgesinde inşa edilen betonarme tabliye ile içinde akışkanın çalkantısına izin veren bir hazne oluşturulması (H=60 cm) durumu, Model C ise hali hazırda bulunan minare şerefesinin alt ve yan yüzeylerin geçirimsiz hale getirilmesi, üstünün ise çevre şartlarından korumak için kapatılarak yarısına kadar (H=40 cm) akışkan doldurulduğu durumdur. Sultan Camii minaresinin tabanı 3.15 m çapında, yüksekliği ise 5.30 m'dir. Sekiz köşeli kaide üzerinde bulunan prizma altı 3.15 m, üstü 3.20 m çapında, 1.5 m yüksekliğinde ve on altı köşelidir. Silindirik gövde bitiminde, 0.5 m genişliğinde sahanlık ve 0.8 m korkuluk yüksekliği olan şerefe vardır. Korkuluk duvarı kalınlığı 0.12 m, merdiven basamak yüksekliği 0.25 m alınmıştır. Şerefe üstünde yüksekliği 5.0 m olan petek, tepe noktasında ise yüksekliği 4 m külah yer almaktadır. Tüm bu yapısal bileşenler ile minare 31.60 m uzunluğa ulaşmaktadır. Hava payı sismik etkiler dikkate alındığında oluşan çalkantının taşmaması için hazne yüksekliğinin %50'si olarak kabul edilmiştir. Diğer boyutlar Şekil 5.b,c'de gösterilmiştir [30].



Şekil 5. a) Sultan Camii minaresinin fotoğrafı [29], b) Minare teknik resmi, c) İnceleme modelleri.

### Minare malzeme özellikleri

Camii minaresine ait mekanik özellikler, röleve ölçümleri, malzeme testleri ve kalibrasyon Hökelekli, 2015 tarafından doktora tezinde ve Nohutçu ve ark., 2017 tarafından yapılan araştırma makalesinde paylaşılmıştır [13], [30]. Minareyi oluşturan taş yapı malzemesi özellikleri ve sıvı sönümleyici olarak kullanılan suyun malzeme özellikleri Tablo 1.'de verilmiştir [31-35]. Ayrıca referans alınan bu iki çalışmada minarede yapısal sönüm oranı 0.81 olarak verilmiştir.

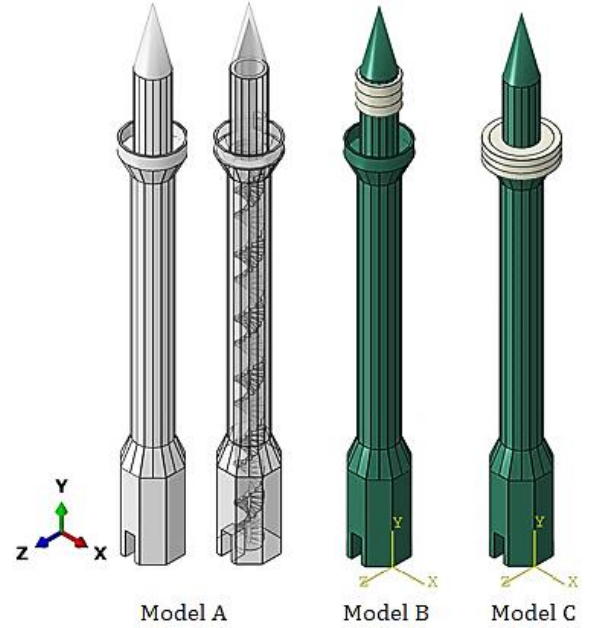
Tablo1. Minare ve sıvı sönümleyici malzeme özellikleri.

Malzeme	Kesme Taş	Akışkan
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2100	1000
Elastisite Modülü (MPa)	7700	-
Poison Oranı	0.17	-
Sesin Sudaki Hızı (m/s)	-	1450
Dinamik Viskozite (N.s/m <sup>2</sup> )	-	1.002x10 <sup>-3</sup>

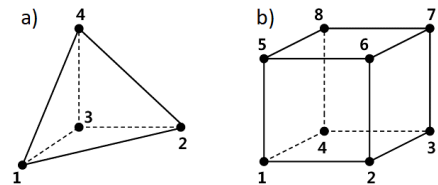
### Minare birleşik Eulerian-Lagrangian yaklaşımı ile sonlu eleman modeli

Sultan Camii'nde iki adet minare vardır, Bunlar avluya yakın sağ ve solda bulunur. Özdeş bu iki minare camii gövdesinde bağımsız hareket etmektedir. Kaide, gövde, şerefe ve kûlah ve merdivenin 3B katı modeli ve sonlu elemanlar modeli (SEM) ABAQUS paket programı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 6.) [36]. Makro modelleme tekniği ile malzeme özellikleri belirlenmiş, taş ve harç için elastisite modülü, poison oranı ve yoğunluk ortak olarak tanımlanmıştır.

Yapının sonlu elemanlar modelinde dört düğüm noktalı üçgen prizma eleman (C3D4) ve akışkan için ise 8 düğüm noktalı, azaltılmış entegrasyonlu kübik eleman (C3D8R) tipi kullanılmıştır. Katı elemanlar arasında, minare (C3D8) 2x2 entegrasyon noktası ve akışkan eleman (EC3D8) 2x2 entegrasyon noktası içerir. Akışkan ile minare yapısı arasında, basınç kuvvetini normal yönde aktarabilen ancak çekme kuvvetini aktaramayan sert bir temas yüzeyi ve sürtünme sebebiyle teğetsel yönde kuvvet aktarabilen bir temas yüzeyi tanımlanmıştır (Şekil 7). Hökelekli, 2015 çalışmasında yakınsaklık analizi ile minarenin sonlu elemanlar modelinde 0.20 m uzunluğunda ağ aralığı belirlemiş ve buna göre yapılan Modal Analiz ile elde ettiği ilk üç frekans değerleri ise  $f_1=1.3426$ ,  $f_2= 7.0419$  ve  $f_3= 14.1722$  olarak verilmiştir [13].

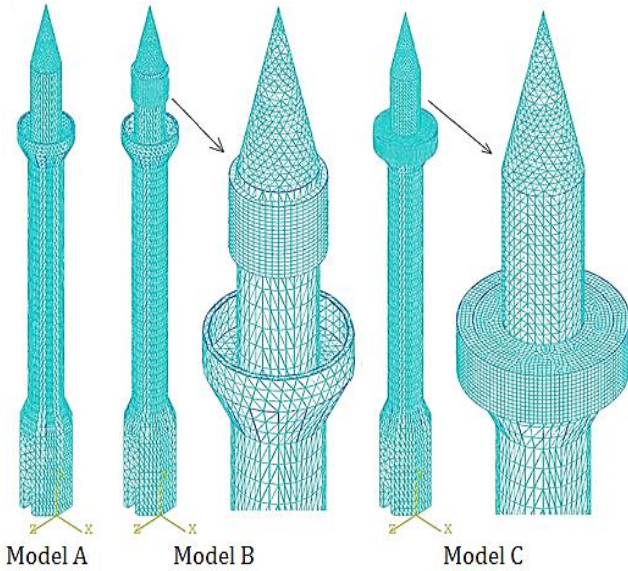


Şekil 6. Hafsa Sultan Camii minaresi 3B sonlu eleman modeli.



Şekil 7. a) C3D4 üçgen prizma yapı elemanı, b) C3D8R küp akışkan elemanı [34].

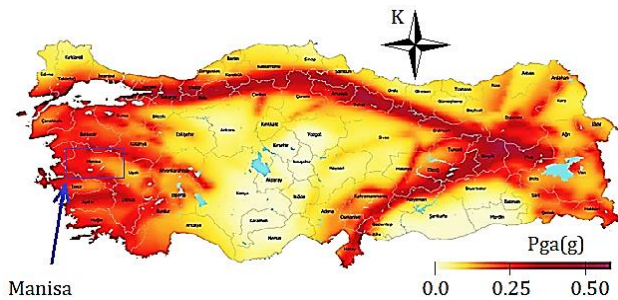
Model A 'da 25371 katı eleman ve 7408 adet düğüm noktası, Model B 'de 29781 katı eleman ve 12081 adet düğüm noktası ve Model C 'de 32583 katı eleman ve 14606 adet düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 8). Sınır şartı olarak minare tabanı ve camiye bitişik duvarı sabit mesnet olarak kabul edilmiştir. Deprem ivme kaydı yapıya x-x doğrultusunda tabandan uygulanmıştır. Diğer y-y ve z-z yönlerinde ise harekete izin verilmemiştir.



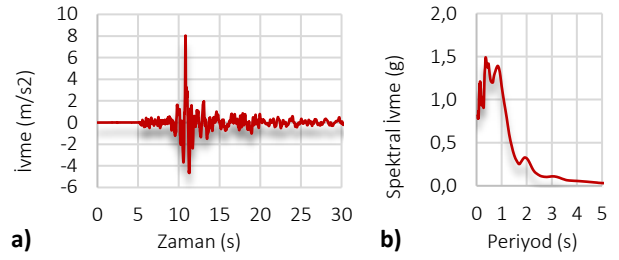
Şekil 8. Hafsa Sultan Camii minaresi sonlu eleman ağı.

### Kullanılan sismik kayıtlar

Hafta Sultan Camii'nin bulunduğu Manisa şehir merkezi Türkiye'nin batısında deprem hareketliliği yoğun olan bölgede bulunmaktadır (Şekil 9), [37], [38]. Sıvı sönümleyicini etkisini görebilmek için şiddetli bir deprem olan Düzce depremi (IX, Çok Yıkıcı) kaydı ile yapı analiz edilmiştir. Türkiye'nin Düzce ilinde 12 Kasım 1999'da yerel saatle 18:57'de (16:57 UTC) aletsel büyüklüğü 7.2 olan Düzce depremi vuku bulmuştur. Yaklaşık 30 saniye süren deprem büyük hasara yol açmış, 845 kişi ölmüş, 4948 kişi de yaralanmıştır. Şiddeti IX (Çok Yıkıcı) olmuştur. Deprem merkez üssü 40,768 ve 31,148 koordinatlarında olup moment büyüklüğü 6.2'dir ( $M_b=6.2$ ,  $M_s=7.4$ ). Sismik moment  $M_0=4.5 \times 10^{19}$  Nm 'dir [39]. Bu çalışmada Şekil 10'da gösterildiği gibi 1999 Düzce depremi 1401 numaralı istasyondan elde edilen Doğu-Batı (E-W) bileşenini kullanılmıştır.



Şekil 9. Türkiye sismik haritası ve minarenin konumu.



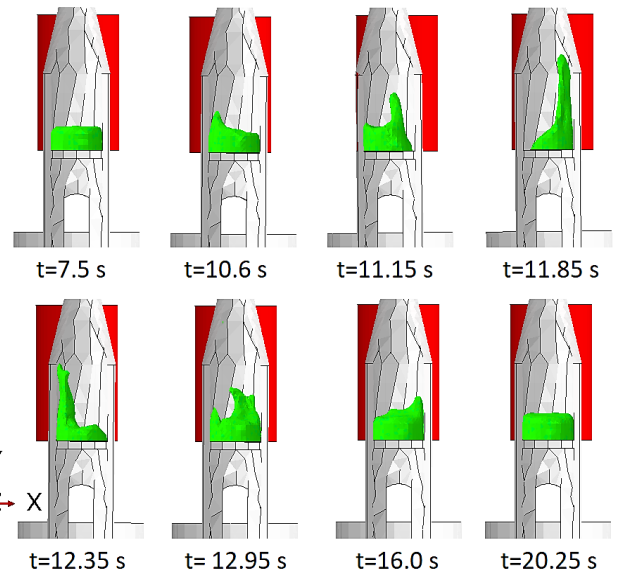
Şekil 10. Düzce depremi Doğu-Batı bileşenine ait a) İvme-zaman grafiği, b) Spektral ivme-Periyod grafiği [37].

### Bulgular

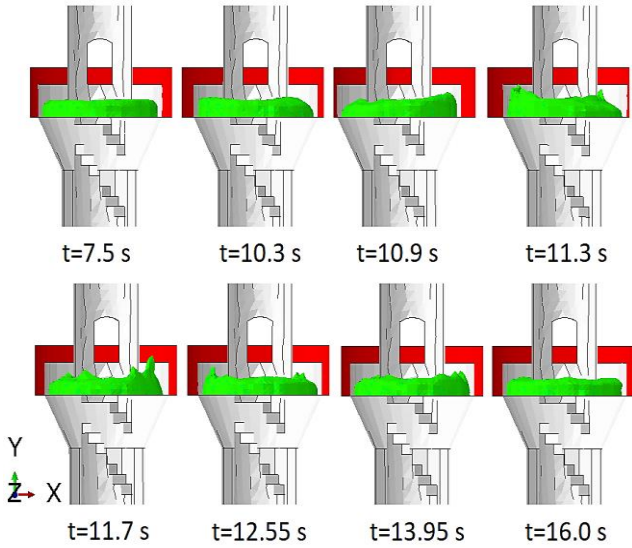
Analiz sonuçları üç farklı bölüm olarak verilmiştir. Bunlardan ilki petekdeki (Model B) ve şerefedeki (Model C) akışkanın deprem etkisinde çalkantısını gösteren farklı t sürelerindeki su yüzey şekilleri, ikincisi minare tepe noktasının yer değiştirme-zaman grafikleri ve minarenin en büyük fark yer değiştirme kontür diyagramı, üçüncüsü ise minarenin en fazla zorlandığı kaide üstüne denk gelen bölgeden seçilen noktaların en büyük asal çekme-zaman ve en büyük asal basınç-zaman grafikleri ve bu gerilmelerin en büyük olduğu ana ait kontür diyagramlarıdır.

### Sıvı sönümleyici çalkantısı

Sıvı sönümleyici bulunan Model B ve Model C için çalkantı sonucu oluşan su yüzeyleri Şekil 11. ve Şekil 12. 'de verilmiştir. Model B incelendiğinde deprem etkisinde petekte bulunan su kütlesi (yeşil renkle gösterilen) harekete geçmiş ve çalkantı su yüksekliğinin yaklaşık 3 katına kadar yükselmiştir. Model C'de ise deprem etkisindeki çalkantı yüksekliği su yüksekliğinin yaklaşık 1 katı kadar olduğu gözlenmiştir. Model B'de sıvı sönümleyici petek duvarları arasında bir bölme duvarı veya geçişi sınırlayıcı bir bölgenekli diyafram olmadığı için bütün olarak hareket etmektedir. Deprem etkisinde sıvı petek iç duvarlarına çarparak bütün halde geri dönmektedir. Buda sıvının sönümleyici etkisini gösterememesine neden olmaktadır.



Şekil 11. Model B sıvı sönümleyici çalkantı yüzey şekilleri.



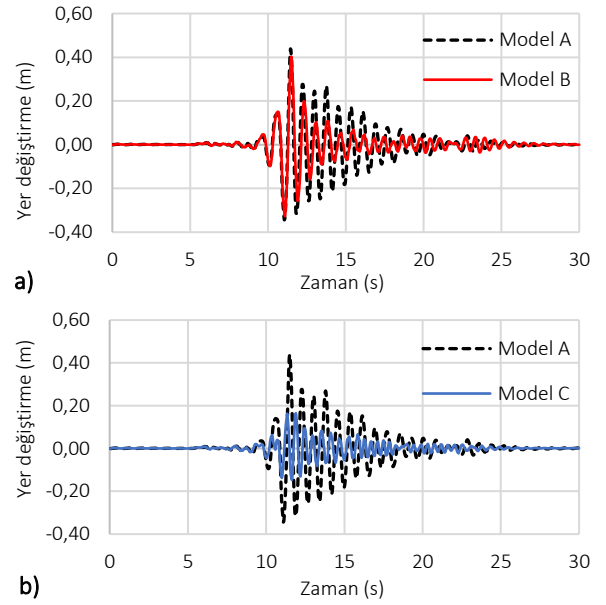
Şekil 12. Model C sıvı sönümleyici çalkantı yüzey şekilleri.

Model C’de su kütlesi petek dış duvarı ve şerefe iç duvarı arasında bir su halkası şeklinde olduğu için deprem salınımlarında hem şerefe duvarlarına hem de petek duvarlarına çarpmaktadır. Bir nevi bölme duvarı veya gözenekli diyafram diyebileceğimiz petek duvarları sıvının sönümleyici etkisini daha belirgin hale getirmektedir. Bu sonuçlar literatür bahsedilen makalelerde elde edilen sonuçlar ile uyumludur [10], [12], [20].

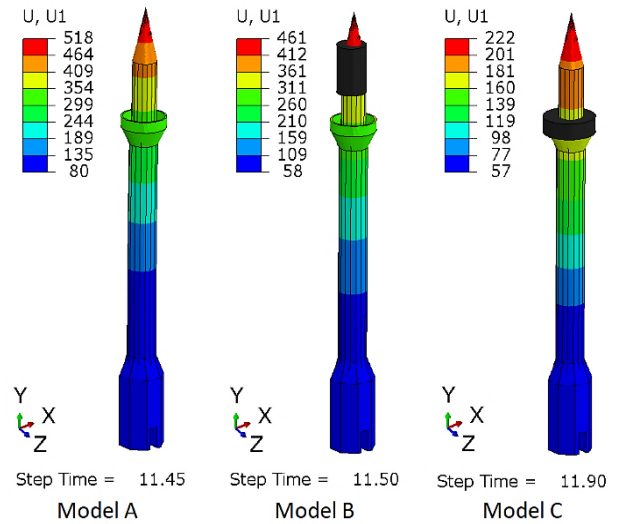
### Yer değiştirmeler

Minare tepesi ile tabanı arasındaki yer değiştirme farkı Model A dayanak alınarak sıvı sönümleyici olan Model B ve Model C ile karşılaştırmalı yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 13.a.b’de gösterilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde Model B’deki sıvı sönümleyicinin etkisi Model C’ye göre sınırlı kalmıştır. Sıvı sönümleyici olmayan Model A’da tepe noktası en büyük yer değiştirme değeri 0.438 m iken Model B’de 0.403 m, Model C’de ise bu değer 0.165 m olarak ölçülmüştür.

Sıvı sönümleyici bulunan her iki model de Model A’ya göre minarenin salınımlarının genliğini grafikte 12s-20s arasında gördüğü üzere azaltmıştır. Her üç modelin en büyük göreceli yer değiştirme kontür diyagramları ise Şekil 14’de verilmiştir. Şekil 13 ve 14 de görüleceği üzere sıvı sönümleyici bulunmayan Model A’ya göre Model B’de kullanılan sıvı sönümleyici yöntemi göreceli yer değiştirmeyi %8, Model C’de kullanılan sıvı sönümleyici yöntemi ise göreceli yer değiştirmeyi %62 oranında azaltmıştır.



Şekil.13. Minare tepe noktası göreceli yer değiştirme-zaman grafikleri karşılaştırması, a) Model A-B, b) Model A-C.

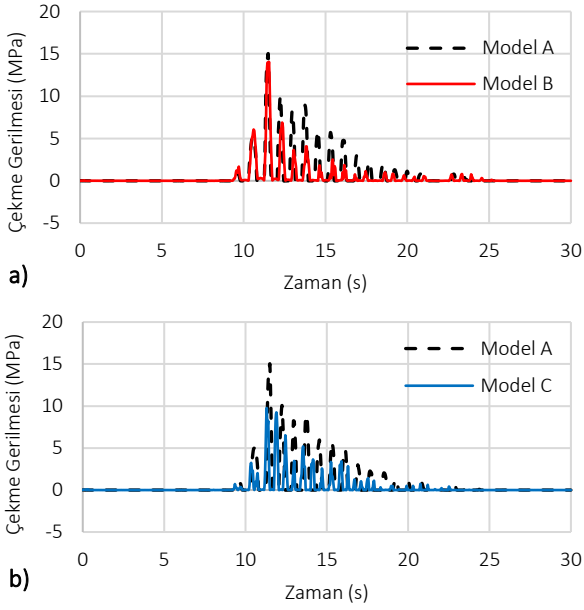


Şekil 14. Göreceli yer değiştirme kontür diyagramları (mm).

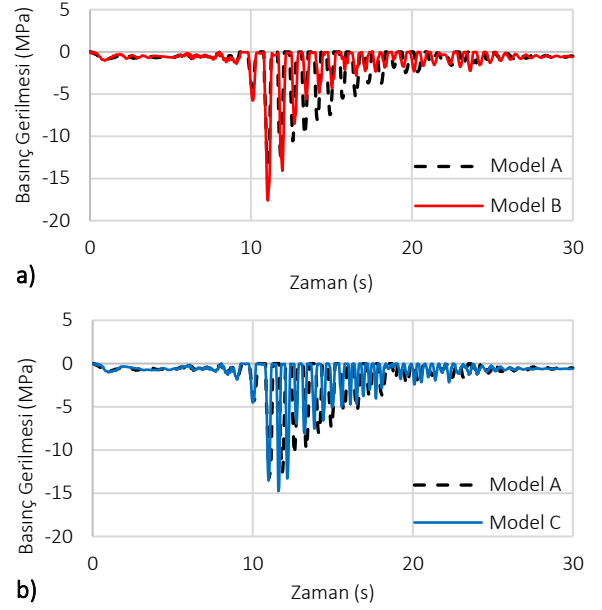
### Gerilmeler

Sıvı sönümleyicilerin ağırlıkları Model B’de yaklaşık 10 kN, Model C’de ise 22 kN’dur. Buda minare üzerinde en büyük asal çekme gerilmelerin de azalış ve en büyük asal basınç gerilmelerinde artışa neden olacağı öngörülmektedir. Şekil 15’te verilen en büyük asal çekme gerilmeleri-zaman grafikleri ( $S_{max}$ ) ve Şekil 16’da en büyük asal çekme gerilmeleri kontür diyagramları verilmiştir. Şekil 15 ve Şekil 16’da görüleceği üzere Model A’ya göre karşılaştırıldığında, Model B’de en büyük asal çekme gerilmeleri %6.48, Model C’de ise %34.76 oranında azaldığı gözlenmiştir. Model C’de sıvı ağırlığının yanı sıra sönümleme etkisiyle göreceli yer değiştirmedeki azalış asal çekme gerilmelerini daha fazla düşürmüştür. Şekil 17’de en büyük asal basınç gerilmeleri-zaman grafikleri ( $S_{min}$ ) ve Şekil 18’de en büyük asal basınç gerilmelerinin kontür diyagramları verilmiştir.

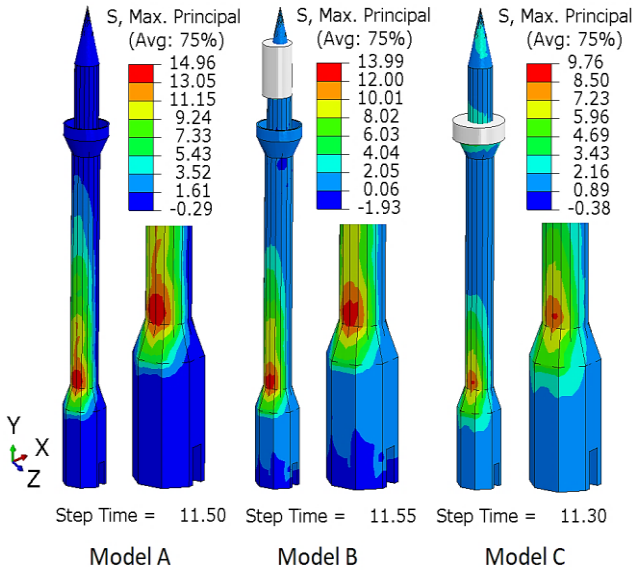




Şekil 15. En büyük asal çekme gerilmeleri-zaman grafikleri karşılaştırması ( $S_{max}$ ), a) Model A-B, b) Model A-C.



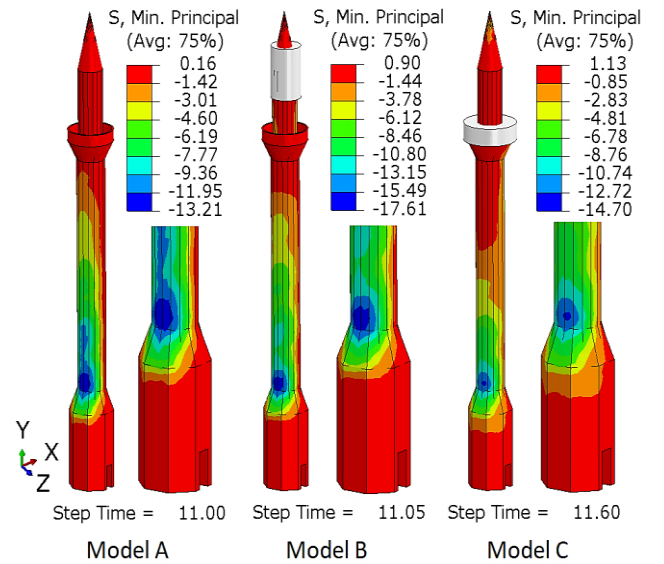
Şekil 17. En büyük asal basınç gerilmeleri-zaman grafikleri karşılaştırması ( $S_{min}$ ), a) Model A-B, b) Model A-C.



Şekil 16. En büyük asal çekme gerilmeleri kontür diyagramları (MPa).

Model A'ya göre karşılaştırıldığında, Model B'de en büyük asal basınç gerilmeleri %33.3, Model C'de ise %11.27 oranında arttığı gözlenmiştir. Model B'de sıvı sönmüleyici minarenin yer değiştirmesini %8 azaltsa dahi (bk. Şekil 13.) sönmüleyici sıvı ağırlığı Model A'ya göre basınç gerilmelerinin en fazla çıkmasına sebep olmuştur.

Model C'deki sönmüleyici sıvı daha ağır olmasına rağmen yer değiştirmeleri %62 oranında azalttığı için basınç gerilmelerini Model B'den daha az olmuştur. Sıvı sönmüleyici ilave ağırlığı olmayan Model A'da ise en büyük asal basınç gerilmeleri en az olmuştur.



Şekil 18. En büyük asal basınç gerilmeleri kontür diyagramları (MPa).

Gerilmeler genellikle minarelerin depremden en fazla hasar aldığı kaide üstündeki geçiş bölgesi ile gövdenin alt kısmındaki bölgede yoğunlaşmaktadır. Literatür taramasında görülen yıkımlar bu bölgede olmuştur [2], [5].

## Sonuçlar

Bu çalışmada Manisa Hafsa Sultan Camii minaresinin mevcut hali (Model A), petek kısmında (Model B) ve şerefe kısmında (Model C) yapısal değişikliğe gitmeden uygulanabilecek sıvı sönmüleyici modelleri ile sismik tepkilerinin araştırılması amacıyla doğrusal dinamik analizi yapılmıştır. Sıvı sönmüleyicinin etkisini görebilmek için 0.8g PGA değerine sahip 1999 Düzce D-B deprem kaydı kullanılmıştır. Kalibre edilmiş malzeme özellikleri ve

ölçüleri Hökelekli, (2015)'den alınan minarede akışkan olarak su kullanılmıştır [13]. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Birleşik Eularian-Lagrangian (CEL) yaklaşımı ile su çalkantısının deprem tepkisini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Modelin analizi ile deprem anında çalkalanma ve olası su taşması kolaylıkla gözlemlenebilmiştir.
- Sıvı sönümleyici uygulamasında tüm su kütesini serbest ve bütün hareket edecek şekilde (Model B) modellemek yerine gözenekli veya çıtalı bölmeler şeklinde su kütesinin salınımını kısıtlayacak modellemeler (Model C) daha etkili olmuştur.
- Petekte uygulanabilecek sıvı sönümleyicide su kütesinde çalkantı yüksekliği su seviyesinin yaklaşık üç katına çıkarken şerefede uygulanabilecek sıvı sönümleyicide bir katına çıkmıştır.
- Akışkan-yapı etkileşimi dikkate alındığında sıvı sönümleyici olan modellerde göreceli yer değiştirmelerde azalma gözlemlenmiştir.
- Sıvının sönümleyici etkisi ve sıvı ağırlığı en büyük asal çekme gerilmelerinde ( $S_{max}$ ) azalmaya sebep olurken en büyük asal basınç gerilmelerinde ( $S_{min}$ ) artışa sebep olmuştur.
- Tüm modellerde en büyük asal basınç gerilme dağılımları ve en büyük asal çekme gerilme dağılımları minarelerin genellikle depremlerde hasar aldığı kaide ile gövde arasındaki bir alanda yoğunlaşmıştır.
- Model A'ya göre Model B'de kullanılan sıvı sönümleyici yöntemi göreceli yer değiştirmeyi %8, Model C'de ise %62 oranında azaltmıştır.
- Model A'ya göre Model B'de en büyük asal çekme gerilmeleri %6.48, Model C'de ise %34.76 oranında azaldığı gözlenmiştir.
- Model A'ya göre Model B'de en büyük asal basınç gerilmeleri %33.3, Model C'de ise %11.27 oranında arttığı gözlenmiştir.

Bu konuda yapılabilecek farklı çalışmalar ise aşağıda listelenmiştir.

- Tarihi minarelerin boyutları her yapıya özeldir. Bu nedenle sismik performansın artırılmasında en uygun su yüksekliği ve hava payının belirlenmesi konusu araştırılabilir.
- İki veya üç şerefeli tarihi minareler veya betonarme minarelerin sıvı sönümleyici ile deprem tepkilerinin iyileştirilmesi incelenebilir.

Analizler, minarenin sıvı sönümleyici ile iyileştirilmesinin depreme dayanıklılığı önemli ölçüde artırdığını gösterdi. Bu nedenle tarihi minarelerin gelecek nesillere aktarılması için restorasyon veya güçlendirme seçeneklerinin yanı sıra akışkan-yapı etkileşiminin de dikkate alınması önerilmektedir.

## Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Kaynaklar

- [1] M. H. Baştürk, "Bursa Tarihi Yığma Minarelerin Dinamik Davranışların Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2013.
- [2] A. Doğangün, R. Acar, H. Sezen and R. Livaoğlu, "Investigation of dynamic response of masonry minaret structures," *Bull Earthquake Engineering*, vol. 6, pp. 505–517, April 2008.
- [3] Devleti Aliyye-i, "Erzurum Muratpaşa Camii", Accessed on: 16/01/2024, <https://www.devletialiyeyi.com/Zaman-Tuneli/murat-pasa-camii>
- [4] Tarih Gezisi, "Ordu Aziziye Yalı Camii", Accessed on: 16/01/2024, <https://tarihgezisi.com/camiler/aziziye-yali-camii-ordu/>
- [5] Anadolu Ajansı, "Gündem Asrın Felaketi", Accessed on: 16/01/2024, <https://www.aa.com.tr/tr/asrin-felaketi/elbistandaki-tarihi-atik-camisinin-minaresi-artci-depremler-sonrasinda-yikildi/2853966>
- [6] J. S. Love, T. C. Haskett, "Nonlinear modelling of tuned sloshing dampers with large internal obstructions: Damping and frequency effects," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 79, pp. 1-13, May 2018.
- [7] A. Vázquez-Greciano, A. A. López, N. Buratti and J. M. O. Herrera, "Magnetic Fields to Enhance Tuned Liquid Damper Performance for Vibration Control: A Review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 31, pp. 25–45, August 2024.
- [8] A. Kareem, T. Kijewski, Y. Tamura, "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications," *Wind and Structures*, vol. 2, no. 3, pp. 201-251, 1999.
- [9] M. H. Alkmin, M. V. G. de Moraes and A. T. Fabro "Vibration Reduction of Wind Turbines Using Tuned Liquid Column Damper Using Stochastic Analysis," *MOVIC2016 & RASD2016 Journal of Physics: Conference Series*, Southampton, United Kingdom, 3-6 July 2016, pp. 1-11
- [10] J. Hamelin, "The Effect of Screen Geometry on Performance of a Tuned Liquid Damper," Master Thesis, McMaster University, Hamilton, Canadian, 2007.
- [11] M. A. Türk, "Seismic Response Analysis of Masonry Minaret and Possible Strengthening by Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Materials," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, pp. 1-14, Jun 2013.
- [12] T. Novo, H. Varum, F. Teixeira-Dias, H. Rodrigues, S. M. Falcao, C. A. Campos and L. Guerreiro, "Tuned liquid dampers simulation for earthquake response control of buildings," *Bull Earthquake Engineering*, vol. 12, pp. 1007–1024, October 2014.
- [13] E. Hökelekli, "Manisa Hafsa Sultan Camii Deprem Davranışının Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile

- İncelenmesi,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 2015.
- [14] G. R. Patil and K. D. Singh, “Evaluation of Sloped Bottom Tuned Liquid Damper for Reduction of Seismic Response of Tall Buildings,” *Journal of the Intuition of Engineers (India): Ser. A*, vol. 97, pp. 385–394, November 2016.
- [15] P. K. Pekgökgöz and G. Taş, “Ayarlı kütle sönümleyici yerleştirilmiş betonarme yüksek minarelerin dinamik analizi,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 32, no. 1, pp. 265–282, Jun 2017.
- [16] M. Günaydın, “Tarihi Bir Yığma Minarenin Onarım Sonrasındaki Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi,” *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 2, pp. 381–395, Mayıs 2018.
- [17] A. Hemmatia, E. Oterkusa and M. Khorasanchib “Vibration suppression of offshore wind turbine foundations using tuned liquid column dampers and tuned mass dampers,” *Ocean Engineering*, vol. 172, pp. 286–295, January 2019.
- [18] Kamgar R, Gholami F, Sanayei HRZ, Heidarzadeh H. “Modified Tuned Liquid Dampers for Seismic Protection of Buildings Considering Soil–Structure Interaction Effects,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44, 339–354, 2020.
- [19] M. Vafaei, A. Pabarja and Alih SC, “An Innovative Tuned Liquid Damper for Vibration Mitigation of Structures,” *International Journal of Civil Engineering*, vol. 19, pp. 1071–1090, April 2021.
- [20] T. Konar and A. Ghosh, “A review on various configurations of the passive tuned liquid damper,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 29, no. 9, 1945–1980, March 2022.
- [21] X. Hu, Z. Zhao, K. Yang, W. Liao and Q. Chen, “Novel triple friction pendulum-tuned liquid damper for the wind-induced vibration control of airport control towers,” *Thin-Walled Structures*, vol. 182, pp. 1–13, January 2023.
- [22] A. Skrzat, “Application of Coupled Eulerian-Lagrangian Approach In Metal Forming Simulations,” *Scientific Letters of Rzeszow University of Technology-Mechanics*, vol. 84, no. 4, pp. 25–35, April 2012.
- [23] D. J. Benson and S. Okazawa, “Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 193, no. 39–41, pp. 4277–4298, October 2004.
- [24] D.J. Benson, “A mixture theory for contact in multi-material Eulerian formulations,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 140, no 1–2, pp. 59–86, January 1997.
- [25] K. J. Bathe, “Finite element procedures.” 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1996.
- [26] Belytschko T, Liu KW, Moran B, Elkhodary KI, “Non-linear Finite Element Analysis for continua and structures,” 2<sup>nd</sup> ed. New York, USA, Spi, 2014.
- [27] K. S. Al-Athel and M. S. Gadala, “Eulerian volume of solid (VOS) approach in solid mechanics and metal forming,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 200, issue 25–28, pp: 2145–2159, June 2011.
- [28] Türkiye Kültür Portalı, “Manisa’da Gezilecek yerler”, Accessed on: 23/01/2024, <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/manisa/gezilecekyer/sultan-camii>
- [29] Manisa Gündem, “Manisa mesir’e hazır peki Sultan Camii”, Accessed on: 11/01/2024, <https://www.manisadagundem.com/gundem/manisa-mesir-e-hazir-peki-sultan-camii-h23444.html>
- [30] H. Nohutcu, E. Hökelekli, E. Ercan, A. Demir and G. Altıntaş, “Collapse mechanism estimation of a historical slender minaret,” *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 64, no. 5, pp. 653–660, October 2017.
- [31] M. E. Yiğit, “Investigation of the Seismic Performance of Historical Masonry Aqueducts with Eulerian-Lagrangian Coupled Analysis”, *International Journal of Architectural Heritage*, pp:1–17, 2024. <https://doi.org/10.1080/15583058.2024.2338441>
- [32] M. A. Uğurlu, S. Erdemli Günaslan, ve A. Karaşin, “Dört Ayaklı Minare’nin modellenmesi ve yapısal analizi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 8, sy. 2, ss. 413–422, Nisan 2017.
- [33] N. Işık ve F. M. Halefoğlu, “Tarihi yapılarda Tahribatsız Yöntemlerle Yapısal Sorunların Tespiti; Diyarbakır Hoca Ahmet (Ayn Minare) Camide Georadar (GPR) Ölçümleri ve Değerlendirilmesi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 12, sy. 5, ss. 829–840, 2021, doi: 10.24012/dumf.1051475.
- [34] S. A. Yıldız, M. E. Yiğit and G. Kaplan, “Glass fibre reinforced concrete rebound optimization,” *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol: 113, no: 2, pp: 203–218, 2017.
- [35] H. Koman, ve H. Nohutcu, “Harşısız yığma duvarlı betonarme çerçevenin nümerik analizi,” *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol: 10, no: 1, ss: 266–275, 2021, DOI: 10.28948/ngumuh.785286
- [36] Abaqus, “Abaqus user’s manual”. <http://130.149.89.49:2080/v2016/books/usb/default.htm> (05.06.2023)
- [37] T.C. İçişleri Bakanlığı, “Afet ve Acil Durum Daire Başkanlığı”, 01/11/2023, <https://depem.afad.gov.tr/content/131>
- [38] E. Hökelekli, “Yapı-Zemin Etkileşiminin Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Davranışına Etkisi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 11, sy. 2, ss. 825–838, 2020, doi: 10.24012/dumf.626894.
- [39] M. Erdik, “Report On 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes”. Department of Earthquake Engineering, Boğaziçi University, İstanbul, Türkiye, Scientific Report, 39, 2000. [Online] Available: <http://www.koeri.boun.edu.tr/depemuh/eqspecials/kocaeli/kocaelireport.pdf>