



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Büyük kütleli tarihi kale ve sur duvarlarının çevresel etkiler altında yapısal dengelerinin analitik yöntemlerle değerlendirilmesi

## *Evaluation of the structural balance of large scale historical castle and city walls under environmental effects by analytical methods*

Yazar(lar) (Author(s)): Rüya KILIÇ DEMİRCAN<sup>1</sup>, Ali İhsan ÜNAY<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-7318-9383

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9510-0375

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kılıç Demircan R. ve Ünay A. İ., “Büyük kütleli tarihi kale ve sur duvarlarının çevresel etkiler altında yapısal dengelerinin analitik yöntemlerle değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 545-555, (2022).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.794802

# Büyük Kütleli Tarihi Kale ve Sur Duvarlarının Çevresel Etkiler Altında Yapısal Dengelerinin Analitik Yöntemlerle Değerlendirilmesi

## Evaluation of the Structural Balance of Large Scale Historical Castle and City Walls under Environmental Effects by Analytical Methods

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Kale tipi tarihi yapıların analitik modellenmesi ve çevresel etkiler altında yapısal analizi (Analytical modeling and structural analysis of historical castle under environmental effects)
- ❖ Tarihi kalelerin malzeme erozyonundan kaynaklanan denge sorunları (Balance problems caused by material loss in historic castles)
- ❖ Kale formu yapıların geometrik kararlılığı ve statik denge değişimi kademeli analizlerle incelenmesi (Investigation of geometric stability and static equilibrium change of castles with progressive analysis)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Malzeme kaybı ile her modelde çekme gerilmesi ve yer değiştirme artış göstermektedir. Uygulanan yöntem mühendislik ilkeleri doğrultusunda doğru sonuçlar vermektedir. / (Tensile stress and displacement in each model tick up with loss of material. The applied method gives correct results in line with engineering principles.)

Hesap Kademesi	$\sigma_{\max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{\min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta_x$ (mm)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_z$ (mm)
CRC 11	2.36	-159.67	0	0	-2.44
CRC 13	35.54	-120.29	-2.01	-2.01	-3.73
CRC 15	52.83	-46.28	-8.36	-8.36	-8.49
HXG 11	1.34	-170.13	0	0	-2.43
HXG 13	17.62	-141.26	0.74	1.28	-3.05
HXG 15	33.45	-87.82	2.15	3.72	-4.43
SQR 11	1.34	-162.53	0	0	-2.39
SQR 13	4.12	-138.36	-1.04	-1.04	-3.07
SQR 15	10.64	-73.86	-4.05	-4.05	-5.47

### Amaç (Aim)

Kale tipi tarihi yapıların çevresel etkiler altında malzeme kaybı ile geometrik kararlılığı ve statik denge değişimi kademeli seri analizlerle incelenmiştir. / (Geometric stability and static equilibrium change of castle-type historical buildings under environmental effects with material loss are examined by progressive series analysis.)

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Dörtgen, dairesel ve altıgen tip burçların analitik modellenmesi SAP 2000 sonlu elemanlar programında yapılmıştır. Yapısal dengesinin kararlılığı malzeme kaybı göz önüne alınarak lineer-statik analizlerle izlenmiştir. / (Analytical modeling of quadrilateral, circular and hexagonal towers was done in SAP 2000 finite element program. The stability of the structural balance was monitored by linear-static analysis, considering the material loss.)

### Özgünlük (Originality)

Tarihi kalelerde malzeme kaybının modellenmesi ve kademeli yıkılma analizleri. / Modeling of material loss in historical castles and progressive collapse analysis.)

### Bulgular (Findings)

Yapılan modelleme ve analizlerde malzeme kaybı ile çekme gerilmesi ve yer değiştirmede artış gözlenmektedir. / (In modeling and analysis, an increase in material loss and tensile stress and displacement is observed.)

### Sonuç (Conclusion)

Artan çekme gerilmeleri sonucunda yapı; literatürden alınan çekme gerilmelerini aşması halinde (7. Metreden sonra) yıkılacağı ön görülmektedir. / (As a result of increased tensile stresses; If it exceeds the tensile stresses taken from the literature (after the 7th meter), it is predicted that it will collapse.)

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Büyük Kütleli Tarihi Kale ve Sur Duvarlarının Çevresel Etkiler Altında Yapısal Dengelerinin Analitik Yöntemlerle Değerlendirilmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Rüya KILIÇ DEMİRCAN<sup>1\*</sup>, Ali İhsan ÜNAY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sinop Üniversitesi Boyabat Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojileri Bölümü, Sinop Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü, Ankara Türkiye

(Geliş/Received : 14.09.2020 ; Kabul/Accepted : 07.10.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 09.10.2020)

## ÖZ

Uygurlukların tanıkları ve medeniyetlerin yansımalarını günümüze taşıyan tarihi yapıların bir kısmı zamanın ve bu zaman diliminde meydana gelen tüm olumsuz etkilere yenik düşmüş, bir kısmı ise günümüze hala ışık tutmaktadır. Asırlara meydan okuyan kale tipi tarihi strüktür örnekleri; genel olarak diğer tip yapılardan farklı formda ve amaçta inşa edilmişlerdir. İnşa edilme nedenleri doğrultusunda diğer yapılardan daha ağır ve daha dayanıklı oldukları bilinmektedir. Bir form ile ifade edilen cami, kilise, köprü gibi tarihi yapılarda genel olarak sütun, giriş, tonoz, kubbe, kemer gibi strüktür elemanları bulunmaktadır. Bu tip yapıların yapısal davranışları hakkında genel olarak yapısal davranış teorileriyle yorum yapmak daha kolaydır. Fakat kale gibi ağır kütleli ve belirli, düzenli bir forma sahip olmayan yapıların, strüktürel davranışları hakkında yorum yaparken mühendisliğin temel prensipleri doğrultusunda sistematik bir şekilde ilerlemek gerekmektedir. Bu makale de amaç; kale tipi ağır kütleli yapıların sonlu elemanlar hesap yöntemiyle çevresel etkiler altında yapısal dengesinin sistematik bir şekilde yorumlanmasıdır. Sonlu elemanlar modellemesinde üç temel burç formu olan dörtgen, altıgen ve dairesel geometriye sahip burç örnekleri SAP 2000 sonlu elemanlar paket programında modellenmiştir. Bu üç formun zamana bağlı malzeme kaybının yapı üzerindeki etkileri, kademeli lineer statik analizlerle incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kale, yapısal denge, sonlu elemanlar, lineer statik analiz, kademeli analiz.

## Evaluation of the Structural Balance of Large Scale Historical Castle and City Walls Under Environmental Effects By Analytical Methods

### ABSTRACT

Some of the historical buildings that bear witnesses of civilizations and repercussion of cultures have defeated by all the negative effects of time and this time period but some of them still shed light on the present day. Examples of castle-type historical structures that challenge centuries were generally built in different forms and purposes than other types of structures. It is known that they are heavier and more durable than other structures for their construction purposes. Historical structures such as mosques, churches and bridges, expressed in a form, have structural elements such as columns, beams, vaults, domes, arches. Generally, it is easier to comment on the structural behavior of these types of structures with structural behavior theories. However, when interpreting about the structural behaviors of buildings with heavy mass, such as castle, not having a specific, regular form, it is necessary to proceed systematically in line with the basic principles of engineering. The purpose of this article is the systematic interpretation of the structural balance of the castle-type heavy mass structures under environmental effects by finite element calculation method. Three basic form in finite element modeling, rectangular, hexagonal and circular geometry samples of tower, are modeled in SAP 2000 finite element package program. The effect of time-dependent material loss of these three forms on the structure was analyzed by gradual linear static analysis.

**Keywords:** Castle/fortless, structural balance, finite element, linear statics analysis, progressive analysis.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarihi yapılarda koruma ve geleceğe taşıma kavramları ulusal ve uluslararası disiplinler arası çalışma alanlarında farkındalık yaratmıştır. Günümüze ulaşan bu yapıların mühendislik, mimarlık, arkeoloji, sanat tarihi gibi temel disiplinlerde ele alınarak sürdürülebilirliğinin sağlanması ve yeniden işlevlendirilmesinin gerekliliği küresel ölçüde

büyük önem taşımaktadır. Öncelikle yapının güncel durumu hakkında bilgi sahibi olmak, mevcut halini korumak ve gerekli olduğu takdirde özgünlüğünü kaybetmemek koşuluyla müdahale etmek gerekir. Koruma, onarım-güçlendirme, yeniden işlevlendirme ve geleceğe aktarma adımları önemli hususlar olup yetkin çerçeveler doğrultusunda ilerlenmelidir.

Tarihi yapılar; inşa edildiği dönemin teknolojilerini, sosyo-ekonomik, dini ve kültürel yapısını yansıtan, zamana karşı çoğunlukla ayakta durmayı başarmış, güçlü

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ruyakilic86@gmail.com

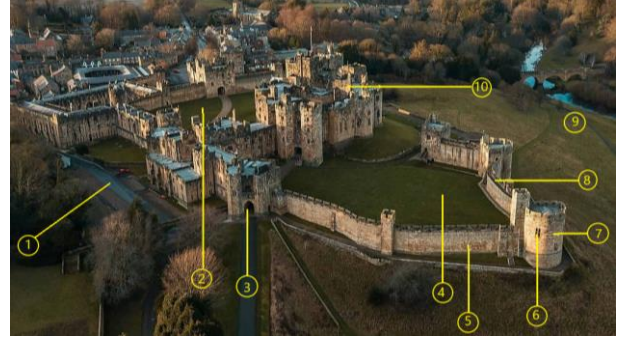
yapılardır. Doğal afetler, gelişen teknolojinin getirmiş olduğu hızlı modernleşme ve doğrudan insan etkisiyle bu tip yapılar hasara uğramakta ve bazıları yıkılmaktadır.

Mevcut tarihi yapının yapısal analizleri ve değerlendirmeleri, yapının güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Doğru analizler ve değerlendirmeler yapının geleceği hakkında yol gösterici olacaktır. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle modelleme teknikleri ve analiz yöntemlerinde de büyük ilerlemeler kaydedilmiştir ve bu doğrultuda tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi ve yapısal analizleri de hız kazanmıştır.

Tarihi bir köprü, kilise, katedral, hamam ya da cami gibi düzenli yapılar; sütun, kemer, tonoz, kubbe ve benzeri nitelikte taşıyıcı elemanlara sahip oldukları için yapısal davranışları hakkında yorum yapmak daha kolaydır. Kale, sur duvarları burç gibi ağır kütleli, malzeme karakteristiği farklı, düzgün bir geometrik bir şekle sahip olmayan tarihi yapıların çevresel etkiler altındaki davranışları hakkında yorum yapmak kolay değildir. Mühendisliğin temel ilkeleri ve gelişen programlarla yapılan sayısal analizlerin beraber değerlendirilmesi doğru yaklaşımların temelini oluşturacaktır.

İnsanoğlu hayatının her döneminde savunma ve güvenlik ihtiyacı duymuştur. Kaleler; düşman saldırılarından korunmak ve dış tehlikelerden sakınmak için, stratejik ve askeri önemi olan yerlerde yapılan, halkın ve askerlerin sığınmasına ve savunmaya elverişli kalın ve yüksek duvarları olan sağlam yapılardır [1-2]. Kaleler mimari anlamı ve özellikleriyle iki kategoride tanımlanabilir. Öncelikle kaleler; askeri savunma amacıyla inşa edildiği, mimari biçim ve fonksiyonlarının diğer mimari eserlerden farklı olarak arazinin konumu ve topografya yapısı, savunma politikası ve stratejisine göre şekillendirilmişlerdir [3]. Bu durumda estetik, geometrik biçim ve günlük yaşam fonksiyonları daha arka planda kalmaktadır. Taşıyıcı sistemin biçimi ve strüktürel dayanımı, kale yapıları için en önemli kriterdir. Ancak popüler kültürde kale ya da şato sözcüğü daha çok orta çağda derebeylerin korunaklı özel konutları da olarak bilinir. Bu tip kalelerde savunma stratejisi yine en ön plana çıksa da, kalenin gösterişi o hanedanın kuvvetini simgelemektedir.

En sık kullanılan kale planları; kuleler (burçlar) ve yüksek kalın sur duvarlarıyla çevrili avludan oluşan plan şeklidir. Kullanılan mimari elemanların strüktürel ve malzeme niteliği, savunma bakımından bölgenin önemine göre farklılık göstermiştir. Bu sebeple her bir kale, ortak mimari elemanlara sahip olsalar dahi, kendi içlerinde özgün bir mimari biçime sahiptirler. Kalelerin mimari terimleri; iç kale, dış kale, avlu, varoş, sur, kule (burç), mazgal, seyirdim yolu, kale bedeni gibi sıralanabilir [2]. Şekil 1. de, İngiltere'nin kuzeydoğu kıyısında Northumberland-Bamburgh taşrasında 420-547 yılları arasında inşa edildiği bilinen Bamburgh Kalesi üzerinde kale terimleri ve strüktür elemanları gösterilmiştir. 1: Hendek, 2: Avlu, 3: Kale kapısı, 4: Dış kale, 5: Sur duvarı, 6: Mazgal, 7: Kule (burç), 8: Seyirdim yolu, 9: Varoş, 10: İç kale olarak ifade edilmiştir.



Şekil 1. Bamburgh Kalesi-İngiltere/Northernburg [4]. (Bamburgh Castle-England/Northernburg)

Kulelerin mimarisi kare, dairesel ve yarım daire, beşgen, altıgen, sekizgen gibi çok kenarlı şekilde inşa edilmektedirler. Şekil 2. (a) da 17. yüzyılda yapılan İngiltere Clevedon da Walton Kalesi sekiz adet daire şeklinde yan kule ve bir adet sekizgen baş kuleden oluşmaktadır. Şekil 2. (b) de ise 1461-1488 yılları arasında inşa edilen İspanya Ampudia Kalesi ise; daire tipi yan kulelerden ve dikdörtgen-kare baş kulelerden oluşan bir kale örneğidir.

Bu mimari şekiller içerisinde en çok kare planlı olan kule tiplerine rastlanmaktadır. Bunun sebebi ise dairesel kulelerin inşasında kullanılan taşların yontulmasının maliyeti arttırmasıdır [5].



Şekil 2. (a) Walton Kalesi-Clevedon/İngiltere (Walton Castle-Clevedon-England) [6]



Şekil 2. (b) Ampudia Kalesi-Palencia/İspanya (Ampudia Castle-Palencia/Espanol) [7]

Kalelerin inşa edildikleri bölgenin topografyası, arazinin durumu ve coğrafi yapısı; bu yapıların mimari bakış açısından yönlendirilmesinde önemli bir etkidir. Farklı duvar yüksekliği ve karmaşık kütle dağılımına sahip olduklarından, bu düzensizlik mühendislik tasarımı ve strüktürel davranışının daha ön plana çıkmasına neden olur.

Diğer tarihi ve anıtsal yapılarla karşılaştırıldığında, kale yapılarının “açıklık geçme” anlamında mimari ve mühendislik teknikleri bakımından strüktürel özellikleri daha basittir. Genellikle büyük kütleleriyle düşey doğrultuda kendi ağırlığının sağladığı denge ile olası diğer yüklere ve kuvvetlere karşı oldukça dayanıklıdır. Diğer anıtsal yapılarda olduğu gibi çeşitli strüktürel elemanların birbirleriyle belli düzen içinde geometrik biçimlerinin belirlenmesi yerine, tek bir masif elemanla ve muhtemelen taşıma kapasitesinin çok daha fazlasına karşılık gelen kesit boyutlarıyla genel geometrik biçimleri oluşmaktadır [8].

Özet olarak, kaleler; öncelikli olarak savunma ve barınma amacıyla yapılmış, kurulduğu coğrafik konumun ve topografyanın zorlu şartlarına uygun bir mimaride, biçimsel ve strüktürel olarak diğer yapılardan farklı özelliktedirler. Yapılış amacına uygun olarak, doğal etkenlere karşı ayakta durabilen, ağır kütleli, düzgün geometriye sahip değildirler. En eski çağlardan günümüze kadar gelebilen bu yapıların, nesillerce ayakta durabilmesi için öncelikli olarak strüktürel davranışları hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Yapının mevcut halinden edinilen bilgiler ışığında, günümüzde teknolojiye gelinen son noktaya; yapı hakkında ileriye dönük gerçekçi yorumlar yapılabilmektedir. Günümüzde disiplinler arası birçok araştırmacı tarihi kaleler hakkında çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalardan bir kısmı aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Farklı disiplinlerde birçok araştırmacı, tarihi kalelerin çevresel etkiler altında yapı dengesinin korunması üzerine, mevcut yapının sonlu elemanlar modellemelerini oluşturarak çalışmalar yapmışlardır. Model üzerinde doğrusal-doğrusal olmayan, dinamik ve statik analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarda; özellikle İtalya da son yıllarda gerçekleşen depremlerin Maniace Kalesi, San Niccolò Kalesi, Finale Emilia Kalesi, Arnara Kalesi ve St.George Kalesi tarihi kalelerinin ve sur duvarları üzerinde nasıl etkili olduğu araştırılmıştır. Yapı modellemeleri ve analizleri sonlu elemanlarda en sık kullanılan ANSYS ve Abaqus paket programlarında uygulanmıştır. Modellemelerde yapının stabil durumu, malzeme ve zemin özellikleri dikkate alınmıştır. Maniace Kalesi'nin matematiksel modellemesi üzerinde uygulanan yapısal analizlerle yapay ve doğal ivmeölçerlerle karşılaştırmalı doğrulama yapmışlardır [9]. San Niccolò Kalesi'nin mevcut hasarlarını ve yapılan restorasyon çalışmalarını değerlendirmek ve gerekli güçlendirme önerileri için analitik modellemeler üzerinde yapısal davranış analizlerini göstermişlerdir [10]. Depremler nedeniyle büyük hasar görmüş olan Finale Emilia Kalesi'nin analitik modeli oluşturarak, hem yapının kısmi

çöküşünün temelindeki nedenleri kavramak hem de sismik yükler altında gelecekteki hasarı önlemek için sismik iyileştirme ile rehabilitasyon müdahaleleri önermek için sonuçları eleştirel olarak karşılaştırılmıştır [11]. Arnara Kalesi'ni yeniden kullanımı için, tarihi kale duvarlarını güçlendirmeyi amaçlayan anti-sismik kavramları içeren tam bir yapı-güçlendirme önerisi vermişlerdir [12]. Frangokastello Kalesi'nin mevcut geometrinin analitik modellenmesi için anıtın tarihi, yapı malzemelerinin kalitesi ve zemin koşulları dikkate alınarak; çatlaksız yapının kendi ağırlığı altında analizini ve dinamik modal analizini yapmışlardır. Ardından, statik ve dinamik yükleme altında yapının sınır durumunu araştırmak için Yunan yönetmeliğine göre tasarım spektrumu için spektral analiz modeli yapmışlardır. Son olarak, incelenen tüm modeller için farklı depremlere karşılık gelen çeşitli geçici dinamik analizler yapmışlar ve yapının kritik alanları tahmin etmişlerdir [13]. St.George Kalesi'nin sismik tepki ve kısmi çökme mekanizmalarını araştırmışlardır. Sonlu elemanlar hesapları Abaqus bilgisayar programıyla, kalenin sismik tepkisi hakkında ek bilgiler sağlayarak farklı sismik yoğunluk seviyeleri için hasar düzenlerini ve en savunmasız kısımları belirlemişlerdir. Sayısal hesap sonuçlarında, köşe kuleleri ve tonozların kalenin en hasarlı unsurları olduğunu göstermişlerdir [14]. San Felice sul Panaro Kalesi ve San Fili Stignano Kalesi'nin matematiksel modelini dijital fotogrametri yöntemleriyle elde ederek simüle etmişlerdir. San Fili Stignano Kalesinin analitik modellemesinde ayırık elemanlar metodunun uygulandığıdır. Sınır şartı olarak eigen-frekans analizi için elastik yaylar tanımlayıp doğrusal olmayan statik itme analizleri doğrultusunda kalenin sismik güvenliği hakkında yorumlar yapılmıştır[15-16]. Özetlenen çalışmalar doğrultusunda; düzgün bir geometriye sahip olmayan kaleler; malzeme özellikleri, çevresel etkiler altındaki yapısal davranışları, yapı-zemin etkileşimleri, modelleme ve sayısal analiz türleri, prototip örnekler geliştirerek analitik modelleme ile karşılaştırma gibi bir çok açıdan tanımlanabilmektedir. Genellikle paket analiz programları kullanılarak yapılan bu araştırmalarda bilgisayar programının izin verdiği ölçüde doğru ve hassas sonuçlar elde edilmektedir. Birçoğu bilime bu alanda büyük katkı sağlayan bu çalışmalar tarihi yapıların korunmasında, güçlendirilmesinde ve gerekli onarımların ön görülmesinde büyük katkı sağlamışlardır. Ancak modelleme ve hesap yöntemleri hazır paket programlarının sınırları içinde yapıldığı için her biri kendine özgü özellikler arz eden yapıların matematiksel modellerinin oluşturulması sırasında çok basit mekanik teorisine bile ters düşecek hatalar ya da ihmaller yapılabilmektedir.

Bu makalede, kale tipi tarihi yapıların çevresel etkiler altında malzeme kaybı ile geometrik kararlılığı ve statik denge değişimi kademeli seri analizlerle incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda en sık rastlanan burç tipi olan dörtgen (kare), dairesel ve altıgen tip burçların analitik modellemesi SAP 2000 sonlu elemanlar programında

yapılmıştır. Yapısal dengesinin kararlılığı malzeme erozyonu göz önüne alınarak lineer-statik analizlerle izlenmiştir.

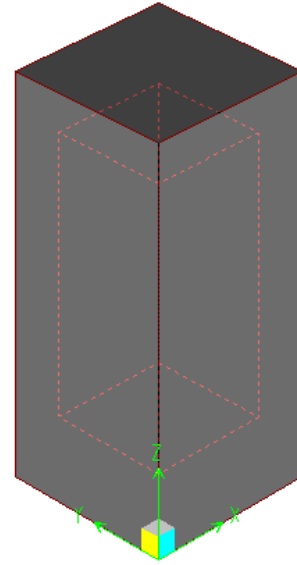
## 2. KALE FORMU PROTOTİP MODELLEME VE STRÜKTÜREL BOZULMA ANALİZLERİ (CASTLE FORM OF PROTOTYPE MODELING AND STRUCTURAL FAILURE ANALISYS)

Kale formuyla inşa edilen yapıların modellenmesi ve yapısal analizlerinde bilgisayar sistemlerinin ve programların hızla gelişmesiyle son yıllarda büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Farklı geometrik biçim ve davranış sergileyen, yığma yapım sistemiyle inşa edilen yapıların strüktürel davranışı fiziğin temel ilkeleri ile belirlenebilir. İyi bir mekanik, yapı bilgisiyile ve bu alandaki deneyimle en karmaşık şekle sahip yapıların bile çeşitli yük ve çevresel etkiler altında gösterdiği tepki ve davranış, yaklaşık olarak saptanabilir. Günümüzde tarihi yapı olarak tanımlanan binaların ve diğer yapıların inşa edildikleri dönemde strüktürel davranışı veya dayanımı da bu şekilde belirlenmektedir.

Kale ve sur duvarlarının inşasındaki ilk amaç; dışarıdan etki edebilecek büyük kuvvetlere karşı koymaktır. Bu nedenden dolayı diğer yapılara göre çok daha büyük kesit özelliklerine daha fazla dayanım gösterebilecek geometrik yapıya sahiptirler. Tarih boyunca kale ve sur duvarlarının çok güçlü mekanik silahlardan dolayı hasar gördüğü, yıkıldığına tanık olunduğu halde binlerce yıl geçmişe rağmen çoğu da hala ayakta durmaktadır. Birçok kale ve sur duvarları da bu etkenler altında yıkılmış veya devrilmiştir. Bunun en önemli nedeni malzeme bozulması ve zemin problemlerinden dolayı ortaya çıkan denge sorunlarıdır. Bu iki faktörün etki ve sonuçlarını sonlu elemanlar hesap yöntemiyle incelemek için farklı geometrik şekle sahip üç tip kale burcunun prototip matematiksel modeli hazırlanmıştır. Bu burçların malzeme kaybı senaryosu ile geometrik kararlılığı ve statik denge değişimi kademeli seri analizlerle incelenmiştir.

Modellemeler SAP 2000 programında SOLID eleman olarak modellenmiştir. SAP 2000 yazılımı, global eksen takımında x, y ve z eksenleri farklı gerilmeleri ifade etmektedir [17].

Bu eksenleri temsilen ifade eden gerilmeler dikdörtgen prizması şeklinde bir model üzerinde Şekil 3. de gösterilmiştir. Global z ekseni yönünde meydana gelen gerilmeler; S-33, x ekseni yönündeki gerilmeler; S-11, y ekseni yönündeki gerilmeler ise; S-22 olarak ifade edilmiştir. S-MAX; çekme kuvvetlerinin neden olduğu bileşke gerilmeleri; S-MIN; basınç kuvvetinin neden olduğu bileşke gerilmelerini tanımlamaktadır. S-MIN ve S-MAX; kendi içlerindeki asal gerilmeleri renk dağılımı ile değerlendirmektedir.

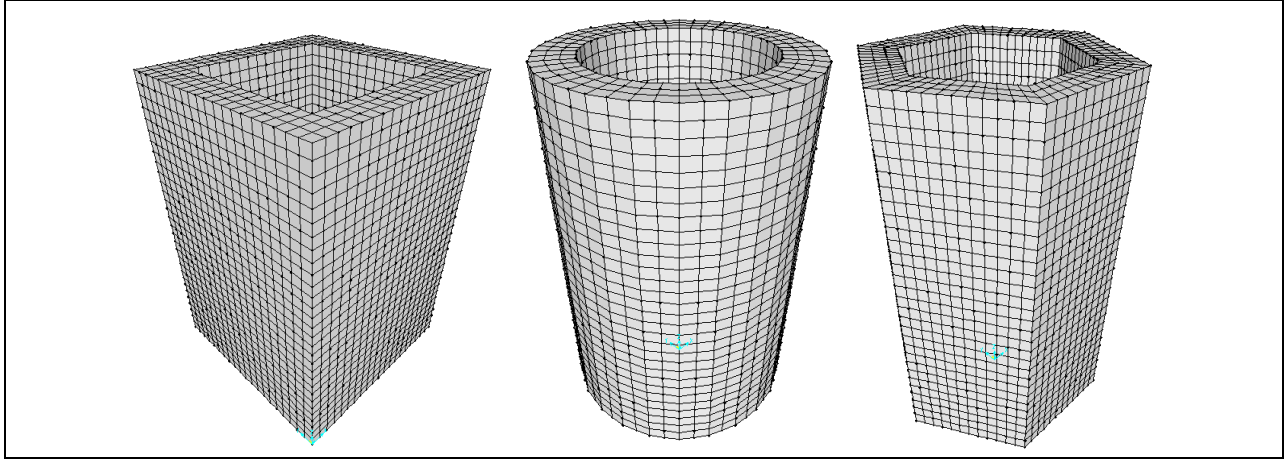


Şekil 3. X-Y-Z global eksen takımının katı model üzerinde tanımlanması (Defining the X-Y-Z global axial plane on the SOLID model)

## 3. KALE VE SURLARIN AŞINMA VE GEOMETRİK BOZULMA SONUCUNDA STRÜKTÜREL KARARLIĞININ KADEMELİ ANALİZLERLE TESPİT EDİLMESİ (DETERMANITION OF THE STRUCTURAL STABILITY OF CASTLE AND CITY WALLS AS A RESULT OF WEAR AND GEOMETRIC DETERIORATION BY PROGRESSIVE ANALYSIS)

Kale burçları ve surları zamanla yavaş yavaş aşınmanın neden olduğu malzeme kaybı ile yapının statik denge ve kararlılığının bozulması sonucunda yıkım ve hasara uğrarlar. Bu süreci gözlemek amacıyla, üç adet temel geometrik formu simgeleyen, örnek teşkil eden (prototip) hesap modelleri hazırlanmıştır. Bu temel formların statik denge ve kararlılıklarındaki değişim her seferinde aşınma ve malzeme kaybını temsil eden geometrik şekil değişiklikleri uygulanarak kademeli hesaplarla incelenmiştir.

Sonuçlar geometrik form ve aşamalı bir şekilde malzeme kaybı sonucunda ortaya çıkan şekil değişimi ile karşılaştırılmıştır. Bu yüzden, hazırlanan bu üç farklı modelin boyutlarının, kütlelerinin ve kesit düzleminde her iki eksen etrafındaki atalet momentlerinin birbirine yakın değerlerde olmasına dikkat edilmiştir. Şekil 4. de gösterildiği gibi, sırasıyla dörtgen (kare) kesit, dairesel kesit ve altıgen kesite sahip modeller tercih edilmiştir.



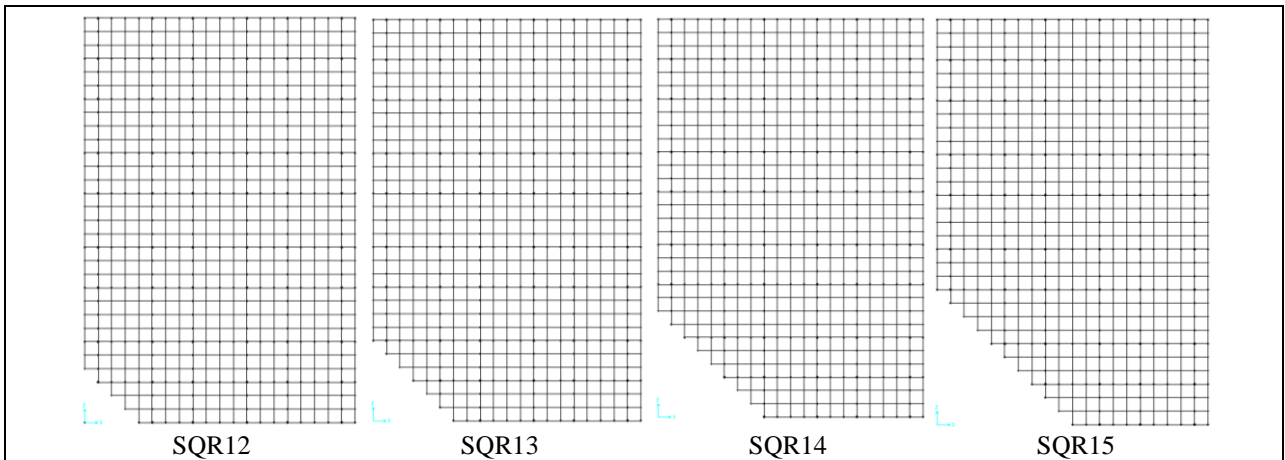
Şekil 4. Kademeli hesaplar için hazırlanan protitip hesap modelleri (Prototype models prepared for progressive analysis)

Kademeli hesaplar, x-y düzlemine göre x ekseninden saat yönünün tersine 225 derece açıya karşılık gelen köşeden (plan görünümüne göre sol alt köşe) sırasıyla 2 m, 3m, 4 m ve 5 m yüksekliğe kadar düşey eksene göre 45 derecelik açıyla, kalenin burç duvarlarını temsil eden SOLID (3 boyutlu katı eleman) elemanlarının hesap modelinden çıkartılması suretiyle yapılmıştır. SQR kod tanımı ile adlandırılan dörtgen kesitli hesap modelinin yüksekliği 15 metre, kesit boyutları 10 x10 m2 şeklindedir. Duvar kalınlığı 1.5 metre, kabul edilen

elastisite modülü ise literatür çalışmalarında kabul edilen  $E=1\ 000\ 000\ \text{kN/m}^2$ 'dir [18-20]. SQR 11 başlangıç hesap modeli olup, 2m, 3m, 4m ve 5m yüksekliğe kadar malzeme kaybı modellemeleri ise sırasıyla SQR 12, SQR 13, SQR 14 ve SQR 15 olarak kodlanmıştır. Yapılan modellemelerin malzeme kaybı (Şekil 5.) ile oluşan ağırlık, düğüm noktası ve SOLID eleman değerleri Çizelge 1. de gösterilmiştir. SQR 11 başlangıç modeli referans alındığında diğer modellerde kademeli azalma gözlenmektedir.

Çizelge 1. Dörtgen kesitli (SQR) modelin analiz verileri (Analysis data of quadrangular (SQR) model)

SQR kodu	Ağırlık (kN)	Ağırlık Azalma Oranı (%)	Düğüm Noktası	SOLID Eleman
SQR 11	16830	-	8432	6120
SQR 12	16775	%0.3	8413	6100
SQR 13	16676	%0.9	8375	6064
SQR 14	16511	%1.89	8307	6004
SQR 15	16280	%3.26	8207	5920



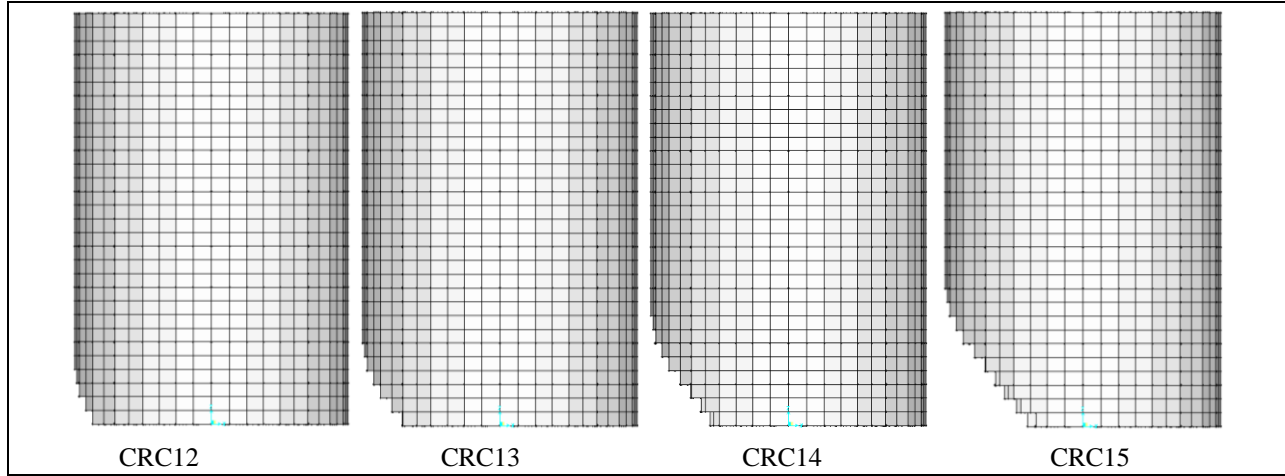
Şekil 5. Dörtgen kesitli (SQR) hesap modeli serisi (Analytical model series of quadrangular section (SQR))

CRC kod tanımı ile adlandırılan dairesel kesitli hesap modelinin yüksekliği 15 metre, çapı 10 metre, duvar kalınlığı ise 1.5 metredir. Kabul edilen elastisite modülü  $E=1\ 000\ 000\ \text{kN/m}^2$ 'dir. CRC 11 başlangıç hesap modeli olup, 2m, 3m, 4m ve 5 m yüksekliğe kadar malzeme kaybı modellemeleri ise sırasıyla CRC 12, CRC 13, CRC

14 ve CRC 15 olarak kodlanmıştır. Yapılan modellemelerin malzeme kaybı (Şekil 6.) ile oluşan ağırlık, düğüm noktası ve SOLID eleman değerleri Çizelge 2. de gösterilmiştir. CRC 11 başlangıç modeli referans alındığında diğer modellerde kademeli azalma gözlenmektedir.

Çizelge 2. Dairesel kesitli (CRC) Modelin Analiz Verileri (Analisis data of circular (CRC) model)

CRC kodu	Ağırlık (kN)	Ağırlık Azalma Oranı (%)	Düğüm Noktası	SOLID Eleman
CRC 11	13067	-	5953	4320
CRC 12	12948	%0.9	5920	4282
CRC 13	12782	%2.18	5860	4228
CRC 14	12543	%4.01	5768	4150
CRC 15	12228	%6.42	5648	4047



Şekil 6. Dairesel kesitli (CRC) hesap modeli serisi (Analytical model series of circular section (CRC))

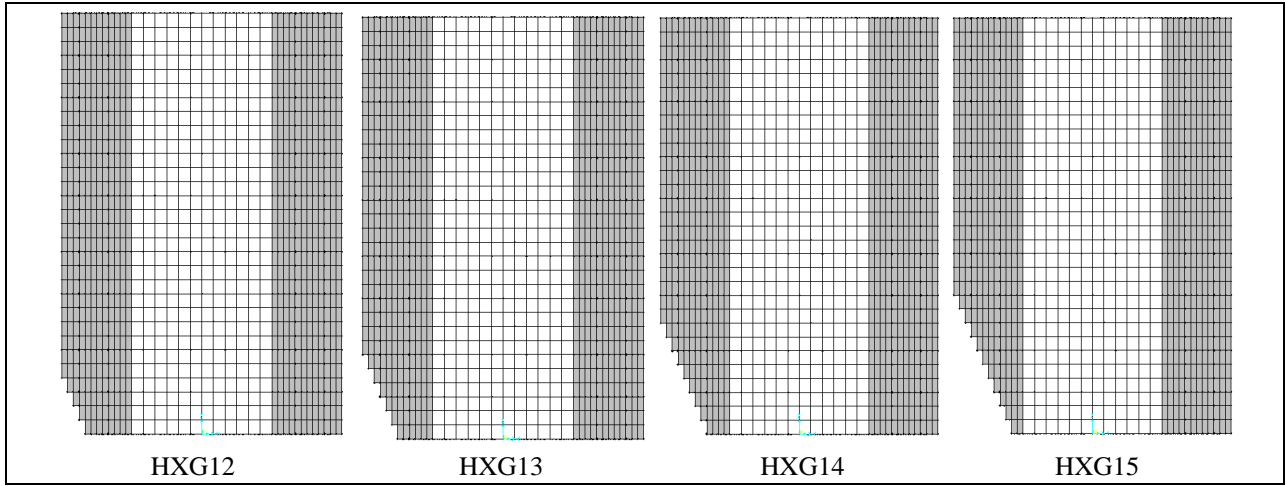
HXG kod tanımı ile adlandırılan altgen kesitli hesap modelinin yüksekliği 15 m, en geniş kesit boyutu 10 metre en dar kesit boyutu 8.66 metredir. Duvar kalınlığı 1.5 metre, kabul edilen Elastisite modülü ise  $E=1\ 000\ 000\ \text{kN/m}^2$ 'dir. HXG 11 başlangıç hesap modeli olup, 2m, 3m, 4m ve 5 m yüksekliğe kadar malzeme kaybı modellemeleri ise sırasıyla HXG 12, HXG 13, HXG 14

ve HXG 15 olarak kodlanmıştır. Yapılan modellemelerin malzeme kaybı (Şekil 7.) ile oluşan ağırlık, düğüm noktası ve SOLID eleman değerleri Çizelge 3. de gösterilmiştir. HXG 11 başlangıç modeli referans alındığında diğer modellerde kademeli azalma gözlenmektedir.

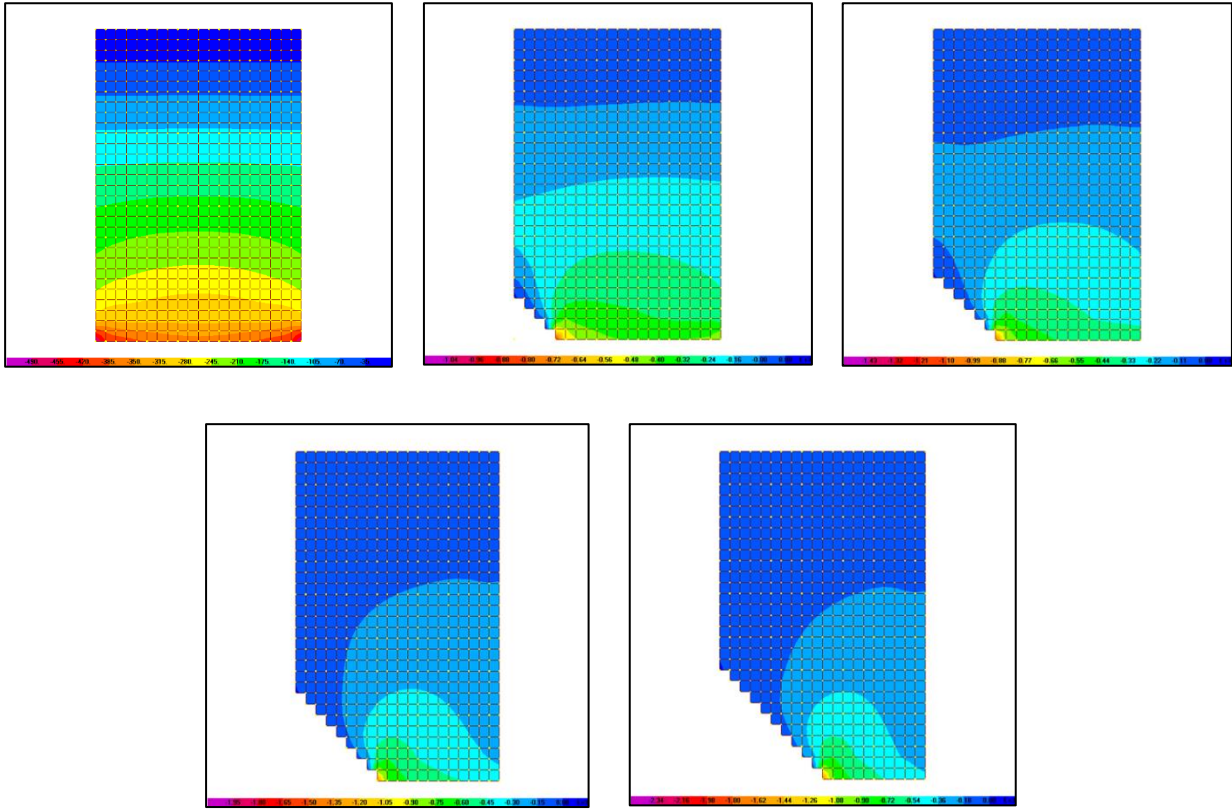
Çizelge 3. Altgen kesitli (HXG) Modelin Analiz Verileri (Analisis data of hexagonal (HXG) model)

HXG kodu	Ağırlık (kN)	Ağırlık Azalma Oranı (%)	Düğüm Noktası	SOLID Eleman
HXG 11	10931	-	8929	6480
HXG 12	10864	%0.61	8896	6442
HXG 13	10772	%1.45	8836	6388
HXG 14	10639	%2.67	8744	6310
HXG 15	10465	%4.26	8620	6208

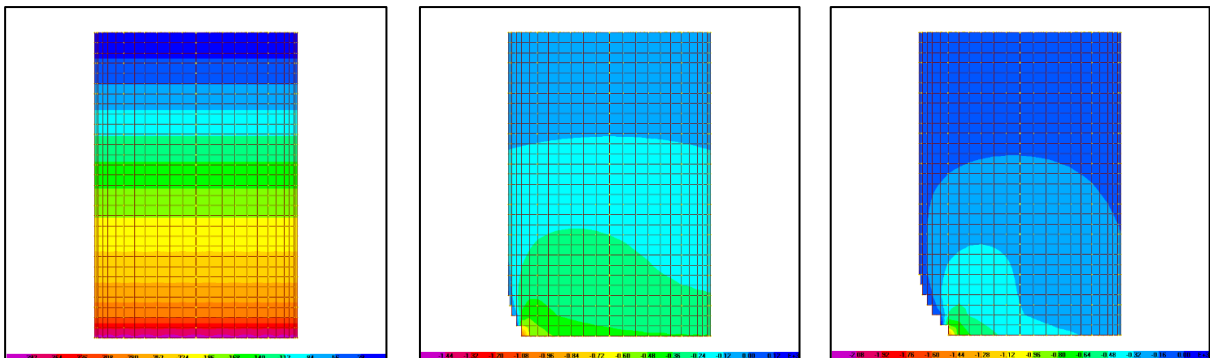


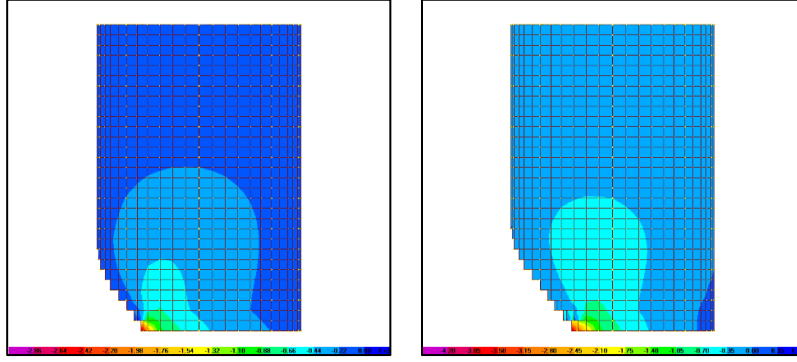


Şekil 7. Altıgen kesitli (HXG) hesap modeli serisi (Analytical model series of hexagonal section (HXG))

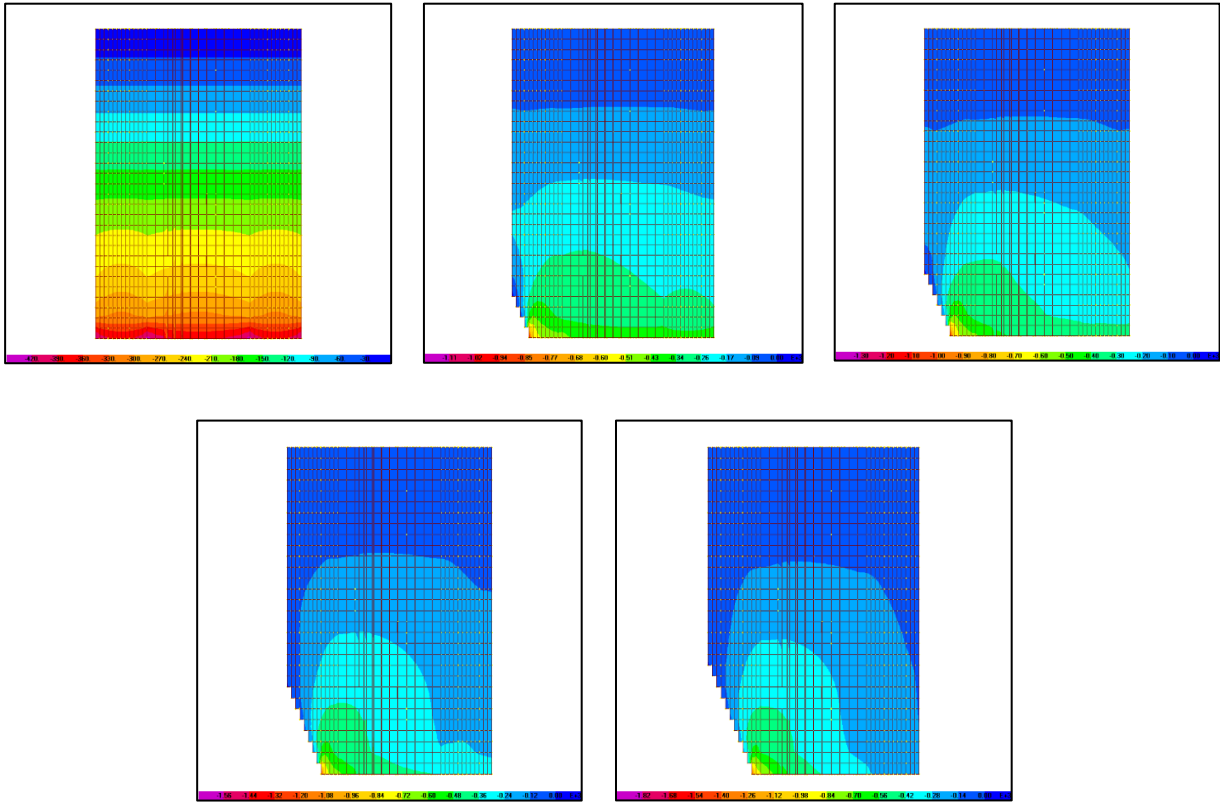


Şekil 8. Dörtgen kesitli (SQR) hesap modellerinin düşey yöndeki gerilme dağılımı (Stress distribution in vertical direction of quadrilateral (SQR) analytical models)





Şekil 9. Dairesel kesitli (CRC) hesap modellerinin düşey yöndeki gerilme dağılımı (Stress distribution in vertical direction of circular (CRC) analytical models)



Şekil 10. Altıgen kesitli (HXG) hesap modellerinin düşey yöndeki gerilme dağılımı (Stress distribution in vertical direction of hexagonal (HXG) analytical models)

Kademeli hesap serisi ilk olarak dörtgen kesitli hesap modelleri (SQR) ile yapılmıştır. Şekil 8. de görüldüğü gibi kendi ağırlığı altında düşey doğrultudaki (z eksenini doğrultusu) çekme ve basınç gerilmelerinin dağılımını genel mekanik teorilerine uygun bir şekilde göstermektedir. Şekil 8. de ilk model SQR 11 hesap modeli, diğerleri sırasıyla SQR 12, SQR 13, SQR 14 ve SQR 15'in gerilme dağılımlarını ifade etmektedir. Lejantlarda gösterilen renk konturları ise sarıdan turuncuya doğru gidildikçe basınç gerilmelerinin arttığını, yeşilden koyu maviye doğru gidildikçe çekme gerilmelerinin arttığını ifade etmektedir. Bu bağlamda modellerin belirlenen yerindeki malzeme kaybı sonucunda meydana gelen şekil değiştirmeye uygun bir biçimde her adımda çekme gerilmesinin arttığı açık bir

şekilde görülmektedir. SQR 11 ilk ana hesap modeli referans alındığında, diğer modellerde uygulanan malzeme kaybı ile çekme gerilmeleri artmakta son model olan SQR 15 de çekme gerilmesi bölgesi en üst düzeye ulaşmıştır. Çekme gerilmelerine karşı zayıf olan kale tipi yapılarda bu tip kayıplar, yapının denge kaybını doğurmaktadır ve yıkılmasına sebep olmaktadır. Aynı kademeli hesaplar dairese kesitli hesap modelleri (CRC) ve altıgen kesitli hesap modelleri (HXG) için tekrarlanmıştır Şekil 9. ve Şekil 10. dan sırasıyla CRC 11 ve HXG 11 referans model alınıp diğer modellerde malzeme kaybı ile artan çekme gerilmelerinin arttığı gözlemlenmekte, benzer davranış ve sonuçlar elde edilmektedir.

Yığma yapı tekniği ile inşa edilmiş tarihi yapıların sayısal analizleri çok fazla kriterin göz önüne alınarak yapılmasını gerektirir. Malzemenin doğrusal elastik olmayan özelliklerinin tanımı, yapının her yerinde aynı örüntü şeklinin olmaması, kesit içinde olası boşlukların bulunması bunlardan sadece birkaç tanesidir. Bu hesapların amacı tarihi kalelerin sur duvarları ve burçlarının hesapları için sistematik bir sayısal modelleme ve hesap yöntemi geliştirmektir. Gerçek yapı hesaplarında her ne kadar çatlama ve kırılma için sınır değerlerinin saptanması çok zor da olsa, yapının dayanımı ve strüktürel performansının belirlenmesi sınır gerilme değerleri için bazı kabuller yapılır. Bu çalışmada her ne kadar kesit alanı ve atalet momentlerine dayalı rijitlikleri benzer kesitlerin sonuçları karşılaştırılmış olsa da, geometrik şekil olarak tamamen farklı olan hesap modellerinin çekme ve basınç kırılma gerilmeleri farklı

yerlerde oluşacaktır. Gerilme dağılımı haritalarından da görüleceği gibi her bir modelin sınır gerilme değerleri bakımından en kritik yeri malzeme kaybının tanımlandığı köşenin üst bölgesinde yoğunlaşmıştır. Bu nedenle sistematik bir karşılaştırma amacıyla her bir modelin malzeme kaybının olduğu köşesinin en üst noktasındaki yer değiştirmeler ve aynı köşenin modelin yüksekliğinin orta yeri olan 7 metre yüksekliğinde seçilen SOLID elemanındaki asal gerilmeler karşılaştırılmıştır. Dörtgen kesitli (SQR), dairesel kesitli (CRC) ve altıgen kesitli (HXG) hesap modellerinin kademeli hesaplarında elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 4., Çizelge 5. ve Çizelge 6. da gösterilmiştir. Çizelgelerde de görüldüğü yer değiştirme ve gerilme değişimleri modellerin beklenen şekil değiştirme ve gerilme dağılımına uygun bir şekilde elde edilmiştir.

**Çizelge 4.** Dikdörtgen kesitli modellerde (düşey yük) gerilme değişimleri (Stress variations of rectangular models (vertical load))

Hesap Kademesi	$\sigma_{\max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{\min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta_x$ (mm)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_z$ (mm)
SQR 11	1.34	-162.53	0	0	-2.39
SQR 12	2.42	-155.30	-0.37	-0.37	-2.61
SQR 13	4.12	-138.36	-1.04	-1.04	-3.07
SQR 14	6.88	-108.45	-2.25	-2.25	-3.99
SQR 15	10.64	-73.86	-4.05	-4.05	-5.47

**Çizelge 5.** Dairesel kesitli modellerde (düşey yük) gerilme değişimleri (Stress variations of circular models (vertical load))

Hesap Kademesi	$\sigma_{\max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{\min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta_x$ (mm)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_z$ (mm)
CRC 11	2.36	-159.67	0	0	-2.44
CRC 12	19.28	-145.28	-0.74	-0.74	-2.89
CRC 13	35.54	-120.29	-2.01	-2.01	-3.73
CRC 14	48.04	-83.98	-4.03	-4.03	-5.38
CRC 15	52.83	-46.28	-8.36	-8.36	-8.49

**Çizelge 6.** Altıgen kesitli modelde (düşey yük) gerilme değişimleri (Stress variations of hexagonal models (vertical load))

Hesap Kademesi	$\sigma_{\max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{\min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta_x$ (mm)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_z$ (mm)
HXG 11	1.34	-170.13	0	0	-2.43
HXG 12	9.79	-139.03	0.33	5.56	-2.68
HXG 13	17.62	-141.26	0.74	1.28	-3.05
HXG 14	25.76	-116.68	1.33	2.31	-3.61
HXG 15	33.45	-87.82	2.15	3.72	-4.43

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMENDATIONS)

Öncelikli amacı savunma olan kale tipi yapılar malzemenin, yüksek basınç dayanımı sayesinde özellikle düşey yüklere karşı dayanıklı olmasına karşın çekme dayanımı açısından oldukça zayıflardır. Yatay yüklerin, malzeme bozulmasının neden olduğu geometrik şekil değiştirmeler ya da zemin oturması gibi etkilere karşı dayanıklı değildir. Bu çalışmada tarihi kaleler, sur duvarları ve burçlarının malzeme kaybı ile gelişen gerilme dağılımlarının izlenmesi için analitik modelleme ve hesap yöntemi geliştirilmiştir. Çekme ve basınç gerilmeleri açısından değerlendirilen üç tip kale formun farklı noktalarda kırılmaları boyut ve atalet farklılıklarından kaynaklanmasına karşın, kendi içlerinde sistematik değerlendirmesi yapılarak renk konturlarıyla açıklanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda önerilen yöntem malzeme erozyonu senaryosunun analitik yansması olarak kabul edilebilir ve geliştirilebilir.

Dörtgen, dairesel ve altıgen formunda modellenen burçlar (SQR 11, CRC 11 ve HXG 11) referans alınarak sırasıyla 2m, 3m, 4m ve 5m yükseklikte malzeme kaybı ile yeniden modellenmiş ve statik-lineer analiz ile gerilme dağılımları yorumlanmıştır. Gerilme dağılımları tüm modellerde 7m yükseklikteki değerler ölçüt alınmıştır. Her bir burç tipi kendi hesap modeli içerisinde değerlendirilmiştir. SQR 11-SQR 15 arasında maksimum çekme gerilmesi değeri %55-% 65 oranında, CRC 11-CRC 15 arasında maksimum çekme gerilmesi % 12-%90 oranında, HXG 11-HXG 15 arasında %13-%77 oranında artış görülmektedir. Yer değiştirme açısından değerlendirme yapıldığında SQR 11-SQR 15 arasında maksimum 4mm (x ve y asal eksenleri doğrultusunda), CRC 11-CRC 15 arasında maksimum 8mm (x ve y asal eksenleri doğrultusunda), HXG 11-HXG 15 arasında maksimum 4mm (x ve y asal eksenleri doğrultusunda) öteleme yapmıştır.

Çizelge 4, 5 ve 6 da görüldüğü üzere tüm modellerin kademeli olarak malzeme kaybı senaryosu ile gerilme ve deplasman değerleri mühendislik ilkeleri çerçevesinde uygun bir şekilde değişmektedir. Bu bağlamda tüm modellemelerde yapı yüksekliğinin 15 m olduğu göz önünde bulundurulduğunda tüm yapılarda yaklaşık 7 m yüksekliğe tekabül eden bölgede oluşacak malzeme kaybı ile yapıda oluşacak çekme gerilmeleri, yapının denge kaybına ve yıkılmasına yol açacaktır.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Ali İhsan ÜNAY:** Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

**Rüya KILIÇ DEMİRCAN:** Sonuçları kontrol etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N. Öztürk, "Ege Bölgesinde Bulunan Müze İşlevli Kıyı Kalelerinin Mimari Özellikleri ve Koruma Sorunlarının Bodrum Kalesi Örneği Üzerinden İncelenmesi," *Yüksek Lisans Tezi*, Restorasyon Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü-Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, 6-20, (2019).
- [2] M. Çıtak, "Kale Kent." *Paradigma Akademi*, 15-24, Çanakkale, (2018).
- [3] S. Özçetin, "Kale Yapılarının Arkeoloji Müzesi Olarak Kullanılması; Bodrum, Çeşme Ve Marmaris Kaleleri Örneği," *Yüksek Lisans Tezi*, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü-Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, ss. 7-34, (2016).
- [4] T. Grebestein, "Bamburgh Castle in United Kingdom." *instagram.com* [https://www.instagram.com/p/Br59nDGHFgM/?utm\\_source=ig\\_web\\_copy\\_link](https://www.instagram.com/p/Br59nDGHFgM/?utm_source=ig_web_copy_link) (erişim:20Nisan,2020)
- [5] A. Akarca, "Şehir ve Savunması." *Türk Tarih Kurumu Basım Evi*, 10-25, Ankara, (1998).
- [6] Wikipedia, "Walton Castle Clevedon,England." *Wikipedia.org* [https://en.wikipedia.org/wiki/Walton\\_Castle](https://en.wikipedia.org/wiki/Walton_Castle) (erişim: 22 Nisan,2020)
- [7] A. Cicero, "Ampudia Castle in Palencia-Spain." *Instagram.com* [https://www.instagram.com/p/Bv8rAIYgR3K/?utm\\_source=ig\\_web\\_copy\\_link](https://www.instagram.com/p/Bv8rAIYgR3K/?utm_source=ig_web_copy_link) (erişim: 22 Nisan,2020)
- [8] S. Reid, "Castles and Tower Houses of the Scottish Clans 1450-1650." *Osprey Publishing Limited*, 4-12, New York-USA, (2006).
- [9] S. Casolo ve C.A. Sanjust, "Seismic analysis and strengthening design of a masonry monument by a rigid body spring model: The "Maniace Castle" of Syracuse." *Engineering Structures*, 31(7): 1447-1459, (2009).
- [10] M. Betti, M. Orlando ve A. Vignoli, "Static behaviour of an Italian Medieval Castle: Damage assessment by numerical modelling." *Computers & Structures*, 89(21-22): 1956-1970, (2011).
- [11] S. Tiberti, M. Acito ve G. Milani, "Comprehensive FE numerical insight into Finale Emilia Castle behavior under 2012 Emilia Romagna seismic sequence: Damage causes and seismic vulnerability mitigation hypothesis." *Engineering Structures*, 117, 397-421, (2016).
- [12] G. Di Gangi ve G. Monti, "Regeneration and Structural Strengthening of the Fortress of Arnara, Latium, Italy." *International Journal of Architectural Heritage*, 10(8): 1041-1054, (2016).
- [13] M.E. Stavroulaki, G.A. Drosopoulos, E. Tavlopoulou, N. Skoutelis ve G.E. Stavroulakis, "Investigation of the structural behaviour of a masonry castle by considering the actual damage." *International Journal of Masonry Research and Innovation*, 3(1): 1-33, (2018).

- [14] M. Valente, ve G. Milani, "Earthquake-induced damage assessment and partial failure mechanisms of an Italian Medieval castle." *Engineering Failure Analysis*, 99, 292–309, (2019).
- [15] G. Castellazzi, A.M. D'Altri, S. de Miranda, ve F. Ubertini, "An Innovative Numerical Modeling Strategy For The Structural Analysis of Historical Monumental Buildings." *Engineering Structures*, 132, 229–248, (2017).
- [16] R.S. Olivito ve S. Porzio, "A New Multi-Control-Point Pushover Methodology for The Seismic Assessment of Historic Masonry Buildings." *Journal of Building Engineering*, 26, 1-15, (2019).
- [17] SAP2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual, Computer and Structures Inc., Berkeley, California, USA, 2000.
- [18] P.B. Lourenço, "Analysis of historical constructions: From thrust-lines to advanced simulations." *Historical Constructions*, 91–116, (2001).
- [19] Oliveira, D.V. de C. "Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading." *Doktora Tezi*, Minho Üniversitesi, Portekiz, 5-67, (2003).
- [20] P.B. Lourenço, "Computations on historic masonry structures." *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3): 301–319, (2002)