



Lefkoşa Selimiye Camii Yapısal Özellikleri ve İyileştirilmiş Deprem Performansı İçin Bir Ön Çalışma

Structural Properties of Nicosia Selimiye Mosque and Preliminary Intervention Recommendations for Improved Seismic Performance

Tuğçe Alan^{1*}, Alper İlki²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Bölümü, alan20@itu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5185-4758>

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ilki@itu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4853-7910>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 14 Mayıs 2024
Revizyon 7 Haziran 2024
Kabul 26 Haziran 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Tarihi Yapılar, Lefkoşa Selimiye Camii, Yapısal Performans Analizi, Sonlu Elemanlar Modeli

Tarihi yapılar, kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılabilmesinde önemli rol oynayan unsurlardır. Bu devamlılığın sağlanabilmesi için tarihi yapıların depremlere rağmen asırlar boyunca ayakta kalabilmesi esas amaçlardan olmuştur. Depremi neden olabileceği yıkımların önüne geçebilmek için öncelikle tarihi yapıların deprem güvenliği belirlenmeli ve gerekmesi halinde deprem performansının iyileştirilmesi için çalışmalar yapılmalıdır. Bu makale kapsamında Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ne ait Lefkoşa ilinde yer alan gotik kilise örneklerinden Selimiye Camii taşıyıcı sistemi yapısal davranışı, makro modelleme yaklaşımı ile tepki spektrumu analizi yapılarak değerlendirilmiştir. Makalede, yapının düşey yükler ve deprem etkileri altındaki performansının iyileştirilmesine yönelik müdahale önerilerine yer verilmiştir. Bu çalışmada geçen modelleme, analiz ve öneriler, sözkonusu yapı üzerinde gerçekleştirilmekte olan restorasyon çalışmalarından farklı modelleme, analizler ve müdahalelere dayanmaktadır.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 14 May 2024
Received in revised form 7 June 2024
Accepted 26 June 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Historical buildings, Nicosia Selimiye Mosque, Structural Performance Analysis, Finite Element Modeling,

Historical buildings play a crucial role in transferring cultural heritage to future generations. Ensuring the continuity of this heritage has been one of the primary goals, particularly in enabling historical structures to withstand earthquakes for centuries. To prevent earthquake damage, it is essential to first assess the seismic safety of historical buildings and then conduct interventions to improve their seismic performance when necessary. Within the scope of this article, the structural behavior of the Selimiye Mosque, an example of Gothic churches located in the city of Nicosia in the Turkish Republic of Northern Cyprus, was evaluated through response spectrum analysis, for which macro modeling approach was implemented. The article also presents intervention proposals aimed at enhancing the performance of the structure under vertical loads and seismic effects. Macro modeling, analysis, and recommendations presented are limited to the scope of thesis and article research, while the ongoing restoration efforts on the structure rely upon distinct modeling, analyses, and interventions.

Doi: 10.24012/dumf.1483819

* Sorumlu Yazar

Giriş

Geçmişten günümüze tarihi yapıları en çok etkileyen, geri dönüşü çok zor olan, büyük ve kalıcı hasarlar veren faktör deprem olmuştur. Depremi önüne geçebilmek için öncelikle tarihi yapıların deprem güvenliği belirlenmeli ve gerekmesi halinde deprem performansının iyileştirilmesi için çalışmalar yapılmalıdır. Bunun için tarihi yapıların mevcut taşıyıcı sistem özelliklerinin gerçekçi bir biçimde belirlenmesi ve sistemin deprem performansının artırılması için uygulanabilir çözümler geliştirilmesi gerekmektedir [9].

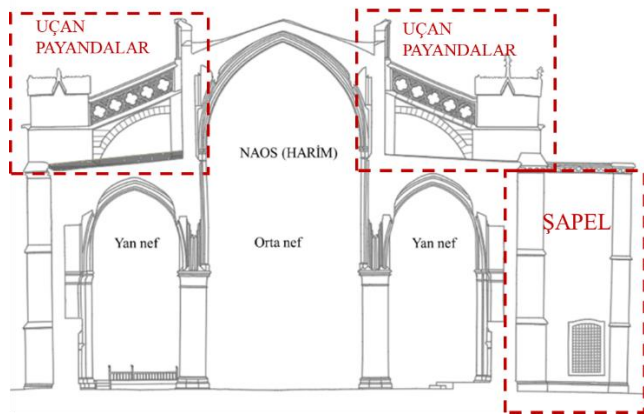
Bu çalışma kapsamında Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ne ait Lefkoşa ilinde yer alan Selimiye Camii taşıyıcı sisteminin yapı mühendisliği açısından değerlendirilmesi ele alınmıştır. Yapıda bulunan tüm elemanlar için analiz ve tahkikler yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Çalışma kapsamında, yapının düşey yükler ve deprem etkileri altındaki performansının iyileştirilmesine yönelik müdahale önerilerine yer verilmiştir. Tarihi yapıların korunmasına yönelik temel ilkeler gereği önerilen müdahaleler olabildiğince sınırlı düzeyde tutulmuştur.

Modelleme, analiz ve öneriler sadece tez ve makale çalışması kapsamında yapılmış olup, yapı üzerinde gerçekleştirilmekte olan restorasyon çalışmaları ile ilgisi bulunmamaktadır.

Lefkoşa Selimiye Camii

Dünya mimari mirasının Gotik örneklerinden olan yapı 1209-1326 yılları arasında bir Katolik kilisesi olarak inşa edilmiştir. Lüzinyanlar Döneminde inşa edilen St. Sophia Katedrali'nin yapıyla dini bir merkez olarak oluşmaya başlamış ve sonraki tarihi dönemlere ait çevresel gelişimi tamamlanarak Lefkoşa'nın önemli bir tarihi doku parçası olmuştur [18]. Yapının 1431 yılında meydana gelen deprem sonrası batıdaki üst bölümünün yıkıldığı ve 1432'de hasarın tamir olması için restorasyon geçirdiği düşünülmektedir [1]. Güney yan nefin orta kısmından taşacak şekilde inşa edilen şapel bölümü ve orta nef duvarlarını destekler şekilde konumlanan kesme taş uçan payandaların yapıya sonradan, apsisteki uçan payandaların ise 14. Yüzyılın ikinci yarısında eklendiği bilinmektedir, Şekil 1 [2].



Şekil 1. Yapıya sonradan eklenen kısımlar- kesit.

Ayrıca 1547'de yapı başka bir depremle zarar görmüş, uzun süre ihmal edilmiş ve 1565'te genel bir restorasyon yapılmıştır [2]. Katedral, Osmanlı döneminde katedral girişinin iki yanındaki bitirilememiş olan çan kulelerinin

üzerine, yaklaşık 46 metre yüksekliğinde minareler, mihrap ve minber eklenerek camiye çevrilmiştir. Osmanlı döneminde birçok kez restore edilmiş olan yapı, özellikle 16.yy ve 18.yy'da yaşanan depremlerden çok zarar gördüğünden, kapsamlı yapısal çalışmalar yapılmış ve duvarların desteklenmesi için güneyine kemerli uçan payandalar ile iki tane fil ayağı inşa edilmiştir [3,4]. 1571 yılından sonra başlayan Osmanlı hükümdarlığı ile, İslam dinine uygunluğu açısından kulelerin minareye çevrilmesi gibi yapısal değişikliklere uğramıştır [20]. 1741 yıllarında olan şiddetli bir depremde caminin minaresinin hasar aldığı bilinmektedir. Bunun üzerine kuzey minarenin ana binadan ayrılması nedeniyle yıkılma tehlikesi geçirdiği düşünülerek 1902'de yıkılarak tekrar inşa edilme kararı alınmış, 1922'de bu karar gerçekleştirilmiştir [1]. 1968-1974 yılları arasında UNESCO uzmanları Profesör P. Gazzola ve Dr. C. Musso'nun yönetiminde kapsamlı şekilde yapısal restorasyon yapılmıştır (Şekil 2) [5,19]. Bu restorasyonda yapının güney kısmında çıkıntı oluşturan iki şapel bölümü inşa edilmiştir. Restorasyonda, dönemin restorasyonlarında yaygın olarak kullanılan çimento harcı yerine, ilk kez yapısal anlamda katkı sağlayacak bir tamir harcı türevi kullanılmıştır [19]. 1986 yılında ise Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti döneminde Vakıflar İdaresi'ne devredilen Selimiye Camii'nin, zaman zaman gereken bakım ve onarımları, Vakıflar tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapının günümüzdeki hali Şekil 3'te verilmiştir.



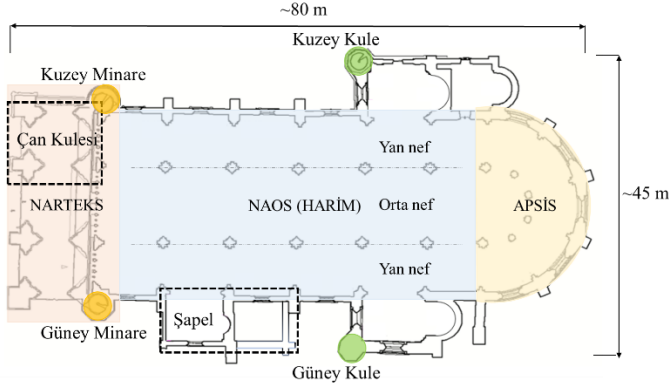
Şekil 2. 1968-1974 yılları arasında yapılan restorasyon [19].



Şekil 3. Günümüzden bir görünüş.

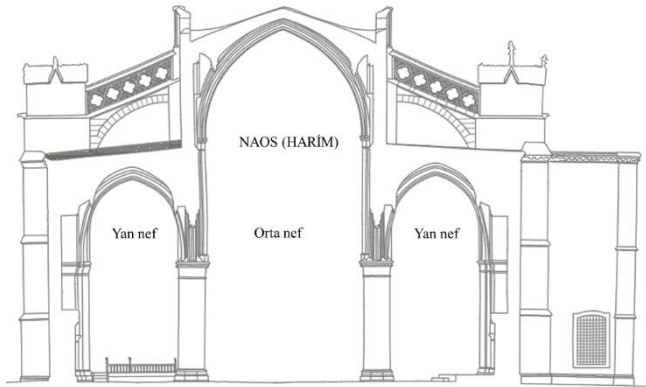
Yapısal Özellikler

Lefkoşa Selimiye Camii'nin ana yapısı narteks, naos (harim) ve apsis bölümlerinden oluşmaktadır. Yapının önemli ve çalışmada adı geçen bölgeleri Şekil 4'te verilmiştir. Yapının plan boyutları x doğrultusunda 80 m, y doğrultusunda 45 m mertebelerindedir.

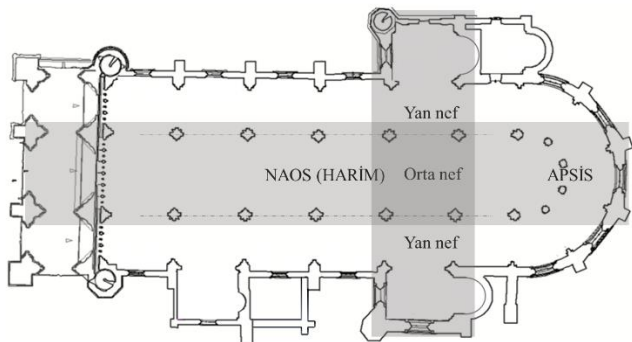


Şekil 4. Yapıya ait ana bölümler- Plan.

Narteks bölümü 8 adet devasa kesme taş fil ayağından oluşmaktadır ve üzerinde bir çan kulesi bulunmaktadır. Harim bölümü iki sıra halinde altışar dairesel kesme taş sütunla üç nef ayrılan, bazilikal planlıdır. Ana (orta) nef yan neflerden daha yüksek ve geniş olarak tasarlanmıştır. Yapıda bulunan kesme taş uçan payandalar orta nef duvarlarını destekler niteliktedir. Orta nefin yüksekliği 22 m, yan neflerin kat yükseklikleri 13.2 m mertebelerindedir (Şekil 5).



Şekil 5. Yapıya ait ana bölümler- Kesit.



Şekil 6. Yapı transeptinin görünüşü.

Yapının aslında transepti olmamasına rağmen, kuzeyinde ve güneyinde bulunan birer şapel yapı formuna dik doğrultu kazandırmış ve transept oluşturmuştur (Şekil 6). Transeptin uç kısımlarından, yapının kuzey ve güneyinde konumlanmış ana yapıya tamamen bağlı durumdaki kulelere ulaşabilmektedir. Kulelerin yükseklikleri 19.6 m olarak ölçülmüştür. Apsis bölümündeki dairesel sütunlar harim bölümündeki dairesel sütunlardan daha küçük kesitlere sahiptir. Orta nefte olduğu gibi apsis kısmında da üst duvarlar uçan payandalarla desteklenmiştir. Uçan payandalarla desteklenen orta nefin üzeri ve yan neflerin üzerine dolgu yapılmıştır, bunun sonucunda yan neflerin üstü düze çok yakın bir forma ulaşmıştır. Caminin kuzeybatı ile güneybatı köşelerinde yapıya bitişik olarak yükselen, kesme taştan yapılmış, tek şerefeli iki minare bulunmaktadır. Minarelerin yükseklikleri 46 m mertebelerindedir. Minareler sekizgen planlı başlamakta olup silindirik gövdelidir. Yapının üst örtüsü, düzgün kesme taş örgü ile inşa edilmiş kaburgalı çapraz tonozlardan oluşmaktadır (Şekil 7). Kaburgalı çapraz tonozların plan boyutları x doğrultusunda 9.5 m, y doğrultusunda 7.5 m mertebelerindedir.

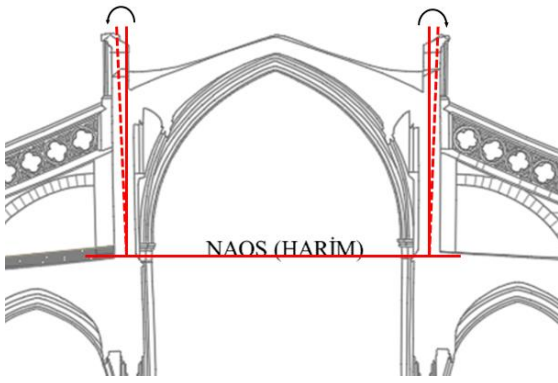


Şekil 7. Yapıya ait kaburgalı çapraz tonozlar.

Tonoz kalınlıkları, yapının yapısal analizler esnasında gerçekçi olarak incelenebilmesi amacıyla üzerinde bulunan mevcut dolgular kaldırıldıktan sonra 35 cm olarak ölçülmüştür. Yapının beden duvarları da diğer yapı bölümleri ile aynı olmak üzere düzgün kesme taş örgüye sahiptir. Beden duvarı kalınlıkları 78 cm ile 165 cm arasında değişmektedir.

Yapının Mevcut Hasarları

Yapının maruz kaldığı depremler ve zemin oturmaları sonucunda taşıyıcı sisteminde bazı hasarların meydana geldiği görülmüştür. Rölöveler aracılığıyla orta nef beden duvarlarının, her iki tarafta olmak üzere dışa doğru yaklaşık 2° döndüğü tespit edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Orta nef beden duvarlarındaki 2 derecelik dönme.

Yapısal analizde gerçeğe uygun sonuçlar alınabilmesi amacıyla mevcut durumdaki orta nef duvarı dönmeleri oluşturulan numerik modele yansıtılmıştır. Haricindeki ileri düzeyde çatlak, ayırık vb deformasyonlar sonlu elemanlar modeline yansıtılmamıştır. Sahada gerçekleştirilen incelemeler esnasında tonozların iç mekan tarafındaki alçı tabakaları sıyrılmış, bunun sonucunda tonozların büyük çoğunluğunda çatlaklar ve yapı genelinde derzlerde malzeme kayıpları gözlenmiştir. Oluşan ayrılmaların 7 cm mertebelerine ulaştığı görülmüştür (Şekil 9).



Şekil 9. Tonozlar- orta nef beden duvarı birleşim bölgesinde oluşan çatlak ve ayrılmalar.

Narteks bölümünün kuzey tarafında bulunan Çan Kulesi pencere boşlukları altındaki duvarlarda 1 cm mertebelerinde düşey çatlaklar ve derz boşlukları bulunmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Çan kulesi pencere altlarında oluşan derz boşlukları ve çatlaklar.

Ayrıca yapının güneybatı tarafında kalan Şapel bölümüne ait y doğrultusundaki duvarların güney duvarıyla birleşme bölgelerinde yapı temelinden başlayarak yapı yüksekliği boyunca aralıklı olarak devam eden derin ayrılmalar meydana gelmiştir. Bu ayrılmaların en geniş olduğu bölgenin uzunluğu yaklaşık 2 m olarak ölçülmüştür (Şekil 11). Aynı duvarın zemine yakın bölgelerinde ileri düzeyde derz boşalması bulunmaktadır. Ek olarak Şekil 11'de görülen pencere boşluğu duvarda düzensizlik oluşturduğu ve bunun sonucunda bu bölgelerde duvar gerilmelerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 11. Şapel bölümü duvarında meydana gelen ayrılma.

Yapıya ait beden duvarlarının dış cepesindeki taşlarda yer yer derz boşalması, kararma, malzeme yapısının bozulması ve buna bağlı olarak eksilmeler bulunmaktadır.

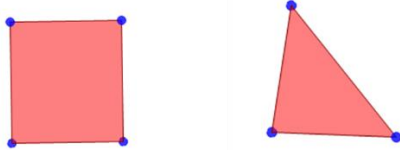
Yapısal Modelleme ve Malzeme Kabulü Seçimleri

Modelleme Yöntemi Seçimi

Lefkoşa Selimiye Camii'nin modellenmesi ve analizlerinin yapılabilmesi için çok sayıda modelleme ve analiz teknikleri olmasına rağmen, gelişmiş sayısal yöntemler kullanılarak karmaşık analizlerin yapılmasına olanak sağlayan, bu yüzden de en yaygın olarak tercih edilen yöntem olan sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu bağlamda yapısal analizler SAP2000 v22 [21] yazılımı kullanılarak mod birleştirme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapının sonlu elemanlar modeli makro modelleme yaklaşımı ile oluşturulmuştur. Makro modelleme yaklaşımında, yığma malzemeye ait yığma birimi ve harç homojenleştirilmekte ve beden duvarlarının bütün doğrultularda tek bir malzeme özelliği gösterdiği kabul edilmektedir Yapılan analizlerin sonucunda ortaya çıkan kritik bölgeler için makro modelleme yaklaşımı yeterli görülmez ise, yalnızca o bölgeye özgü olarak mikro modelleme yaklaşımı kullanılabilir [7,8].

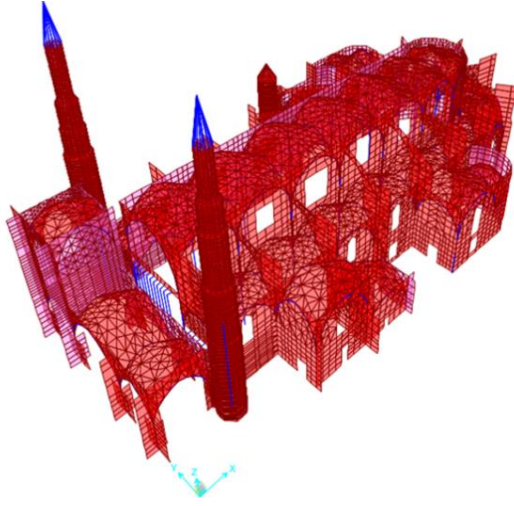
Yapının numerik modellemeleri oluştururken sütunlar çubuk (frame) elemanlarla, tonoz ve duvarlar kabuk (shell) elemanlarla modellenmiştir. Yapı modeli, toplam 1452 adet çubuk ve 26163 adet kabuk eleman ile oluşturulmuştur. Yapıda bulunan kemerlerin formu, yaklaşık 1.6 m olacak şekilde ayrılmış çubuk elemanlar ile gerçeğe en uygun şekilde verilmiştir. Tüm kabuk elemanlar, sınırlı ve benzer büyüklükteki, üç ya da dört düğüm noktasına sahip sonlu elemanlar parçalarına ayrılmıştır (Şekil 12). Her bir düğüm noktası üç eksenli deformasyon ve dönme serbestliği olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. Kabuk elemanların

alanları 1 ile 2 m² arasında oluşturulmuştur. Elemanlar kareye yakın ve üçgen formda oluşturulmuş olup maksimum kenar uzunluğu 1.5 m olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 12. Modelde oluşturulan kabuk eleman formları

Farklı kalınlıklardaki beden duvarlarının bulunduğu çevre mesnetlere göre oldukça zayıf olduğu düşünülen tonozların rijit bir diyafram şeklinde çalışmayacağı öngörülmüş, rijit diyafram kabulü yapılmamıştır. Yapının üst örtüsü üzerindeki yer yer değişen dolgu kalınlıklarının sebep olduğu farklı dolgu yükleri gerçeğe uygun şekilde bölgelere göre hesaplanıp sabit yük olarak etkilmiştir. Yapının oluşturulan numerik modeline ait 3D görünüş Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Yapı için oluşturulan makro model.

Malzeme Kabulü

Lefkoşa Selimiye Camii'nin tüm yapısında yalnızca kesme taş kullanılmıştır. Yapısal analizler ve tahkikler esnasında gerekli olan yığma malzemesinin elastisite modülü, basınç, çekme ve kayma dayanımları gibi mekanik özellikleri Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'ndaki malzeme tablolarındaki düzgün kesme taş özellikleri göz önünde bulundurularak öngörülmüştür. Buna göre, mevcut durumda düzgün kesme taşlardan yapılan yığma duvarlar için elastisite modülü 2580 MPa, basınç dayanımı 3.5 MPa, başlangıç kayma dayanımı da 0.088 MPa alınmıştır. Kabul edilen malzeme dayanımları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yığma duvar malzemelerinin mekanik özellikleri [9]

Duvar Türü	Basınç Dayanımı f _m (MPa)	Kayma Dayanımı τ ₀ (kPa)	Elastisite Modülü E (MPa)	Kayma Modülü G (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)
Düzgün Kesme Taşlı, Sıvalı Yığma Duvar	3.0~4.0	78~98	2340~2820	390~470	22

Kayma gerilmesi için yapılan tahkiklerde malzemenin başlangıç kayma dayanımına ilave olarak elemanlarda meydana gelen normal kuvvetin kayma dayanımına yapacağı katkı da dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, elemanlarda meydana gelen kayma gerilmesi aşağıdaki bağıntı (1) ile hesaplanan kayma dayanımı ile karşılaştırılmıştır.

$$\tau = \tau_0 + 0.4\sigma \quad (1)$$

τ : Kayma dayanımı

τ₀ : Başlangıç kayma dayanımı

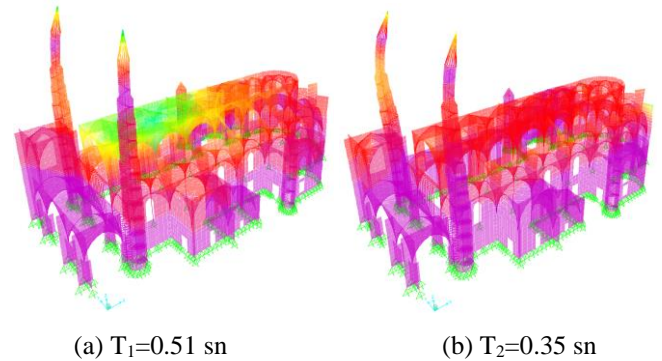
σ : Gerilme

Yapının Modal Analizi ve Modelde Yapılan Güncellemeler

Modal Analiz

Modal analiz ile yapı sisteminin kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak, mod şekilleri ve periyotlar elde edilmektedir. Yapının modal analizi için Özdeğer yöntemi kullanılmıştır. Lefkoşa Selimiye Cami'ye ait sonlu eleman modelinin Sap2000 programında modal analizi yapılmış ve %95 mertebelerindeki kütle katılım oranına 400 mod şekli ve serbest titreşim periyodu ile ulaşılmıştır.

Yapının ilk modlarında minarelerin karakteristikleri etkili olmuştur. Minarelere ait en yüksek periyot 1.16 saniye olarak elde edilmiştir. Ana yapıda etkili olan ilk modlarda, uçan payandalar ile desteklenen orta nef beden duvarların karakteristikleri etkili olmuştur. Ana yapı için kısa doğrultuda (Y doğrultusu) %45 kütle katılımı ile periyot 0.51 saniye olarak elde edilirken uzun doğrultuda (X doğrultusu) %30 kütle katılım ile 0.35 saniye olarak elde edilmiştir. Ana yapıda hakim olan ilk iki mod şekli Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Yapı için oluşturulan makro model.

Yapı Sağlığı İzleme Çalışmaları ve Sonlu Elemanlar Modelinin Güncellenmesi

Yapı sağlığı izleme(YSİ) sistemi ile yapıda yerel ölçümler gerçekleştirilerek yapının doğal titreşim modları elde edilmeye çalışılmıştır. Yapının çeşitli bölgelerinde yaygın hasar bulunması sebebiyle yapı sağlığı izleme sisteminden elde edilecek dinamik özelliklerin sonlu elemanlar modelinde elde edilecek dinamik özelliklerden farklılık gösterebileceği düşünülmüştür. Buna göre sonlu elemanlar modelinde elde edilen frekans değerleri ile yapının bazı noktalarında ihmal edilebilir form değişiklikleri sonucunda

oluşan dinamik özelliklerin olabildiğince yakın olması amaçlanmıştır ve numerik modelde yığma duvar malzemesine ait elastisite modülünün 2500 MPa değerinden 3500 MPa değerine getirilmesi uygun bulunmuştur.

Tarihi Yapılarda Yapısal Değerlendirme ve Performans Hedefleri

Lefkoşa Selimiye Camii'nin yapısal değerlendirmesinde, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda yer alan esaslar dikkate alınmıştır. Bu bölümde deprem yer hareketi düzeyleri ve hedef performans düzeylerinden bahsedilecektir.

Söz konusu kılavuzda [9], tarihi yapıların deprem güvenliğinin değerlendirilmesi için 3 farklı deprem yer hareketi düzeyi ve 3 farklı performans düzeyi belirtilmiştir. Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem güvenliğinin değerlendirilmesi için Tablo 2'de verilen deprem düzeyleri öngörülmektedir.

Tablo 2. Deprem yer hareketi düzeyleri [9].

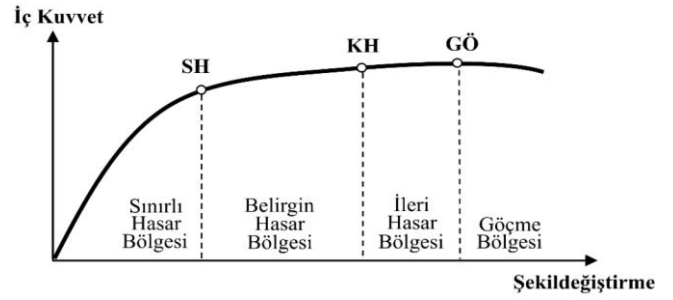
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	50 Yılda Aşılma Olasılığı	Tekrarlanma Periyodu	Deprem Yer Hareketi ve İsimlendirme
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1)	2%	2475	Çok seyrek/ En Büyük Deprem
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2)	10%	475	Seyrek/ Tasarım Depremi
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3)	50%	72	Sık/ Sık Deprem

Değerlendirmesi yapılacak tarihi yapının önemi, kullanıcı, ziyaretçi sayısı ve işlevselliği göz önünde bulundurularak performans düzeyi belirlenmektedir.

Belirli bir deprem etkisi altındaki tarihi yapılar için 'Yapısal Performans Düzeyleri' Tablo 3'te tanımlanmış olup, şematik bir iç kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 15'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Deprem performans düzeyleri [9].

Performans Düzeyi	50 Yılda Aşılma Olasılığı
Sınırlı Hasar (SH)	Yapının taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği hasar düzeyi
Kontrollü Hasar (KH)	Yapının taşıyıcı sistem elemanlarında çoğunlukla onarılması mümkün olan hasarların meydana geldiği hasar düzeyi
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	Yapının taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği hasar düzeyi



Şekil 15. Şematik iç kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi ve hasar sınır durumları [17].

Tarihi yapılarda yapı önemine bağlı olarak tanımlanan "Hedef Performans Düzeyleri" Çizelgesine [9] göre, Lefkoşa Selimiye Camii "Ulusal Öneme Sahip Tarihi Yapı" olarak sınıflandırılarak kılavuzda bu sınıftaki yapılar için öngörülen performans hedefini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Buna göre yapının 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (475 yıl dönüş periyodu olan deprem (DD-2)) deprem etkisi altında "Kontrollü Hasar" düzeyi performans seviyesini sağlaması hedeflenmiştir.

Bu bağlamda Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'na (2017) göre "Kontrollü Hasar" performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığının kontrolü için doğrusal hesap yaklaşımının (mod birleştirme yöntemi) kullanılması durumunda düşey yük ve $R_a \leq 3$ ile azaltılmış deprem etkisi altında taşıyıcı sistem elemanlarının mevcut dayanımlarının aşılmaması gerekmektedir.

Sahaya Özel Depremsellik Çalışması

Bölgenin depremselliği sahaya özel sismik tehlike analizi ile belirlenmiştir. Bunun için SHARE (Seismic Hazard Harmonisation in Europe) projesi kapsamında oluşturulmuş tarihsel deprem katalogları, aletsel ölçüm katalogları, alansal ve çizgisel kaynak modelleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 3 farklı yer hareketi tahmin denklemi kullanılmıştır. Söz konusu ilişkiler ve katılım oranları Tablo 4'te sunulmuştur.

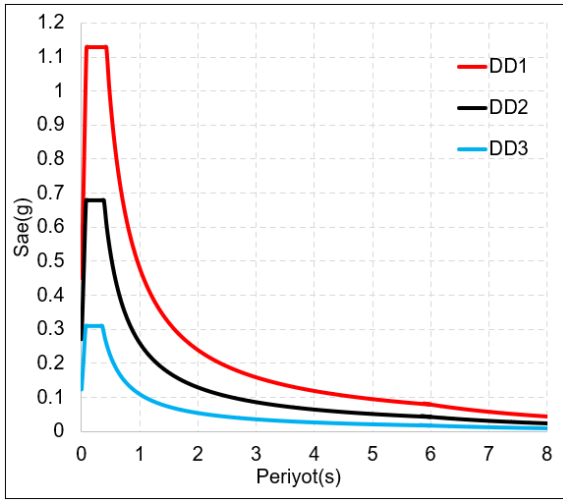
Tablo 4. Hesaplamalarda kullanılan 3 farklı azalım ilişkisi ve katılım oranları

Azalım İlişkisi	Katılım Oranı
Kale ve Diğ. 2015 [10]	%34
Boore ve Atkinson 2008 [11]	%33
Chiou ve Youngs 2008 [12]	%33

Sahaya özel sismik tehlike analizinden 72, 475 ve 2475 yıl dönüş periyoduna sahip deprem düzeyleri için elde edilen kısa periyot spektral ivme katsayısı S_s , 1 saniye periyot için spektral ivme katsayısı S_1 ve en büyük yer ivmesi (PGA) değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Çizelgedeki değerler 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde tasarım spektrumu için belirtilen denklemlerde yerine konulduğunda elde edilen yatay elastik ivme spektrumları Şekil 16'da verilmiştir.

Tablo 5. Sahaya özel sismik tehlike analizi sonuçları

	72 yıl dönüş periyodu olan deprem	475 yıl dönüş periyodu olan deprem	2475 yıl dönüş periyodu olan deprem
PGV (cm/s)	9,52	21,98	40,28
PGA (g)	0,13	0,29	0,48
S_a (T=0.2)	0,31	0,68	1,13
S_a (T=1) (g)	0,11	0,26	0,48



Şekil 16. TBDY-2018 denklemleri kullanılarak elde edilen Yatay Elastik İvme Spektrumu.

Zemin Çalışmaları ve Yapı Temeli

Sondaj Çalışmaları

Yapının bulunduğu bölgenin zemin özelliklerinin belirlenmesi için derinlikleri 18 m ile 31.5 m arasında değişen 8 farklı noktada sondaj çalışması gerçekleştirilmiş olup açılan sondaj kuyularında Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapılmıştır [16]. 6 adet sondaj kuyusu açılarak presiyometre deneyleri yapılmış ve limit basınç (PL) değerleri belirlenmiştir.

Yapılan sondajlarda zemin kesitinin tek eksenli basınç direnci $q_u > 400$ kPa'dır. V_{s30} (m/sn) değerleri 300-334 m/s olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan kil tabakasının çok katı-sert kıvamda olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen V_{s30} (m/sn) değerleri ve zemin tipi göz önüne alındığında zemin sınıfı TBDY 2018' e göre ZD olarak bulunmuştur [13] (Tablo 6).

Tablo 6. Elde edilen zemin sınıfı

Yerel Zemin Sınıfı	$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe/30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZD	180-360	15-50	70-250

Zemin Yapısı Değerlendirmesi

Yapı boyutları ve temel derinliği dikkate alınarak taşıma gücü analizleri Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)'ye göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre zemin emniyet gerilmesi değeri 374 kPa olarak belirtilmiştir. Düşey Yatak Katsayısı ise 37000 kN/m^3 olarak verilmiştir. Söz konusu zemin emniyet gerilmesi değeri emniyet faktörü 3 kabul edilerek elde edilmiştir. Buna göre 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre karakteristik zemin taşıma gücü değeri 1122 kPa, tasarım güvenli taşıma gücü değeri ise 800 kPa olarak elde edilmiştir [13].

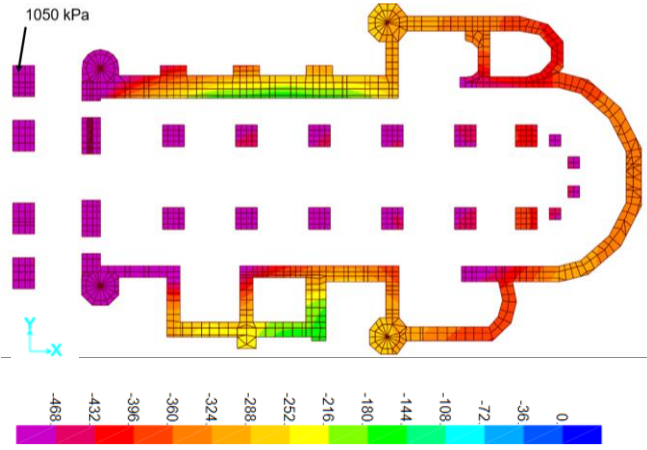
Yapının yüklerinin aktarıldığı kesme taş, moloz dolgu temel sistemi ile çok katı-sert kıvamdaki çakıllı kil tabakasının taşıma gücü ve yapı oturmaları yönünden uygun bir temel zemini olduğu, açılan muayene kuyularında, üst yapıda görülen ayrılma, çatlak vb hasarların yapının temel sisteminde devam etmediği, yapının zamana bağlı konsolidasyon oturmasını tamamlamış durumda olduğu, temel zemininde mevcut koşullarda ilave bir oturma ya da deprem anında zemin sıvılaşması beklenmediği, saha çalışmaları sırasında yer yer duvar/sütun altında bulunan malzemede bozulmalar, moloz dolguda kısmi boşluklar gözlemlendiği, bu tür hasarların gözlemlendiği bölgelerde malzeme onarımı ile birlikte temellerin oturduğu çakıllı malzemede, düşük basınçlarda emdirme enjeksiyonu yapılarak bölgesel bir iyileştirmenin yararlı olacağı bilgi ve görüşlerine yer verilmiştir [13].

Zemin Gerilmelerinin Tahkiki

Selimiye Camii zemin incelemeleri kapsamında yapılan çalışmalar doğrultusunda, toplam 11 adet muayene kuyusu açılarak temel boyutları net bir şekilde elde edilmiştir. Buna göre yapının kuzey kısmındaki beden duvarlarının altında kalan temel boyutları y doğrultusunda 2.9 m ve temel yüksekliği 1.2 m, güney kısmındaki beden duvarlarının altında kalan temel boyutları y doğrultusunda 1.5 m ve temel yüksekliği 1 m olarak alınmıştır. İç hacimde yapılan tek kazı sonucunda ise sütunların altında 2.2 m yüksekliğinde, 2.8 m x 2.8 m boyutlarında kare temel kabul edilmiştir. Yapı temelinin üst yapıda olduğu gibi düzgün kesme taş ile teşkil edildiği görülmüştür.

Yapı temeli üst yapıda olduğu gibi gerçeğe en uygun şekilde SAP2000 v22 [21] yapısal analiz programı kullanılarak makro modelleme yaklaşımı ile doğrusal analiz yapılmıştır. Temele ait mesnet koşulları yalnızca z ekseninde ötelenebilir ve yalnızca z ekseninde dönemez olarak tanımlanmıştır.

Buna göre deprem etkilerini içeren yük kombinasyonları içerisinde temel tabanında oluşan en büyük zemin gerilmesi değeri 1050 kPa olarak elde edilmiştir. Söz konusu bu değer yalnızca Narteks kısmının altında meydana gelmiştir. Gerilme değeri tasarım güvenli taşıma gücü değerinin üstünde kalmakla beraber karakteristik taşıma gücü değeri olan 1122 kPa değerinin altında kalmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17. Yapıya ait mevcut temelde oluşan zemin gerilmeleri (kPa) (X ve Y doğrultusundaki deprem etkileri için en elverişsiz durum).

Yapının Deprem Etkileri Altında Davranışının Değerlendirilmesi

Makro modelleme yöntemi kullanılarak modellenen Selimiye Cami yapısının düşey yükler ve deprem etkileri altında doğrusal analizi yapılmıştır. Analizlerde deprem etkilerinin düşey bileşeni $\frac{2}{3}S_{ds}$ olarak dikkate alınmıştır.

X doğrultusundaki deprem etkileri $G+Q+Eq_x+Eq_z$, Y doğrultusundaki deprem etkileri $G+Q+Eq_y+Eq_z$ olarak dikkate alınmıştır. Modelin taban noktaları sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Her bir analiz durumu, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu [9]'na göre değerlendirilmiştir. İlgili yapı elemanlarının XTRACT yazılımıyla moment ve eğrilik bilgileri elde edilmiştir. Duvarlar ve payandalar için düşey eğilme momenti kapasitesi (M22), düşey yükler (G+Q) altında oluşan aksel yük etkisinde, yatay eğilme momenti kapasitesi (M11) aksel yükün sıfır olduğu durumda elde edilmiştir. Tonzlardaki yatay eğilme momenti kapasiteleri (M11 ve M22) ise düşey yükler (G+Q) altında oluşan aksel yük etkisinde elde edilmiştir.

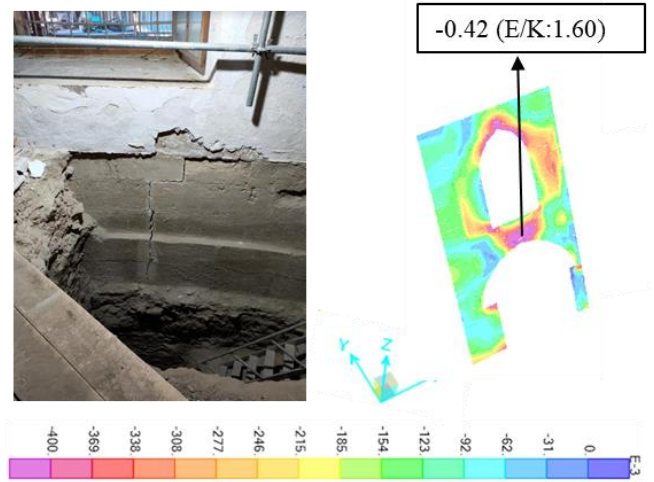
Düşey Yükler Altında Doğrusal Analiz ve Sonuçları

Yığma yapılarda düşey yükler, yapının ölü yükleri, hareketli yükler ve kar yükleri olarak tanımlanabilir. Selimiye Cami yapısının düşey yükler (G+Q) altında yapılan doğrusal analiz sonucunda sınır değerleri aşan sonuçlara rastlanmamıştır. Beden duvarlarındaki aksel yük seviyesi Etki/Kapasite (E/K) 0.24, sütunlarda 0.52 mertebelerindedir. Maksimum kayma gerilmesi değeri E/K 0.62, orta nef beden duvarlarında düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı 2.00, maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise 1.75'tir. Payandalarda oluşan düşey basınç gerilmeleri 0.44 Mpa mertebelerindedir. Maksimum kayma gerilmesi E/K oranı 1.29 olup, düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı 0.53 ve düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı 0.20 olarak bulunmuştur. Yapının üst örtüsünde elde edilen maksimum çekme gerilmesi değeri 0.97 MPa'dır. Ayrıca

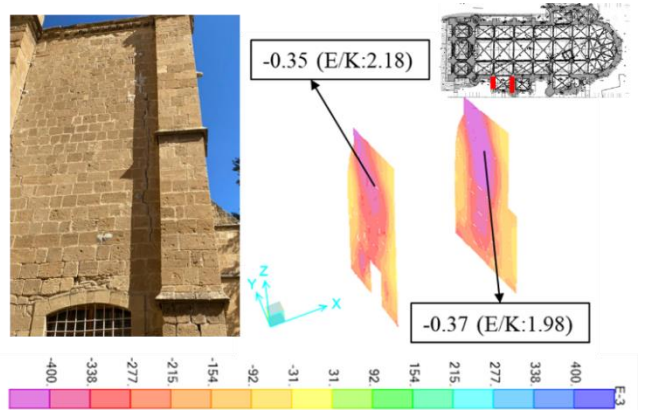
düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum eğilme momenti E/K oranı 0.58 olarak bulunmuştur.

Deprem Etkileri Altında Doğrusal Analiz ve Sonuçları

Düşey yük etkisi altında yapının beden duvarlarında görülen maksimum düşey basınç gerilmesi değeri 0.85 MPa iken, X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.52 MPa, Y doğrultusunda deprem etkisi altında 1.38 MPa'dır. Yapının beden duvarlarında oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilmesi E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında maksimum 2.00, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.18'dir. Yapının Çan kulesi ve Şapel bölümlerine ait beden duvarlarında gözlemlenen ileri düzeydeki çatlak, ayrılma hasarları, sonlu elemanlar modelinde ilgili bölgelerde elde edilen E/K oranlarıyla örtüşmektedir (Şekil 18,19).



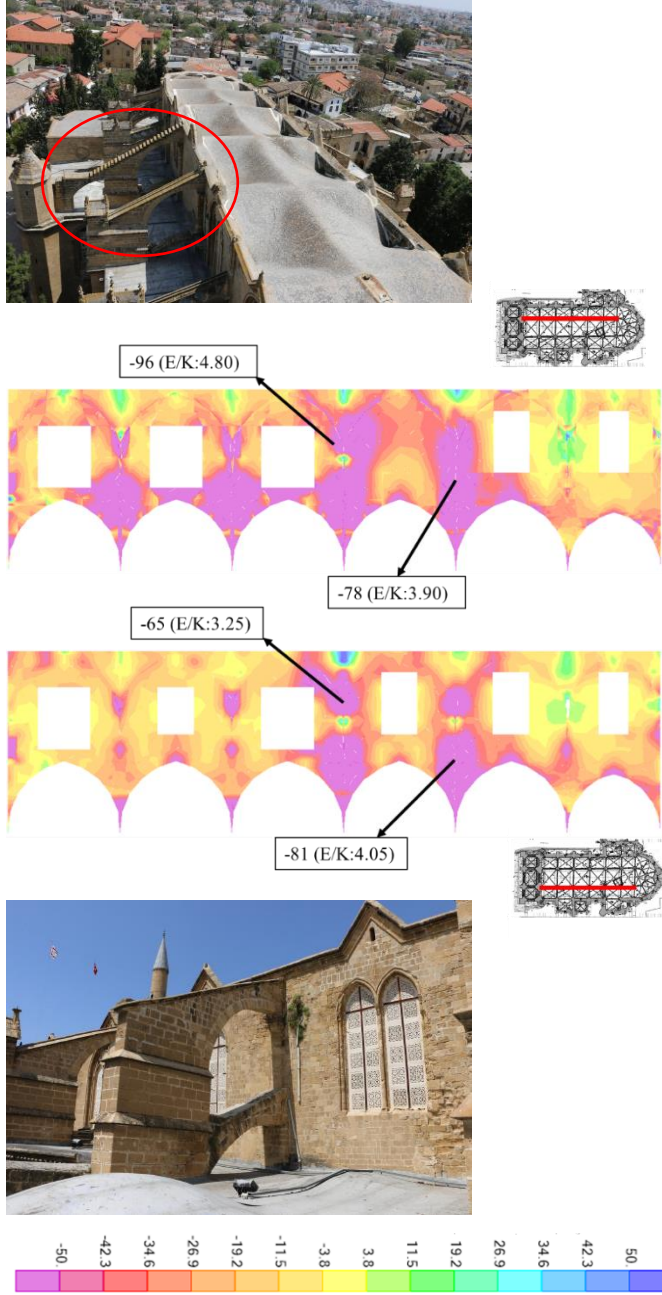
Şekil 18. Çan kulesi bölümündeki ayrılma ve modelden alınan X doğrultusundaki deprem etkisi altında elde edilen kayma gerilmesi sonuçları. (kPa)



Şekil 19. Şapel bölümündeki ayrılma ve modelden alınan Y doğrultusundaki deprem etkisi altında elde edilen kayma gerilmesi sonuçları. (kPa)

Yapının beden duvarlarında oluşan düzlem dışı eğilme momenti dağılımları düşey yükler ve her iki doğrultudaki deprem etkileri altında olacak şekilde sunulmuştur. Düzlem dışı doğrultuda yapının beden duvarlarında oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.10, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 4.80'dir. Maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise X doğrultusundaki deprem etkisi altında 0.85, Y

doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.18'dir. Y doğrultusundaki deprem etkisi altında oluşan maksimum düzlemsiz eğilme momenti dağılımı Şekil 20'de verilmiştir. Elde edilen en olumsuz sonuçların, orta nef beden duvarları ile uçan payandaların kesişim bölgelerinde meydana geldiği görülmüştür.

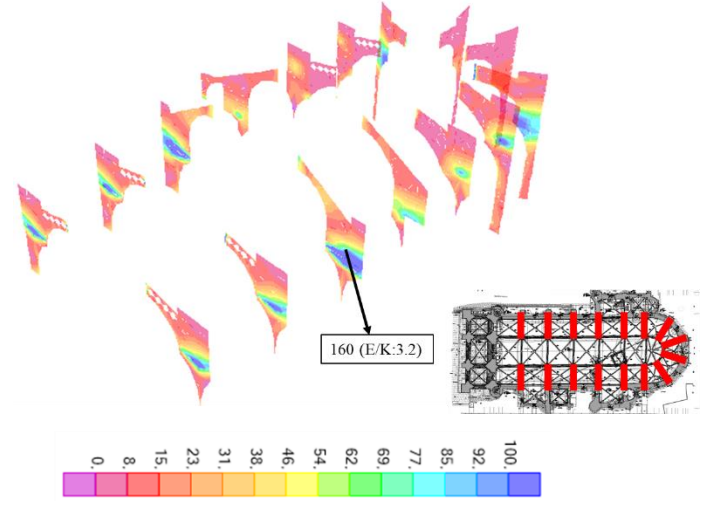


Şekil 20. Üst Orta Nef Beden Duvarlarında Düzlem Dışı Moment Etkileri (kNm)- M11.

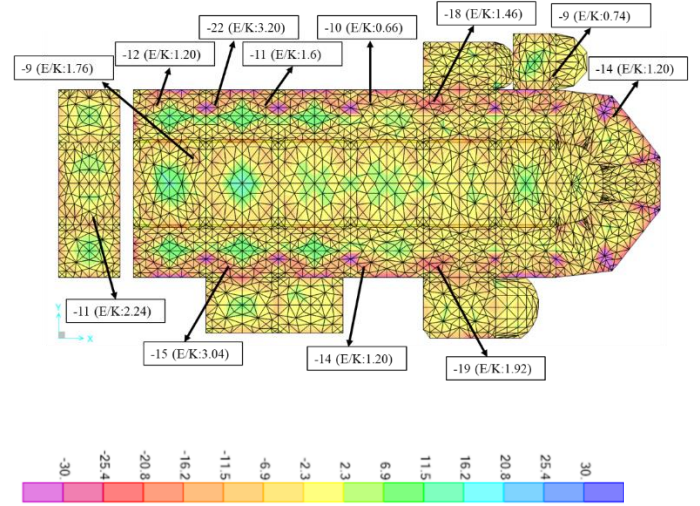
Yapıya ait uçan payandalarda elde edilen maksimum düşey basınç gerilmesi değeri Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.08 MPa'dır. Maksimum kayma gerilmesi E/K oranı 2.32 olup, düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum düşey eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkileri altında 3.20 olarak bulunmuştur (Şekil 21).

Yapının üst örtüsünde elde edilen maksimum çekme gerilmesi değeri X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.55 MPa, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.65

MPa'dır. Ayrıca yapıda oluşan maksimum eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.20, Y doğrultusundaki deprem etkisi 2.56 olarak bulunmuştur. Gerilmelerin yoğunlaştığı ve kapasitenin aşıldığı bölgeler mevcut hasarlar ile önemli ölçüde örtüşmektedir (Şekil 22).

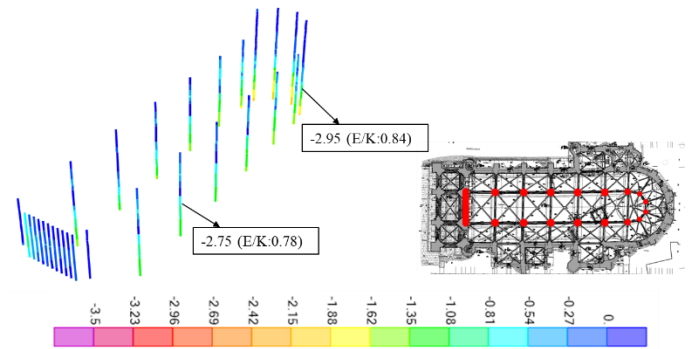


Şekil 21. Payanalarda Düzlem Dışı Moment Etkileri (kNm)- M22.



Şekil 22. X doğrultusundaki deprem etkileri altında Tonozlardaki İç Kuvvetler (kNm)- M11.

Yapıya ait ayaklarda elde edilen aksel gerilmelerin her iki doğrultudaki deprem etkisi altında da kapasitenin altında kaldığı görülmüştür (Şekil 23).



Şekil 23. Ayaklarda Basınç Gerilmeleri (mPa)-S11.

Bu sonuçlar doğrultusunda yapının yalnızca düşey yükler altında elde edilen etki değerlerinin kapasite değerlerinden düşük olduğu görülmüştür. Düşey yükler ve deprem etkileri altında elde edilen gerilme ve iç kuvvet değerleri, elemanların mevcut dayanımlarından yüksektir. Elde edilen maksimum E/K oranları özellikle orta nef beden duvarlarında oluşmaktadır. Düzlem dışı doğrultuda, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında elde edilen maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı 4.80, maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise 3.18'dir. Ayrıca yapı üst örtüsünde oluşan maksimum yatay eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.20, Y doğrultusundaki deprem etkisi 2.56 olarak bulunmuştur.

Müdahale Önerileri

Lefkoşa Selimiye Camii'nin yapılan doğrusal analiz sonuçlarına göre mevcut haliyle Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzu'nda (2017) belirlenen hedef deprem performansını yeterli düzeyde sağlamadığının tespit edilmesi nedeniyle aşağıda belirtilen müdahaleler önerilmiştir. Önerilen müdahaleler yapısal performansı iyileştirmeyi hedeflemekte olup, tarihi ve kültürel önemi yüksek olan bu yapının beden duvarlarında yer alan sütun başlıkları, sütunlar, süslemeler ve dekoratif unsurlar nedeniyle sınırlı düzeyde tutulmuştur.

Yapının mevcut durumu için yapılan inceleme ve değerlendirmeler sonucunda yapılması gerektiği düşünülen müdahale önerileri aşağıda verilmiştir.

- Orta Nef Üst Örtüsü Üzerindeki Dolguların Azaltılması
- Yapıya Gergi ve Basınç Çubuğu Sistemi Eklenmesi
- Şapel Bölümü Yatay Ankraj Uygulaması Yapılması
- Çan Kulesi Yatay Ankraj Uygulaması Yapılması
- Tonzlar İçin Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) Uygulaması Yapılması
- Beden Duvarları İçin Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) Uygulaması Yapılması
- Mevcut Hasarların Onarımı için Enjeksiyon Uygulamaları Yapılması

Orta Nef Üst Örtüsü Üzerindeki Dolguların Azaltılması

Selimiye Camii yapısının deprem etkilerine karşı güçlendirilmesi için müdahale önerileri düşünüldüğünde akıllara gelen ilk unsur, orta nef üst örtüsü üzerindeki gereğinden fazla yükseklikteki dolgu tabakası olmaktadır. Bu dolgu tabakası tüm yapının üzerinde işlevsiz şekilde yük olmakta ve orta nef beden duvarlarındaki düzlem dışı moment değerlerini arttırmaktadır.

Yapının orta nef beden duvarlarında oluşan ileri düzeyde düzlemdışı yatay ve düşey eğilme momenti etki/ kapasite oranları nedeniyle, yapı üzerindeki ölü yükü azaltmak amacıyla orta nef üst örtüsünde bulunan dolgu kalınlığının 10 cm mertebelerine indirilmesine karar verilmiştir.

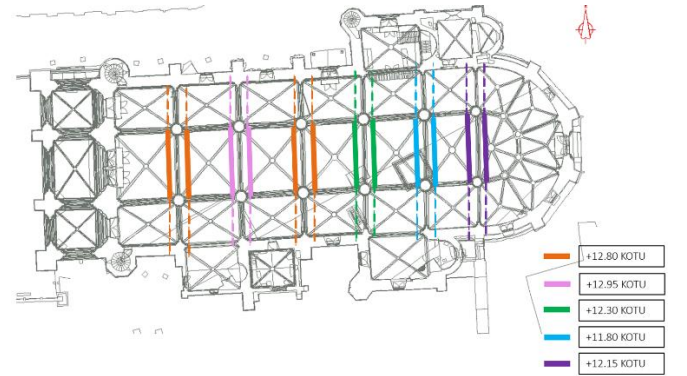
Yapıya Gergi ve Basınç Çubuğu Sistemi Eklenmesi

Orta nef beden duvarlarının düzlem dışı hareketini sınırlandırmak amacıyla yapının söz konusu beden duvarlarını bağlayacak bir gergi ve basınç çubuğu sistemi

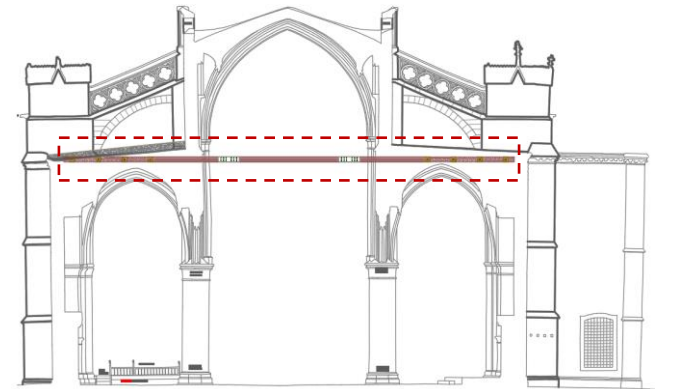
oluşturulmasına karar verilmiştir. Yapıda orta nef kısmındaki her iki taraftaki beden duvarlarının birlikte çalışmasına katkı sağlayacak bir gergi ve basınç çubuğu sistemi oluşturulmasının deprem etkileri altında elemanlarda meydana gelecek kesit zorlanmalarının sağlıklı şekilde yeniden dağıtılmasına katkı sağlayacağı ve deprem davranışını iyileştireceği düşünülmektedir.

Sistemin plandaki ve kesitteki yerleşimi Şekil 24 ve Şekil 25'te verilmiştir. Sistem, aralarındaki net açıklık 1 m mertebelerinde olan, harim bölgesindeki tüm ayakların sağ ve sol tarafında olmak üzere duvar doğrultusuna dik yerleştirilen toplam 12 adet 30x30 cmxcm boyutlarında ahşap gergilerden oluşmaktadır.

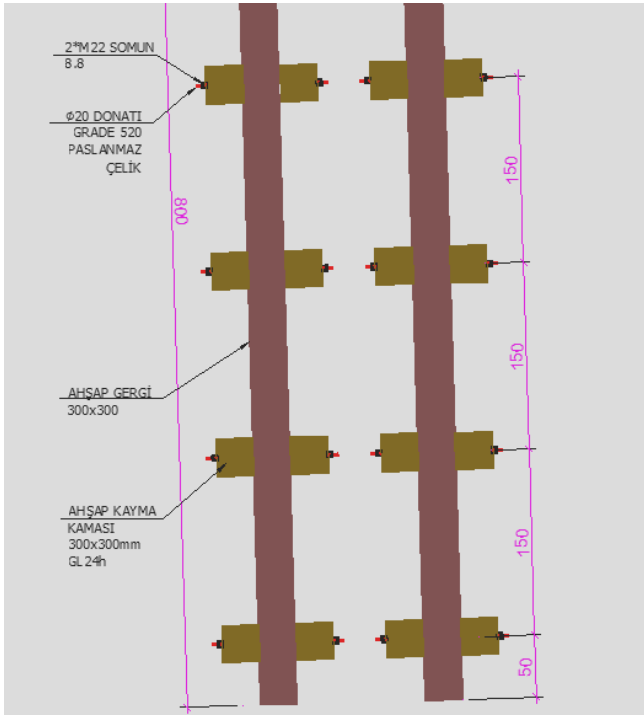
Gergiler, uygulanabilirlik açısından sorun yaşanmaması adına açıklık bölgesinde 2 adet bağlantı yapılarak 3 parça halinde yapılacaktır. Her bir gergi elemanı, açıklık bölgesinde kalan ek uzunluğu 7 m, duvarlardan geçip yan nef tonoz dolgularının içinde kalan eklerin uzunluğu 9.5 metre olmak üzere toplamda 26 m olacaktır. Ahşap gergilerin tonoz dolgusu içinde kalan kısmında merkezden merkeze açıklık 1.5 m olacak şekilde, gerginin iki yüzeyinde toplamda 8 adet 30x30 cmxcm kesitlerinde ahşap kayma kaması eklenmesi uygun bulunmuştur (Şekil 26).



Şekil 24. Gergi sisteminin planda yerleşimi ve kotları.

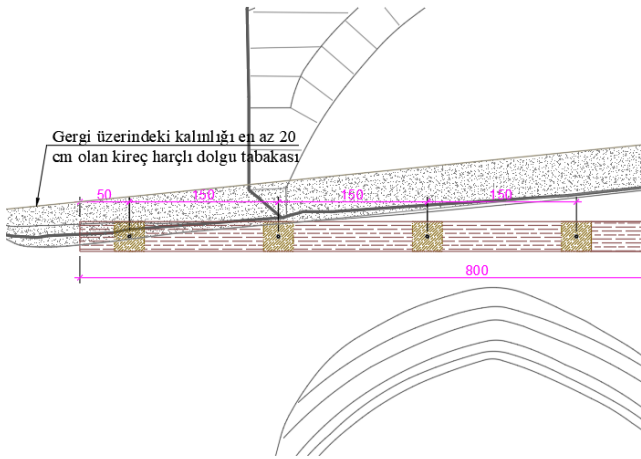


Şekil 25. Gergi sisteminin kesit görünüşü.



Şekil 26. Tonzol dolgusu içinde kalan gergi sistemi detayları.

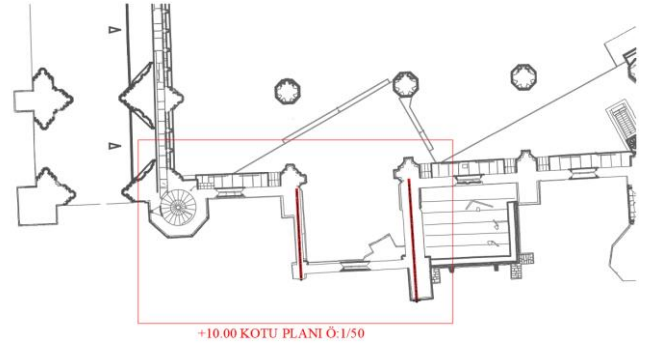
Gergi imalatı öncesinde yan nef tonozların mevcut dolgu tabakasının kaldırılması, gergi yerleşimi ve imalatı tamamlandıktan sonra gergi üzerinde kalacak minimum dolgu yüksekliği 20 cm olacak şekilde dolgu tabakası tekrar oluşturulması öngörülmüştür (Şekil 27).



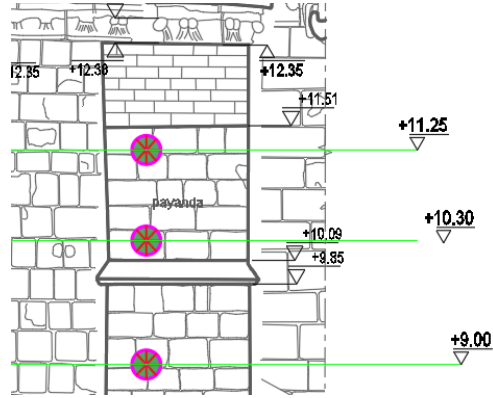
Şekil 27. Gergi sisteminin yan nef tonoz dolgusu içinde kalan kısmına ait detayı

Şapel Bölümü Yatay Ankraj Uygulaması Yapılması

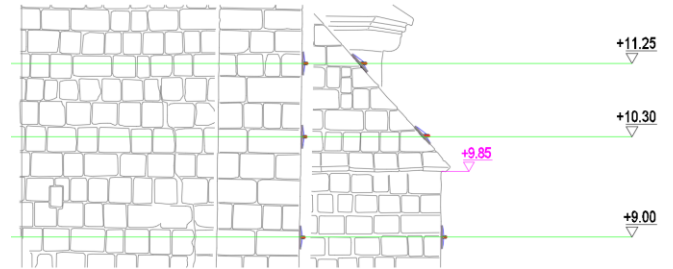
Şapel kısmında bulunan X ve Y doğrultusundaki beden duvarlarının birleşim bölgelerinde X doğrultusundaki duvarın yapıdan ayrılmaya çalıştığını gösteren düşey doğrultuda derin yapısal çatlaklar gözlemlenmiştir. Buna göre her iki doğrultudaki beden duvarlarının birlikte çalışmasına katkı sağlayacak bir çelik ankraj uygulaması yapılmıştır. Ankrajların çapı 20 mm ve AISI 316 sınıfı paslanmaz çelik özelliklerinde imal edilmesi gerekmektedir. Ankrajların plandaki yerleşimi Şekil 28'de, cephe görüşleri Şekil 29 ve Şekil 30'da gösterilmiştir.



Şekil 28. Ankrajların +10.00 kotu için planda gösterimi.



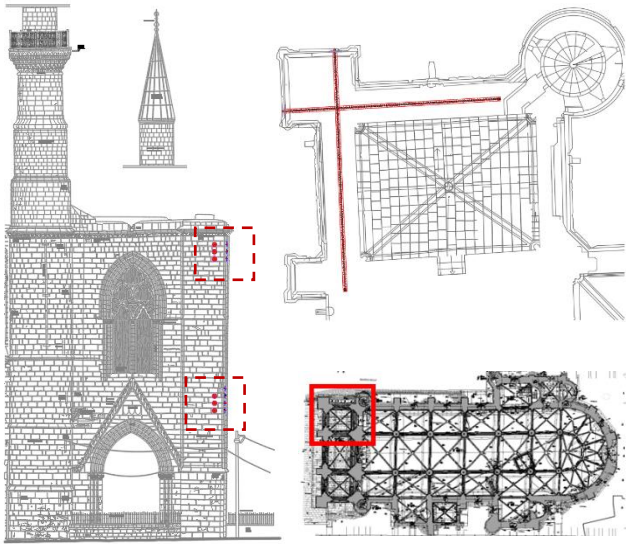
Şekil 29. Ankrajların güney cephe görünüşü.



Şekil 30. Ankrajların batı cephe görünüşü.

Çan Kulesi Yatay Ankraj Uygulaması Yapılması

Yapının kuzeybatı bölgesindeki çan kulesi olarak bilinen kısmında +10.00 m ve +20.00 m mertebelerindeki kotlarda düşey doğrultuda derin çatlaklar gözlemlenmiştir. Buna göre her iki mertebedeki kotlarda, beden duvarlarındaki ayrılmayı engelleyecek bir çelik ankraj uygulaması yapılması öngörülmüştür. Bu ankraj sistemi +9.00 m ve +19.50 m kotlarından başlayarak yukarı doğru merkezden merkeze 50 cm arayla 3'er adet olmak üzere toplamda 7 adet ankrajdan oluşmaktadır. Ankrajların çapı 20 mm ve AISI 316 sınıfı paslanmaz çelik olarak kullanılmıştır. Ankrajların plandaki ve kuzey cephesindeki yerleşimi Şekil 31'de gösterilmiştir.



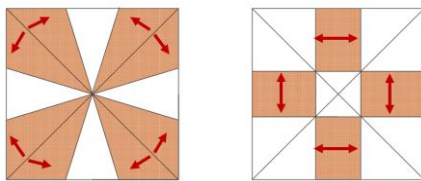
Şekil 31. Ankrajların cephe ve plan görünüşü.

Tonozlar İçin Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) Uygulaması Yapılması

Gerçekleştirilen performans analizleri doğrultusunda yapının üst örtüsünde meydana gelen moment değerlerinin yer yer eğilme kapasitesinden yüksek olması nedeniyle, olası bir deprem esnasındaki yapısal davranışı iyileştirmek amacıyla tonozların üst yüzeylerine karbon hasır donatılı sıva (KHDS) uygulanması uygun bulunmuştur. 1 kat karbon hasır donatılı sıva uygulaması, 5-7 mm mertebelerinde yapısal tamir harcı ve 1 kat karbon hasır donatıdan oluşmaktadır. Eklenen her katta 1 kat tamir harcı ve karbon hasır donatı ilave edilmektedir.

Gereken KHDS kat sayısının belirlenmesi için öncelikle 1 m uzunluğunda ve mevcut kalınlıkta (35 cm) tonoz kesiti XTRACT yazılımıyla modellenmiş, kesitin tek yüzeyine, tek kat için 1 cm KHDS eklenmiştir. Çekme etkisi altındaki mekanik özellikleri kompozit malzeme olarak dikkate alınmıştır. Buna göre, ulaşılabilecek yatay eğilme momenti kapasiteleri elde edilmiştir.

Uygulama bölgesi ve yönleri şekil 32'de şematize edilmiştir.



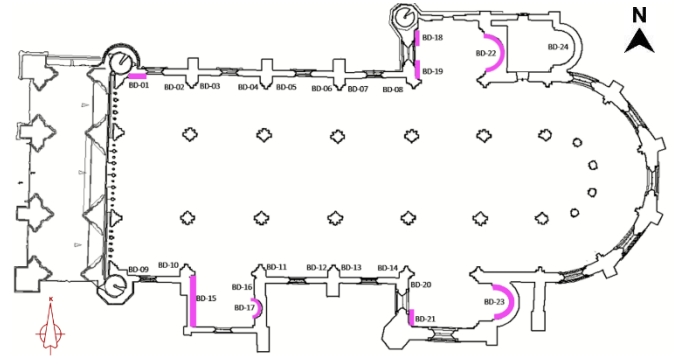
Şekil 32. KHDS uygulama bölgeleri ve yönleri

Karbon lifli polimer (kuru lif) mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir. Hidrolik kireç esaslı tamir harcı ile oluşturulmuş 1 cm kalınlığa sahip kompozit elemanın elastisite modülü hesaplarında 60 GPa olarak dikkate alınmıştır.

Çekme Dayanımı	≥	4900 MPa
Kopma Uzaması	≥	0.0017
Elastisite Modülü	≥	240 GPa
Ağırlık	:	200 gr/m ²
Kesit Alanı	:	55 mm ² /m

Beden Duvarları İçin Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) Uygulaması Yapılması

Selimiye camii alt kotundaki 60 cm ile 165 cm arası olmak üzere farklı kalınlıklara sahip beden duvarlarının maruz kaldığı düzlem içi kayma gerilmeleri, yer yer kayma kapasitelerini aşmaktadır. Bu bağlamda, kayma dayanımı değerleri, kapasitesini aşan duvarlarda düzlem içi kayma kapasitelerini arttırmak ve yapısal davranışı iyileştirmek amacıyla KHDS uygulanmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Uygulama yapılacak duvarlar Lefkoşa Selimiye Camii +7.60 m kotu planında gösterilmiştir (Şekil 33).



Şekil 33. Beden Duvarlarının KHDS ile Güçlendirilmesi.

Mevcut Hasarların Onarımı için Enjeksiyon Uygulamaları Yapılması

Özellikle orta nef duvarlarının düzlem dışında 2 derece mertebelerinde dönme yapması (Şekil 8) sonucunda oluşmuş farklı düzeylerdeki çatlak ve deformasyonlara harç enjeksiyonu yapılarak boşlukların doldurulması ve duvar bütünlüğünün iyileştirilmesi uygun bulunmuştur. Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2017) tanımlanan, enjeksiyon uygulamasının yapılması neticesinde iyileştirilmiş malzeme özellikleri dikkate alındığında, düşey yükler ve deprem etkileri altında kayma gerilmeleri için hesaplanan E/K oranlarında yaklaşık %15 mertebesinde bir azalma görülmüştür.

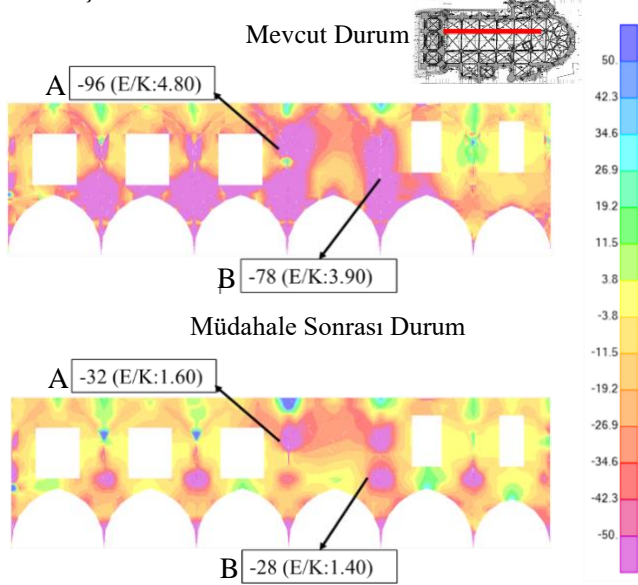
Beden duvarlarında ve hasarların yoğunlaştığı diğer bölgelerde, çürütme yapılarak duvar örgüsünün tekrar teşkil edilmesi gerekli bulunmuştur. Bu bölgelerde, duvar örgüsü için kullanılacak malzemenin özgün duvar malzemesi ile mekanik, fiziksel ve kimyasal açılarından uyumuna, yığma elemanın örgüsü esnasında geleneksel yapım tekniğinin korunmasına dikkat edilmesi önemlidir. Yeniden örülecek bölge için mekanik özellikleri görece yüksek bir örgü harcı (Puzolanik veya Hidrolik Kireç Esaslı, Lif Takviyeli, Çimento İçermeyen Tarihi Yapı Onarım Harcı) kullanılması gerekmektedir.

Söz konusu Puzolanik veya Hidrolik Kireç Esaslı, Lif Takviyeli, Çimento İçermeyen Tarihi Yapı Onarım Harcı Özellikleri:

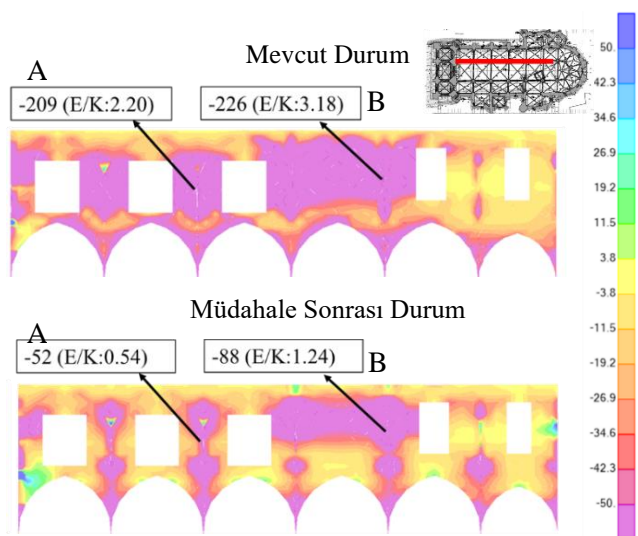
Basınç Dayanımı	≥	15-20 MPa
Elastisite Modülü	≥	16 MPa
Eğilmede Çekme Dayanımı	≥	2 MPa

Müdahale Önerilerinin Yapısal Davranışa Katkısının Araştırılması

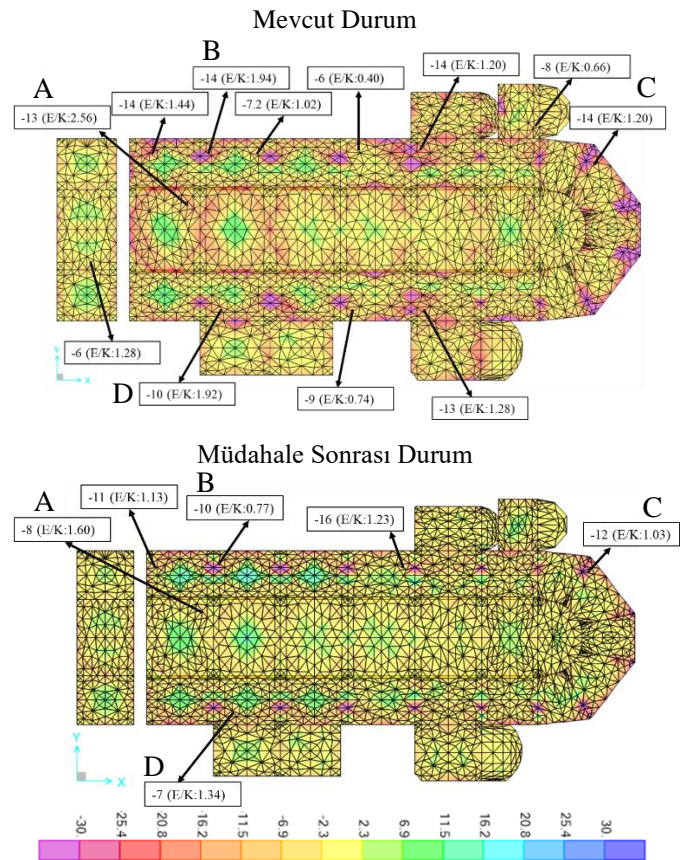
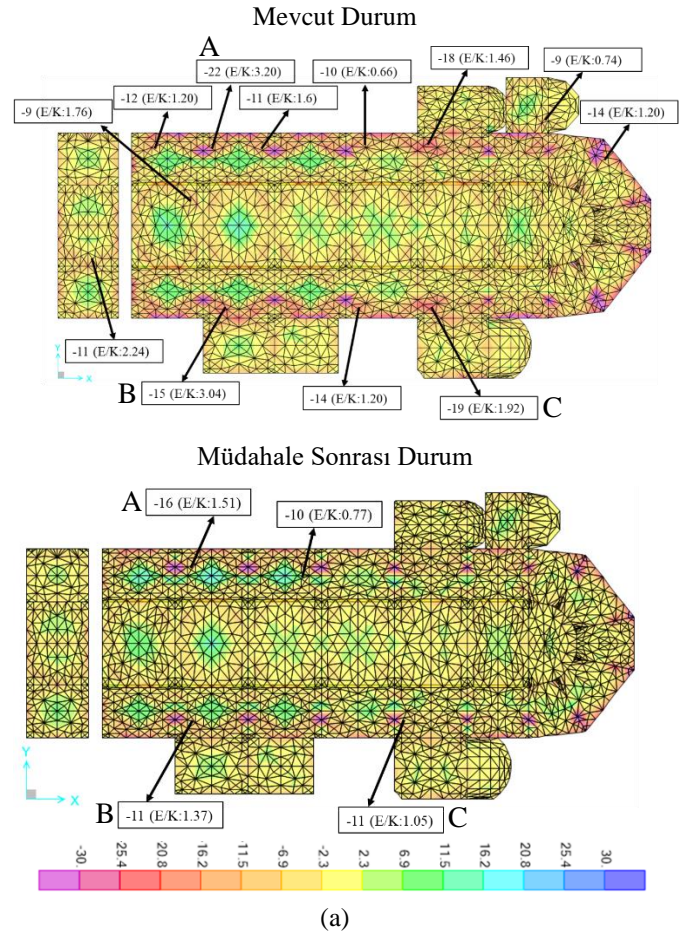
Mevcut durumun incelendiği modelde müdahale önerilerinde belirtilen “Orta nef tonozları üzerindeki dolgunun 10 cm mertebelerine indirilmesi” ve “Ahşap gergi ve basınç çubuğu sistemi” müdahale uygulamaları modele dahil edilip doğrusal analiz tekrar edilmiştir. Öncelikle orta nef tonozlar üzerindeki dolguların yapı davranışındaki etkisi hakkında bilgi edinebilmek adına yalnızca orta nef tonozları üzerindeki dolgu kalınlığı 10 cm mertebelerine indirilerek kontrol edilmiştir. Bu müdahale sonucunda yapının orta nef beden duvarlarındaki ileri düzeyde düzlemdışı yatay ve düşey eğilme momenti E/K oranları ile, tonozlardaki çekme gerilmelerinin de düştüğü görülmüştür. Müdahale öncesi ve sonrası Y doğrultusundaki deprem etkileri altında orta nef duvarlarda oluşan yatay eğilme momenti (M11) ve yatay eğilme momenti (M22) değerleri Şekil 34 ve Şekil 35’te, X ve Y doğrultusundaki deprem etkileri altında tonozlarda oluşan yatay eğilme momenti değerleri Şekil 36’da verilmiştir.



Şekil 34. Duvarlarda oluşan M11 momenti değerleri (kNm).



Şekil 35. Duvarlarda oluşan M22 momenti değerleri (kNm).



Şekil 36. Tonozlarda oluşan M11 momenti değerleri (kNm) (a) X doğrultusundaki deprem, (b) Y doğrultusundaki deprem

Ahşap gergilerin yan nef bölgelerindeki tonoz dolgusu içinde kalan kısmında, herhangi bir sıyrılma, kayma problemi yaşamadan sağlıklı bir şekilde yapıdan gelen etkileri karşılayabilmesi amacıyla gergilerin dolgu içinde kalacak bölümlerine belirli aralıklarda ahşap kayma kaması eklenmesi uygun bulunmuştur. Kayma kamaları için numerik hesaplamalar aşağıda sunulmuştur.

30 cm kenar uzunluğuna sahip bir adet kayma kamasının ve bağlantı elemanının karşılayabileceği kesme kuvveti ACI 530-05/530R-05 (3.1.6.3) [14] bölümünde verilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Bağıntı (2)'de verilen formül tonozlar üzerindeki dolgunun ezilmesi, Bağıntı (3)'te verilen formül kayma kaması ile ahşap gergi birleşiminde kullanılan bağlantı çeliğinin kesilmesi durumları içindir.

Hesaplamalarda ahşap kayma kamasının görünen alanı, A_{pv} (3.1.6.3.1) bölümündeki Bağıntı (4) formülü ile hesaplanmıştır. Güvenli tarafta kalınması amacıyla elde edilen kesme kuvvetlerinden küçük olan değer dikkate alınmıştır.

$$B_{vn} = 4A_{pv} \sqrt{f'_m} \quad (2)$$

$$B_{vn} = 0.6A_b f_y \quad (3)$$

$$A_{pv} = \frac{\pi l_{be}^2}{2} \quad (4)$$

B_{vn} : Karşılanabilecek kesme kuvveti

A_{pv} : Ahşap elemanın alanı

f'_m : Dolgunun basınç dayanımı

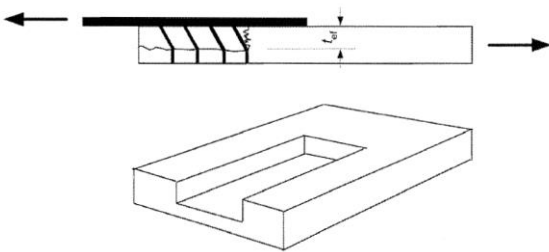
A_b : Bulon kesit alanı

f_y : Çeliğin akma dayanımı

l_{be} : Ahşap kenarı ile bulon arası mesafe

Buna göre her bir ahşap gerginin uç kısmından başlayacak şekilde 4 sıra, toplamda 8 adet ahşap kayma kamasının (Şekil 27) karşılayabileceği toplam kesme kuvvetinin, yapının numerik modelinden alınmış ahşap gergilerde meydana gelen en büyük eksenel kuvvet değerinden büyük olduğu görülmüştür.

Ahşap kayma kamaları ile çelik bağlantı elemanları arasındaki çekme ve kayma güvenliği kontrolü EN 1995-1-1:2004+A1:2008'e [15] göre yapılmıştır (Şekil 37).



Şekil 37. Çelik bağlantı elemanının ahşap elemandan sıyrılması [15].

$$A_{net,t} = L_{net,t} t_1 \quad (5)$$

$$A_{net,v} = L_{net,v} t_1 \quad (6)$$

$$F_{bs,Rk} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1.5A_{net,t} f_{t,0,k} \\ 0.7A_{net,v} f_{v,k} \end{array} \right. \quad (7)$$

$A_{net,t}$: Ahşap yönüne dik net kesit alanı

$L_{net,t}$: Ahşap yönüne dik net kesit uzunluğu

t_1 : Ahşap kalınlığı

$A_{net,v}$: Ahşap yönüne paralel net kesit alanı

$L_{net,v}$: Ahşap yönüne paralel net kesit uzunluğu

$F_{bs,Rk}$: Karakteristik kesme kapasitesi

Yapıya eklenen basınç çubuklarının orta açıklıkta kalan kısmı için burkulma kontrolü yapılmıştır. Bu bağlamda, elemanların burkulma oluşmadan karşılayabileceği kritik P kuvveti için Euler yaklaşımından faydalanılmıştır. Euler formülü Bağıntı (8)'de verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan L boyu, elemanın tutulu olmayan, burkulmaya çalışacak uzunluğunu temsil etmektedir.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (8)$$

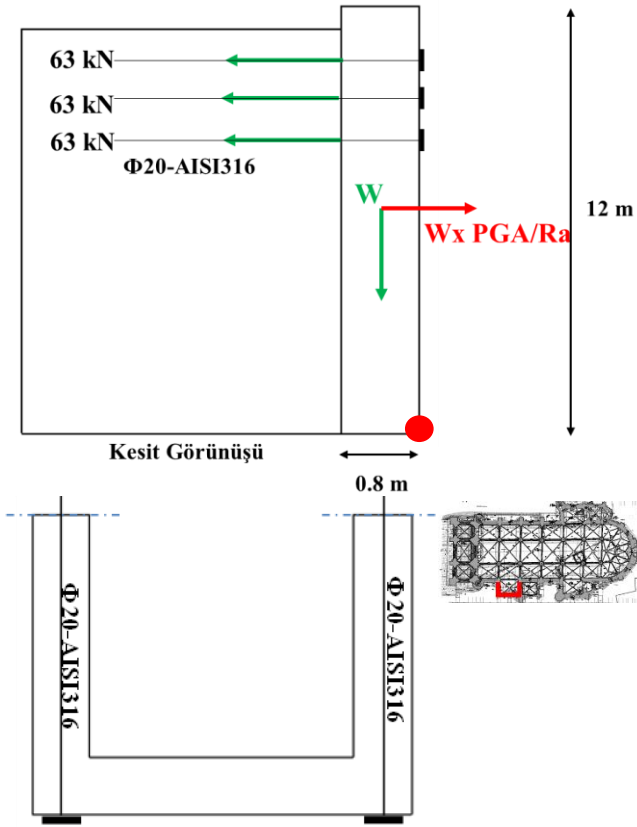
E : Elastisite modülü

I : Atalet momenti

L : Net uzunluk

Buna göre elemanın P_{cr} değeri 585 kN olarak hesaplanmıştır. Basınç çubuklarına tesir eden maksimum P kuvveti ise 355 kN olarak elde edilmiştir. Numerik modelden elde edilen P kuvveti, P_{cr} değerinden küçük olduğundan basınç çubukları burkulmaya karşı dayanıklıdır denilebilir.

Yapının şapel bölümünde, yapıya sonradan eklenmiş olan x doğrultusundaki duvarın dışa doğru dönmesini engellemek ve her iki doğrultudaki beden duvarlarının birlikte çalışmasına katkı sağlayacak çelik ankraj tasarımı deneme-yanılma yöntemi ile kararlaştırılmıştır. Buna göre, 20 mm çapında ve AISI 316 sınıfı paslanmaz çelik olmak üzere 3'er adet, toplamda 6 adet ankraj kullanılması öngörülmüştür. Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (2017) Bölüm 6.5.5'te belirtilen "Mekanizma Durumunu Esas Alan Analiz Yöntemi" uyarınca ilk olarak ankraj sistemi müdahalesiyle devrilmeye karşı konulabilecek toplam kuvvet hesaplanmış, olası deprem anında devrilmeye neden olacak kuvvetler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplama şeması Şekil 38'de verilmiştir.



Şekil 38. Şapel bölgesine yapılacak ankraj sistemi.

.AISI 316 çeliği karakteristik akma dayanımı 200 MPa olarak alınarak ankrajların olası bir deprem sonucunda, x doğrultusundaki duvarın dışa doğru dönmesi sırasında oluşacak moment etkisine karşı konulabilecek maksimum moment değeri hesaplanmıştır. Hacmi ve birim hacim ağırlığı yaklaşık olarak 65 m^3 ve 22 kN/m^3 olarak hesaplanan duvarın toplam ağırlığı 1430 kN olarak elde edilmiştir. Hesaplarda kullanılan PGA değeri, sahaya özel sismik tehlike analizi ile elde edilen 475 yıl dönüş periyotlu pik yer ivmesi 0.34 g 'dir. Buna göre ankraj sisteminin duvar üzerinde oluşturduğu moment kapasitesinin yeterli düzeyde olduğu görülmüştür.

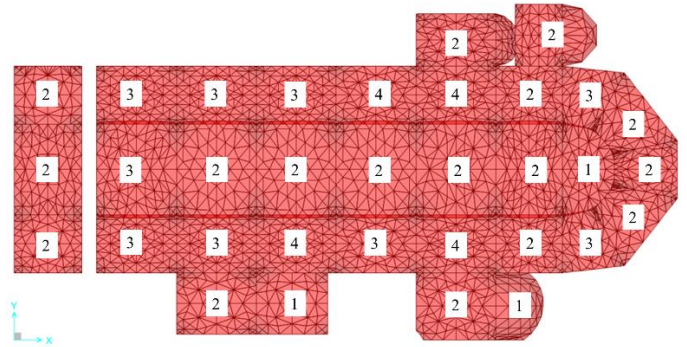
Bu yöntem yapının çan kulesi bölümünde uygulanacak ankraj sistemi için de kullanılmıştır. Hacmi ve birim hacim ağırlığı yaklaşık olarak 370 m^3 ve 22 kN/m^3 olarak hesaplanan duvarların ağırlığı 8161.6 kN olarak elde edilmiştir. Hesaplarda kullanılan PGA değeri yine 0.34 g 'dir. Buna göre ankraj sisteminin duvar üzerinde oluşturduğu moment kapasitesinin yeterli düzeyde olduğu görülmüştür.

Yapının üst örtüsünde eğilme kapasitesinin artırılması amacıyla gerekli görülen karbon hasır donatılı sıva uygulanması için oluşturulması gereken karbon hasır donatılı sıva kat sayıları, tonozlarda düşey yükler ve deprem etkileri altında oluşan moment değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. 1 kat karbon hasır donatılı sıva uygulaması, 5-7 mm mertebelerinde yapısal tamir harcı ve 1 kat karbon hasır donatıdan oluşmaktadır. Eklenen her katta 1 kat daha tamir harcı ve karbon hasır donatı ilave edilmektedir. Bu aşamada üst örtü elemanlarının mevcut kalınlıkları dikkate alınarak karbon hasır donatılı sıva uygulamaları ile elde edilebilecek moment kapasiteleri hesaplanmıştır. Tonoz kesitlerinde 35

cm kalınlığındaki kesme taşın mevcut eğilme momenti kapasitesi 6 kNm/m bulunmuş olup farklı kat sayıları ile karbon hasır donatılı sıva uygulaması sonucu elde edilen eğilme momenti kapasiteleri Tablo 7'de gösterilmiştir. Buna göre gereken kat sayıları Şekil 39'da verilmiştir.

Tablo 7. Farklı kat sayıları ile ulaşılabilecek eğilme momenti kapasiteleri.

KHDS Katsayısı ve Ulaşılan Kapasite (kNm/m)			
1 Kat	2 Kat	3 Kat	4 Kat
7.3	13.2	17.9	20.3

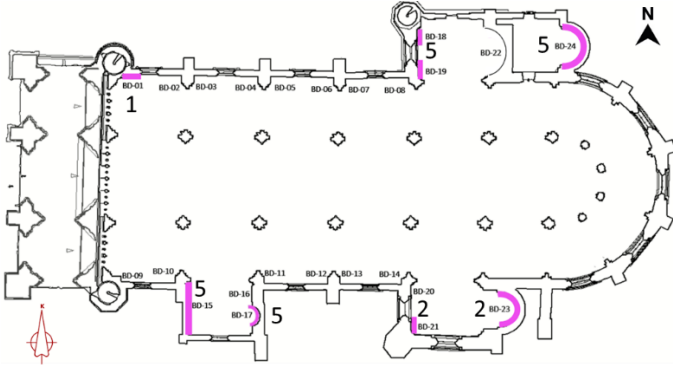


Şekil 39. Tonozlarda gereken karbon hasır donatılı sıva kat sayısı.

Yapının $+13.00 \text{ m}$ kotuna kadar olan, yan nef beden duvarlarında kayma dayanımı aşılın duvarlarda düzlem içi kayma kapasitelerini arttırmak ve yapısal davranışı iyileştirmek amacıyla karbon hasır donatılı sıva uygulanmasının gerekli bulunmuştur.

Duvarların mevcut kayma kapasiteleri $\tau = (\tau_0 + 0.4N) \times t_d$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Burada τ_0 başlangıç kayma dayanımı (kPa), kullanılan aksel yük değeri N (kN/m), ölü yük ile kütle katılım katsayısı (n) ile azaltılmış hareketli yük etkisinde, numerik modelden elde edilen maksimum aksel yük değeridir. t_d duvar kalınlığı (m) olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Karbon hasır donatılı sıvanın kayma dayanımına katkısı, kompozit elemanın kesit alanı (mm^2/m), elastisite modülü (Gpa), kopma uzaması, azaltma katsayısı (0.75 alınmıştır.) ve KHDS kat sayısı çarpılarak hesaplanmıştır. Buna göre KHDS gerektiren duvarlar gereken kat sayıları ile birlikte Şekil 40'ta verilmiştir. Her KHDS katı için yapısal tamir harcı 5-7 mm mertebelerinde düzgün bir yüzey oluşturacak şekilde uygulanacak, karbon hasır çift doğrultuda gerilerek yapısal tamir harcı içerisine düzgünce yerleştirilecektir.

Kopma Uzaması	\geq	0.0017
Elastisite Modülü	\geq	240 GPa
Ağırlık	:	200 gr/m ²
Kesit Alanı	:	55 mm ² /m



Şekil 40. Beden duvarlarında gereken karbon hasır donatılı sıva kat sayısı.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ne ait ülkenin en önemli tarihi yapılarından biri olan Lefkoşa Selimiye Camii taşıyıcı sistemi yapısal davranışının doğrusal analiz yöntemi ile değerlendirilmesi ele alınmıştır. Buna göre yapının düşey yükler altında elde edilen etki değerlerinin kapasite değerlerini aşmadığı görülmüştür. Düşey yükler ve deprem etkileri altında yapının beden duvarlarında oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilmesi E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında maksimum 2.00, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.18'dir. Düzlem dışı doğrultuda yapının beden duvarlarında oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.10, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 4.80'dir. Maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise X doğrultusundaki deprem etkisi altında 0.85, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.18'dir. Yapıya ait uçan payandalarda elde edilen maksimum düşey basınç gerilmesi değeri Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.08 MPa'dır. Maksimum kayma gerilmesi E/K oranı 2.32 olup, düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum düşey eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkileri altında 3.20 olarak bulunmuştur. Yapının üst örtüsünde elde edilen maksimum çekme gerilmesi değeri X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.55 MPa, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.65 MPa'dır. Ayrıca yapıda oluşan maksimum eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.20, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.56 olarak bulunmuştur.

Kültürel mirasımız olan tarihi yapıların gelecek nesillere aktarılabilmesi için gerekli yapısal değerlendirme çalışmalarının yapılması ve gerekli olması durumunda, koruma ilkelerine uygun şekilde deprem performansının iyileştirilmesi oldukça önemlidir. Elde edilen sonuçların, benzer deprem etkileri altında, benzer mimariye sahip tüm tarihi yapılar için kılavuz niteliğinde olduğu söylenebilir.

Yürütülmüş olan analiz çalışmalarının sonucunda orta nef üst örtüsü üzerindeki dolguların azaltılmasına ve bir gergi ve basınç çubuğu sistemi oluşturulmasına karar verilmiştir. Mevcut durumda oluşan gerilme ve iç kuvvetler, müdahale sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırılmış, tüm değerlerde azalma görülmüştür.

Söz konusu müdahaleler sonrasında, yapının beden duvarlarında oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilmesi E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında

maksimum 1.32, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.44 olarak elde edilmiştir. Düzlem dışı doğrultuda (Y doğrultusundaki deprem etkisi altında) yapının beden duvarlarında oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı 1.60, maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise 1.24 olarak ölçülmüştür. Yapının üst örtüsünde elde edilen maksimum çekme gerilmesi değeri X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.25 MPa, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.65 MPa'dır. Ayrıca yapıda oluşan maksimum eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.51, Y doğrultusundaki deprem etkisi 1.15 olarak elde edilmiştir.

Müdahalelere rağmen, deprem etkileri altında tonozlarda oluşan eğilme momenti E/K oranlarının 1'den fazla elde edildiği bölgelerde eğilme kapasitesinin artırılabilmesi için Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) uygulaması uygun bulunmuştur. Aynı zamanda, +13.00 m kotuna kadar olan yan nef beden duvarlarında oluşan düzlem içi kayma gerilmesi E/K değerlerinin azaltılması için Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) uygulaması öngörülmüştür. Mevcut durumdaki maksimum E/K oranı 2.29 iken, müdahale sonrası durumda 1.45 olarak elde edilmiştir. Yapının şapel ve çan kulesi bölümlerinde duvarlardaki çatlama ve ayrılmaların sınırlandırılması, duvarların yapı dışına doğru düzlem dışı dönmelerinin ilerlemesinin engellenmesi ve yapısal davranışın iyileştirilmesi için paslanmaz çelik ankraj uygulamaları öngörülmüştür. Yapıda gerekli görülen ve incelenen tüm müdahaleler mimari açıdan değerlendirilmiş, herhangi bir engel yaratmayacak şekilde oluşturulmuştur. Ayrıca orta nef duvarlarının üstten dışarı, alttan içeri doğru 2 derece mertebelerinde dönme yapması sonucunda orta nef tonozlarında oluşmuş farklı düzeylerdeki çatlak ve deformasyonlar ve yapı genelinde oluşmuş tüm hasarlı bölgelerde mekanik özellikleri görece yüksek bir örgü harcı (Puzolanik veya Hidrolik Kireç Esaslı, Lif Takviyeli, Çimento İçermeyen Tarihi Yapı Onarım Harcı) ile enjeksiyon yapılarak boşlukların doldurulması ve duvar bütünlüğünün iyileştirilmesi önerilmiştir. Yapı minareleri tez kapsamı içinde tutulmamıştır.

Verilen müdahale önerileri sonucunda, koruma ilkelerine uyumlu, minimum düzeyde ve büyük ölçüde geri dönüştürülebilir müdahaleler ile yapının deprem performansı kayda değer düzeyde iyileştirilmiştir. Fakat tarihi yapılarda yapısal değerlendirmenin, incelenen yapıya ait birçok farklı durum içerebileceği ve her farklı yaklaşım ya da yapıya ait her unsurun sonucu değiştirebileceği unutulmamalıdır. Modelleme, analiz ve öneriler sadece tez çalışması kapsamında yapılmış olup, yapı üzerinde gerçekleştirilmekte olan restorasyon çalışmalarında farklı modelleme, analizler ve müdahaleler yapılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın tamamlanması için değerli bilgi ve deneyimlerini paylaşan İnş. Yük. Müh. Ali Naki Şanver'e çok teşekkür ederiz. Ayrıca çalışmanın ilerlemesi ve yayınlanmasına imkan sağlayan T.C Kültür ve Turizm Bakanlığı Vakıflar Genel Müdürlüğü'ne teşekkürü borç biliriz.

Kaynaklar

- [1] Arslangazi H. (2007). Lefkoşa Kent Dokusunda Mimari Üsluplar, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- [2] Enlart, C., Hunt, D. (1987). Gothic Art and The Renaissance in Cyprus, s.83-87.
- [3] Jeffery, G. (1931). Cyprus Monuments, Historical and Architectural Buildings, New Illustrated Series, No.3, Nicosia, s.5.
- [4] Önge, Y. (1989). Kıbrıs Eserlerinde Yaşatılan Türk Sanat Ve Mimarlık Gelenekleri, s.103.
- [5] Musso, C.M. (1972). St. Sophia (Selimiye Mosque) Project of Restoration, Unesco Mission in Cyprus, 1971-1972.
- [6] Smith, A., L. (1887). Through Cyprus... Illustrated, with map. British Library.
- [7] Lourenço P.B. (1998). "Experimental and Numerical Issues in The Modelling of The Mechanical Behaviour of Masonry", Sturctural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona.
- [8] Mistler, M., Butenweg, C., Meskouris, K. (2006) Modelling methods of historic masonry buildings under seismic excitation. J Seismol 10: 497-510, 664.
- [9] Vakıflar Genel Müdürlüğü. (2017). "Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu".
- [10] Kale, Ö., Akkar, S. Anooshivaran, A., Hamzehloo, H. (2015). A Ground Motion Predictive Model for Iran and Turkey for Horizontal PGA, PGV and %5 Damped Response Spectrum: Investigation of Possible Regional Effects. Bulletin of the Seismological Society of America 105(2), 963-980.
- [11] Boore, D.M., Atkinson, G. (2008). "Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s." Earthquake Spectra 24(1), 99-138.
- [12] Chiou, BS-J., Youngs, RR. (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. Earthquake Spectra 24(1), 173-215.
- [13] İyisan, R., Akbaş, M. (2022). Lefkoşa Selimiye Camii, Geoteknik ön değerlendirme.
- [14] ACI 530-05. (2005). Building Code Requirements for Masonry Structures, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.
- [15] EN 1995-1-1. (2008) Eurocode 5, Design of timber structures.
- [16] Geotest (2021). KKTC/ Lefkoşa Selimiye Camii Restorasyon Çalışması.
- [17] TBDY (2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [18] Turkan, Z., Özburak, Ç. (2018). Lefkoşa Tarihi Kent Dokusunda Selimiye Meydanı.
- [19] Limbouri, E. (2011). The restorations of ancient monuments of Cyprus from the establishment of the Department of Antiquities of Cyprus in 1935 until 2005.
- [20] Öztürk, C., Gürdallı, H. (2021). Lefkoşa ve Mağusa'da Gotik Yapıların Mimari Elemanlara Göre Analizi. YDÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi, 3(1), 1-20.
- [21] SAP2000 (Version 22.2.0) [Computer Software]. Integrated software for structural analysis and design program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.