



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞKEN YÜKSEKLİK VE ENKESİTLİ BETONARME
PREFABRİK KİRİŞLERDE YANAL BURKULMANIN
İNCELEMESİ**

ERDOĞAN GÖKKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2019

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN YÜKSEKLİK VE
ENKESİTLİ BETONARME
PREFABRİK KİRİŞLERDE YANAL
BURKULMANIN İNCELEMESİ

ERDOĞAN GÖKKAYA

Bu tez,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2019

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Erdoğan GÖKKAYA tarafından hazırlanan “DEĞİŞKEN YÜKSEKLİK VE ENKESİTLİ BETONARME PREFABRİK KİRİŞLERDE YANAL BURKULMANIN İNCELEMESİ” adlı bu tez, jürimiz tarafından 18 / 11 / 2019 tarihinde oy birliği ile Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Metin KÖSE (DANIŞMAN)
İnşaat Mühendisliği, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Alırıza İlker AKGÖNEN (ÜYE)
İnşaat Mühendisliği, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. M.Eren GÜLŞAN (ÜYE)
İnşaat Mühendisliği, Gaziantep Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. MUSTAFA YAZICI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Erdoğan GÖKKAYA



Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**DEĞİŞKEN YÜKSEKLİK VE ENKESİTLİ BETONARME PREFABRİK
KİRİŞLERDE YANAL BURKULMANIN İNCELEMESİ
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)
ERDOĞAN GÖKKAYA
ÖZET**

Bu çalışmada; geniş açıklıklı, değişken yükseklikli ve enkesitli betonarme kirişlerin, kritik burkulma yükleri ANSYS ve SAP2000 programları kullanılarak incelenmiştir. Analizlerden önce, ANSYS modelininin doğrulanması için teorik bir çalışma seçilmiştir. Çalışmada, sabit kesitli çelik ve beton kirişlerin burkulma yükleri, elastik teori ile bulunan burkulma yükleri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Yapılacak analizlerin doğrulanması amacıyla daha önce yapılan çalışmalarda kullanılan çelik ve betonarme kirişlere ait ölçü ve malzeme bilgileri kullanılarak doğrusal burkulma analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar ile yapılan burkulma hesapları sonuçları yeterlidir. Çünkü, Elastik Stabilité Teorisi ile hesaplanan teorik sonuçlar ile ANSYS sonuçları arasındaki fark %5'ten azdır. ANSYS modeli teorik sonuçlarla doğruladıktan sonra, burkulma analizinde optimum sonlu eleman boyutunu belirlemek için çalışmada kullanılan yeni prefabrik beton kiriş üzerinde 4 farklı eleman boyutu denenmiştir.

ANSYS programı, üst başlık genişliğinin kiriş elemanlarının düşey yükler altındaki burkulma yükü üzerindeki etkisini belirlemek için de kullanılmıştır. Ek olarak, donatı ve öngerilme kuvvetinin doğrusal burkulma yükü üzerindeki etkisini belirlemek için modele donatı ve öngerilme kuvveti dahil edilmiştir. Son olarak, beton ve donatı malzemelerinin doğrusal olmayan davranışları SAP2000 programı ile hazırlanan modele dahil edilmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonuçları doğrusal modellerle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, ANSYS ve SAP2000 programları ile değişken yükseklik ve enkesitli prefabrik kirişlerde, doğrusal ve doğrusal olmayan kritik burkulma yükünün belirlenmesinde kullanılabilecek analiz modelleri elde edilmiştir. Ayrıca, doğrusal olmayan burkulma yükünün doğrusal burkulma yükünden daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Burkulma, Kiriş üst tabla genişliği, Prefabrik çatı kirişi

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ağustos / 2019

Danışman: Prof. Dr.M.Metin KÖSE
Sayfa sayısı :106

ANALYSIS OF LATERAL BUCKLING IN VARIABLE HEIGHT AND CROSS-SECTION CONCRETE PREFABRICATED BEAMS

ABSTRACT

In this study, the critical buckling loads of the reinforced concrete beams with wide spans, variable heights and cross sections were investigated using ANSYS and SAP2000 programs. Before analyses, a theoretical study was selected to verify ANSYS model. Buckling loads of steel and concrete beams with uniform cross section are verified by comparing the buckling loads found by elastic theory.

Linear buckling analysis were carried out using the dimensions and material data of steel and reinforced concrete beams used in the previous studies in order to verify the ANSYS model. The results of the buckling calculations made with finite elements were found to be sufficient, because difference between the theoretical results calculated by the Elastic Stability Theory and ANSYS results is less than 5%. After verifying ANSYS model with the theoretical results, 4 different element sizes were tried on new prefabricated concrete beam used in the study in order to determine the optimum finite element size in the buckling analysis.

ANSYS program was also used to determine the effect of upper head width on buckling load of beam members under vertical loads. In addition, reinforcement and prestressing force were included in the model in order to determine the effect of reinforcement and prestressing force on linear buckling load. Finally, the nonlinear behavior of concrete and reinforcement materials was included in the model prepared with the SAP2000 program. The results of nonlinear were compared with the linear models.

In this study, analysis models which can be used to determine the linear and nonlinear critical buckling loads have been obtained in prefabricated beams with variable height and cross section by ANSYS and SAP2000 programs. In addition, it was also found that nonlinear buckling load was lower than linear buckling load.

Key Words: Prefabricated roof beam, Buckling, Beam upper flange width

Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Institute for Graduate Studies in Science and Technology
Department of Civil Engineer August / 2019

Supervisor: Prof. Dr.M.Metin KÖSE
Page number: 106

TEŐEKKÜR

Bu tez çalıŐması sűresince engin bilgi ve tecrűbelerinden faydalandıĐım ve çalıŐmamın her aŐamasında saĐladıĐı bilimsel katkılardan dolayı Prof.Dr.M.Metin KŐSE'ye her fırsatta bilgi ve birikimlerinden yararlandıĐım tűm bűlűm hocalarıma, bana her konuda destek olan AraŐtırma Gűrevlisi Sıla AVĐIN'a teŐekkűr ederim.

Son olarak, bu gűnlere gelmemde her tűrlű maddi ve manevi desteklerini gűrdűĐűm aileme ve eŐime sonsuz teŐekkűrlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| TEZ BİLDİRİMİ | i |
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER..... | iv |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | xii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | xiii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Ön Üretilmiş Betonarme (Prefabrik) Yapılar | 2 |
| 1.2. Öngerilmeli Kirişler | 5 |
| 1.3. Burkulma | 9 |
| 1.4. Betonarme Kirişlerde Burkulma | 11 |
| 1.5. Burkulmanın Analitik Olarak İncelenmesi | 11 |
| 1.5.1. Lineer (özdeğer) burkulma analizi | 12 |
| 1.5.2. Doğrusal olmayan (Non-linear) burkulma analizi..... | 12 |
| 1.6. Çalışmanın Amacı..... | 12 |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR | 13 |
| 3. MATERYAL | 18 |
| 3.1. Beton | 18 |
| 3.1.1. Beton doğrusal malzeme özellikleri | 18 |
| 3.1.2. Beton doğrusal olmayan malzeme özellikleri | 18 |
| 3.2. Donatı..... | 19 |
| 3.2.1. Donatı doğrusal malzeme özellikleri..... | 19 |
| 3.2.2. Normal donatılara ait doğrusal olmayan malzeme özellikleri..... | 19 |
| 3.2.3. Öngerme halatlarına ait doğrusal olmayan malzeme özellikleri | 19 |
| 4. METOD | 21 |
| 4.1. ANSYS Programı ile Yapılan Doğrusal Burkulma Analizi | 21 |
| 4.1.1. ANSYS programı ile yapılan doğrusal burkulma analizi adımları | 21 |
| 4.1.2. ANSYS Programıyla Yapılan Analizlerde Kullanılan Sonlu Elemanlar | 26 |
| 4.1.2.1. SOLID186 eleman | 26 |
| 4.1.2.2. BEAM188 eleman | 27 |
| 4.2. SAP2000 ile Doğrusal olmayan (Nonlinear) Burkulma Analizi | 28 |
| 4.2.1. Doğrusal olmayan geometri | 30 |
| 4.2.2. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı | 31 |
| 4.3. Kiriş Ağırlığı ve Öngerme Kuvvetinin Burkulma Analizlerine Dahil Edilmesi | 32 |

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| 4.4. Sınır Şartları..... | 33 |
| 5. ANSYS İLE YAPILAN DOĞRUSAL BURKULMA ANALİZLERİ..... | 34 |
| 5.1. ANSYS ile Yapılan Burkulma Analizlerinin Doğrulanması | 34 |
| 5.1.1. Sabit I Enkesitli Çelik Kirişlerin Yanal Burkulması | 34 |
| 5.1.1.1. Konsol ucuna tekil yük etkileyen sabit I enkesitli çelik kirişlerin yanal burkulması | 34 |
| 5.1.1.2. Basit mesnetli, tekil yük etkileyen sabit I enkesitli çelik kirişlerin yanal burkulması | 36 |
| 5.1.1.3. Basit mesnetli, yayılı yük etkileyen sabit I enkesitli çelik kirişlerin yanal burkulması | 38 |
| 5.1.1.4. Sabit I enkesitli basit mesnetli betonarme kirişlerin yanal burkulması | 38 |
| 5.1.1.5. Basit mesnetli, tekil yük etkileyen sabit I enkesitli betonarme kirişlerin yanal burkulması | 41 |
| 5.1.1.6. Basit mesnetli, yayılı yük etkileyen sabit I enkesitli betonarme kirişlerin yanal burkulması | 42 |
| 5.1.2. Basit mesnetli, yayılı yük etkileyen sabit yükseklikli mesnet bölgesi dikdörtgen beton kirişlerin yanal burkulması | 44 |
| 5.1.3. Değişken Yükseklik ve Enkesitli Basit Mesnetli Betonarme Kirişlerin Yanal Burkulması | 45 |
| 5.2. Mesh Yapısı ve Sonlu Eleman Büyüklüğü Seçimi Analizleri | 48 |
| 5.2.1. 10 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan model..... | 49 |
| 5.2.2. 5 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan model..... | 49 |
| 5.2.3. 4 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan model..... | 50 |
| 5.2.4. 3 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan model..... | 50 |
| 5.2.5. Eleman büyüklüğü seçimi | 51 |
| 5.3. Üst Başlık Genişliğinin Burkulma Yüküne Etkisi | 51 |
| 5.3.1. B=350 mm üst başlık genişliği için burkulma yükünün hesabı | 54 |
| 5.3.2. B=400 mm üst başlık genişliği için burkulma yükünün hesabı | 55 |
| 5.3.3. B=508 mm üst başlık genişliği için burkulma yükünün hesabı | 57 |
| 5.3.4. B=634 mm üst başlık genişliği için burkulma yükünün hesabı | 58 |
| 5.4. Betonarme Kirişlerde Öngerilme Kuvvetinin ve Normal Donatının Doğrusal Yanal Burkulma Yüküne Etkisi | 60 |
| 6. SAP2000 PROGRAMIYLA YAPILAN ANALİZLER..... | 68 |
| 6.1. SAP2000 Programıyla Yapılan Öngerilmemiş Kirişte Doğrusal Burkulma Analizi. 68 | |
| 6.2. SAP2000 Programıyla Doğrusal Olmayan Eğilme Analizi..... | 71 |
| 6.3. SAP2000 Programıyla Doğrusal Olmayan Burkulma Analizi | 74 |
| 6.3.1. B=350 mm üst başlık genişliği için doğrusal olmayan burkulma analizi | 76 |
| 6.3.2. B=400 mm üst başlık genişliği için doğrusal olmayan burkulma analizi | 78 |
| 6.3.3. B=508 mm üst başlık genişliği için doğrusal olmayan burkulma analizi | 80 |
| 6.3.4. B=634 mm üst başlık genişliği için doğrusal olmayan burkulma analizi | 81 |
| 7. SONUÇLAR..... | 83 |
| 7.1. ANSYS Programı İçin Yapılan Doğrulama Analizleri..... | 83 |
| 7.2. Üst Başlık Genişliğinin Burkulma Yüküne Etkisi | 83 |
| 7.3. Öngerilme Kuvvetinin Kritik Burkulma Yüküne Etkisi..... | 84 |

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|------------------------|
| 7.4. SAP200 Programı ile yapılan Analiz Sonuçları | 84 |
| 8. DEĞERLENDİRMELER..... | 86 |
| KAYNAKLAR..... | 87 |



ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa No |
|--|-----------------|
| Şekil 1.1. Depremden sonra Üst başlık yaklaşık 30 cm deplasman yapmış(Barka, A.G., Kulaksızoğlu, A. (2013)) | 1 |
| Şekil 1.2. Üst başlık yetersizliği (Barka, A.G., Kulaksızoğlu, A. (2013)) | 2 |
| Şekil 1.3. Prefabrik kolon | 4 |
| Şekil 1.4. Prefabrik çatı kirişi ve aşık kirişleri | 4 |
| Şekil 1.5. Prefabrik çatı kirişi ve aşık kirişleri (http://www.prefab.org.tr/tr/cubuk-elemanlar/sayfa/58.aspx) | 5 |
| Şekil 1.6. Prefabrik yapı görüntüsü ve çatı kirişi enkesiti | 5 |
| Şekil 1.7. Ön gerdirme işlemi | 7 |
| Şekil 1.8. Basit mesnetli bir kirişte öngerme yükü ve dış yükler etkisiyle düşey deplasman durumu | 7 |
| Şekil 1.9. Öngermesiz (1,2) ve öngermeli kiriş deplasmanları (Wikipedia) | 8 |
| Şekil 1.10. Öngermeli kirişte gerilme durumu (ptsindia.net) | 8 |
| Şekil 1.11. Öngerme halatı (www.mdpi.com) | 9 |
| Şekil 1.12. İki ucu mafsallı aksenal yüklü eleman | 9 |
| Şekil 1.13. Basınç çubuklarında burkulma boyu (TS 648) | 10 |
| Şekil 3.1. Beton doğrusal olmayan malzeme özellikleri | 18 |
| Şekil 3.2. Normal donatılara ait doğrusal olmayan malzeme özellikleri | 19 |
| Şekil 3.3. Öngerme halatlarına ait doğrusal olmayan malzeme özellikleri | 20 |
| Şekil 4.1. Proje alanına yapısal statik analiz şablonu eklenmesi | 21 |
| Şekil 4.2. Proje alanına burkulma analizi şablonu eklenmesi ve statik analiz ile ilişkilendirilmesi | 22 |
| Şekil 4.3. Malzeme bilgileri ekleme ve değiştirme ekranı | 22 |
| Şekil 4.4. Analiz şablonuna geometri eklenmesi | 23 |
| Şekil 4.5. Analiz modeline kontak tanımlama ekran görüntüsü | 23 |
| Şekil 4.6. Beton ve donatı elemanlarına ait ile düğüm noktalarının birleştirilmesi | 24 |
| Şekil 4.7. Doğrusal burkulma analizi ekranının açılması | 25 |
| Şekil 4.8. Solid186 elemana ait geometri, düğüm noktaları ve eleman koordinat sistemi .. | 27 |
| Şekil 4.9. BEAM188 geometrisi, düğüm noktaları ve eleman koordinat sistemi | 28 |
| Şekil 4.10. SAP2000 doğrusal olmayan analiz parametreleri | 29 |
| Şekil 4.11. Kolon elemanlarında P-Delta etkisi | 31 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.12. "Load Case Data" ekran görüntüsü | 31 |
| Şekil 4.13. Shell (Multilayered) elemanı düzenleme ekran görüntüsü..... | 32 |
| Şekil 4.14. Ağırlığın bulunması durumunda burkulma analizi adımları | 33 |
| Şekil 5.1. Kiriş en kesiti | 34 |
| Şekil 5.2. Çelik konsol kiriş 3 boyutlu katı modeli, uygulanan yükler ve mesnet şartları .. | 34 |
| Şekil 5.3. Çelik konsol kirişe uygulanan birim yükleme..... | 35 |
| Şekil 5.4. Çelik konsol kiriş ANSYS modeli mesh yapısı görüntüsü | 35 |
| Şekil 5.5. Çelik konsol kiriş burkulma analizi sonuçları ve burkulma yük faktörleri..... | 35 |
| Şekil 5.6. Basit mesnetli çelik kiriş 3 boyutlu katı modeli | 36 |
| Şekil 5.7. I-kesitli çelik kiriş ANSYS modeli mesh yapısı | 36 |
| Şekil 5.8. I-kesitli çelik kiriş simetri düzlemi ve uygulanan tekil yük | 37 |
| Şekil 5.9. I-kesitli çelik kiriş ucu mesnet şartları | 37 |
| Şekil 5.10. I-kesitli çelik kiriş üst görünüşü | 37 |
| Şekil 5.11. I-kesitli çelik kirişte yayılı yük uygulanan yüzey | 38 |
| Şekil 5.12. I-kesitli çelik kiriş deformasyon şekli | 38 |
| Şekil 5.13. Sabit I-kesitli beton kiriş en kesiti ve kesit ölçüleri | 39 |
| Şekil 5.14. Sabit I-kesitli beton kiriş katı model en kesiti | 39 |
| Şekil 5.15. Sabit I-kesitli beton kiriş 3 boyutlu katı modeli | 40 |
| Şekil 5.16. Sabit I-kesitli beton kiriş mesh yapısı | 40 |
| Şekil 5.17. Sabit I-kesitli beton kiriş kesiti mesh yapısı..... | 40 |
| Şekil 5.18. Sabit I-kesitli beton kiriş kiriş simetri eksen ve uygulanan tekil yük | 41 |
| Şekil 5.19. Sabit I-kesitli beton kiriş ucu mesnet şartları | 41 |
| Şekil 5.20. Sabit I-kesitli beton kiriş burkulma yük faktörleri | 42 |
| Şekil 5.21. Sabit I-kesitli beton kiriş mesnet şartları ve uygulanan yayılı yük | 42 |
| Şekil 5.22. Sabit I-kesitli beton kiriş simetri düzlemi | 43 |
| Şekil 5.23. Sabit I-kesitli beton kiriş ucu mesnet şartları | 43 |
| Şekil 5.24. Burkulma analizi sonuçları ve burkulma yük faktörleri..... | 43 |
| Şekil 5.25. I-kesitli, mesnet bölgesi dikdörtgen beton kiriş yan görünüşü..... | 44 |
| Şekil 5.26. I-kesitli, mesnet bölgesi dikdörtgen beton kiriş mesh yapısı görünüşü | 44 |
| Şekil 5.27. I-kesitli, mesnet bölgesi dikdörtgen beton kiriş burkulma analizi sonuçları..... | 45 |
| Şekil 5.28. Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş mesnet ve açıklık ortasında en kesit ve ölçüleri | 45 |
| Şekil 5.29. Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş ölçüleri..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Şekil 5.30 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş mesh yapısı yan görünüşü | 46 |
| Şekil 5.31 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş mesh yapısı perspektif görünüşü .. | 47 |
| Şekil 5.32 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş simetri düzlemi ve uygulanan tekil yük | 47 |
| Şekil 5.33 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kirişe uygulanan mesnet koşulları | 47 |
| Şekil 5.34 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş burkulma analizi sonucu burkulma yük faktörleri | 48 |
| Şekil 5.35. 10 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan ağ yapısı | 49 |
| Şekil 5.36. 5 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan ağ yapısı | 49 |
| Şekil 5.37. 4 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan ağ yapısı | 50 |
| Şekil 5.38. 3 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan ağ yapısı | 50 |
| Şekil 5.39. Modellenen prefabrik çatı kirişine ait ölçüler | 51 |
| Şekil 5.40. Çatı kirişi A-A kesiti (mesnet kesiti)..... | 52 |
| Şekil 5.41. Çatı Kirişi B-B Kesiti (Açıklık Ortası Kesiti)..... | 52 |
| Şekil 5.42. 350 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesnet bölgesi katı görüntüsü | 54 |
| Şekil 5.43. 350 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesh görüntüsü | 55 |
| Şekil 5.44. 350 mm üst başlık genişlikli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları..... | 55 |
| Şekil 5.45. 350 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait burkulma yük faktörü | 55 |
| Şekil 5.46. 400 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesnet bölgesi katı görüntüsü | 56 |
| Şekil 5.47. 400 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesh görüntüsü | 56 |
| Şekil 5.48. 400 mm üst başlık genişlikli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları..... | 56 |
| Şekil 5.49 400 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait burkulma yük faktörü | 57 |
| Şekil 5.50 508 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesnet bölgesi katı görüntüsü | 57 |
| Şekil 5.51. 508 mm üst başlık genişlikli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları..... | 57 |
| Şekil 5.52 508 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesh görüntüsü..... | 58 |
| Şekil 5.53 508 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait burkulma yük faktörü | 58 |
| Şekil 5.54 634 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesnet bölgesi katı görüntüsü | 59 |
| Şekil 5.55 634 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesh görüntüsü..... | 59 |
| Şekil 5.56. 634 mm üst başlık genişlikli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları..... | 59 |
| Şekil 5.57 634 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait burkulma yük faktörü | 60 |
| Şekil 5.58. Öngermeli kiriş açıklık ortasında en kesit ve ölçüleri..... | 60 |
| Şekil 5.59. Öngermeli kiriş mesnette kesit ölçüleri..... | 61 |
| Şekil 5.60. Öngermeli kirişte öngerme şablonu, mesnette en kesit ve ölçüleri..... | 61 |

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Şekil 5.61. Öngermeli kirişte boy donatıları..... | 61 |
| Şekil 5.62. Öngermeli kiriş normal donatı yerleşimi..... | 62 |
| Şekil 5.63. Öngermeli kiriş ölçüleri..... | 62 |
| Şekil 5.64. Öngermeli kiriş katı modeli..... | 62 |
| Şekil 5.65. Öngermeli kiriş model bölmeleri | 62 |
| Şekil 5.66. Öngermeli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları | 63 |
| Şekil 5.67. Öngermeli kiriş ucundan 10 cm uzaklıktaki mesnet yeri | 63 |
| Şekil 5.68. Öngermeli kiriş simetri sınır koşulu uygulanan kesit görüntüsü..... | 64 |
| Şekil 5.69. Öngermeli kiriş mesh yapısı perspektif görüntüsü..... | 64 |
| Şekil 5.70. Öngermeli kiriş mesh yapısı yan görüntüsü | 64 |
| Şekil 5.71. Öngerme ve kiriş ağırlığı uygulandıktan sonra kiriş X yönü deplasmanları..... | 65 |
| Şekil 5.72. Öngerme ve kiriş ağırlığı uygulandıktan sonra kiriş Z yönü (düşey) | 66 |
| Şekil 5.73. Burkulma analizi sonucu burkulma yük faktörü | 66 |
| Şekil 6.1. Betonarme kiriş SAP2000 modeli perspektif görüntüsü..... | 68 |
| Şekil 6.2. Alt başlık ve üst başlık geçiş bölgesinin SAP2000’de modellenmesi | 69 |
| Şekil 6.3. Kiriş ucu mesnet koşulları..... | 69 |
| Şekil 6.4 Kiriş ortası mesnet koşulları (simetri düzlemi) | 70 |
| Şekil 6.5. Uygulanan tekil yükler | 70 |
| Şekil 6.6 Burkulma analizi sonucu burkulma yük faktörü | 70 |
| Şekil 6.7. Kirişi modellemek için kullanılan kesitler | 71 |
| Şekil 6.8. "Shell Section" düzenleme ekran görüntüsü | 71 |
| Şekil 6.9. Multilayered Shell tanımlama ekran görüntüsü | 72 |
| Şekil 6.10. Kiriş gövdesinde etriye ve gövde donatısının tanımlanma ekran görüntüsü..... | 73 |
| Şekil 6.11. Üstbaşlık açıklık ortası deplasmanları..... | 73 |
| Şekil 6.12. Doğrusal olmayan eğilme analizi sonucu kirişte gerilme dağılımı | 73 |
| Şekil 6.13. Doğrusal olmayan eğilme analizi sonucu kirişte gerilme dağılımı perspektif görünüşü | 74 |
| Şekil 6.14. Kiriş ortası üst başlıkta uygulanan kuvvet | 74 |
| Şekil 6.15. Kirişte tanımlanan tendonlar | 76 |
| Şekil 6.16. Öngerme şablonun SAP2000’de modellenmesi..... | 76 |
| Şekil 6.17. 350 mm üst başlık genişliği için uygulanan yükler | 77 |
| Şekil 6.18. 350 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği..... | 77 |
| Şekil 6.19. 350 mm üst başlık genişliği için deplasmanlar | 77 |

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|------------------------|
| Şekil 6.20. 350 mm üst başlık genişliği için gerilmeler | 78 |
| Şekil 6.21. 400 mm üst başlık genişliği için uygulanan yükler | 78 |
| Şekil 6.22. 400 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği..... | 79 |
| Şekil 6.23. 400 mm üst başlık genişliği için deplasmanlar | 79 |
| Şekil 6.24. 400 mm üst başlık genişliği için gerilmeler | 79 |
| Şekil 6.25. 508 mm üst başlık genişliği için uygulanan yükler | 80 |
| Şekil 6.26. 508 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği..... | 80 |
| Şekil 6.27. 508 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği..... | 81 |
| Şekil 6.28. 508 mm üst başlık genişliği için gerilmeler | 81 |
| Şekil 6.29. 508 mm üst başlık genişliği için uygulanan yükler | 81 |
| Şekil 6.30. 634 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği..... | 82 |
| Şekil 6.31. 634 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği..... | 82 |
| Şekil 6.32. 634 mm üst başlık genişliği için gerilmeler | 82 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|------------------------|
| Çizelge 2.1. m tablosu | 16 |
| Çizelge 3.1. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan C40/50 beton malzeme özellikleri.... | 18 |
| Çizelge 5.1. Çelik kirişe ait ölçüler | 34 |
| Çizelge 5.2. Sonlu eleman büyüklüğü ve burkulma yükündeki değişim | 51 |
| Çizelge 5.3. Analizlerde kullanılan üst başlık genişlikleri | 52 |
| Çizelge 6.1. AASHTO ve ACI standartlarına göre öngerme transfer uzunluğu eşitlikleri . | 75 |
| Çizelge 6.2. SAP2000 modelinde tendon gerilmeleri | 75 |
| Çizelge 7.1. Doğrulama çalışması sonuçları | 83 |
| Çizelge 7.2. Yapılan 4 adet analize ait kritik burkulma yükleri | 83 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---------------|--|
| P_{cr} | : Euler'in kritik yükü (sütunda boyuna sıkıştırma yükü), |
| E | : Kolon malzemesinin elastikiyet modülü, |
| G | : Kayma modülü, |
| π | : Poisson oranı, |
| I | :Kolon kesitinin minimum atalet alanı, |
| L | : Desteklenmeyen sütun uzunluğu , |
| L_n | : Kiriş serbest açıklığı |
| K | : Sütun etkili uzunluk faktörü, |
| f_{ck} | : Karakteristik basınç dayanımı, |
| f_{ctk} | : Karakteristik çekme dayanımı, |
| d_b | : Öngerme halatı çapı |
| B | : Yatay eğilme rijitliği |
| C | : Torsion rijitliği |
| F_p | : Toplam öngerme kuvveti |
| d_p | : Öngerme halatlarının ağırlık merkezinin kesit ağırlık merkezine uzaklığı |
| A | : Enkesit alanı |
| W | : Mukavemet momenti |
| σ_p | : Öngerme kuvvetinin neden olduğu gerilme |
| σ_g | : Kiriş kendi ağırlığının neden olduğu gerilme |
| L_t | : Öngerme donatısı transfer uzunluğu |
| AASHTO | : American Association of State Highway and Transportation Official |
| ACI | : American Concrete Institute |

1. GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyamızda devam eden teknolojik gelişmeler bir yandan üretim olanaklarını arttırmış bir yandan da çeşitlendirmiştir. Gelişen teknoloji ile beraber endüstriyel yapılardan beklentilerde yıllar içerisinde artmıştır. Bu beklentiler endüstriyel yapılarda da değişiklikleri ve gelişmeleri beraberinde getirmiştir. Yapılardaki açıklıkların artması bu beklentilerin başında sayılabilir.

Ülkemizde imal edilen mevcut yapıların çoğunlukla düşey yükleri taşıyacak dayanıma sahip olduğu söylenebilir. Ülkemizde büyük açıklıklarda imal edilen sanayi yapılarında yüzde 85’inde prefabrikasyon teknolojisi kullanılmaktadır (2016 yılı sektör raporu). İmal edilen prefabrik betonarme sanayi yapılarına ait çatı kirişlerinde değişken yükseklikli, I-kesitli kiriş elemanları yaygın olarak kullanılmaktadır. Çatı kirişi elemanlarında kullanılan beton kalitesinin artması, daha hafif ve ekonomik yapı tasarımı ihtiyacı ile I-kesitli çatı kirişlerinde üst başlık genişliğinin daraltıldığı uygulamalar görülmektedir. Bu durum çatı kirişinde yanal stabilite sorunlarına sebep olmaktadır. Çatı kirişlerinin zati ağırlığını hafifletmek amacıyla yapılan üst başlık genişlikleri depremlerde onarımı çok zor olan eğilme ve deformasyon problemleri yaşanmasına neden olmuştur. Deformasyonlar Şekil 1.1 ve Şekil 1.2 ile gösterilmektedir. (Barka, A.G., Kulaksızoğlu, A. (2013))



Şekil 1.1. Depremden sonra Üst başlık yaklaşık 30 cm deplasman yapmış(Barka, A.G., Kulaksızoğlu, A. (2013))



Şekil 1.2. Üst başlık yetersizliği (Barka, A.G., Kulaksızoğlu, A. (2013))

1998 Adana-Ceyhan ve 1999 Adapazarı-Gölcük depremlerinde geniş açıklıkları geçen prefabrike endüstri yapılarının çatı kirişlerinde kiriş düzlemine dik yönde eğilme problemleri yaşanmıştır. Büyük açıklık geçen prefabrike çatı sistemlerinde diyafram oluşumu çatı plakalı ya da çatı çaprazları ile güçlendirilmiş sistemler ile sağlanmaktadır. Bu sistemlerde çatı düzleminde oluşan yatay deprem yükleri diyafram yoluyla tüm sisteme dağıtılmaktadır. Yapılmış olan diyaframlar ile etki eden yatay deprem yüklerinin çatı kirişinin üst başlığı ile taşınmasının önüne geçilebilmektedir. Ancak ülkemizde genellikle uygulanan prefabrike çatı sistemleri aşıklı sistem olup çatıda bir diyafram oluşmayacağından çatı kirişi üst başlığı kendisine gelen yatay deprem yüklerini tek başına karşılamak mecburiyetindedir. (Barka, A.G., Kulaksızoğlu, A. (2013))

1.1. Ön Üretimli Betonarme (Prefabrik) Yapılar

Ülkemizde, betonarme yapılarda prefabrikasyon teknolojisinin yaygın olarak kullanılması 1960'lı yıllarda başlamıştır. Beton prefabrikasyon sanayinin bugün ulaştığı düzeyde ise her türlü az ve çok katlı yapılar (konut, ticaret, genel hizmet, eğitim, turizm, spor yapıları vb.) ulaşım yapı elemanları (boru, menfez, elektrik ve telefon direkleri, trafo binaları vb.) ve çevre düzeni elemanları prefabrik sanayii tarafından yapılabilmekte ve üretilmektedir (<http://www.prefab.org.tr/tr/Default.aspx>).

Avrupa'da endüstriyel ve ticari binaların yanı sıra otoparklar da prefabrik olarak inşa edilmiştir. Bunun nedenleri olarak, kısa bir inşaat süresi, uzun bir kullanım ömrü, inşaat elemanlarının yüksek güvenliği ve binanın esnek bir şekilde kullanılmasını

sağlayan geniş açıklıklar söylenebilir. Bir yapının tamamı, temelden, kolonlardan, kirişlerden ve duvarlardan başlayarak, prekast beton elemanlarla inşa edilebilir. Prefabrikleştirme, kolonlar ve kirişler gibi sağlam yapı elemanları için idealdir. Beton için uzun kürlenme süresi, yerinde betonla yapılan inşaatlarda inşaatın ilerlemesini önemli ölçüde geciktirir. Sertleşme süresini kısaltmak için pahalı katkı maddelerinin kullanılması gerekir. Pahalı katkı maddelerinin kullanılması durumu önüretimli betonarme elemanların tesiste üretilerek şantiyeye taşınmaları sebebiyle gerekli değildir (<https://www.prilhofer.com/precast-industrial-buildings>).

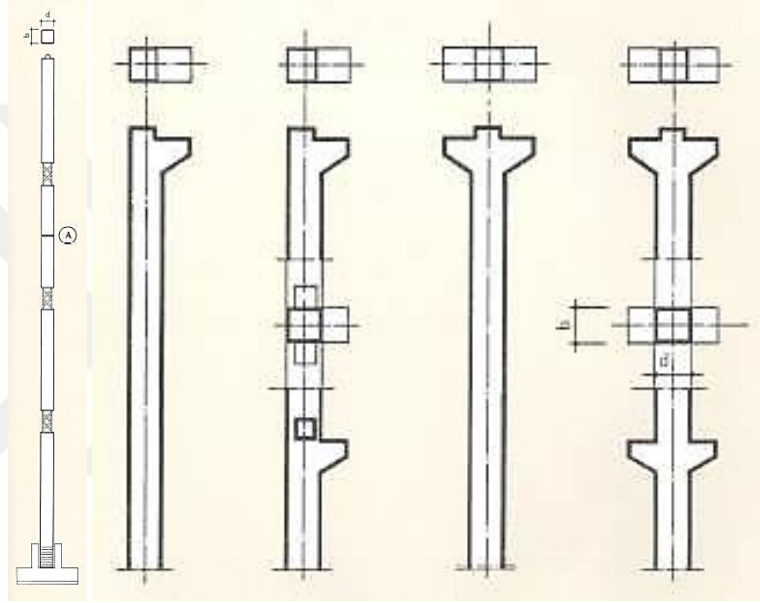
Yerinde beton yapım yönteminde, her bir yapı elemanı için kalıplar yerinde monte edilerek beton dökümü gerçekleştirilmektedir. Yerinde beton dökümü bir yandan binaların tasarımı konusunda büyük bir esneklik sağlar ve yapısal davranış üzerinde olumlu etkilere sahiptir. Diğer yandan ise endüstriyel üretimin kalitesi, süresi ve üretim maliyeti açısından olumsuz yönleri bulunmaktadır. Prefabrik beton yapım yöntemi ile üretilen yapılarda malzeme tasarrufu ve daha kısa inşaat süresi ile binaların daha erken kullanılması sağlanır.

Ülkemizde daha çok köprü kirişleri ve sanayi yapılarında kullanılması tercih edilen ön üretimli betonarme (prefabrik) yapılar, yapı elemanlarının fabrika koşullarında üretilmesi ve şantiyeye nakledilerek birleştirilmesiyle imal edilmektedir. Prefabrik yapılar hızlı imal edilmesi ve ekonomik olması sebebi ile tercih edilmektedir. Prefabrik yapıların avantajları aşağıda listelenmiştir.

- Hız; yapı üretimi ve temel işleri aynı anda yürütülebildiği için projenin hızlı tamamlanması ve dolayısıyla yatırımın hızla kazanca dönmesini sağlar.
- Kalite; endüstriyel ortamda, etkin kalite kontrol ile yapı elemanı üretimi sağlanabilmektedir.
- Teknolojik avantajlar; öngerilme ve yüksek dayanımlı beton gibi teknolojik üstünlükler ile büyük açıklıklar ve özel geometriye sahip yapı elemanları imal edilebilmektedir.
- Hava koşullarından bağımsız (kısmi) üretim olanağı sağlanmaktadır.
- Yapımda ekonomi: prefabrik yapılar ile kalıp maliyetinde (1/20), iskelede, malzemede (küçük kesitler, büyük açıklıklar), iş gücünde ve zamanda tasarruf sağlanarak, endüstriyel ortamda verimli yapı elemanı üretimi sağlanmaktadır.
- Mimari tasarımda esneklik: prefabrik yapılar ile büyük açıklıklar ile bölünmemiş mekanlar sağlanabilmekte ve cephelerde form, doku, renk zenginliğinin sağlanmasına imkan vermektedir.

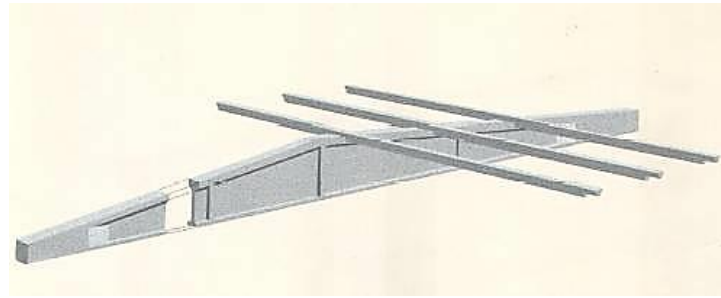
- Çevre dostu teknoloji, etkin geri kazandırma; prefabrik yapılar düşük fire ve üretim atıklarının geri kazandırılmasına imkan vermektedir.
- Kolay bakım, uzun ömür sağlanabilmektedir.
- Yangına, korozyona direnç sağlanabilmektedir.
- Prefabrik yapılar ile yerli girdi kullanımı sağlanabilmektedir (<http://www.prefab.org.tr/tr/Default.aspx>)

Çatı makaslarının montajı Şekil 1.3'te gösterilen prefabrik kolonlar üzerine yapılmaktadır. Montaj esnasında yapılan hatalar çatı makaslarında ek yüklerle sebep olabilmekte ve burkulma riskini arttırabilmektedir.

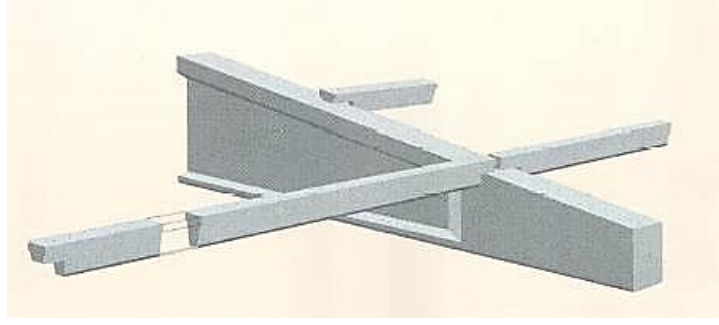


Şekil 1.3. Prefabrik kolon

Şekil 1.4'te gösterilen değişken yükseklikli çatı makasları ile büyük açıklıklar geçilmeye çalışılmaktadır. Burada daha çok kesme yükünün etkin olduğu mesnet bölgesinde kesme yükü dikdörtgen (veya T) kesit ve donatı ile taşınmaya çalışılmaktadır. Çatı kirişi mesnet bölgesi Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Prefabrik çatı kirişi ve aşık kirişleri



Şekil 1.5. Prefabrik çatı kirişi ve aşık kirişleri (<http://www.prefab.org.tr/tr/cubuk-elemanlar/sayfa/58.aspx>)

Açıklıkta moment yükünün karşılanması için yükseklik arttırılmakta ve çoğunlukla açıklıkta Şekil 1.6'da gösterilen I-kesit kullanılmaktadır. Mesnetten açıklığa doğru yüksekliğin artması aynı zamanda çatı eğiminin de sağlanmasına imkan vermektedir.



Şekil 1.6. Prefabrik yapı görüntüsü ve çatı kirişi enkesiti

1.2. Öngerilmeli Kirişler

Tasarlanan betonarme yapı elemanları gelen yükler karşısında kırılmayacak şekilde dizayn edilmektedir. Ancak olası kırılma durumunda özellikle kiriş elemanlarında sünek kırılmanın oluşması tercih edilir. Kiriş gibi moment taşıyan betonarme bir elemanda önce donatının akma durumuna gelmesi daha sonra beton basınç bölgesinde maksimum kısılma oluşması istenir. Gelişen malzeme teknolojisi ile betonarme yapılarda çok sık kullanılan ve karakteristik akma dayanımı 420 MPa olan inşaat demiri yerine karakteristik akma dayanımı 1.860 MPa olan yüksek kalite öngerme çeliği kullanımı, öngerilmeli elemanların imalatını mümkün kılmaktadır. Kiriş elemanlarında donatı elemanı olarak yüksek kalite donatı kullanımı çoğu zaman kesit taşıma kapasitesini arttırmaz. Öngerme veya ardgerme teknikleri ile donatı elemanı yerine öngerme halatları kullanılarak kesit taşıma kapasiteleri arttırılabilir ve normal betonarmeye göre büyük açıklıklar ekonomik ve güvenli olarak geçilebilir.

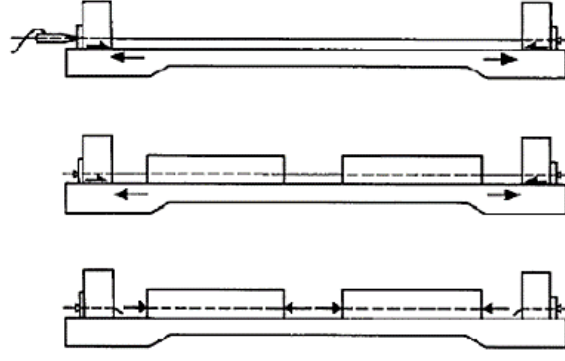
Ön gerdirme yönteminde, gerilme başlangıçta çelik tendonların gerilmesiyle verilir. Bunlar, ankrajlar arasında gerilmiş teller veya çelik halatlardır. Bu gerdirme işleminden sonra beton dökümü yapılır. Döküm beton yeterince sertleştğinde, düzenlenmiş ankrajlar serbest bırakılır. Öngerme aşamaları Şekil 1.7'de gösterilmektedir. Bu serbest bırakma, ön gerilim kuvvetini betona aktarır. Beton ve çelik tendonlar arasındaki bağ bu stres transferini kolaylaştırır (<https://theconstructor.org/concrete/prestressed-concrete/353/>).

Öngerilmeli beton, elemana gelecek yük etkilerinin, çeliğin gerilmesi ile istenen şekilde dengelendiği betondur. Eğilme elemanlarında (kiriş, makas, aşık, köprü kirişi, döşemeler) yaygın olarak kullanılır.

Beton yapıda oluşturulan iç gerilmeler, dış yük uygulamasından gelen gerilmeleri önlemek için kullanılır. Öngerme, beton yapı elemanı üzerine bir ilk yükün uygulanmasıdır. Böylece yapı hizmet yükleri nedeniyle gelen gerilmelere karşı koyabilir veya dayanabilir. Beton yapı herhangi bir servis yüküne maruz kalmadan önce, gerilmiş çelik çubuklar vasıtasıyla betonda etkili iç gerilmeler oluşturulur. Betonda ön gerilme yöntemine duyulan ihtiyaç, aşağıdaki hususla doğrulanabilir:

- Beton çekme açısından zayıf ve sıkıştırma açısından kuvvetlidir. Bu, özellikle kirişler ve döşemeler gibi eğilme elemanlarında erken esneme çatlaklarına neden olan betonun zayıf bir özelliğidir. Bunu önlemek için, beton kasıtlı olarak ön germe ile yüklenir ve bu gerilme, yapının hizmet durumu sırasında maruz kaldığı çekme gerilimini karşılar. Bu nedenle eğilme çatlakları olasılığı azalır.
- Öngerilmeli bir beton elastik davranır.
- Betonun basınç dayanımındaki tam kapasitesi, öngerilmeli beton durumunda tam yükleme altında tüm derinliklerde kullanılabilir.

Ön gerdirme yönteminde ön gerilim kuvvetini uygulamak için çok sayıda tendon ve tel kullanılır. Dolayısıyla bu düzenleme, bağ ve gerilme aktarımını mümkün kılmak için geniş bir yüzey teması alanı gerektirir.

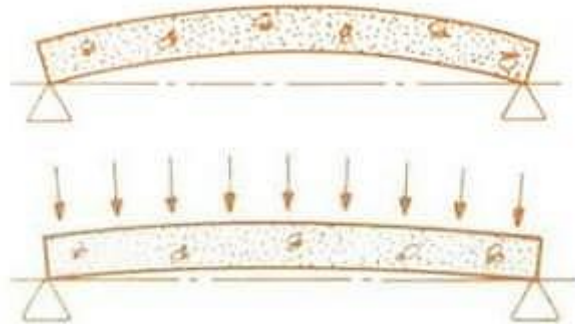


Şekil 1.7. Ön gerdirme işlemi

Öngerilmeli betonun en büyük avantajları:

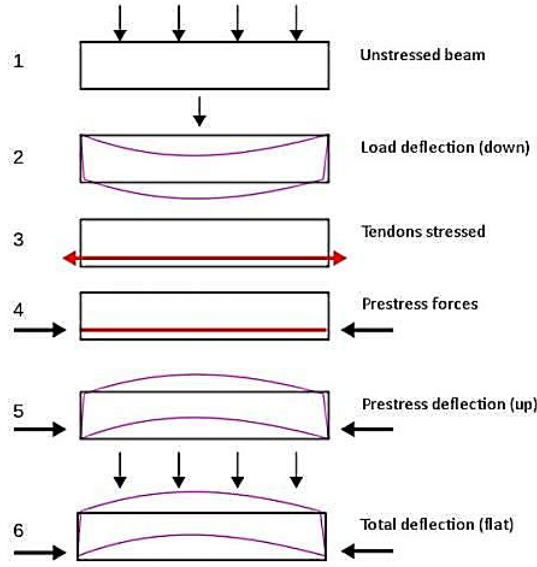
- Yüksek çekme çeliği kullanarak imal edilen betonun ön gerilimi, malzemelerin verimini arttırır
- Öngerilme, betonun kayma dayanımını ve yorulma direncini arttırır
- Öngerilmeli sistemler sayesinde yoğun beton sağlanır, böylece betonun dayanıklılığı artar
- Öngerilme, beton yapının ölü yükünü azaltmaya yardımcı olur
- Öngerilmeli beton, yapısal verimliliği ile servis yükü koşullarında bile çatlamaz

Basit mesnetli bir kirişte dış yüklemelerden sonra betonun alt kısmında çekme bölgesi oluşmaktadır. Bu bölgede betonda çatlaklar meydana gelir. Bu nedenle, kirişin alt bölümüne bazı çelik çubuklar eklenir ve çekme gerilmelerine dayanabilir ve betonun çatlaması önlenir. Bu geleneksel betonarme bir kirişteki uygulamadır. Ancak; büyük açıklıklı köprü kirişi veya sanayi yapılarında kullanılan çatı kirişlerinde durum biraz farklıdır (<https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/concrete/225-pre-stressed-concrete>).

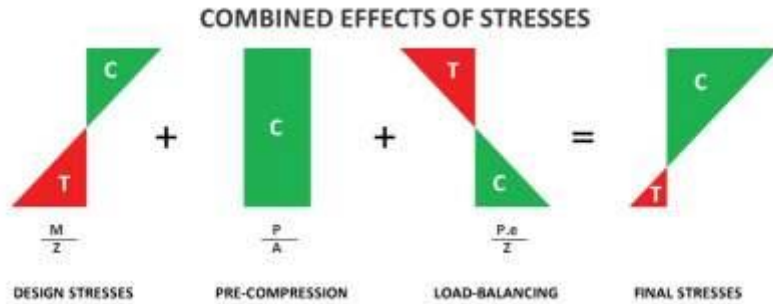


Şekil 1.8. Basit mesnetli bir kirişte öngerme yükü ve dış yükler etkisiyle düşey deplasman durumu

Geleneksel betonarme yapıda açıklık ne kadar büyük ise kiriş yüksekliğinin de o kadar arttırılması gerekmektedir. Öngerilmeli betonda, ilk sıkıştırma, çekme gerilmesi meydana getirecek olan gelecekteki yükleme ile dengelenmek üzere verilir. Öngerme aşamalarında kiriş elemanında meydana gelen deplasmanlar Şekil 1.9'da ve gerilme durumları Şekil 1.10'da verilmektedir.

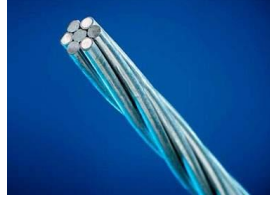


Şekil 1.9. Öngermesiz (1,2) ve öngerimli kiriş deplasmanları (Wikipedia)



Şekil 1.10. Öngerimli kirişte gerilme durumu (ptsindia.net)

AASHTO 'ya göre, yüksek mukavemetli Şekil 1.11'de gösterilen yedi tel halat, yüksek mukavemetli çelik tel ya da (tasarımcının belirttiği gibi) tip alaşımlar öngerilmeli betonda kullanılmalıdır. Ayrıca, ön gerilimde normal betonarmeden daha yüksek dayanıma sahip beton gereklidir. Genellikle, minimum 28 günlük silindir dayanımı 5.000 psi beton kullanılmalıdır. Eğer beton dayanımı yeterince yüksek değilse, tendonlar tarafından öngerme yükü aktarıldığında kırılabilir veya çatlama meydana gelebilir.

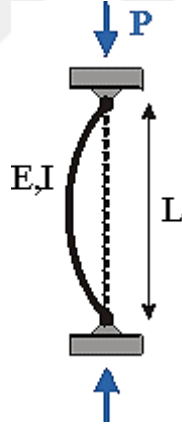


Şekil 1.11. Öngerme halatı (www.mdpi.com)

1.3. Burkulma

İnce bir yapı elemanının aksenal bir sıkıştırma yüküne maruz kaldığında Şekil 1.12’de gösterildiği gibi stabilitesini kaybedebilir. Burkulma, malzemenin (üretim ve kırılma gibi) bir arızası değil, sistem geometrisinin neden olduğu bir dengesizlik durumudur. Mesnetlenmiş bir yapı elemanının burkulması için gereken kritik yük Euler burkulma yükü formülü tarafından verilmektedir. Uzunluğu L , kesitsel atalet Momenti I , elastisite modülü E olan bir çubuk eleman incelendiğinde kritik burkulma yükü Denklem 1.1 ile hesaplanabilir.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L^2} \quad (1.1)$$







Şekil 1.12. İki ucu mafsallı aksenal yüklü eleman

Bir çubuk eleman uçlarındaki mesnet koşulları Şekil 1.13’te gösterildiği gibi burkulma yükünü etkiler. Elemanın etkili uzunluğu ile mesnet koşulları formüle dahil edilir. Aksenal yük altında herhangi bir yapı elemanı için burkulma yükü Denklem 1.2 ile hesaplanır.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{(K \times L)^2} \quad (1.2)$$

Bu formül 1757'de İsviçreli matematikçi Leonhard Euler türetilmiştir. Sütun, kritik yükten daha düşük yükler için düz kalacaktır. "Kritik yük", yanal sapmaya (burkulma) neden olmayacak en büyük yüküdür. Kritik yükten daha büyük yükler için sütun yanal olarak bükülür. Kritik yük kolonu dengesiz bir denge durumuna getirir. Kritik yükün ötesindeki bir yük kolonun burkulma ile hasar görmesine neden olur. Yük, kritik yükün ötesine yükseldikçe, yanal sapsmalar diğer modlarda başarısız olana kadar artar.

| | | | | | | |
|--|--|---|---------------|---------------|----------------|---------------|
| Basınç çubuğunun burkulma şekli | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |
| Teorik burkulma boyu | $0,5 \cdot S$ | $0,7 \cdot S$ | $1,0 \cdot S$ | $1,0 \cdot S$ | $2,0 \cdot S$ | $2,0 \cdot S$ |
| Tavsiye edilen burkulma boyu (S_k) | $0,65 \cdot S$ | $0,8 \cdot S$ | $1,2 \cdot S$ | $1,0 \cdot S$ | $2,10 \cdot S$ | $2,0 \cdot S$ |
| Mesnet tanımları |     | Dönme ve ötelenme tutulu Dönme serbest ve ötelenme tutulu Dönme tutulu ve ötelenme serbest Dönme ve ötelenme serbest | | | | |

Şekil 1.13. Basınç çubuklarında burkulma boyu (TS 648)

Euler formülü türetilirken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır;

- Kolonun malzemesi homojen ve izotropiktir .
- Kolondaki basınç yükü sadece ekseneldir.
- Sütun, başlangıç stresi içermez.
- Kolonun ağırlığı ihmal edilir.
- Sütun başlangıçta düzdür (eksenel yükün eksantrikliği yoktur).
- Pim bağlantıları sürtünmesizdir (moment kısıtlaması yoktur) ve sabit uçlar rijittir (dönme sapsması yoktur).
- Kolonun kesiti uzunluğu boyunca aynıdır.

- Direkt gerilme, bükülme gerilmesine kıyasla çok küçüktür (malzeme sadece elastik gerginlik aralığında sıkıştırılır).
- Sütunun uzunluğu, sütunun kesit boyutlarıyla karşılaştırıldığında çok büyüktür.
- Sütun yalnızca burkulma ile hasar görür. Bu durum, kolondaki basınç gerilmesi akma dayanımını aşmıyorsa geçerlidir.

İnce kolonlar için kritik gerilme genellikle akma gerilmesinden daha düşüktür ve elastik aralıktadır.

1.4. Betonarme Kirişlerde Burkulma

Bir yapı, aksel basınç yüküne maruz kaldığında, burkulma meydana gelebilir. Burkulma, yapısal bir elemanın ani bir yanal sapması ile karakterize edilir. Bu, yapı içerisinde gelişen gerilmeler, yapının oluştuğu malzemenin hasar görmesine neden olmak için gerekli olanların oldukça altında olsa da meydana gelebilir. Kolon gibi bir eleman üzerine uygulanan bir aksel yük arttıkça, nihayetinde elemanın dengesiz hale gelmesine neden olacak kadar büyük hale geleceği ve büküldüğü söylenir. Daha fazla yükleme, muhtemelen elemanın yük taşıma kapasitesinin tamamen kaybolmasına neden olacak şekilde önemli ve bir şekilde tahmin edilemeyen deformasyonlara neden olacaktır. Burkulmadan sonra meydana gelen deformasyonlar bu elemanın tamamen çökmesine neden olmazsa, eleman bükülmesine neden olan yükü desteklemeye devam edecektir. Bina gibi daha büyük bir bileşen topluluğunun bir parçası olan yapı elemanının burkulması durumunda burkulmaya neden olan kuvvet yapı içinde yeniden dağıtılacaktır.

Matematiksel anlamda burkulma, statik denge denklemlerinde bir çatlama değildir. Belli bir noktada, artan bir yük altında, herhangi bir başka yük iki denge durumundan birinde muhafaza edilebilir: tamamen sıkıştırılmış bir durum (yanal sapma olmadan) veya yanal olarak deforme olmuş bir durum.

1.5. Burkulmanın Analitik Olarak İncelenmesi

Eksel yüklere maruz kalan yapı elemanlarının burkulması, belirli yapı tiplerinin dengesiz hale geldiği kritik yüklerdir. Her yük ilişkili bir burkulmuş mod şekline sahiptir. Bu mod şekli, yapının burkulmuş bir durumda üstlendiği şeklidir. Bir burkulma analizi yapmak için iki temel yol vardır:

1.5.1. Lineer (özdeğer) burkulma analizi

Özdeğer burkulma analizi, ideal bir elastik yapının teorik çöküntü kuvvetini öngörmektedir. Verilen sistem yüklemesi ve kısıtlamaları için yapısal özdeğerleri hesaplar. Bu, klasik Euler burkulma analizi olarak bilinir. Çeşitli konfigürasyonlar için burkulma yükleri tablo halinde verilen çözümlerden kolayca temin edilebilir. Bununla birlikte gerçek hayatta yapısal kusurlar ve doğrusal olmayan yükler, yapıların çoğunun kendi özdeğerleri ile tahmin edilen burkulma dayanımlarına ulaşmalarını engeller. Bu yöntem kolay ve hızlı olmakla birlikte kritik burkulma yüklerini olması gerekenden fazla tahmin eder.

1.5.2. Doğrusal olmayan (Non-linear) burkulma analizi

Doğrusal olmayan burkulma analizi, özdeğer analizinden daha gerçekçi sonuçlar verir. Çünkü burkulma yüklerini tahmin etmek için doğrusal olmayan, büyük sapma, statik analiz kullanır. Çalışma şekli çok basittir: yapının dengesiz olduğu bir yük seviyesi bulunana kadar yapıya uygulanan yükü kademeli olarak artırır (bir noktadan sonra yükteki ani ve çok küçük bir artış çok büyük sapsmalara neden olur). Böylece, bu analizin doğrusal olmayan doğası, geometrik kusurların, yük sapsmalarının, malzeme doğrusallıklarının ve boşlukların modellenmesine izin verir. Bu tür analiz için, istenen burkulma modunu başlatmak için küçük eksen dışı yükler gerekli olabilmektedir (<https://sites.ualberta.ca/~wmoussa/AnsysTutorial/IT/Buckling/Buckling.html>).

1.6. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada prefabrik çatı kirişi olarak kullanılan değişken yükseklik ve değişken kesite sahip kirişlerin düşey yükler altında üst başlık burkulmasının ANSYS ve SAP2000 programları ile muhtemel kritik burkulma yükünün bulunması amaçlanmaktadır. ANSYS sonlu elemanlar programı ile lineer burkulma yükleri bulunurken, SAP2000 programı ile de nonlinear burkulma yükü bulunmaya çalışılacaktır.

ANSYS ve SAP2000 programı ile modellerin doğrulaması yapıldıktan sonra lineer elastik teori ile hesaplanması zor olan değişken yükseklik ve değişken kesitli, öngerilmeli çatı makası kirişinin burkulma yükünün belirlenmesine çalışılmıştır. Çalışmada beton ve donatı malzemesinin doğrusal olmayan davranışı da modele dahil edilerek burkulma yüküne etkisi incelenmiştir. Üst başlık genişliğindeki artışın kritik burkulma yüküne etkisi ayrıca incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Barka, A.G. Kulaksızoğlu, A. (2013) çalışmasında önerdiği hesap yöntemi prefabrikte (çatı) kirişlerinin eksenine dik yönde gelen yanal etkilere karşı yaklaşık kabuller ile üst başlığın hesabını kapsamaktadır. Prefabrikte çatı kirişleri, deprem durumunda başlıklarına bağlanan aşıkların (zati, kaplama, kar) etkisiyle yanal etkilere maruz kalacağından aşıkların kirişlere aktardıkları yanal deprem yükleri kiriş eksenine dik yönde eğilme momentine sebep olacaktır. Düşey yüklerden ve yanal deprem yüklerinden dolayı tarafsız eksenin üzerinde oluşan basınç gerilmelerinin bileşkesi, çatı kirişi üst başlık bölgesinde oluşan eksenel yük olarak değerlendirilebilir. Barka, A.G., Kulaksızoğlu, A. (2013) kiriş üst başlığının, bu eksenel yük ve yatay deprem yükleri sebebi ile kirişte oluşan yanal eğilme momenti etkisindeki stabilitesinin kontrol edilmesini ve üst başlık genişliğinin açıklığa göre $B= L/40-50$ boyutlarında seçilmesini önermektedir.

Kalkan ve ark. (2015) çalışmasında, sonlu elemanlar programı ile modellenen kirişlerin nümerik analizi sonucu elde edilen burkulma yükleri, çelik yapılar yönetmeliklerinin farklı versiyonları olan AS 4100, Eurocode 3, AISC-LRFD de sunulan formüller ile geçmiş çalışmalarda geliştirilmiş analitik formüllerden elde edilen kritik yük değerleri ile karşılaştırılarak, yanal burulmalı burkulma için önerilen formüllerin nümerik sonuçlarla uyumu incelenmiş olup ayrıca, gövde boşluklarının da etkisi ile petek kirişlerde ortaya çıkabilecek gövde buruşması riskinin, burkulma yükü değerlerini hangi ölçüde azalttığı ve formüllerin bu azalmayı yansıtmayı yansıtamadığı da araştırıldığı görülmüştür. Bu çalışma neticesinde I-kesitli hücreli boşluklu çelik kirişlerin nümerik analizinden elde edilen kritik yük değerlerinin analitik değerlerin altında kaldığı gözlemlenmiş olup yukarıda belirtilen yönetmelikler arasında nümerik değerlere en yakın sonuçlar ise Eurocode 3 yönetmeliğinde belirtilen formüllerden sağlanmıştır. Sonuç olarak lokal burkulmaların yapısal hesaplarda dikkate alınmasının gerekliliği bu çalışmada ortaya koyularak daha güvenli tarafta kalacak şekilde tasarım yapılmasına dikkat çekilmiştir. Nümerik analiz değerlerinin literatürdeki buruşma etkisini göz önüne alan çalışmalardan hesaplanan kritik yük değerlerinin oldukça altında kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Coşkun (2014) çalışmasında; değişken yüksekliğe sahip, geniş açıklık değerli, I enkesitine sahip betonarme prefabrik kirişleri, düşey yükler altında meydana gelmesi olası yanal burkulma sıkıntısının, SAP2000 programı yardımı ve S. Timoshenko'nun elastik stabilite teorisi esasları kapsamında teorik yönden ve karşılaştırmalı olarak incelenmesi hedeflenmiştir. SAP 2000 programıyla elde edilen değerler ilk olarak konsol ve basit

mesnetli çelik levhaların yanal burkulmaya neden olan kritik yükler, elastik stabilite teorisinden elde edilen diferansiyel denklemler yardımıyla hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Dikdörtgen kirişin gövdesi SAP 2000 programı analizinde sonlu sayıda parçaya bölünerek Shell (kabuk) sonlu elemanlarla optimize edilmiştir. Sabit I en kesitli çelik kirişlerin düzlemi içindeki yükler altında, konsol ve basit mesnetli halleri için yanal burkulmalarının gözlemleri yapılmıştır. Konsol kirişler için gövde ve başlık olarak kabuk model, basit mesnetli kirişler için gövde kabuk, başlıklar çubuk eleman olarak düzenlenmiştir. Merkezden tek berkitmeli sistemler ise berkitmesiz sistemlere göre % 0,3 - 0,5; sistemi üç parçaya ayıran çift berkitmeli sistemlerde % 2,5 - 3,5 ve sistemi dört parçaya ayıran üç berkitmeli sistemlerde % 4,2 - 4,3 mertebesinde daha yüksek bir yük seviyesine kadar yanal burkulmaya uğramadan stabil olarak kalabileceği sonucuna varılmıştır.

Kurt (2007) çalışmasında Euler kirişlerinin genel yapıları ve kesit çeşitlerine, eğilmelerinin incelemeleri yapılmış ve buna bağlı olarak kirişlerde burkulma analizini daha iyi incelemek üzere Euler kirişlerinde teorik olarak belirli formülasyonları netice elde edilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile çalışan ANSYS 10 programı ile belirlediğimiz kiriş tipimizin teorik sonuçları ile inceleme sonucunda bulduğumuz kritik yük değerleri ile ANSYS analiz sonuçlarının ile karşılaştırması yapılmıştır. Lineer değişken kesitli (tapered) kiriş tipleri ile kullanılan kare kesitli lineer kirişlerinin kritik burkulma yükleri hesap edilerek karşılaştırma yapılacak, ANSYS sonuçları ile teorik hesapların da karşılaştırılması sonucu elde edilen değerlerin birbirini tuttuğu sonucuna varılmıştır. Daha karmaşık yapılarda oluşacak burkulmanın, kritik burkulma yükü değerini teorik olarak elde etmek zorlaşacak, bu durumda ANSYS programında modellenen kirişlerin analizinden elde edilen kritik burkulma yükü değerlerine itibar edilmesi gerektiği belirtilmiştir..

Durmaz (2011) çalışmasında, eksantrik yüklü korniyerlerin davranışını anlayabilmek için etkin bir sonlu eleman modeli üzerinde durulmuştur. Mafsal uçlu, merkezi ve eksantrik yüklü korniyerlerin teorik burkulma ve deney göçme yükleri ABAQUS 6.5’de geliştirilen çeşitli modellerin öz değer ve yük-deformasyon analizleri ile tahmin edilmiş, bütün modellerde geometri ve malzeme bakımından doğrusal olmayan davranış dikkate alınmış, korniyerler kabuk elemanlarla modellenmesi sağlanmıştır. Korniyerlerin basit hataları, artık gerilmeleri, uç mesnet şartları, geometrisi ve malzeme özelliği değişimi her model için farklı optimize edilmiştir. Bu bağlamda yük taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Artı olarak korniyerlerin basınç kapasitelerinin TS 648’e göre aşırı emniyetli hesaplandığı çalışmalar sonucunda gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca korniyerler gibi asimetrik ince cidarlı açık kesitli elemanların geometrik bakımdan

doğrusal olmayan analizi için daha hassas bir geometrik rijitlik matrisi elde edilmiş, bunun için 2 düğüm noktalı, 14 serbestlik dereceli bir kiriş-kolon elemanının toplam potansiyel enerji ifadesinde bütün yüksek mertebeden terimler göz önüne alınmıştır. Bu matris ile çeşitli uç mesnet şartlarına sahip korniyerlerin dallanma yükleri neredeyse kesin olarak öngörülebilir bulunmuş, burkulma öncesine ve sonrasına ait yük deformasyon eğrilerini elde etmek için değiştirilmiş Newton-Raphson tekniği ile birlikte güncellenen Lagrangian formülasyonu bu çalışmada dikkate alınmıştır. Ayrıca Mathematica isimli bir uygulamada kodlanan bir program ile eksantrik yüklü korniyerlerin büyük yer değiştirme analizine ait sayısal örneklere yer verilmiştir.

YAZICI (2018) çalışmasında değişken kesitli kolonların burkulma yükünü belirlemek için kuvvet serileri metodu uygulanmıştır. Metod, ilk olarak iki farklı sınır hali için (iki ucu mafsallı, bir ucu ankastre bir ucu serbest) sabit enkesitli kolonlarda uygulanarak dikkate alınmıştır. Sabit enkesitli elemanların burkulma analizlerinde, seri çözümlerinin hızla oluştuğu ve oldukça başarılı neticelere ulaştığı gözlemlenmiştir. Böylelikle, metodun değişken kesitli kolonların burkulma analizinde de uygulanabileceği neticesine ulaşılmıştır. Yapılan çalışmada değişken kesitli iki durum üzerinde durulmuştur. Bu durumlar; bir ucu serbest bir ucu ankastre durumu ve İki ucu mafsallı olan durumdur. Metodun değişken kesitli kolonların kritik burkulma yükünü elde etmek için yeterli olduğu kanaati elde edilmiştir.

Tek katlı rijit çelik çerçeve taşıyıcı sisteme sahip yapılarda, yapısal çeliğin en etkili şekilde kullanımını elde etmek için, ideal olarak nitelendirilebilecek sistemler, değişken enkesitli sistemler olarak görülür. Değişken kesitli sistemler elemanlar üzerinde yayılı bulunan iç kesit tesirlerinin dağılımına uygun şekilde elemanı yalnız enine değil, boyuna da boyutlandırmasının sağlanarak, nebzen hafiflik ve en mühimi ekonomi elde edilmektedir. Böyle çerçeve sistemlerde kullanılacak elemanların kesit özellikleri dikkate alınacak olunursa elemanların kesitleri simetrik ve başlık genişlikleri eşit olduğu görülecek, fakat gövde yüksekliklerinin eleman boyunca değişiklikler göstereceği izlenecektir. Değişken kesitli kolon kullanımında aynı durum geçerlidir. Kullanılan malzemenin çelik olması ve kesitin değişken olması, akla ilk önce stabilite problemlerini getirmekte, bu durumda, ekonomiyi dikkate alınca değişken enkesitli elemanlarda karşısına çıkacak burkulma problemi ile başa çıkmak durumunda kalacaktır. Günümüz uygulamalarına bağlı yönetmeliklerde bulunan abaklar değişken enkesit tiplerine hem uygun değil hem de kolay kullanım sağlamamaktadır. Külekçi (2006) çalışmasında, burkulma boyu katsayısının çok kullanılan özellikle kırıklı çerçeve sistemleri için

burkulma boyu katsayısının doğru bir şekilde bulan bir formülasyonun geliştirilmesi ve uygulanmasını amaçlamıştır. Bu amaçla mevcut çalışmalar incelenmiş, özel olarak seçilen bazı temsili çerçevelerde bu katsayı, literatürde verilen yöntemlerle saptanmış, sonuçlar analitik sonuçlarla karşılaştırılarak yorumlarda bulunulmuş mevcut denklemler çalışma sırasında hazırlanan ek modeller kullanılarak kalibre edilerek formüller geliştirilmiştir.

Keyder çalışmasında Jean Muller'in formüllerini kullanarak öngermeli kirişin kalıptan alınırken veya montaj aşamasında yani taşımada (asılı olma durumu için) kritik burkulma yükü Denklem 2.1 ile verilmiştir.

$$P_{cr} = \frac{m \times \sqrt{B \times C}}{L^3} \quad (2.1)$$

Burada;

$$B = E \times I_y \text{ (Yatay eğilme rijitliği)}$$

$$C = G \times K_t \text{ (Torsion rijitliği)}$$

$$K_t = \sum \frac{1}{3} \times b \times t^3 \text{ (Kesitte)}$$

Çizelge 2.1. m tablosu

| Torsion | Düşey eğilme | Yanal eğilme | m |
|---------|-------------------|--------------|-------|
| Kapalı | Basit mesnet | Mafsal | 28,3 |
| Kapalı | Konsol | Mafsal | 12,8 |
| Kapalı | Uçlar ankastre | Mafsal | 98,0 |
| Kapalı | Ankastre + mafsal | Mafsal | 54,0 |
| Kapalı | Basit mesnet | Ankastre | 50,0 |
| Kapalı | Kapalı | Ankastre | 137,0 |

Yüksel, E., Özkaynak, H., Soydan, C. ve Güllü, A. (2019) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçlarına dayalı olarak, sandviç panellerin düzlem içi davranışını temsil edebilen eşdeğer çapraz sistemin, eleman rijitliklerini belirlemeye yönelik bir bağıntı önerilmiştir. Ancak aynı çalışmada sandviç panellerin çatı düzlem içi yatay yükleri taşıma kapasitesinin çatı panellerini aşıklara montajını sağlayan trifon vida sayısına bağlı olduğu belirtilmektedir.

Yürürlükten kaldırılan TS 9967'nin elemanların yanal stabilitesi ilgili maddesinde narin basınç başlıklı uzun elemanların, taşıyıcı sistemdeki yerlerinde, kaldırmada, taşınma

ve montaj durumlarında, yanal stabilitelerinin var olduğu gösterilmesi istenmekteydi. Bu madde sadece çatı kirişleri için değil tüm elemanları kapsıyordu. 1 Ocak 2019 da yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde hesaplamalar için çatı düzlemi diyaframının tanımlanması yapılmış olsa da yine aynı yönetmelikte kolonlara bağlantısı mafsallı olan ya da montaj aşamasında mafsallı olarak çalışan tüm taşıyıcı çatı kirişlerinde düşey ve yatay yükler etkisinde yanal stabilite hesapları yapılmasını istemekte ve kiriş üst tabla genişliğinin L_n kiriş serbest açıklığı olmak üzere en az $L_n/50$ olması şartı getirilmiştir. Söz konusu yönetmelikle çatı kirişlerine ait üst başlık genişliğine sınırlama getirilmiştir.



3. MATERYAL

3.1. Beton

3.1.1. Beton doğrusal malzeme özellikleri

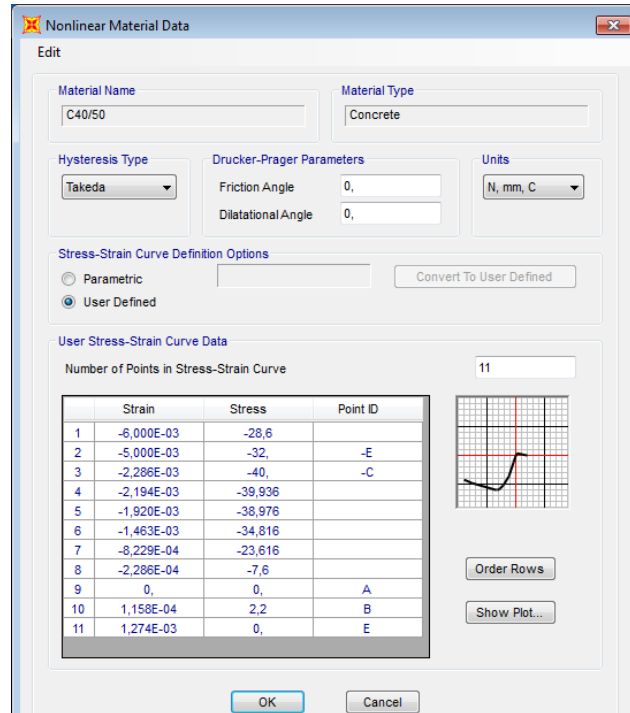
Çalışmanın ilk kısmı, Coşkun (2014) tarafından yapılmış olan çalışmadaki kirişlerin ANSYS ile modellenerek karşılaştırmalarını içermektedir. Sonuçların karşılaştırılabilir olması bakımından Çizelge 3.1 ile verilen beton malzeme özellikleri Coşkun (2014)'un çalışmasında bulunan beton özellikleri ile aynı alınmıştır. Doğrusal analizlerde beton lineer elastik malzeme olarak modellenmiştir.

Çizelge 3.1. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan C40/50 beton malzeme özellikleri

| | |
|-----------------|--------|
| E (MPa) | 34.000 |
| μ | 0,2 |
| f_{ck} (MPa) | 40 |
| f_{ctk} (MPa) | 2,2 |

3.1.2. Beton doğrusal olmayan malzeme özellikleri

SAP2000 ile yapılan doğrusal olmayan analizlerde kullanılan beton malzeme modeli Şekil 3.1'de verilmektedir. Betona ait karakteristik çekme dayanımı C40/50 beton sınıfı için TS500 standardında verilen 2,2 MPa kabul edilmiştir.



Şekil 3.1. Beton doğrusal olmayan malzeme özellikleri

3.2. Donatı

3.2.1. Donatı doğrusal malzeme özellikleri

Sonuçların karşılaştırılabilir olması bakımından beton malzemesi gibi donatı da Çizelge 3.2 ile verilen donatı malzeme özellikleri Coşkun'un (2014) çalışmasında bulunan donatı özellikleri ile aynı alınmıştır. Yapılan doğrusal analizlerde donatı lineer elastik malzeme olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan donatı ve öngerme donatısı elastisite modülü $2,1 \times 10^5$ MPa ve poisson oranı 0,3 olarak alınmıştır.

3.2.2. Normal donatılara ait doğrusal olmayan malzeme özellikleri

SAP2000 ile yapılan doğrusal olmayan analizlerde kullanılan donatı malzeme modeli Şekil 3.2'de verilmektedir. Malzeme modelinde akma dayanımı 420 MPa ve en yüksek dayanımı 500 MPa kabul edilmiştir.

| | Strain | Stress | Point ID |
|----|------------|-----------|----------|
| 1 | -0,108 | -122, | |
| 2 | -0,09 | -500, | -E |
| 3 | -0,0456 | -473,3333 | |
| 4 | -0,0189 | -446,6667 | |
| 5 | -0,01 | -436,8 | |
| 6 | -2,000E-03 | -420, | -B |
| 7 | 0, | 0, | A |
| 8 | 2,000E-03 | 420, | B |
| 9 | 0,01 | 436,8 | |
| 10 | 0,0189 | 446,6667 | |
| 11 | 0,0456 | 473,3333 | |
| 12 | 0,09 | 500, | E |

Şekil 3.2. Normal donatılara ait doğrusal olmayan malzeme özellikleri

3.2.3. Öngerme halatlarına ait doğrusal olmayan malzeme özellikleri

SAP2000 ile yapılan doğrusal olmayan analizlerde kullanılan donatı malzeme modeli Şekil 3.3'de verilmektedir. Öngerme halatı olarak ASTM A416 standardına uygun

7 kablolu düşük gevşemeli halata ait malzeme modelinde akma dayanımı 1.725 MPa ve en yüksek dayanımı 1.860 MPa kabul edilmiştir.

Nonlinear Material Data

Edit

Material Name: HALAT

Material Type: Tendon

Hysteresis Type: Kinematic

Drucker-Prager Parameters: Friction Angle, Dilatational Angle

Units: N, mm, C

Stress-Strain Curve Definition Options: Parametric, User Defined

User Stress-Strain Curve Data

Number of Points in Stress-Strain Curve: 11

| | Strain | Stress | Point ID |
|----|------------|--------|----------|
| 1 | -0,036 | -1730, | |
| 2 | -0,03 | -1860, | -E |
| 3 | -0,0182 | -1835, | |
| 4 | -0,0111 | -1730, | |
| 5 | -8,779E-03 | -1725, | -B |
| 6 | 0, | 0, | A |
| 7 | 8,779E-03 | 1725, | B |
| 8 | 0,0111 | 1730, | |
| 9 | 0,0182 | 1835, | |
| 10 | 0,03 | 1860, | E |
| 11 | 0,036 | 1730, | |

Order Rows

Show Plot...

OK Cancel

Şekil 3.3. Öngerme halatlarına ait doğrusal olmayan malzeme özellikleri

4. METOD

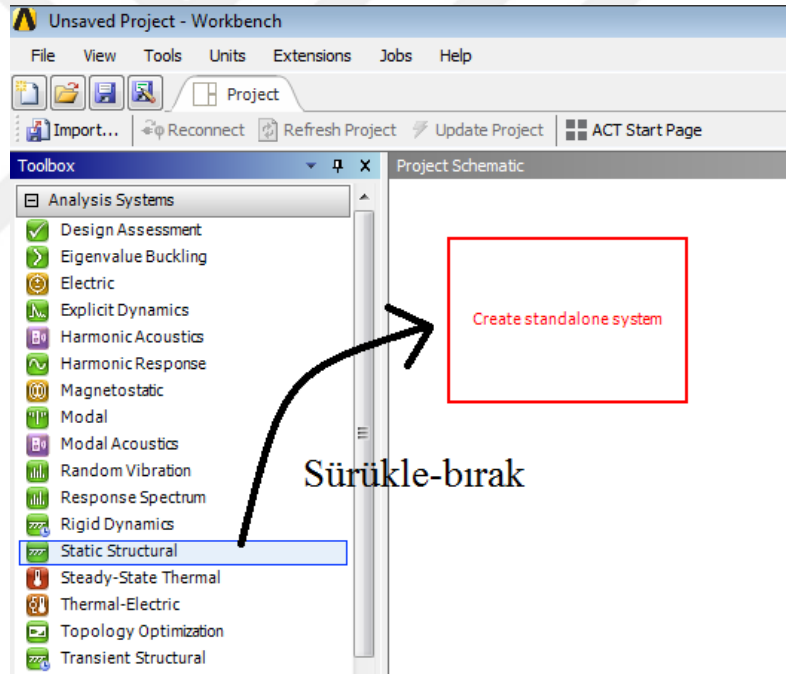
4.1. ANSYS Programı ile Yapılan Doğrusal Burkulma Analizi

4.1.1. ANSYS programı ile yapılan doğrusal burkulma analizi adımları

ANSYS ile bir yapı elemanında burkulma analizinin yapılabilmesi için bir dizi işlem adımının izlenmesi gerekmektedir. En genel hatları ile bu adımlar aşağıda gösterilmektedir.

1.Adım : Proje alanına statik yapısal analiz şablonunun eklenmesi

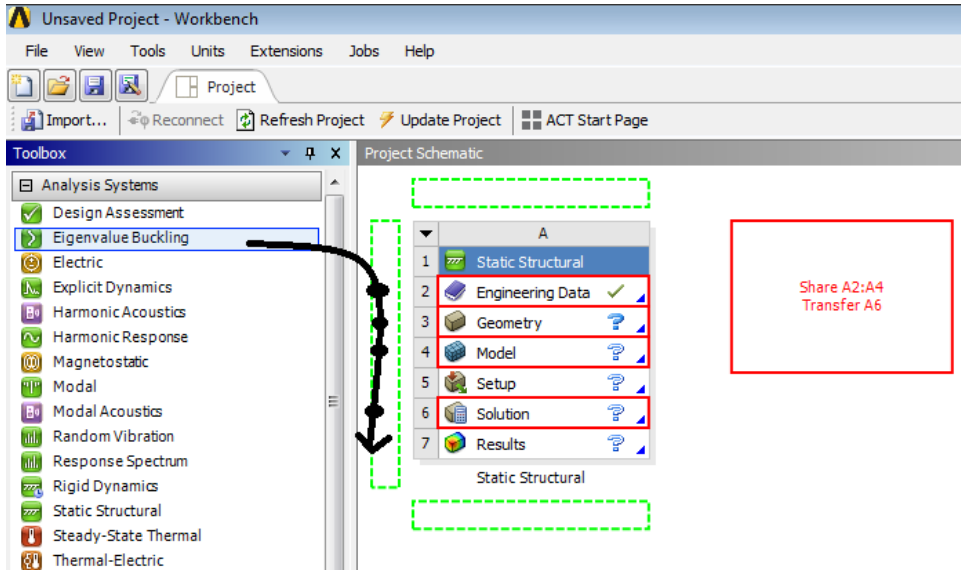
ANSYS programı ile burkulma analizi statik yapısal çözüme dayandığından, statik yapısal analiz ön şarttır. Statik yapısal analiz kapsamında yapıya ilişkin mühendislik verileri, geometri ve sınır koşulu tipi tanımları burkulma analizinde kullanılmak üzere yapılır. Şekil 4.1 ile gösterildiği gibi Toolbox-Analysis Systems-Static Structural ile statik yapısal şablonu Project Schematic alanına sürükleyerek-bırakılır.



Şekil 4.1. Proje alanına yapısal statik analiz şablonu eklenmesi

2.Adım : Proje alanına burkulma analizi şablonunun eklenmesi

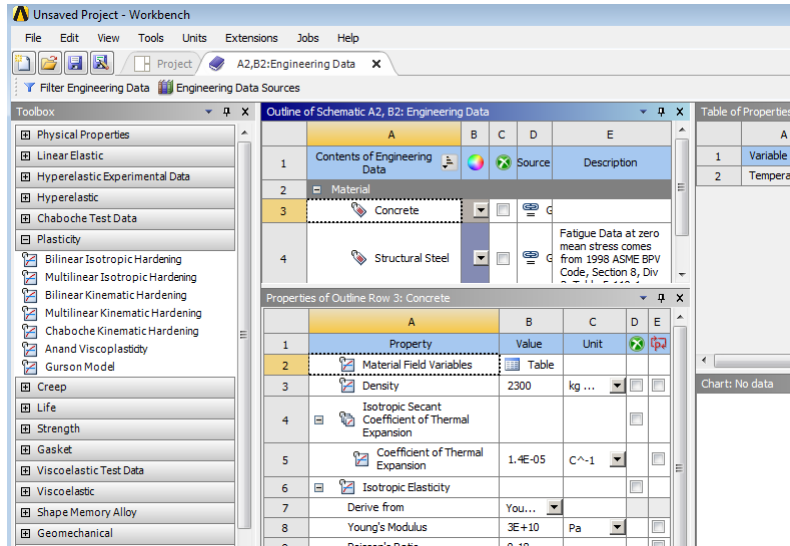
Toolbox→Analysis Systems→Eigenvalue Buckling ile burkulma analizi şablonu Şekil 4.2’te gösterildiği gibi “Project Schematic” alanına sürükleyerek bırakılır. Proje alanına eklenirken statik yapısal şablonun ilgili alanları ile bağlantı kurulması gerekmektedir.



Şekil 4.2. Proje alanına burkulma analizi şablonu eklenmesi ve statik analiz ile ilişkilendirilmesi

3.Adım : Malzeme bilgilerinin tanımlanması

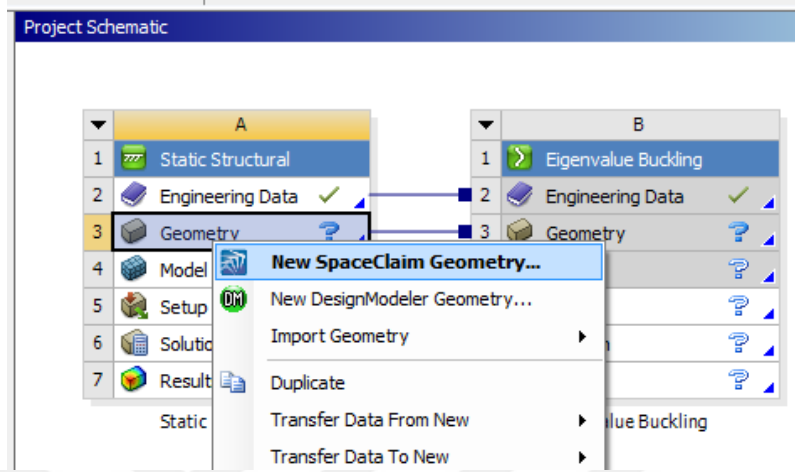
Static Structural → Engineering Data tıklanarak modelde kullanılacak malzeme özellikleri tanımlanır. Engineering data ekranı Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Bu aşamada elastisite modülü tanımlanmalıdır. Malzeme özellikleri doğrusal, doğrusal olmayan, izotropik veya ortotropik ve sabit veya sıcaklığa bağlı olabilir.



Şekil 4.3. Malzeme bilgileri ekleme ve değiştirme ekranı

4.Adım : Model geometrisinin eklenmesi

Static Structural→Geometry linki üzerinde mouse-sağ tuş ile açılan ve Şekil 4.4'te gösterilen menüden yeni bir model oluşturma veya import geometry seçeneklerinden biri ile analizi yapılacak 2 boyutlu veya 3 boyutlu geometri eklenir.



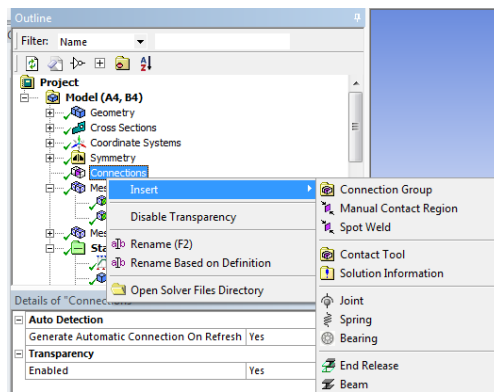
Şekil 4.4. Analiz şablonuna geometri eklenmesi

5.Adım : Parça davranışlarının tanımlanması

Static Structural→Geometry linki üzerinde mouse-sağ tuş ile açılan menüden EDIT tıklanarak ANSYS Mechanical modülü açılır. Analiz edilecek olan modele ait her bir parçanın malzeme bilgisi seçilir.

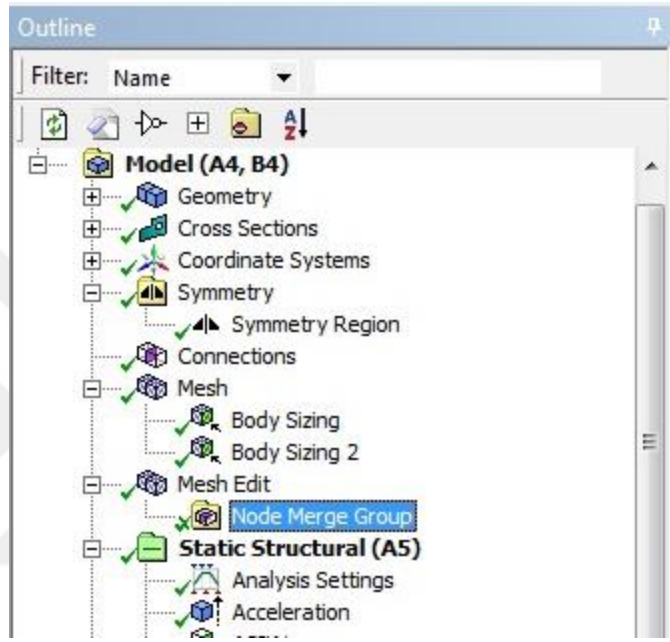
6.Adım : Parçaların bağlantıları tanımlanır

Geometri olarak birden fazla parçanın bulunması durumunda her bir parçanın birbirleri ile olan bağlantıları Şekil 4.5'te gösterildiği gibi tanımlanır. Betonarme yapıda beton içerisinde bulunan donatı hacim elemanı olarak tanımlanması durumunda donatı ve beton elemanları arasında kontak elemanları tanımlanması gerekmektedir.



Şekil 4.5. Analiz modeline kontak tanımlama ekran görüntüsü

Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde beton ile donatı ve öngerme donatısı arasında aderansın tam olarak sağlandığı kabul edilmektedir. Modelde beton katı modeli donatının ve öngerme çeliğinin bulunduğu düzlemlerde kesilmiş olup donatı, beton hacmine ait kenarların kullanılması ile oluşturulan line elemanlarından teşkil edilmiştir. Sonlu elemanlar oluşturulurken beton ve donatı elemanlarının düğüm noktaları Şekil 4.6 gösterilen Mesh Edit → Node Merge Group komutu ile birleştirilmiştir. Tam aderansın sağlandığı bu durum için ayrıca kontak elemanları kullanılmamıştır.



Şekil 4.6. Beton ve donatı elemanlarına ait düğüm noktalarının birleştirilmesi

Uygulamada öngerme donatısında tam kenetlenmenin sağlandığı yere kadar (kenetlenme boyu) gerilme değişken olacaktır. Bu durum için öngerme donatısında kenetlenme boyu üç bölgeye ayrılarak farklı öngerme yükleri verilmiştir.

7.Adım : Mesh kontrollerinin uygulanması ve mesh ön izlemesi

Analiz edilecek modele ait mesh yapısı oluşturulmalıdır. Mesh oluşturulması amacıyla seçilecek eleman büyüklüğü sonuç üzerinde etkili olmaktadır. Eleman boyutları küçüldükçe analiz sonucunun doğruluğu artmakta fakat analiz için gerekli işlem süresi artmaktadır.

8.Adım : Yüklerin ve Mesnet Koşullarının Uygulanması

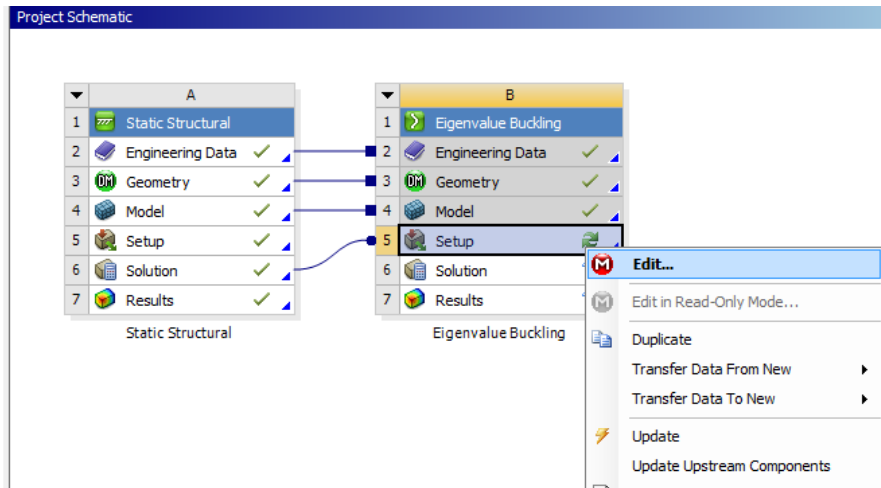
Burkulma analizinde yalnızca statik analiz ile tanımlanan yükler kullanılabilir. Lineer bir burkulma analizinde ayrıca yükleme koşulu tanımlanamaz.

9.Adım : Statik analiz için çözümün yapılması

Program, çözücünden gelen herhangi bir listeleme çıktısını sürekli olarak günceller ve analiz sırasında yapının davranışı hakkında önemli bilgiler sağlar.

10.Adım : Doğrusal burkulma analizi için ilk koşulların tanımlanması

Statik analizin tamamlanmasının ardından Project Schematic Eigenvalue Buckling→Setup linki üzerinde mouse-sağ tuş ile açılan menüden EDIT tıklanarak Şekil 4.7’de gösterilen ANSYS Mechanical modülü açılır. Açılan ekranda “Pre-Stress (Static Structural)” alanında “Pre-Stress Defined By” burkulma analizi için kullanılacak ilk koşul olarak aynı modelin statik yapısal analizinde hesaplanan “load step” seçilmelidir. Varsayılan olarak “Program Controlled” seçilmiştir. Bu durumda burkulma analizi için çözümü gerçekleştirilmiş son load step için burkulma analizi yapılacaktır. Bu sebepten burkulma analizinden önce statik yapısal analiz yapılmalıdır. Ayrıca her iki analiz için de aynı çözücü tipi kullanılmalıdır (ANSYS veya Samcef). Statik yapısal analizin birden fazla sonuç kümesi varsa, statik yapısal analizde mevcut olan herhangi bir yeniden başlatma noktasındaki değer, burkulma analizi için temel olarak kullanılabilir.



Şekil 4.7. Doğrusal burkulma analizi ekranının açılması

11.Adım : Analiz ayarlarının oluşturulması

Lineer burkulma analizi için, temel analiz ayarları şunları içerir:

- Hesaplanacak mod sayısının belirlenmesi;

Burkulma yükü faktörlerinin sayısı ve ilgilenilen mod şekillerinin belirlenmesi için “Maks Mod” seçeneği kullanılır. Genel olarak, ilk (en düşük) burkulma yük faktörü aranan burkulma yükünü göstermektedir. Programda bu alan için varsayılan değer 2’dir. Bu varsayılan ayarı , seçenekler, tercih ayarları aracındaki “frekans” seçeneklerinin Buckling kategorisi altında değiştirilebilir.

- Negatif yük çarpanının dahil edilmesi;

Negatif yüke ilişkin varsayılan seçenek Program Kontrollü (Evet) tir. Bu seçenek ile hem negatif hem de pozitif özdeğerleri (yük çarpanları) hesaplanmaktadır. Program özelliği yalnızca pozitif özdeğerleri (yük çarpanları) hesaplamak için (Hayır) olarak ayarlanmalıdır.

- Çıkış kontrolleri

Varsayılan olarak, sadece burkulma yük faktörleri ve karşılık gelen burkulma modu şekilleri hesaplanır. Gerilme ve genleme sonuçlarının hesaplanması istenebilir, ancak “gerilme” sonuçlarının yapıdaki stresin nispi dağılımını gösterdiği ve gerçek gerilme değerleri olmadığı unutulmamalıdır.

12.Adım : Sonuçların İncelenmesi;

Bir kontur grafiği görüntülenerek veya deforme olmuş mod şekli canlandırılarak belirli bir yük faktörü ile ilişkili burkulma modu şekli görülebilir. Konturlar, parçanın göreceli yer değiştirmesini temsil eder.

Burkulma mod şekli görüntüleri ile burkulma sırasında bir parçanın veya yapının nasıl deforme olduğu anlaşılır. Ancak bu görüntüler gerçek yer değiştirmeleri temsil etmez. Bir burkulma analizi ile hesaplanan “gerilmeler” yapıdaki gerçek gerilmeleri temsil etmez fakat burkulma analizi ile hesaplanan “gerilmeler” her mod için göreceli gerilme dağılımları hakkında bir fikir vermektedir.

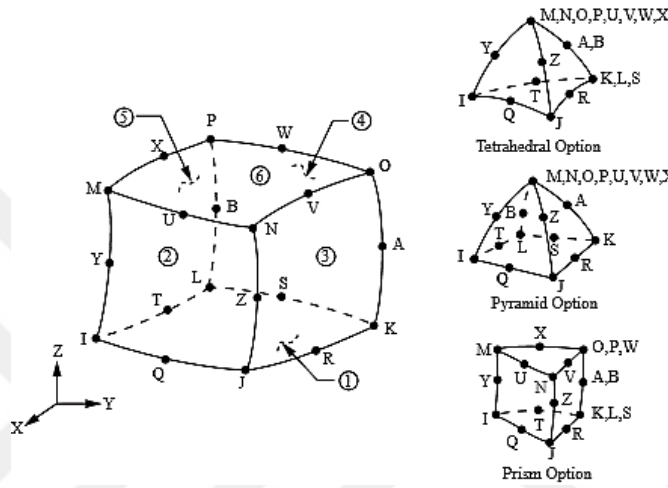
Yukarıdaki adımlar takip edilerek ANSYS programı ile burkulma analizi gerçekleştirilebilir.

4.1.2. ANSYS Programıyla Yapılan Analizlerde Kullanılan Sonlu Elemanlar

4.1.2.1. SOLID186 eleman

Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde beton elemanlar için eleman tipi olarak SOLID186 kullanılmıştır. SOLID186, ANSYS sonlu elemanlar programı tarafından kullanılan ikinci dereceden yer değiştirme davranışı sergileyen üç boyutlu 20 düğüm

noktalı katı elemanlardır. Şekil 4.8’de gösterilen SOLID 186 katı elemanlar, her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine (nodal x, y ve z) sahip 20 düğüm tarafından tanımlanır. Eleman, plastisiteyi, hiperelastisiteyi, sünmeyi, stresi sertleştirmeyi, geniş sapmayı ve geniş gerinim özelliklerini destekler. Ayrıca neredeyse sıkıştırılmaz elastoplastik malzemelerin ve tamamen sıkıştırılmaz hiperelastik malzemelerin deformasyonlarını simüle etmek için karma formülasyon kabiliyetine sahiptir. SOLID186 homojen yapısal katı, düzensiz kafeslerin modellenmesi için çok uygundur (çeşitli CAD / CAM sistemleri tarafından üretilenler gibi).



Şekil 4.8. Solid186 elemana ait geometri, düğüm noktaları ve eleman koordinat sistemi

Geometri, düğüm konumları ve bu eleman için eleman koordinat sistemi Şekil 4.8’de gösterilmiştir. K, L ve S düğümleri için aynı düğüm sayıları tanımlanarak bir prizma şeklindeki eleman oluşturulabilir; A ve B düğümleri; ve O, P ve W düğümleri ve Tetrahedral şekilli bir eleman ve piramit şekilli bir eleman oluşturulabilir (https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html).

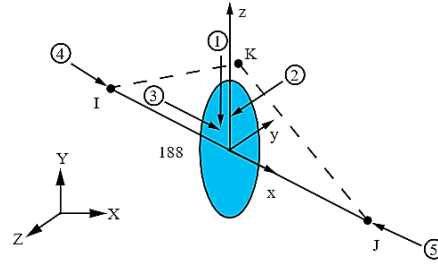
4.1.2.2. BEAM188 eleman

BEAM188, ince ila orta derecede narin ve kalın kiriş yapılarını analiz etmek için uygundur. Eleman, 3-D'deki lineer, kuadratik veya kübik bir iki düğümlü ışın elemanıdır. Şekil 4.9’da gösterilen BEAM188’in her düğümde altı veya yedi serbestlik derecesi vardır. Bunlar, x, y ve z yönlerindeki çevirileri ve x, y ve z yönleriyle ilgili dönüşleri içerir. Yedinci bir serbestlik derecesi isteğe bağlıdır. Bu eleman doğrusal, büyük rotasyon ve / veya büyük gerginlik doğrusal olmayan uygulamalar için çok uygundur.

Eleman, varsayılan olarak büyük sapma içeren herhangi bir analizde gerilme sertliği terimlerini içerir. Sağlanan gerilme sertliği terimleri, elemanların eğilme, yanal ve

burulma stabilite problemlerini analiz etmelerini sağlar (özdeğer burkulması veya ark uzunluğu yöntemleri veya doğrusal olmayan stabilizasyon ile çökme çalışmaları).

Esneklik, plastisite, sünme ve diğer doğrusal olmayan malzeme modelleri desteklenir. Bu eleman tipiyle ilişkilendirilmiş bir kesit, birden fazla materyale gönderme yapan bir yerleşik kesit olabilir. Eklenen kütle, hidrodinamik ilave kütle ve yükleme ve kaldırma yükü mevcuttur.



Şekil 4.9. BEAM188 geometrisi, düğüm noktaları ve eleman koordinat sistemi

BEAM188 , birinci dereceden bir makaslama deformasyon teorisi olan Timoshenko ışın teorisine dayanmaktadır: enine kayma gerilimi kesit boyunca sabittir (yani, kesitler düz kalır ve deformasyondan sonra bozulmaz).

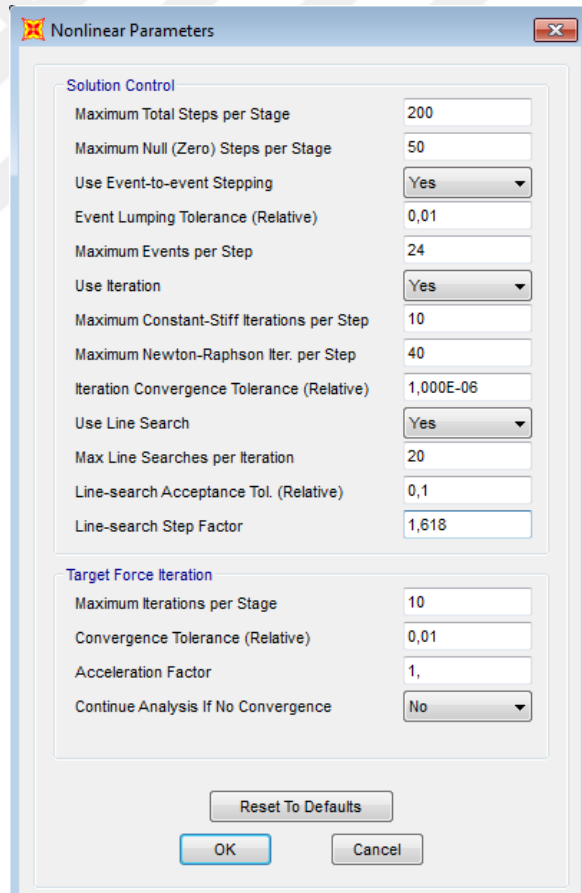
Eleman, ince veya uzun kirişler için kullanılabilir. Birinci derece kayma deformasyon teorisinin sınırlamaları nedeniyle, kalın ve kısa kirişler için kullanılması uygun değildir. BEAM188 elemanda “INISTATE” komutu ile bu elemente ilk gerilme durumu uygulanabilmektedir.

4.2. SAP2000 ile Doğrusal olmayan (Nonlinear) Burkulma Analizi

Doğrusal burkulma analizi sonucunda mod şekillerine karşılık gelen bir dizi burkulma faktörü elde edilir. Uygulanan yükleme koşulu, bu faktörlerle çarpılır, böylece yükleme burkulmaya neden olan bir noktaya ölçeklenir. Doğrusal burkulma analizindeki sapmalar, kuvvetler ve reaksiyonlar bir yapının normalleştirilmiş burkulma şekline karşılık geldiğinden, gerçek yer değiştirmeleri, kuvvetleri ve reaksiyonları elde etmek için doğrusal olmayan burkulma analizi yapılmalıdır ([https://wiki.csiamerica.com /display/kb/Eigenvalue +vs.+Nonlinear+buckling +analysis](https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Eigenvalue+vs.+Nonlinear+buckling+analysis)).

SAP2000 ile doğrusal olmayan burkulma analizi yapılması durumunda modellemede bazı hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Simetrik yapıların burkulma

analizinde burkulmayı başlatmak için geometrik veya yükleme kusurları kullanılmalıdır. Bu kusurlar lineer burkulma mod şekline uygun ve yapıda yüksek ek gerilmeler oluşturmayacak kadar küçük olmalıdır. Hazırlanan modelde yapısal nesnelere (sonlu elemanlar) doğrusal olmayan geometri kaynaklı özellikleri yakalayacak kadar küçük uzunluklara bölünmelidir. Analiz birden fazla adımla gerçekleştirilmeli ve daha iyi sonuç elde etmek için uygun yakınsama toleransı seçilmelidir. Yakınsama toleransının, muhtemelen 10^{-6} veya daha düşük olacak şekilde seçilmesi tercih edilmelidir. Yapılan analizlerde seçilen parametreler Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Bir yapı yük taşıma kapasitesini kaybederse, yük kontrolü yerine yer değiştirme kontrolü uygulanmalıdır. Bu durum yükün gerçekte nasıl uygulandığını değil yük durumu kontrol tanımını ifade etmektedir. Yapıda veya yapı elemanında kararsızlık şiddetli olduğunda, doğrusal olmayan burkulma analizi, doğrusal olmayan statik analiz yerine time-history analizine dönüştürülmelidir (<https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Nonlinear+buckling>).



Şekil 4.10. SAP2000 doğrusal olmayan analiz parametreleri

Doğrusal olmayan statik burkulma analizi sırasında, toplam yük kademeli olarak uygulanır. Sistem rijitliği her yük artışı kademesinde yeniden hesaplanır. Analiz esnasında

kademeli yük artışı ile beraber gerçekleşen yer değiştirme ile çözüm adımları arasında aşağıdaki etkilerden dolayı sertlik değişebilir:

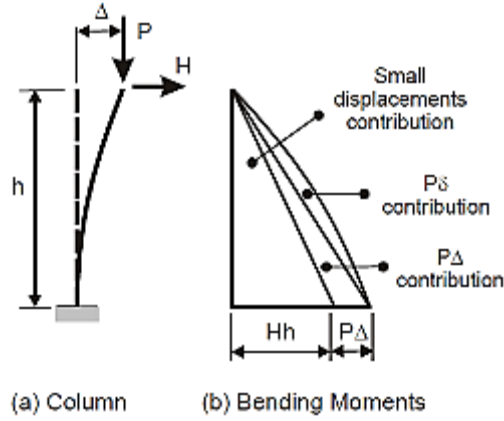
- Enine bükülme ve kayma davranışı üzerinde büyük çekme veya basma gerilmelerini içeren P-Delta etkisi .
- Denge denklemleri oluşturulurken deforme olmuş konfigürasyonun göz önüne alındığı geniş yer değiştirme etkisi .
- Performansın lineer olmayan tepki içerdiği doğrusal olmayan malzeme davranışı . (SAP2000, çubuk elemanlarda plastik mafsallı veya doğrusal olmayan katmanlı kabuk nesnelere kullanarak doğrusal olmayan malzeme özelliği analize dahil edilebilmektedir.)

Doğrusal olmayan analiz yöntemleri, yapısal modelleme ve analiz sırasında doğrusal olmayan geometri veya malzeme özellikleri dikkate alınarak uygulanır (<https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Nonlinear>). Burkulma analizi yapılır iken doğrusal olmayan geometrik ve malzeme davranışının hesaba katılabilmesi için bir dizi adımın izlenmesi gerekmektedir.

4.2.1. Doğrusal olmayan geometri

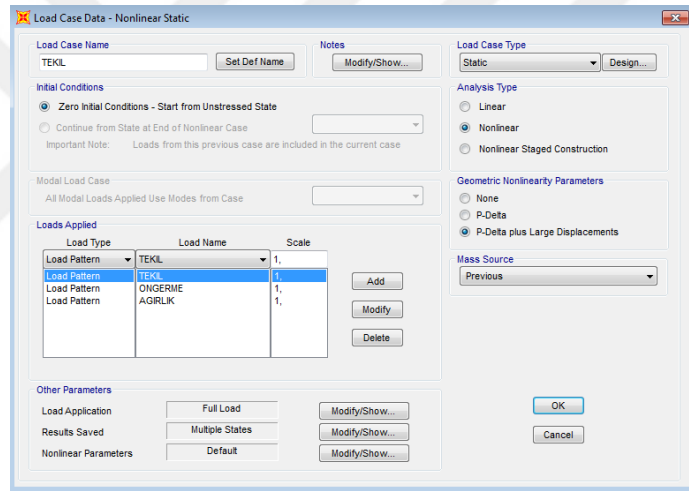
P-Delta etkisi tipik olarak nispeten küçük yer değiştirmeler üzerine büyük dış kuvvetleri içerir. Eğer deformasyonlar doğrusal uyumluluk ilişkilerinden kopacak kadar büyük hale gelirse, “büyük-yer değiştirme” ve “büyük-deformasyon” analizleri gerekli hale gelir. İki P-Delta etkisi kaynağı Şekil 4.12'de gösterilmiş ve aşağıdaki gibi tarif edilmiştir:

- P- δ etkisi veya P- "küçük delta", uç düğüm noktalarının arasındaki lokal deformasyonla ilişkilidir. Tipik olarak, P- δ sadece makul olmayan büyük yer değiştirme değerlerinde veya özellikle ince sütunlarda belirgin hale gelir.
- P- Δ etkisi , eleman uçlarına göre yer değiştirmeler ile ilişkilidir. P- Δ etkisi, doğrusal olmayan modelleme ve analiz için kritik öneme sahiptir. Ağırlık ve diğer düşey yüklemeler önemli yanal yer değiştirmeler altında yapısal sonuçlara etki eder. Yatay dayanım kaybına ve dinamik dengesizliğe katkıda bulunabilir (<https://wiki.csiamerica.com/display/kb/P-Delta+effect>).



Şekil 4.11. Kolon elemanlarında P-Delta etkisi

Doğrusal olmayan burkulma analizlerinde Şekil 4.13’de gösterilen yükleme durumlarının belirlendiği “Load Case Data” ekranında “Nonlinear” analiz tipi seçilerek “P-Delta ve Large Displacement” seçilmesi gerekmektedir.

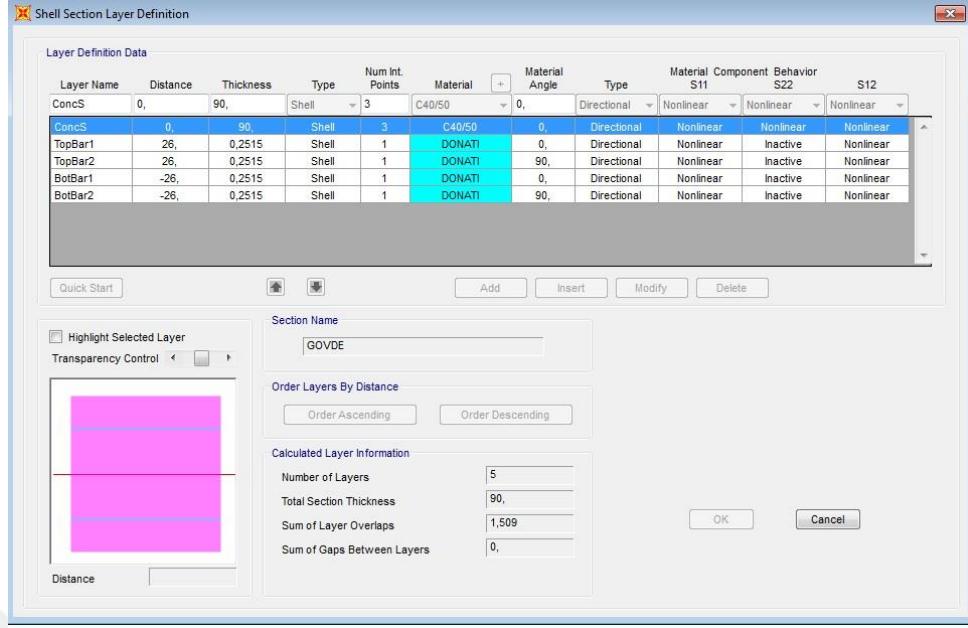


Şekil 4.12. "Load Case Data" ekran görüntüsü

4.2.2. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı

Doğrusal olmayan burkulma ve eğilme analizlerinde yapı elemanında kullanılan beton ve donatı malzemelerinin doğrusal olmayan davranışının analize dahil edilebilmesi için Şekil 4.13 ile gösterilen Shell-multilayered elemanlar kullanılmıştır.

Doğrusal olmayan analizlerde kullanılan shell eleman ile beton içerisinde bulunan donatının da modellenmesi mümkündür. Kullanılan kesit betonarme olarak analize dahil edilmektedir. Beton malzemesi için f_{ck} ve f_{ctd} , donatı malzemesi için ise f_{yk} ve f_{yu} karakteristik değerleri analizde göz önünde bulundurularak kesitin gerçek kapasitesi hesaplanmaktadır.



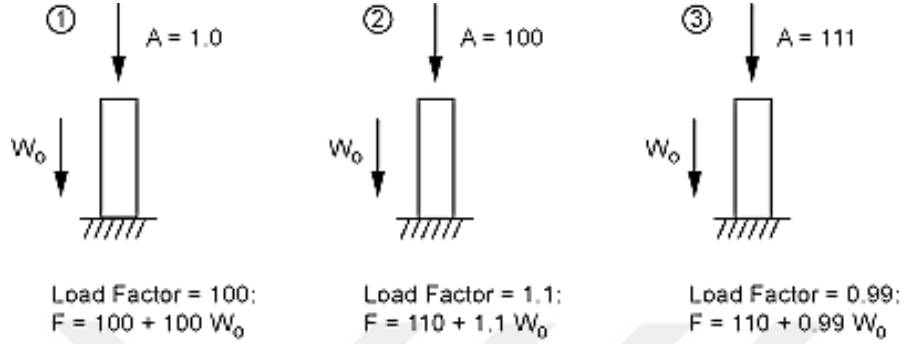
Şekil 4.13. Shell (Multilayered) elemanı düzenleme ekran görüntüsü

4.3. Kiriş Ağırlığı ve Öngerme Kuvvetinin Burkulma Analizlerine Dahil Edilmesi

ANSYS ve SAP2000 programı ile yapılan burkulma analizi neticesinde hesaplanan sonuçlar, statik analizde uygulanan tüm yükleri ölçekleyen burkulma yük faktörleridir. Örneğin, statik analizde bir yapıya 10 N dış yük uygulanırsa ve burkulma analizi ile 1.500 yük faktörü hesaplanırsa tahmin edilen burkulma yükü $1.500 \times 10 = 15.000$ N'dir. Burkulma analizinden önce yapılan statik analizde kullanılan yükler birim yüklerdir. Burkulma yük faktörü, statik analizde kullanılan tüm yüklerle uygulanmaktadır. Eğer bazı yükler sabit ise (örnek: yerçekimi yükleri, öngerme yükleri v.b.) ve diğer yükler değişkense (örneğin, harici olarak uygulanan yükler), doğru sonuçların elde edilmesi için özel adımlar atılması gerekir.

Sabit olan yükler altında (yerçekimi yükleri, öngerme yükleri v.b.) burkulma yükünü bulabilmek için izlenmesi gereken yollardan biri burkulma çözümünü tekrarlayarak Şekil 4.14'te gösterildiği gibi yük faktörü 1,0 (veya bazı yakınsaklık toleransı içinde yaklaşık 1,0) olana kadar değişken yükleri ayarlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında burkulma analizi yapılacak modellere önce belirlenen mesnet şartları ve dış yükler için statik analiz yapılmıştır. Yapılan statik analiz için burkulma analizleri yapılarak burkulma yük faktörleri belirlenmiştir. Program tarafından hesaplanan burkulma yük faktörü, statik analizde kullanılan tüm yüklerle uygulanmaktadır. Yapılan analizlerde hem sabit yükler (yerçekimi yükleri) hem de değişken yükler (kar yükü, kaplama yükü ve aşık ağırlığı) bulunması sebebiyle doğru sonuçların elde edilmesi için aynı model üzerinde birden fazla

analiz yapılmıştır. Bu çalışmada burkulma yükü belirlenirken; sabit yükler ile beraber değişken yükler de uygulanarak yapılan ilk analiz sonucu belirlenen burkulma yük faktörüne göre aşık yükleri değiştirilmiştir. Burkulma analizlerinin sonucu burkulma yük faktörü 1,01 değerinden az olana kadar aşık yükleri değiştirilmiş ve analizler tekrarlanmıştır.



Şekil 4.14. Ağırılığın bulunması durumunda burkulma analizi adımları

4.4. Sınır Şartları

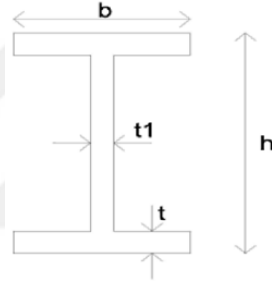
Analizleri yapılacak olan çelik ve betonarme çatı kirişi elemanlarının, düzlemi içindeki yükler altında basit mesnetli olması durumu incelenmiştir. Kirişlerin açıklık ortasına göre simetrik olması sebebi ile modellemelerin tamamında simetriden faydalanılmıştır. Bu durumda kirişlerin yarısı modellenerek simetri düzleminde “Symetry Boundry Condition” (simetri sınır koşulu) uygulanmıştır.

5. ANSYS İLE YAPILAN DOĞRUSAL BURKULMA ANALİZLERİ

5.1. ANSYS ile Yapılan Burkulma Analizlerinin Doğrulanması

5.1.1. Sabit I Enkesitli Çelik Kirişlerin Yanal Burkulması

Yanal burkulma, kesitlerin narin olması sebebi ile genellikle çelik kiriş ve kolonlarda meydana gelmektedir. ANSYS sonlu elemanlar programı ile I enkesitli çelik kirişlerin yanal burkulma analizi yapılarak bulunan sonuçlar Elastik Stabilite Teorisi ve SAP2000 sonlu elemanlar hesap ve analiz programı ile bulunan sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Basit mesnetli kirişlere tekil yük ve yayılı yük etkimesi durumları için karşılaştırma yapılacaktır. Yanal burkulma analizinde kullanılacak kesit geometrisi Şekil 5.1 ve kesit özellikleri Çizelge 5.1 ile verilmektedir. Kirişlerin konsol veya basit mesnetli olması ve sisteme tekil yük veya düzgün yayılı yük etkimesi seçenekleri için karşılaştırma ayrı ayrı yapılacaktır.

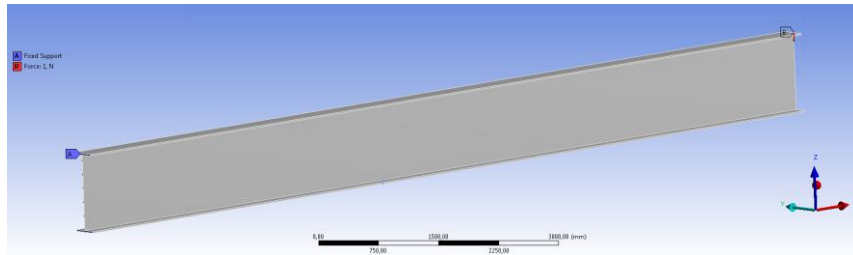


Şekil 5.1. Kiriş en kesiti

Çizelge 5.1. Çelik kirişe ait ölçüler

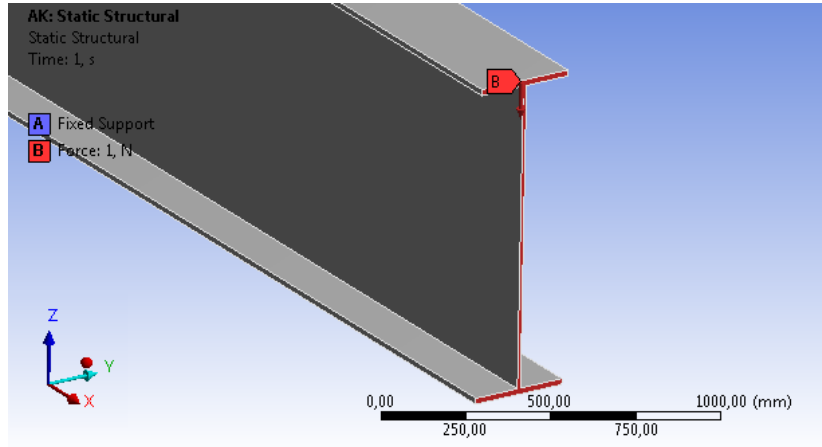
| | | |
|----|-------|----|
| L | : 12 | m |
| h | : 1 | m |
| b | : 30 | cm |
| t | : 1,9 | cm |
| t1 | : 1,1 | cm |

5.1.1.1. Konsol ucuna tekil yük etkileyen sabit I enkesitli çelik kirişlerin yanal burkulması



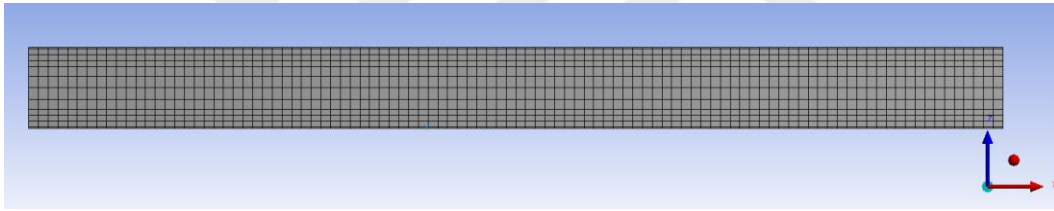
Şekil 5.2. Çelik konsol kiriş 3 boyutlu katı modeli, uygulanan yükler ve mesnet şartları

Ankastre mesnetli çelik kirişe tekil yük konsol ucunda bulunan kesit alanına uygulanmıştır. Yükün uygulandığı yüzey Şekil 5.2 ve 5.3’de görülmektedir.

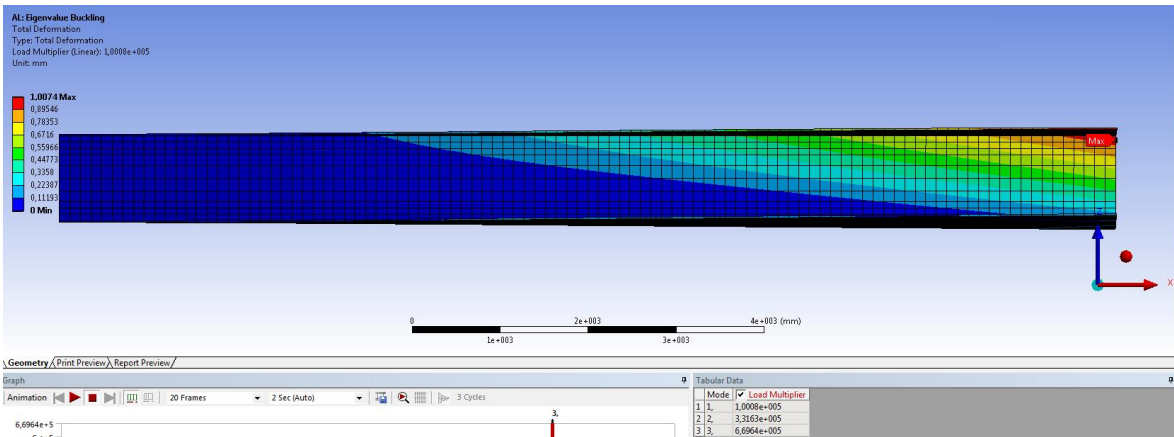


Şekil 5.3. Çelik konsol kirişe uygulanan birim yükleme

12 m uzunluğundaki çelik konsol kirişin yanıl burkulmasının bulunması amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar modeli 37.471 adet düğüm noktası ve 7.000 adet elemandan meydana gelmektedir. Modele ait mesh yapısı Şekil 5.4’de gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Çelik konsol kiriş ANSYS modeli mesh yapısı görüntüsü



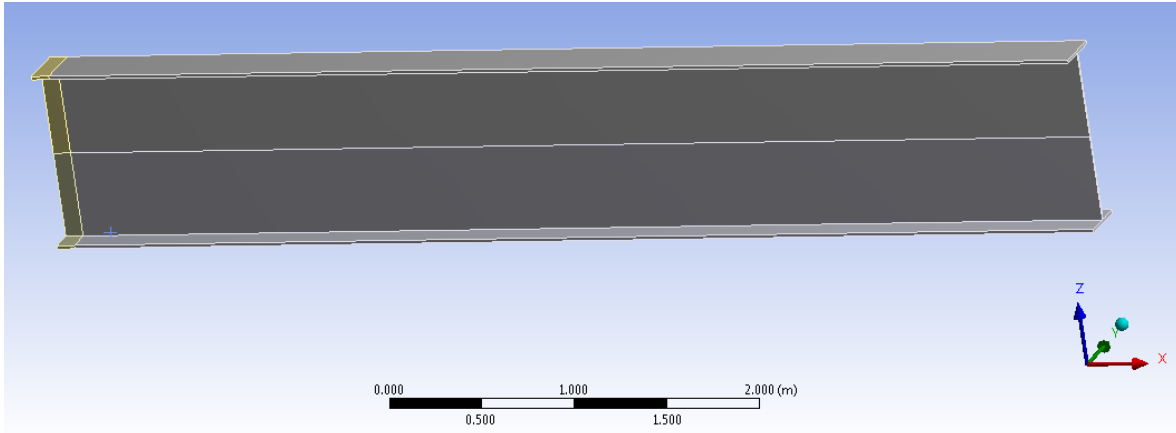
Şekil 5.5. Çelik konsol kiriş burkulma analizi sonuçları ve burkulma yük faktörleri

Coşkun’ un (2014) çalışmasında SAP2000 ile kritik burkulma yükü değeri 10,3 tonf (101,04 kN) olarak, Elastik Stabilité Teorisine göre yapılan çözümde bu değer 10,58 tonf (103,79 kN) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında ANSYS ile yapılan burkulma

analizi sonucunda kiriş kritik burkulma yükü olarak 100 kN hesaplanmıştır. Elastik teori ile yapılan hesaba göre %3,6 hata ile kritik burkulma yükü bulunmuştur.

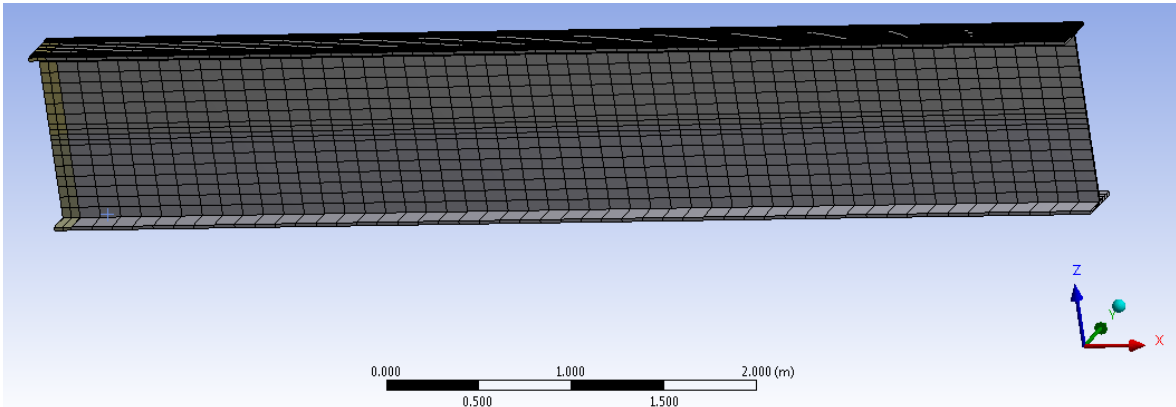
5.1.1.2. Basit mesnetli, tekil yük etkileyen sabit I enkesitli çelik kirişlerin yanal burkulması

Basit mesnetli sabit I-enkesitli çelik kirişlerin yanal burkulması analizinde mesnet bölgesinde oluşan gerilmeler sebebi ile Şekil 5.6'da gösterildiği gibi kiriş ucundan 100 mm'lik kısmı rijit olacak şekilde modellenmiştir.



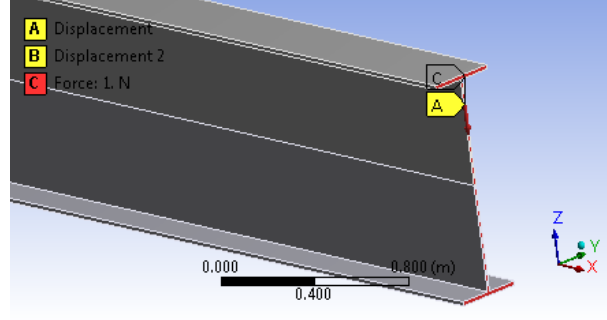
Şekil 5.6. Basit mesnetli çelik kiriş 3 boyutlu katı modeli

Oluşturulan sonlu elemanlar modeli 19.561 adet düğüm noktası ve 3.432 adet elemandan meydana gelmektedir. Modele ait mesh yapısı Şekil 5.7'de gösterilmektedir.



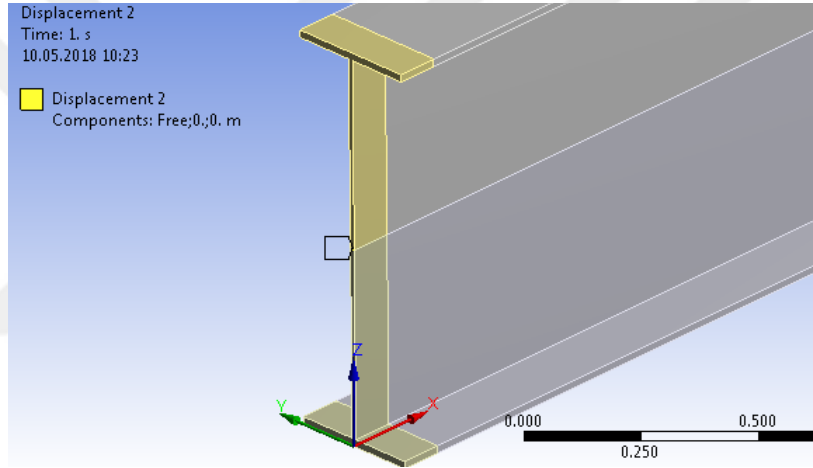
Şekil 5.7. I-kesitli çelik kiriş ANSYS modeli mesh yapısı

Basit mesnetli kirişin açıklık ortasında bulunan düzleme göre simetrik olması sebebi ile kirişin yarısı modellenerek simetri sınır şartları uygulanmıştır. Tekil yük, Şekil 5.8'de gösterildiği gibi simetri düzlemine yayılı yük olarak uygulanmıştır.

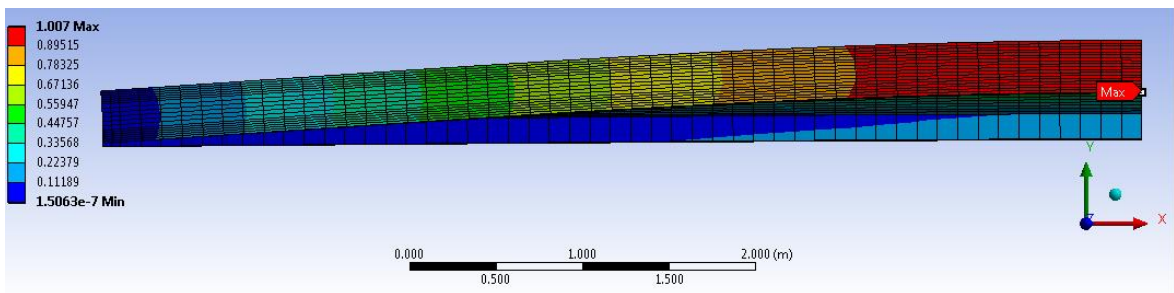


Şekil 5.8. I-kesitli çelik kiriş simetri düzlemi ve uygulanan tekil yük

Kiriş ucunda mesnet şartı olarak kesit ortasından düşey eksen (Z eksen) ve kiriş düzlemine dik doğrultularda (Y eksen) tutulmuştur. Mesnet şartları Şekil 5.9’da gösterilmektedir. Kirişin yüksek olması sebebi ile alt başlıktan tutulması elastik teoriden farklı sonuçlar elde edilmesine sebep olmaktadır.



Şekil 5.9. I-kesitli çelik kiriş ucu mesnet şartları



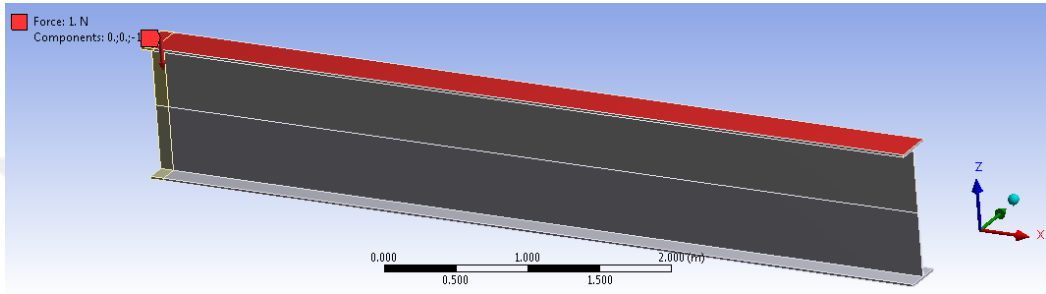
Şekil 5.10. I-kesitli çelik kiriş üst görünüşü

Coşkun’ un (2014) çalışmasında, SAP2000 ile kritik burkulma yükü değeri 31,76 tonf (311,57 kN) olarak, Elastik stabilite teorisine göre yapılan çözümde ise bu değer 34,73 tonf (340,70 kN) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında ANSYS ile

yapılan burkulma analizi sonucunda kiriş kritik burkulma yükü olarak 342 kN hesaplanmıştır. Elastik teori ile yapılan hesaba göre %0,3 hata ile kritik burkulma yükü bulunmuştur.

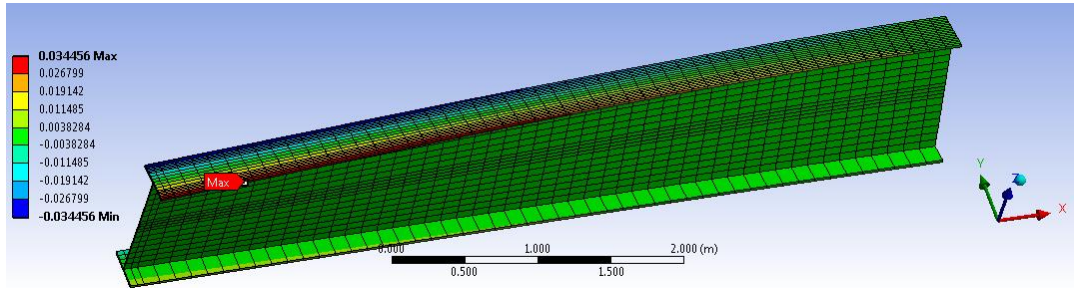
5.1.1.3. Basit mesnetli, yayılı yük etkileyen sabit I enkesitli çelik kirişlerin yanal burkulması

Basit mesnetli çelik kirişte Şekil 5.11’de gösterilen üst başlıkta yayılı yükün etkimesi durumunda kritik burkulma yükü hesaplanmaya çalışılmıştır. Kullanılan çelik kiriş modelinde üst başlık bölgesine 1 N düşey yayılı yük uygulanmıştır.



Şekil 5.11. I-kesitli çelik kirişte yayılı yük uygulanan yüzey

Yapılan analiz sonucu bulunan deformasyon görüntüsü Şekil 5.12’de gösterilmektedir. Coşkun’ un (2014) çalışmasında SAP2000 ile kritik burkulma yükü değeri 4,24 tonf/m (41,59 kN/m) olarak, Elastik stabilite teorisine göre yapılan çözümde bu değer 4,81 tonf/m (47,19 kN/m) olarak hesaplanmıştır. ANSYS ile yapılan burkulma analizi sonucunda kiriş kritik burkulma yükü olarak 47,4 kN/m hesaplanmıştır. Elastik teori ile yapılan hesaba göre %0.4 hata ile kritik burkulma yükü bulunmuştur.

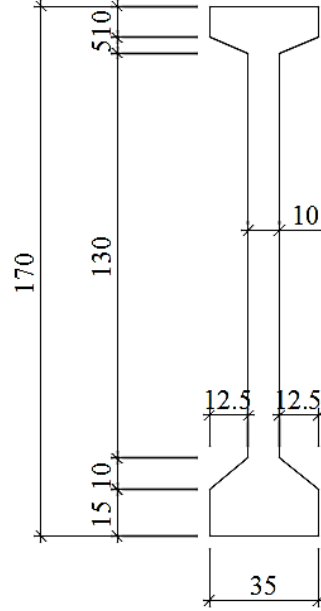


Şekil 5.12. I-kesitli çelik kiriş deformasyon şekli

5.1.1.4. Sabit I enkesitli basit mesnetli betonarme kirişlerin yanal burkulması

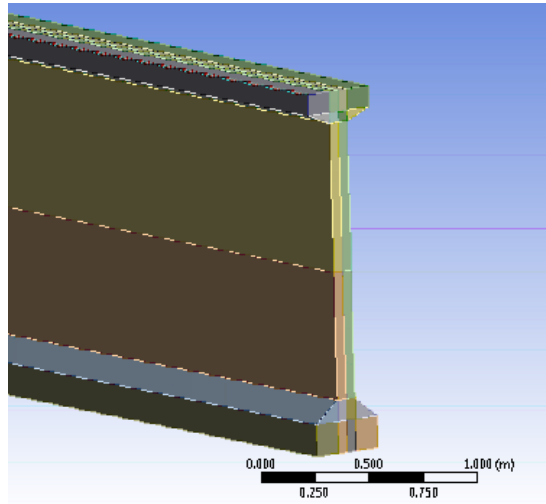
Bu bölümde, sabit I enkesitli; basit mesnetli betonarme kirişler için Coşkun’ un (2014) çalışmasında elastik stabilite teorisi ve SAP2000 sonlu elemanlar hesap ve analiz programı yardımıyla hesaplanan burkulma yükleri, bu çalışma kapsamında ANSYS

programı ile elde edilen burkulma yükü değerleri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplama da kullanılan model 25 m açıklıklı, $h = 1,7$ m yükseklikli kiriş model geometrisi Şekil 5.13'te gösterilmiş olup, beton sınıfı olarak C40/50 kullanılmıştır.

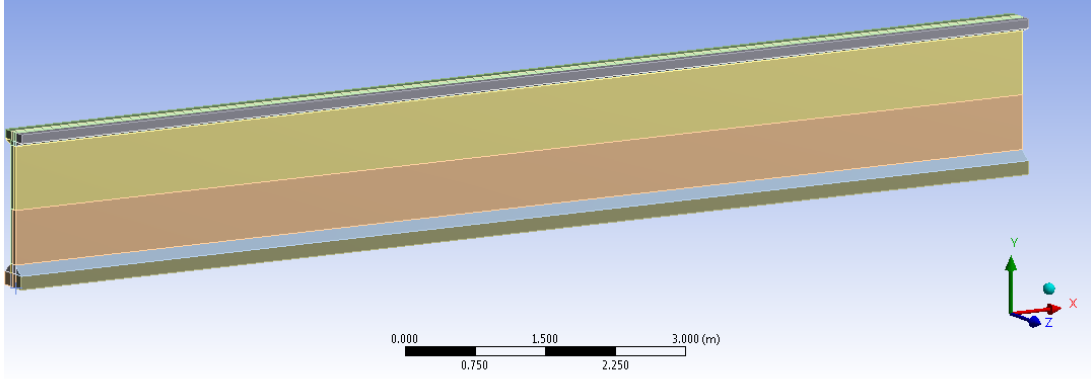


Şekil 5.13. Sabit I-kesitli beton kiriş en kesiti ve kesit ölçüleri

Oluşturulan 3 boyutlu katı modelin 20 düğüm noktalı Solid186 ile mesh edilebilmesi için katı model kesiti dikdörtgenel bölgelere ayrılmıştır. Kesitte hacim elemanları Şekil 5.14 ve oluşturulan 3 boyutlu katı model Şekil 5.15'de gösterilmektedir.

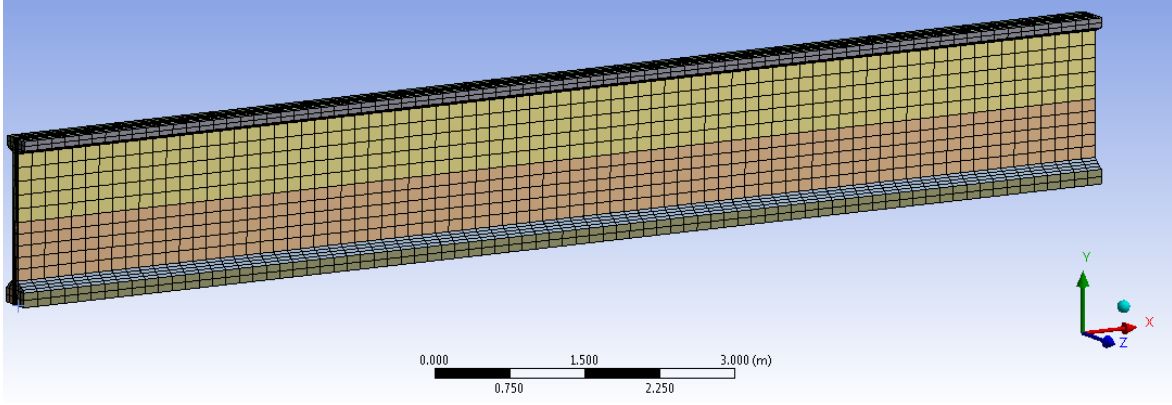


Şekil 5.14. Sabit I-kesitli beton kiriş katı model en kesiti

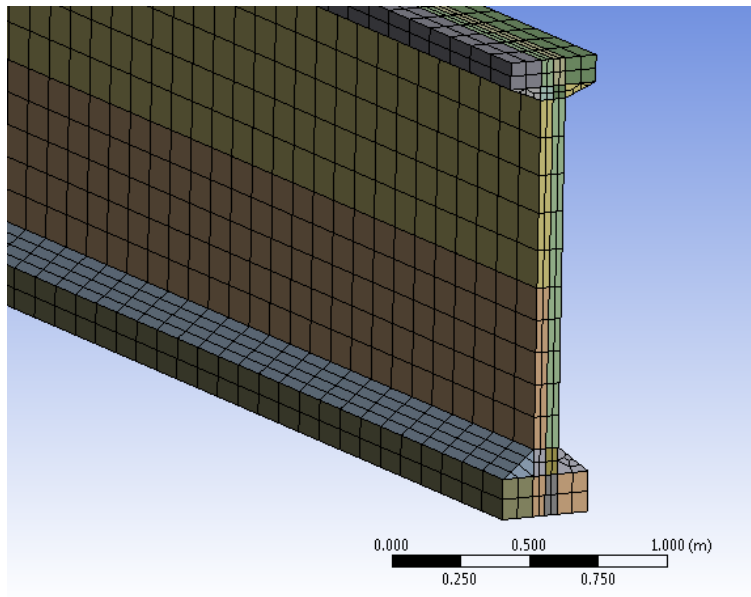


Şekil 5.15. Sabit I-kesitli beton kiriş 3 boyutlu katı modeli

Oluşturulan sonlu elemanlar modeli mesh yapısı 3 boyutlu görüntüsü Şekil 5.16’de, kesit mesh yapısı Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modeli 41.579 adet düğüm noktası ve 8.640 adet elemandan meydana gelmektedir.



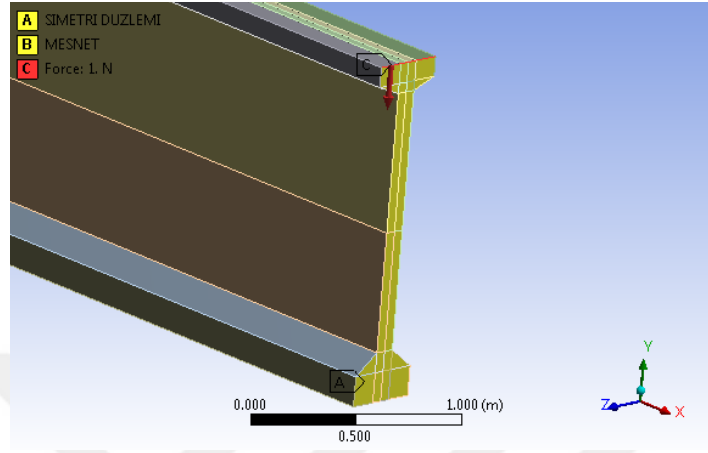
Şekil 5.16. Sabit I-kesitli beton kiriş mesh yapısı



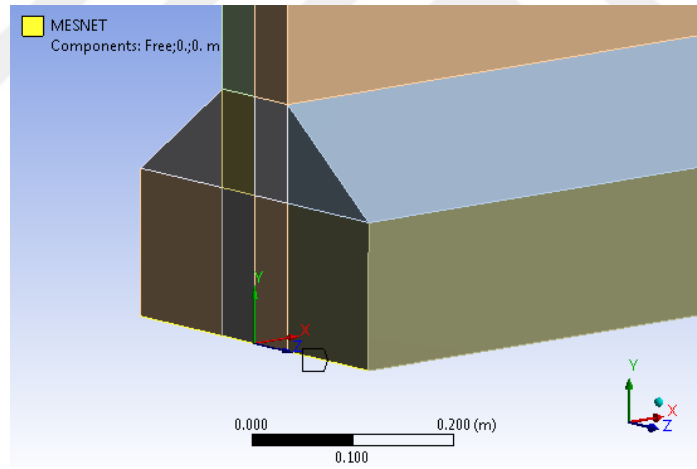
Şekil 5.17. Sabit I-kesitli beton kiriş kesiti mesh yapısı

5.1.1.5. Basit mesnetli, tekil yük etkileyen sabit I enkesitli betonarme kirişlerin yanal burkulması

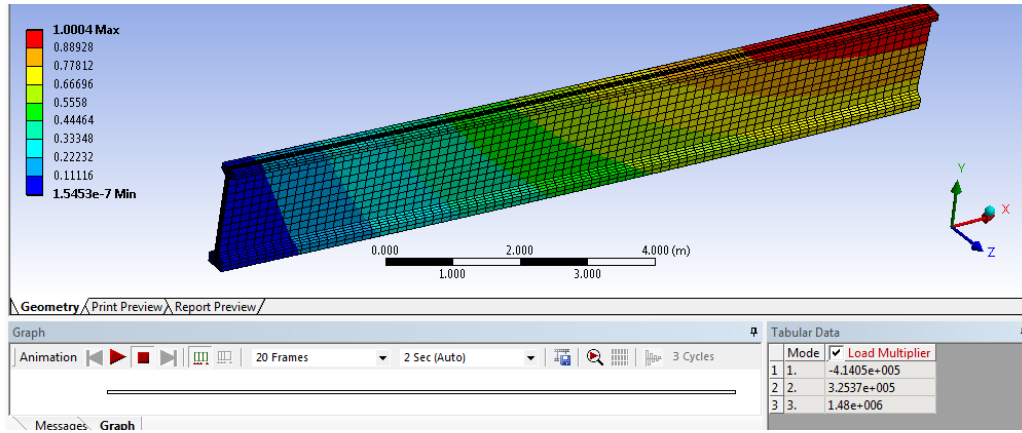
Basit simetrisinden dolayı simetri sınır şartları kullanılmıştır. Tekil dış yük üst başlık çizgisine 1 N olarak etki ettirilmiştir . Uygulanan birim yük ve simetri şartının uygulandığı yüzey Şekil 5.18 gösterilmektedir.



Şekil 5.18. Sabit I-kesitli beton kiriş simetri eksenine ve uygulanan tekil yük



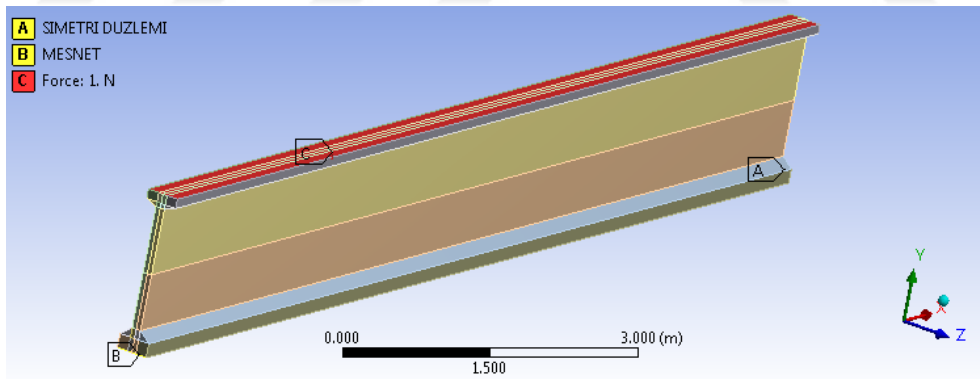
Şekil 5.19. Sabit I-kesitli beton kiriş ucu mesnet şartları



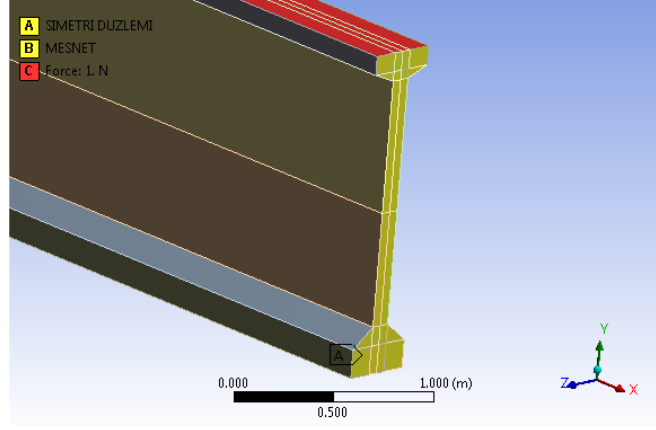
Şekil 5.20. Sabit I-kesitli beton kiriş burkulma yük faktörleri

Coşkun' un (2014) çalışmasında SAP2000 ile kritik burkulma yükü değeri 74,4 tonf (730,07 kN) olarak, Elastik Stabilité Teorisine göre yapılan çözümde bu değer 67,65tonf (663,66 kN) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında ANSYS programı ile yapılan burkulma analizi sonucunda kiriş kritik burkulma yükü olarak 650,74 kN hesaplanmıştır. Elastik teori ile yapılan hesaba göre %1,9 hata ile kritik burkulma yükü bulunmuştur.

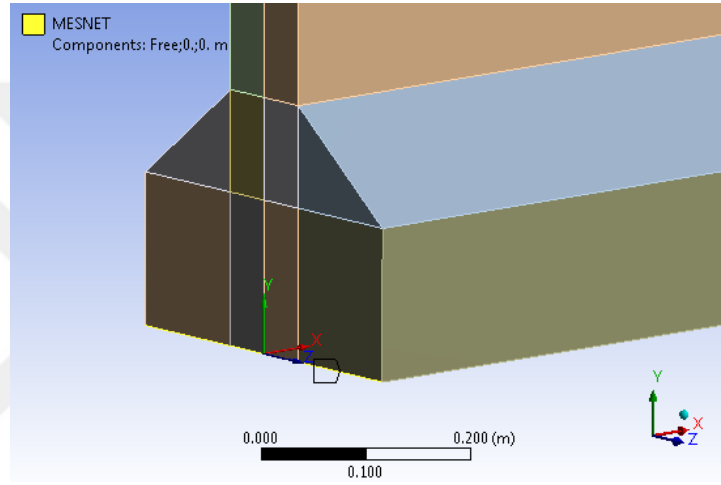
5.1.1.6. Basit mesnetli, yayılı yük etkileyen sabit I enkesitli betonarme kirişlerin yanal burkulması



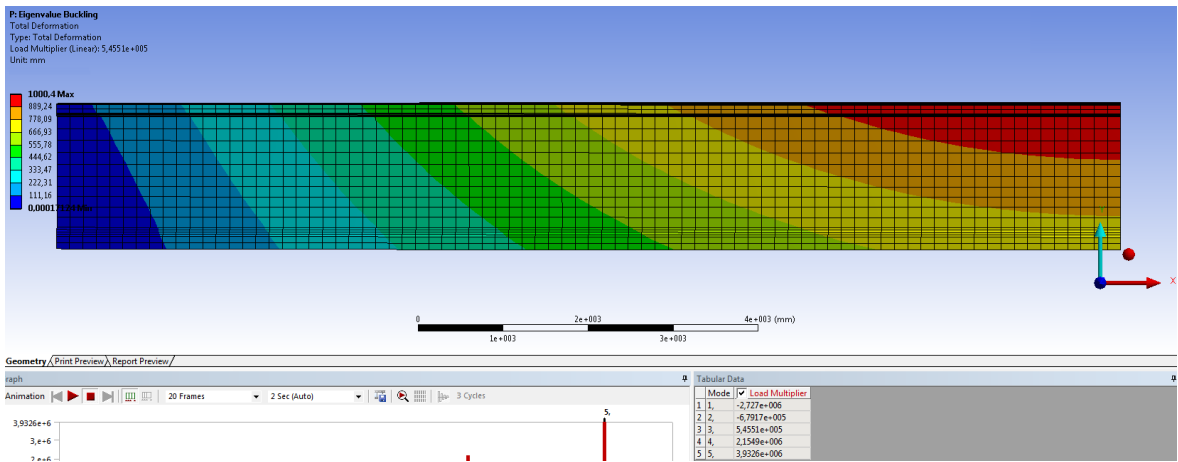
Şekil 5.21. Sabit I-kesitli beton kiriş mesnet şartları ve uygulanan yayılı yük



Şekil 5.22. Sabit I-kesitli beton kiriş simetri düzlemi



Şekil 5.23. Sabit I-kesitli beton kiriş ucu mesnet şartları



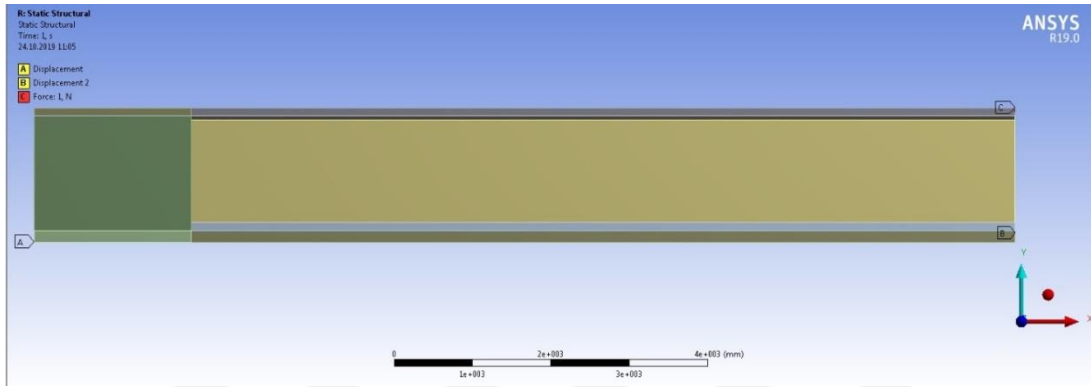
Şekil 5.24. Burkulma analizi sonuçları ve burkulma yük faktörleri

Coşkun' un (2014) çalışmasında SAP2000 ile kritik burkulma yükü değeri 5,08 t/m (49,84 kN/m) olarak, Elastik stabilite teorisine göre yapılan çözümde bu değer 4,49

t/m (43,60 kN/m) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında ANSYS ile yapılan burkulma analizi sonucunda kiriş kritik burkulma yükü olarak 43,60 kN/m hesaplanmıştır. Elastik teori ile yapılan hesaba göre %1 hata ile kritik burkulma yükü bulunmuştur.

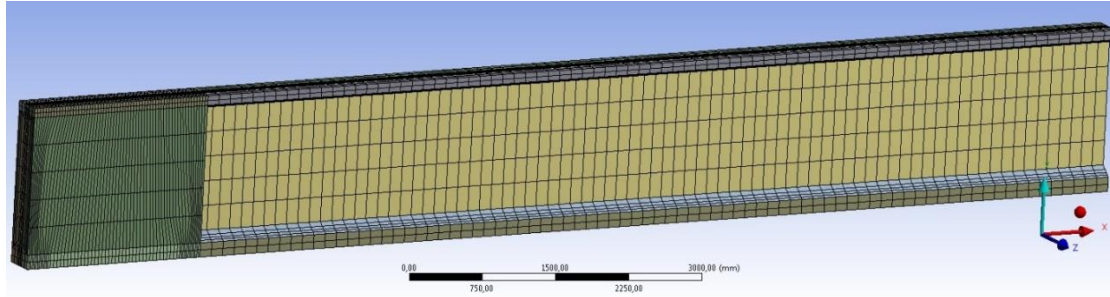
5.1.2. Basit mesnetli, yayılı yük etkileyen sabit yükseklikli mesnet bölgesi dikdörtgen beton kirişlerin yanal burkulması

Sabit enkesitli sistemlerin mesnet bölgelerindeki yüksek kesme kuvvetlerinin karşılanabilmesi için bu bölgeler dolu kesitle geçilir. 25 m açıklıklı kirişimiz esas modelden farklı olarak, Şekil 25’de görüldüğü gibi başta ve sondaki 2 m’lik kısımları 35cmx170cm dolu kesit tanımlanmıştır.

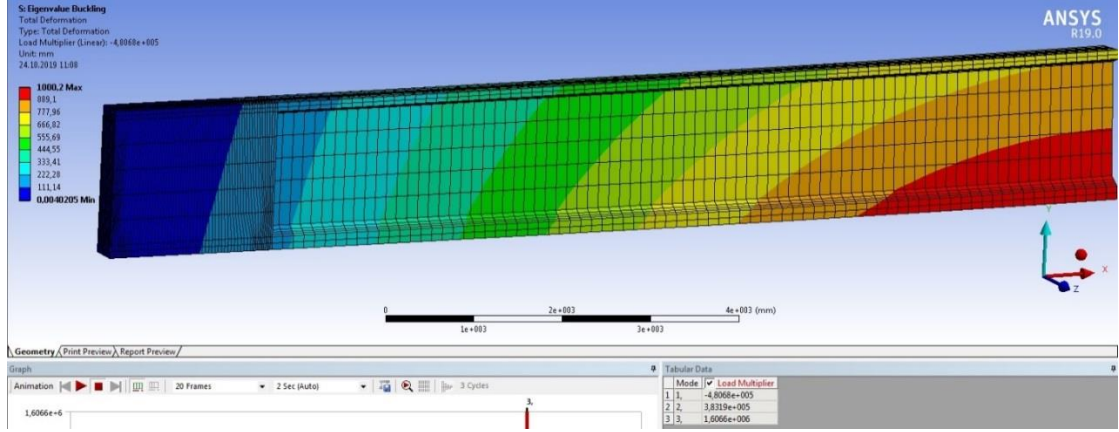


Şekil 5.25. I-kesitli, mesnet bölgesi dikdörtgen beton kiriş yan görünüşü

Oluşturulan sonlu elemanlar modeli 69.185 adet düğüm noktası ve 15.247 adet elemandan meydana gelmektedir. Modele ait mesh yapısı Şekil 5.26’da gösterilmektedir.



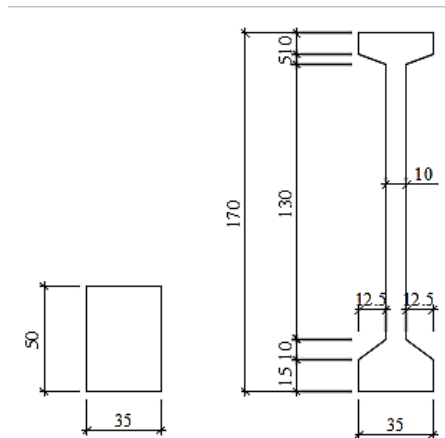
Şekil 5.26. I-kesitli, mesnet bölgesi dikdörtgen beton kiriş mesh yapısı görünüşü



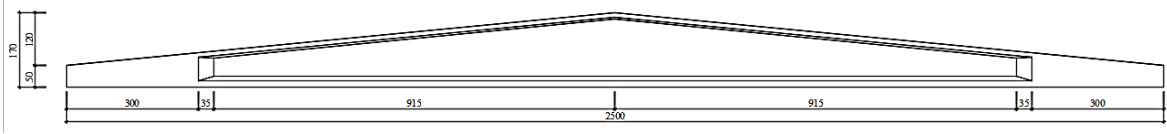
Şekil 5.27. I-kesitli, mesnet bölgesi dikdörtgen beton kiriş burkulma analizi sonuçları

Coşkun' un (2014) çalışmasında SAP2000 ile kritik burkulma yükü değeri 88,97 tonf (872,84 kN) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında ANSYS ile yapılan burkulma analizi sonucunda kiriş kritik burkulma yükü olarak 766,38 kN hesaplanmıştır. I-kesitli, mesnet bölgesi dikdörtgen beton kirişte burkulma yükünün belirlenmesinde SAP2000 ile yapılan hesap ve ANSYS ile yapılan hesap arasında %12,77 fark bulunmaktadır. SAP2000 programı ile sabit I-kesitli beton kiriş için hesaplanan kritik burkulma yükü Elastik Teoriye göre %10 fark bulunmaktadır. ANSYS ve SAP2000 ile bulunan sonuçlar arasındaki farkın Coşkun'un (2014) çalışmasında SAP2000 programı ile oluşturulan modelden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

5.1.3. Değişken Yükseklik ve Enkesitli Basit Mesnetli Betonarme Kirişlerin Yanal Burkulması



Şekil 5.28. Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş mesnet ve açıklık ortasında en kesit ve ölçüleri



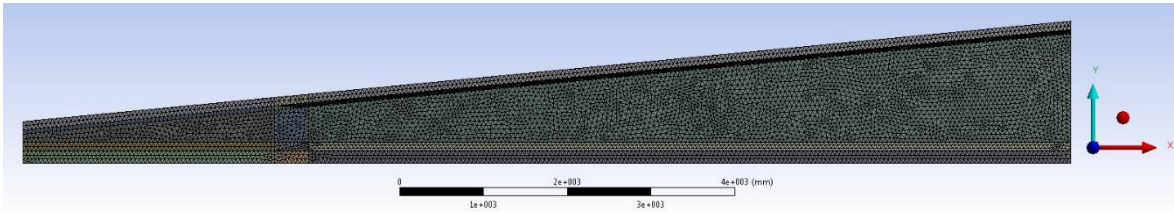
Şekil 5.29. Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş ölçüleri

Yüksek açıklıklara sahip sanayi yapılarında çatı kirişi olarak kullanılan prefabrik elemanlar mesnet bölgelerinde ve açıklıkta farklı enkesitlerde imal edilmektedir. Moment taşıma kapasitesinin artırılması ve çatı eğiminin sağlanabilmesi için kiriş yüksekliği mesnetlerden açıklığa doğru artmaktadır. Prefabrik makas kirişlerinde betonun kesme dayanımına katkısının artırılması için mesnet bölgesinde dikdörtgen kesit kullanılmaktadır.

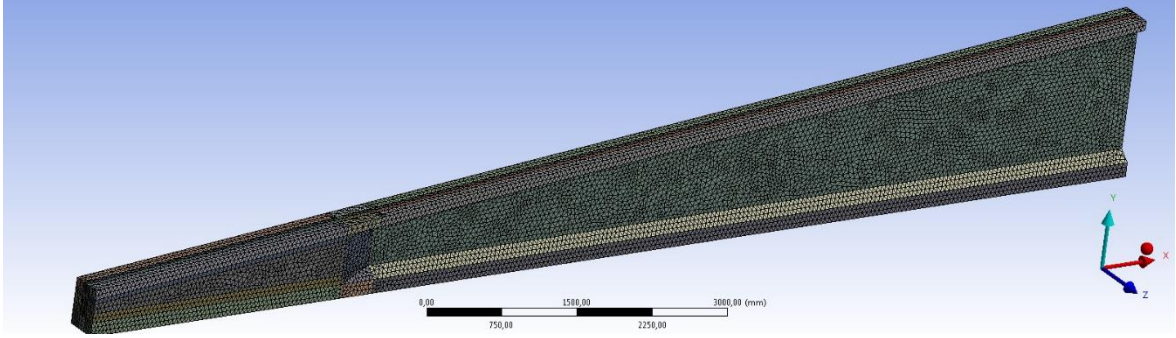
Günümüz şartlarında, çatı kirişleri genel olarak üstü örtü cinsine uygun çatı eğiminde, altı düz olarak kullanılmaktadır. Kullanılan kesitlerin yüksekliği, alt ve üst başlık kesitleri güvenliğe, ihtiyaca ve tasarıma göre değişiklikler göstermektedir. Klasik betonarme sistemlere nazaran daha narin olan bu kirişlerin tasarımında kullanılan kesitlerin tam verimle ihtiyacı karşılayabilmeleri, bir stabilite problemi olan yanal burkulma kritik yüklerinin de irdelenmesi gerekmektedir.

Kullanılacak modellerin beton sınıfları C40 dır. Açıklık kesitindeki maksimum kiriş yüksekliği 1,7 m' dir. Mesnet bölgelerinin 2 m' lik kısımları 35cm kalınlığında dolu gövdeli olarak modellenmiştir. Başlangıç kesiti 35 cm x 50 cm olarak düzenlenmiştir. Şekil 5.28'de sistem kesitleri gösterilmiştir.

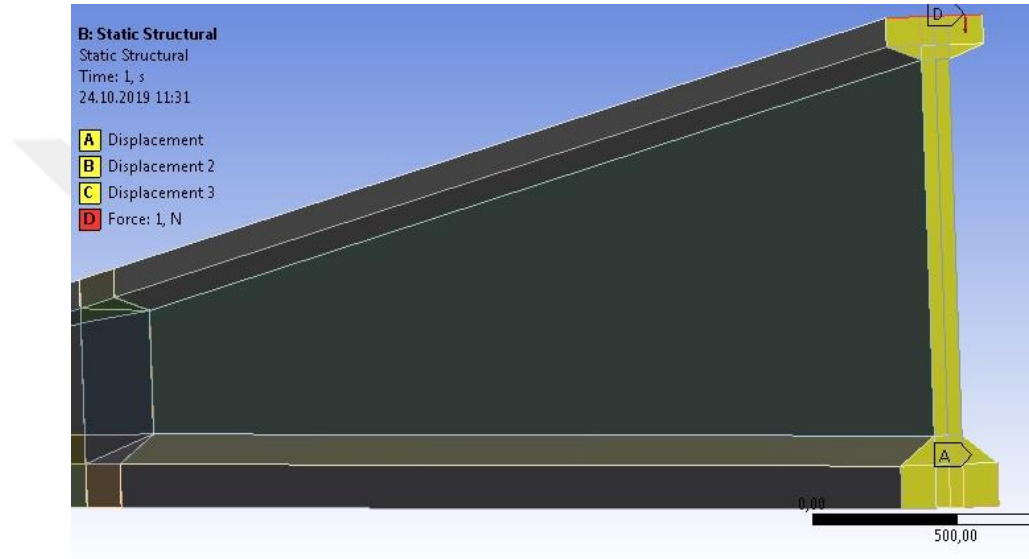
Oluşturulan sonlu elemanlar modeli 322.183 adet düğüm noktası ve 216.258 adet elemandan meydana gelmektedir. Modele ait mesh yapısı Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de gösterilmektedir.



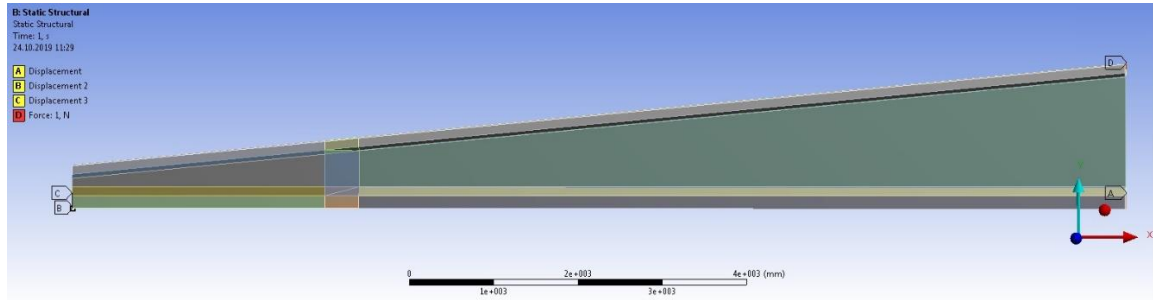
Şekil 5.30 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş mesh yapısı yan görünüşü



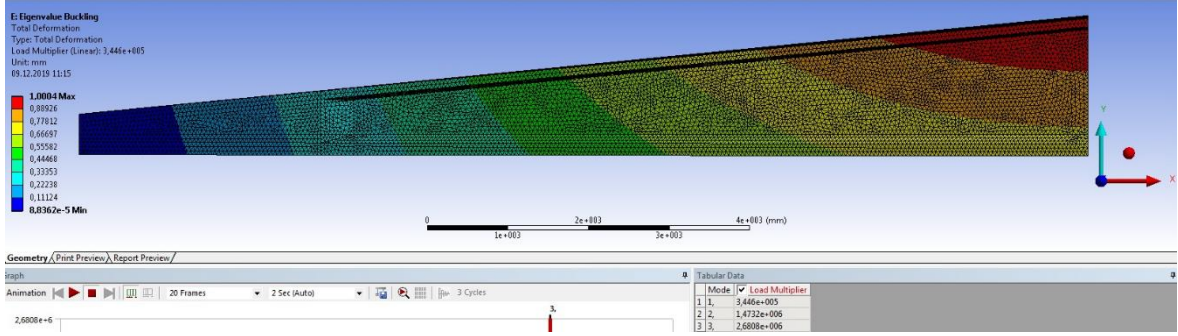
Şekil 5.31 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş mesh yapısı perspektif görünüşü



Şekil 5.32 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş simetri düzlemi ve uygulanan tekil yük



Şekil 5.33 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kirişe uygulanan mesnet koşulları



Şekil 5.34 Değişken yükseklik ve enkesitli beton kiriş burkulma analizi sonucu burkulma yük faktörleri

Coşkun'un (2014) çalışmasında, SAP2000 ile kritik burkulma yükü değeri 774,71 kN) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında ANSYS ile yapılan burkulma analizi sonucunda kiriş kritik burkulma yükü olarak 689,2 kN hesaplanmıştır. I-kesitli, değişken yükseklikli mesnet bölgesi dikdörtgen beton kirişte burkulma yükünün belirlenmesinde ANSYS ile yapılan hesap ve SAP2000 ile yapılan hesap arasında %12,4 fark bulunmaktadır. SAP2000 programı ile sabit I-kesitli beton kiriş için hesaplanan kritik burkulma yükü Elastik Teoriye göre %10 fark bulunmaktadır. ANSYS ve SAP2000 ile bulunan sonuçlar arasındaki farkın Coşkun'un (2014) çalışmasında SAP2000 programı ile oluşturulan modelden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

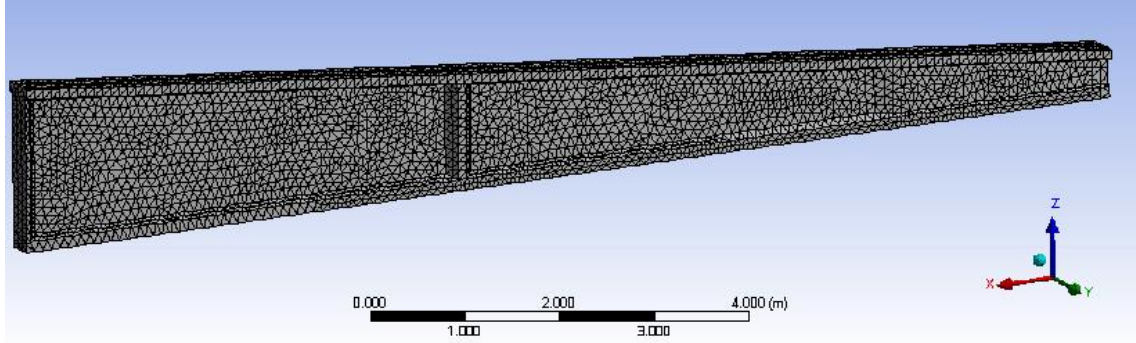
5.2. Mesh Yapısı ve Sonlu Eleman Büyüklüğü Seçimi Analizleri

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak olan mesh yapısı ve optimum sonlu eleman büyüklüğünün belirlenmesi için bir dizi analiz yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları karşılaştırılarak ihtiyaç duyulan mesh yapısı ve eleman büyüklüğü seçimi yapılmıştır.

Mesh büyüklüğü azaldıkça oluşturulan model ve sınır şartları için daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak analiz için kullanılan bilgisayar kapasitesi eleman büyüklüğünün çok küçük seçilmesi durumunda belirli bir noktadan sonra yetersiz kalacaktır. Ayrıca sonlu eleman büyüklüğünün çok küçük seçilmesinin yapılan analizin sonucu üzerinde etkisi önemsiz derecede az olabilmektedir. Bu sebepten gereksiz işlem sürelerinin azaltılması ve optimum sonlu eleman büyüklüğünün belirlenmesi için modelde eleman büyüklüğünün sonuç üzerindeki etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Tez konusu model üzerinde (donatı ve öngerme elemanları kullanılmadan) yapılan analiz ve sonuçları aşağıda verilmektedir. Yapılan analizlerde çatı kirişi elemanının simetri özelliğinden faydalanılmış olup çatı kirişi açıklık ortasında 1 N birim yük ile yüklenmiştir.

5.2.1. 10 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan model

Modellenen çatı makası kenar uzunluğu 10 cm' den büyük olmayacak şekilde sonlu elemanlara bölünerek burkulma analizi yapılmıştır. Bu durumda sonlu elemanlar modeli 41.624 adet düğüm noktası ve 23.564 adet elemandan oluşmaktadır. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 5.35'de verilmektedir.

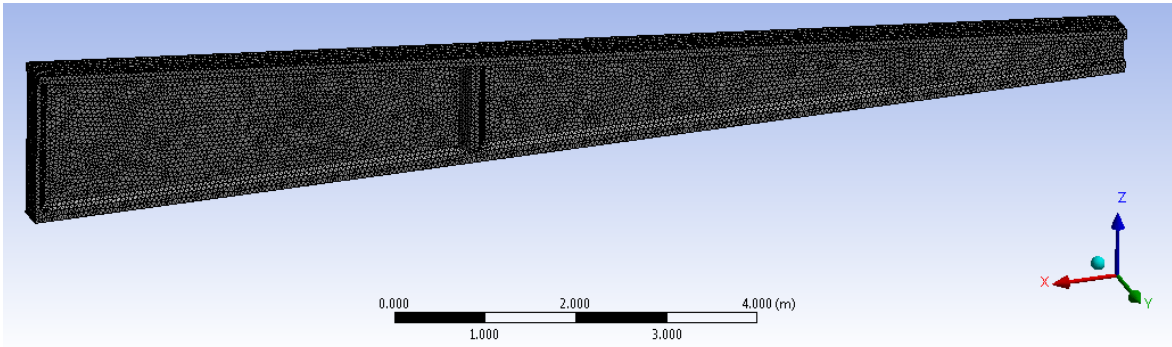


Şekil 5.35. 10 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan ağ yapısı

Oluşturulan sonlu eleman modeli analiz edildiğinde burkulma yükü 244.730 N olarak bulunmuştur.

5.2.2. 5 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan model

Modellenen çatı makası kenar uzunluğu 5 cm' den büyük olmayacak şekilde sonlu elemanlara bölünerek burkulma analizi yapılmıştır. Bu durumda sonlu elemanlar modeli 256.803 adet düğüm noktası ve 165.436 adet elemandan oluşmaktadır. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 5.36'da verilmektedir.

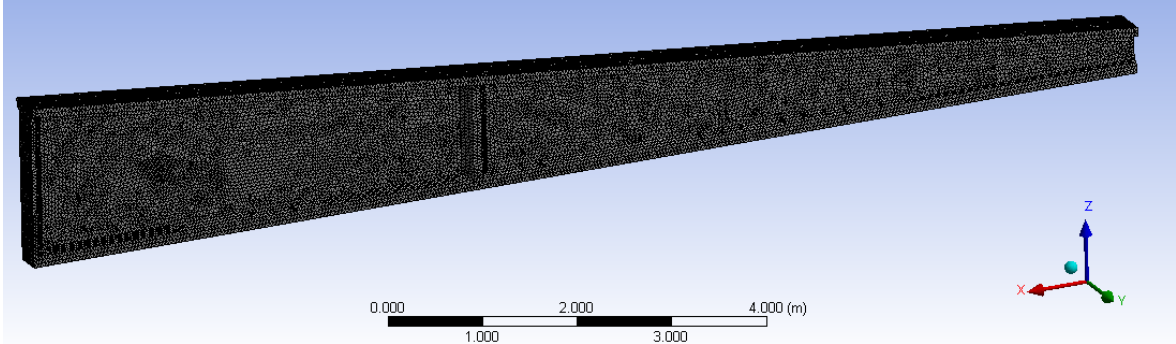


Şekil 5.36. 5 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan ağ yapısı

Oluşturulan sonlu eleman modeli analiz edildiğinde burkulma yükü 238.040 N olarak bulunmuştur.

5.2.3. 4 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan model

Modellenen çatı makası kenar uzunluğu 4 cm' den büyük olmayacak şekilde sonlu elemanlara bölünerek burkulma analizi yapılmıştır. Bu durumda sonlu elemanlar modeli 505.900 adet düğüm noktası ve 334.776 adet elemandan oluşmaktadır. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 5.37'de verilmektedir.

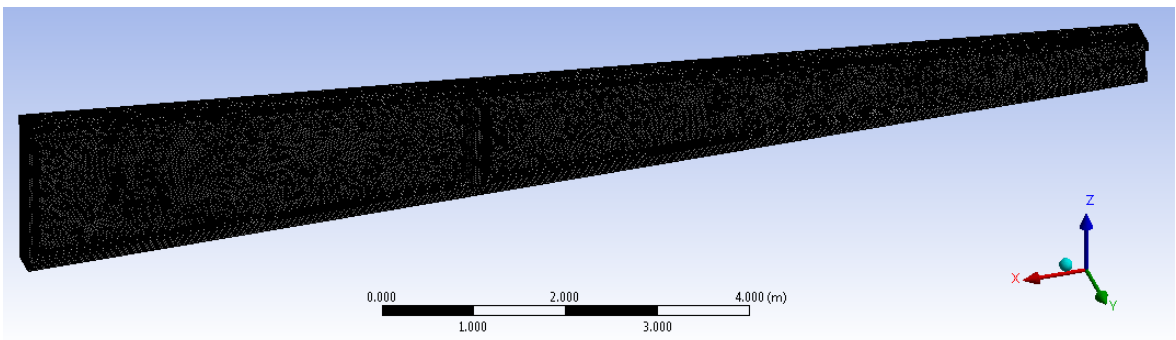


Şekil 5.37. 4 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan ağ yapısı

Oluşturulan sonlu eleman modeli analiz edildiğinde burkulma yükü 236.840 N olarak bulunmuştur

5.2.4. 3 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan model

Modellenen çatı makası kenar uzunluğu 3 cm' den büyük olmayacak şekilde sonlu elemanlara bölünerek burkulma analizi yapılmıştır. Bu durumda sonlu elemanlar modeli 1.158.615 adet düğüm noktası ve 788.729 adet elemandan oluşmaktadır. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 5.38'de verilmektedir.



Şekil 5.38. 3 cm eleman büyüklüğü ile oluşturulan ağ yapısı

Oluşturulan sonlu eleman modeli analiz edildiğinde burkulma yükü 234.870 N olarak bulunmuştur.

5.2.5. Eleman büyüklüğü seçimi

100 mm, 50 mm, 40 mm ve 30 mm eleman büyüklükleri ile mesh yapısı oluşturulan modeller üzerinde yapılan burkulma analizleri sonuçları karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.2’de verilmektedir.

Çizelge 5.2. Sonlu eleman büyüklüğü ve burkulma yükündeki değişim

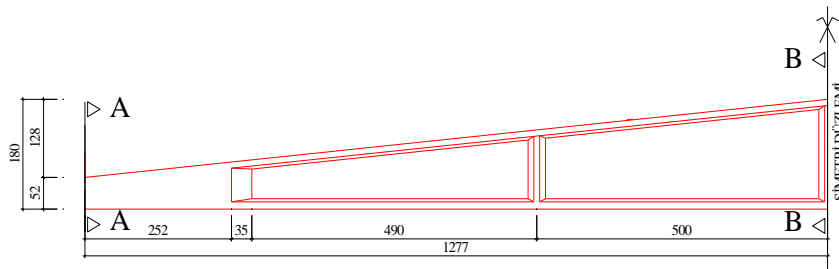
| Eleman büyüklüğü (mm) | Burkulma yükü (N) |
|--------------------------|----------------------|
| 100 | 244.730 |
| 50 | 238.040 |
| 40 | 235.840 |
| 30 | 234.870 |

Buna göre 50 mm’lik eleman büyüklüğü bizim için yeter doğrulukta sonuç verecektir. Analizler 50 mm eleman büyüklüğü için yapılacaktır.

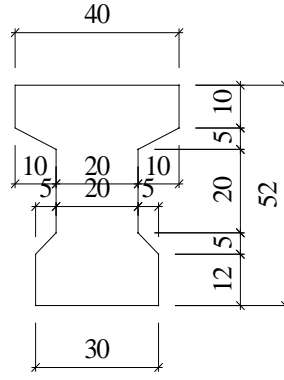
5.3. Üst Başlık Genişliğinin Burkulma Yüküne Etkisi

Büyük açıklıklı prefabrik betonarme sanayi yapılarında kullanılan değişken yükseklikli I-kesitli çatı kirişi elemanlarında üst başlık burkulması ANSYS sonlu elemanlar programı ile analitik yöntemlerle incelenmiştir. Prefabrik çatı kirişi elemanında farklı başlık genişliklerinin düşey yükler altında kirişin burkulma yüküne etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Aynı açıklıkta 4 farklı kiriş üst başlık genişliği için düşey yükler altında burkulmaya sebep olan aşık yükleri bulunmuştur.

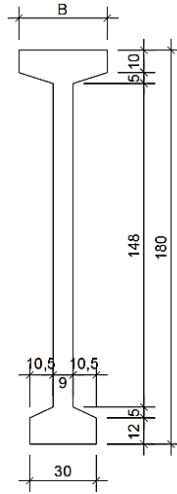
Çalışma kapsamında 25,44 m boyunda çatı kirişi modellenmiştir. Mesnet kiriş ucundan 10 cm uzaklıkta çizgi eleman olarak modellenmiştir. Bu durumda kiriş serbest açıklığı 25,24 m olacaktır. Yapılan analizlerde çatı kirişi geometri, mesnet şartları ve uygulanan dış yüklerde simetri olması sebebi ile yarım model kullanılmıştır. Simetri kesim düzlemine simetri sınır koşulları uygulanmış olup modellenen çatı kirişine ait geometrik özellikler Şekil 5.39, Şekil 5.40 ve Şekil 5.41 ile verilmiştir.



Şekil 5.39. Modellenen prefabrik çatı kirişine ait ölçüler



Şekil 5.40. Çatı kirişi A-A kesiti (mesnet kesiti)



Şekil 5.41. Çatı Kirişi B-B Kesiti (Açıklık Ortası Kesiti)

Üst başlık genişliğinin muhtemel burkulma yüklerine etkilerinin ortaya konması için 4 adet analiz yapılmıştır. Analizlerde kullanılan modeller Şekil 5.39 ile ölçüleri verilen kirişe ait Şekil 5.40 ve Şekil 5.41 kesitlerinde “B” ölçüsü ile gösterilen üst başlık genişliği değiştirilerek oluşturulmuştur. Çizelge 5.3’de analiz numarası ve modellemede kullanılan makas üst başlık genişlikleri verilmektedir.

Çizelge 5.3. Analizlerde kullanılan üst başlık genişlikleri

| Analiz No | L_n (mm) | B (mm) | L_n/B |
|-----------|------------|----------|---------|
| 1 | 25.240 | 350 | 72,11 |
| 2 | 25.240 | 400 | 63,10 |
| 3 | 25.240 | 508 | 49,68 |
| 4 | 25.240 | 634 | 39,80 |

Yapılan analizlerde çatı kirişinin ağırlığı beton malzemesine ait birim kütle tanımlanarak ve analiz modelinde ivme ($g = 9806,6 \text{ mm/s}^2$) tanımlanarak etki ettirilmiştir.

Bu durum burkulma yükünün bulunması için birden fazla analiz yapılmasını gerektirmektedir. ANSYS programı ile yapılan burkulma analizi ile hesaplanan sonuçlar, statik analizde uygulanan tüm yükleri ölçekleyen burkulma yük faktörleridir. Bu çalışma kapsamında burkulma analizi yapılacak modellere önce belirlenen mesnet şartları ve dış yükler için statik analiz yapılmıştır. Yapılan statik analiz için burkulma analizleri yapılarak burkulma yük faktörleri bulunmuştur. ANSYS tarafından hesaplanan burkulma yük faktörü, statik analizde kullanılan tüm yüklere uygulanmaktadır. Yapılan analizlerde hem sabit yükler (yerçekimi yükleri) hem de değişken yükler (Kar yükü, kaplama yükü ve aşık ağırlığı) bulunması sebebiyle doğru sonuçların elde edilmesi için aynı model üzerinde birden fazla analiz yapılmıştır. Burkulma yükü belirlenirken sabit olan yükler ile beraber değişken yüklerin de uygulandığı ilk analiz sonucu belirlenen burkulma yük faktörü kullanılarak aşık yükleri değiştirilmiştir. Burkulma analizlerinin sonucu burkulma yük faktörü 1,01 değerinden az olana kadar aşık yükleri değiştirilmiş ve analizler tekrarlanmıştır. Ayrıca çatı panellerinin makas üst başlık burkulmasına olumlu katkısı dikkate alınmamıştır.

Çalışma kapsamında etriye ve boy donatılarının burkulma yüküne etkisi ayrıca incelenmiştir. Çatı kirişi içerisinde bulunan etriye donatılarının burkulma yüküne etkisinin %0,5 'den az olduğu görülmüştür. Çatı kirişlerinde üst başlık içerisinde montaj donatısı olarak kullanılan boy donatıları pirsantajının az olması sebebi ile burkulma yüküne de etkisi az olmaktadır. Kiriş üst başlığında bulunan ve montaj amacıyla kullanılan boy donatılarının burkulma yüküne etkisinin %1'den az olduğu görülmüştür. Çatı kirişinde bulunan etriye ve boy donatılarının kiriş burkulma yüküne etkisinin az olması ve sadece üst başlık genişliğinin etkisinin belirlenebilmesi amacıyla etriye ve boy donatı analizlerde modellenmemiştir.

Üst başlık burkulması hesabında kabul edilen aşık özellikleri ve aşık yükleri aşağıda verilmektedir.

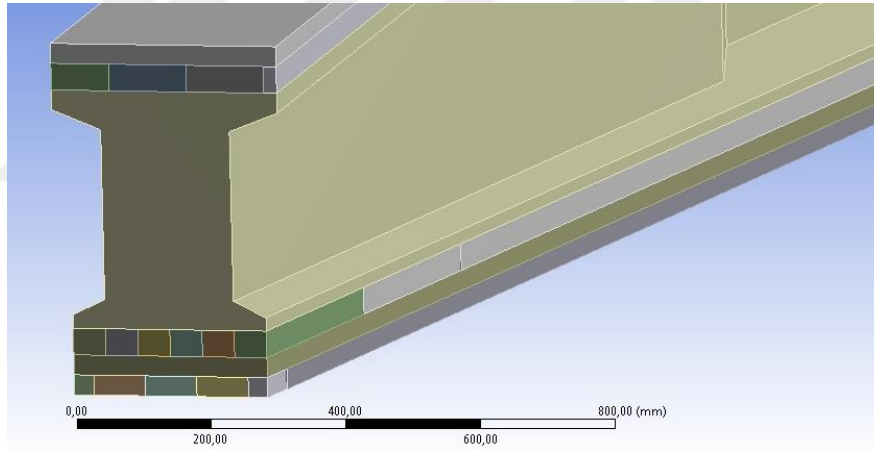
| | |
|---------------|--------------------------|
| Aşık Uzunluğu | : 7,5 m |
| Aşık Ağırlığı | : 7.000 N |
| Aşık Aralığı | : 1,60 m |
| Kaplama Yükü | : 100 N/m ² |
| Asılı Yük | : 100 N/m ² |
| Kar Yükü | : 1.000 N/m ² |

Hesaplanan burkulma yüklerinin gerçek yüklerle karşılaştırılabilmesi için seçilen aşık aralığı ve aşık boyu için düşey yükler hesaplanmıştır. Aşık boyu 7,5 m. ve aşık aralığı

1,8 m. seçilmiş olup seçilen aşık boyu ve aşık aralığı için 1 aşığa gelen yüklerin hesaplanacağı yük alanı $7,5*1,6 = 12,00 \text{ m}^2$ 'dir. Aşık öz ağırlığı 7.000 N, çatı kaplaması 100 N/m^2 ve kar yükü 1000 N/ m^2 seçildiğinde depremsiz durum için çatı makasına aşık yükü olarak (yük katsayıları kullanılmadan) 21,400 N hesaplanmıştır. TS500 ile yanal ötelemesi önlenmemiş kolonlar için tasarım basınç yükü ile kritik burkulma yükü arasında verilen bağıntı ($N_d < 0.45N_k$) kullanılarak depremsiz durumda kiriş üst başlık genişliğinin seçilen yükleme durumu için karşılaştırması yapılmıştır.

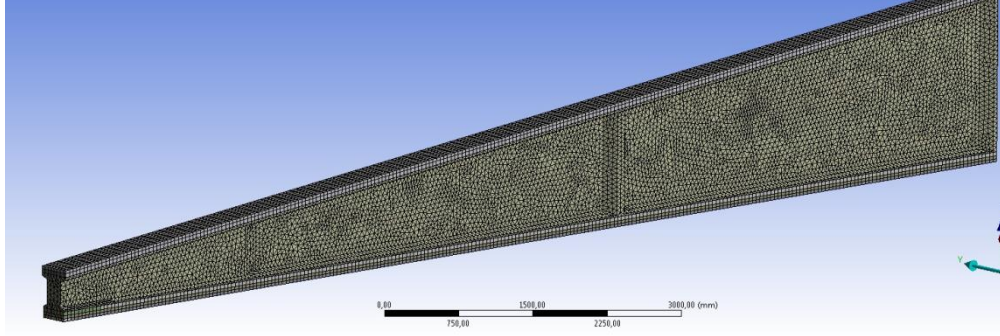
5.3.1. B=350 mm üst başlık genişliği için burkulma yükünün hesabı

1 nolu analizde kiriş üst başlık genişliği (B) 350 mm ($L_n/B = 72,11$) olan model için burkulma analizi yapılmıştır. Bir sonraki bölümde burkulma analizi için hazırlanan 3 boyutlu katı modelin öngerme ve normal donatı eklenerek oluşturulan model ile karşılaştırması yapılacağından birden fazla hacim elemanı olan katı model kullanılmıştır. Hazırlanan 3 boyutlu katı modele ait görüntü Şekil 5.42'de verilmektedir.



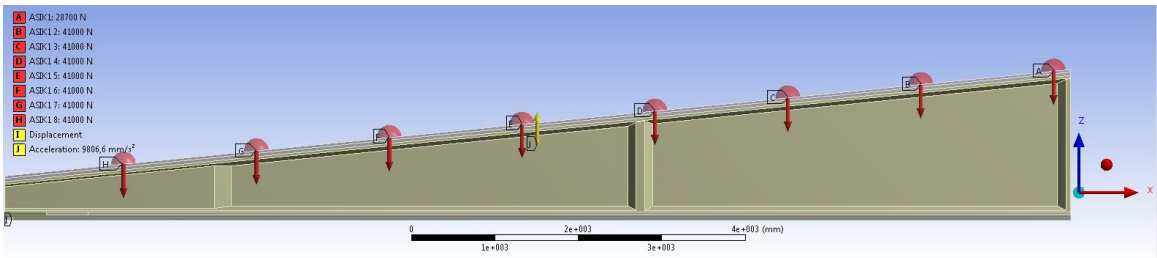
Şekil 5.42. 350 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesnet bölgesi katı görüntüsü

Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde en büyük eleman kenar uzunluğu 50 mm olarak seçilmiştir. Model 231.624 adet düğüm noktası ve 124.590 adet elemandan oluşmaktadır. Model mesh yapısı Şekil 5.43'de verilmektedir.



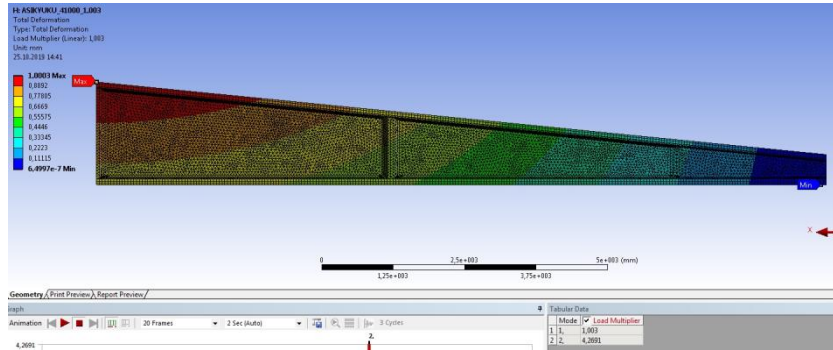
Şekil 5.43. 350 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesh görüntüsü

Kiriş ortasında bulunan aşık kirişi için 28.700 N diğer aşık kirişleri için 41.000 N tekil yük uygulanmıştır. Yükler ve mesnet koşulları Şekil 5.44’de gösterilmektedir.



Şekil 5.44. 350 mm üst başlık genişlikli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları

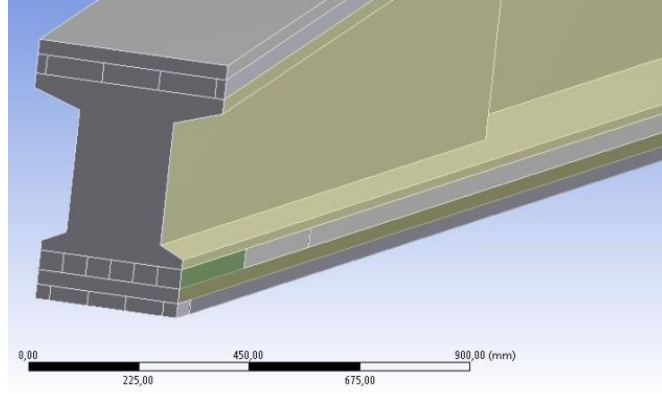
Uygulanan aşık yükleri için burkulma faktörü Şekil 5.45’de gösterildiği gibi 1.003 olarak bulunmuştur. Yapılan analiz sonucu seçilen çatı makası için muhtemel burkulma yükü 41.000 N olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.45. 350 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait burkulma yük faktörü

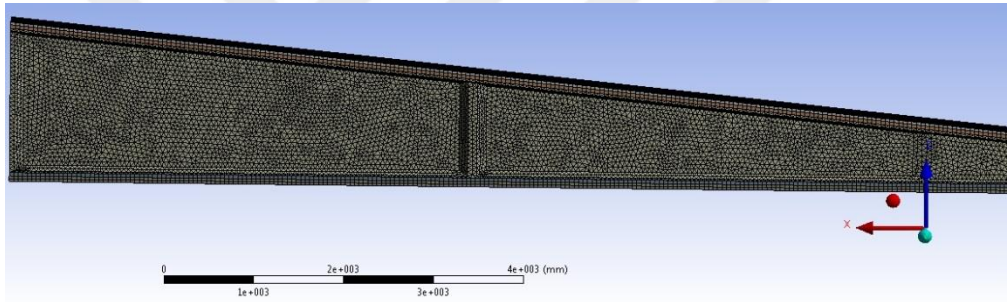
5.3.2. B=400 mm üst başlık genişliği için burkulma yükünün hesabı

2 nolu analizde kiriş üst tabla genişliği (B) 400 mm ($L_n/B=63,10$) olan model için burkulma analizi yapılmıştır. Hazırlanan 3 boyutlu katı modele ait görüntü Şekil 5.46’da verilmektedir.



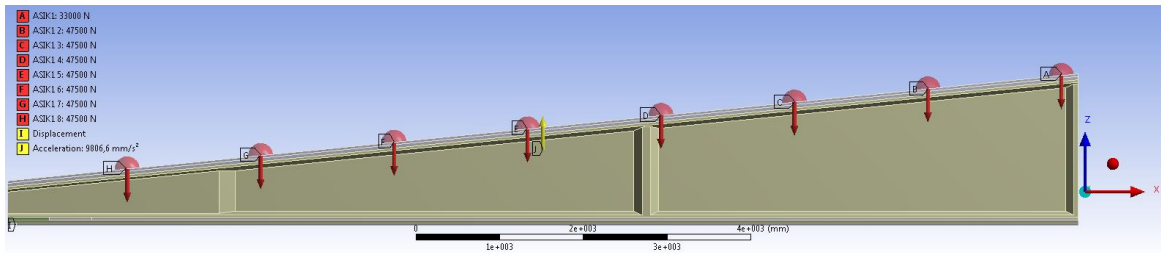
Şekil 5.46. 400 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesnet bölgesi katı görüntüsü

Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde en büyük eleman kenar uzunluğu 50 mm olarak seçilmiştir. Model 239.963 adet düğüm noktası ve 128.311 adet elemandan oluşmaktadır. Model mesh yapısı Şekil 5.47’de verilmektedir.



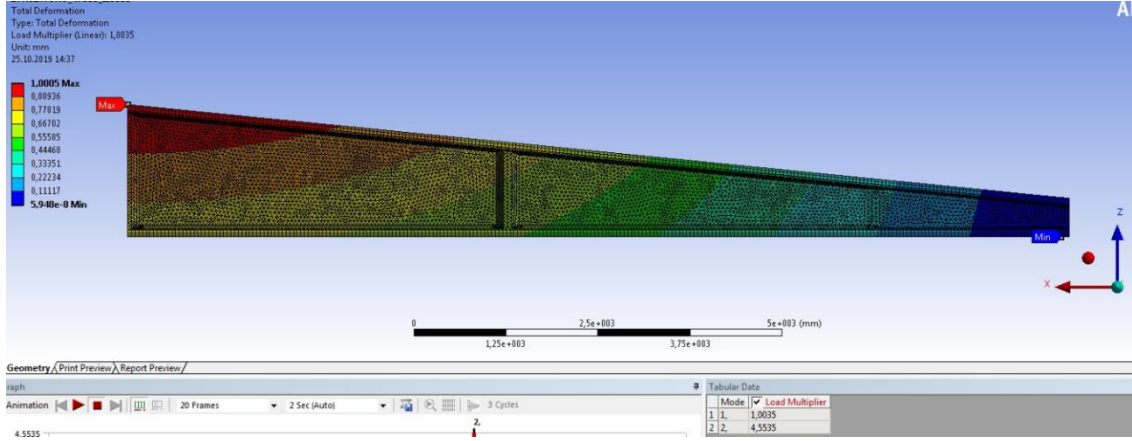
Şekil 5.47. 400 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesh görüntüsü

Kiriş ortasında bulunan aşık kirişi için 33.000 N diğer aşık kirişleri için 47.500 N tekil yük uygulandı. Uygulanan yükler ve mesnet koşulları Şekil 5.48’de verilmektedir.



Şekil 5.48. 400 mm üst başlık genişlikli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları

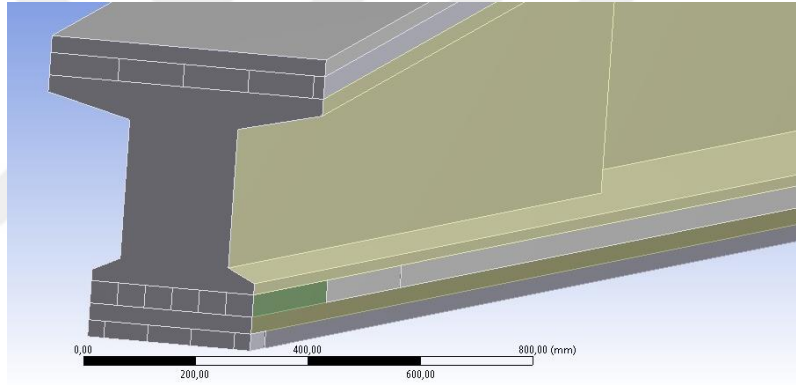
Uygulanan aşık yükleri için burkulma faktörü Şekil 5.49’da gösterildiği gibi 1.0035 olarak bulunmuştur. Yapılan analiz sonucu seçilen çatı makası için muhtemel burkulma yükü 47.500 N olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.49 400 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait burkulma yük faktörü

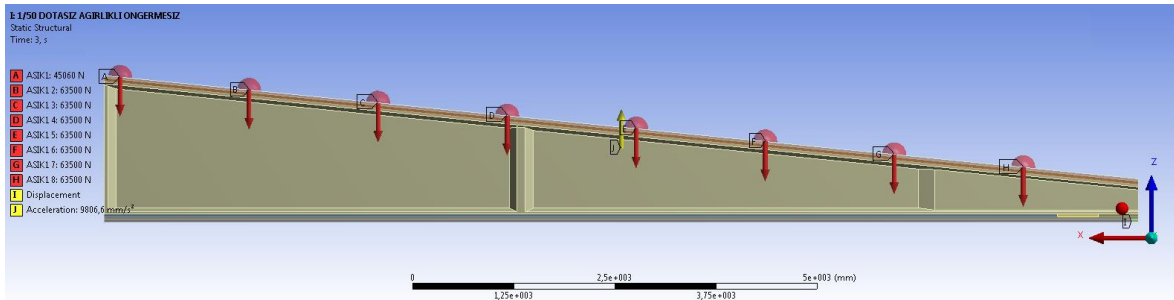
5.3.3. B=508 mm üst başlık genişliği için burkulma yükünün hesabı

3 nolu analizde kiriş üst tabla genişliği (B) 508 mm ($L_n/B=49,68$) olan model için burkulma analizi yapılmıştır. Hazırlanan 3 boyutlu katı modele ait görüntü Şekil 5.50’de verilmektedir.



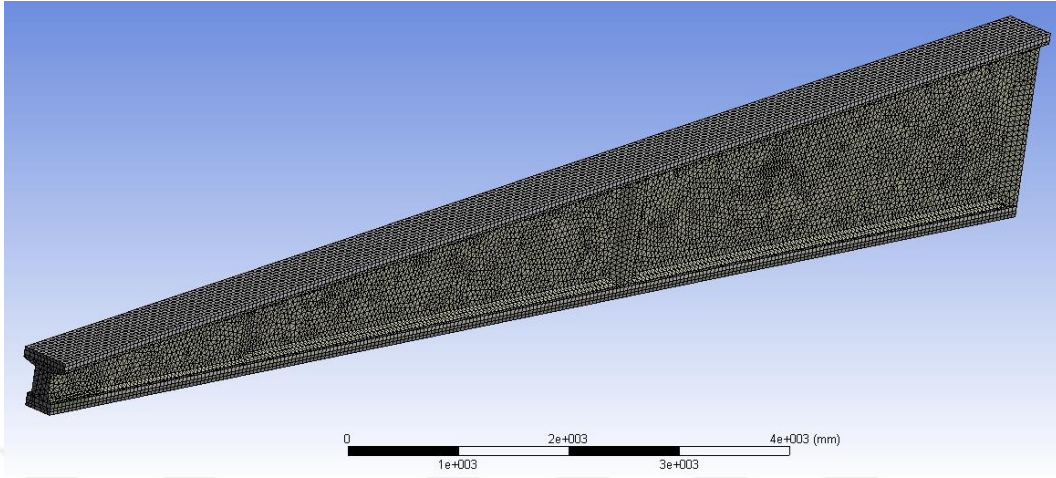
Şekil 5.50 508 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesnet bölgesi katı görüntüsü

Kiriş ortasında bulunan prefabrik aşık kirişi için 45.060 N diğer aşık kirişleri için 63.500 N tekil yük uygulanmıştır. Uygulanan yükler ve mesnet koşulları Şekil 5.51’de verilmektedir.



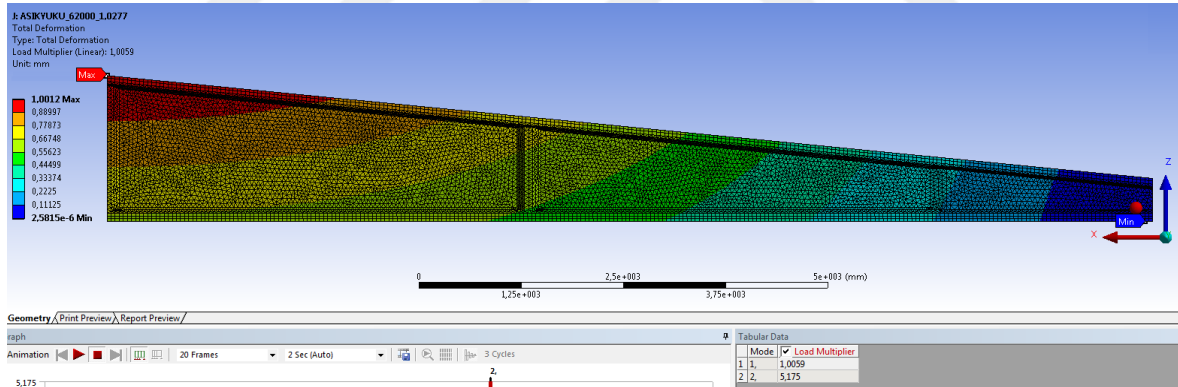
Şekil 5.51. 508 mm üst başlık genişlikli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları

Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde en büyük eleman kenar uzunluğu 50 mm olarak seçilmiştir. Model 252.503 adet düğüm noktası ve 134.101 adet elemandan oluşmaktadır. Model mesh yapısı Şekil 5.52’de verilmektedir.



Şekil 5.52 508 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesh görüntüsü

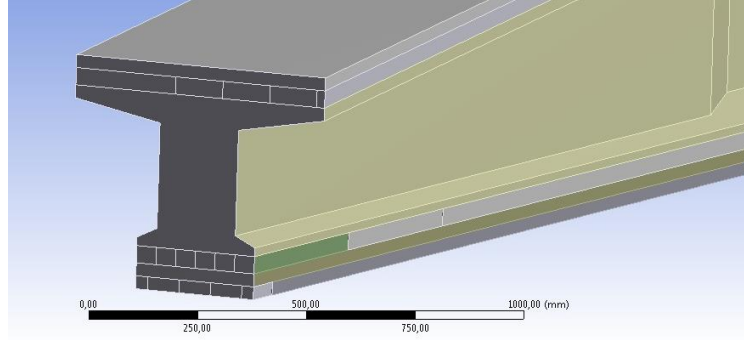
Uygulanan aşık yükleri için burkulma faktörü Şekil 5.53’te gösterildiği gibi 1.0059 olarak bulunmuştur. Yapılan analiz sonucu seçilen çatı makası için muhtemel burkulma yükü 63.500 N olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.53 508 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait burkulma yük faktörü

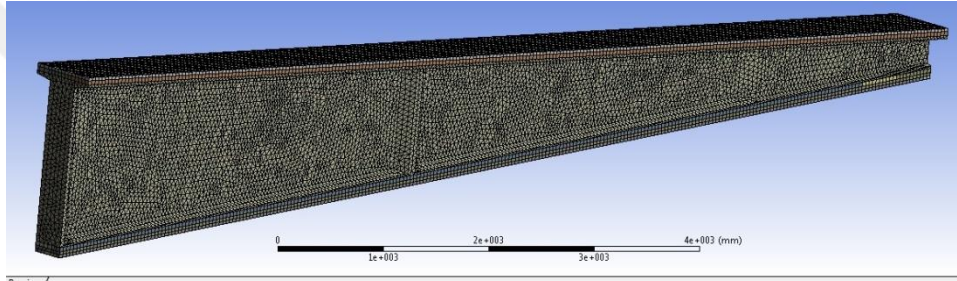
5.3.4. B=634 mm üst başlık genişliği için burkulma yükünün hesabı

4 nolu analizde kiriş üst tabla genişliği (B) 634 mm ($L_n/B = 39,80$) olan model için burkulma analizi yapılmıştır. Hazırlanan 3 boyutlu katı modele ait görüntü Şekil 5.54’de verilmektedir.



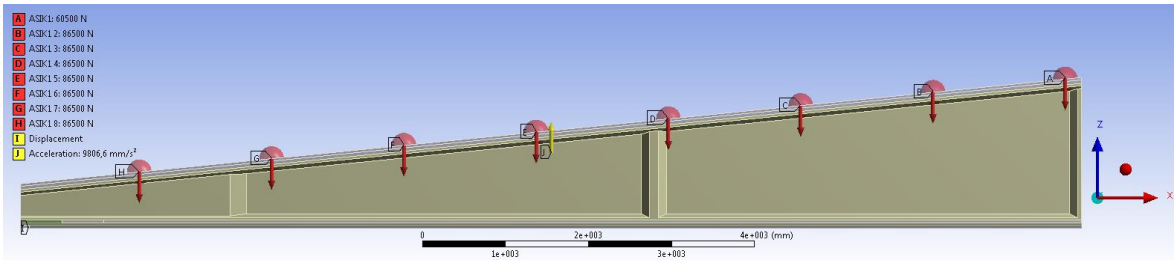
Şekil 5.54 634 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesnet bölgesi katı görüntüsü

Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde en büyük eleman kenar uzunluğu 50 mm olarak seçilmiştir. Model 273.104 adet düğüm noktası ve 143.432 adet elemandan oluşmaktadır. Model mesh yapısı Şekil 5.55’de verilmektedir.



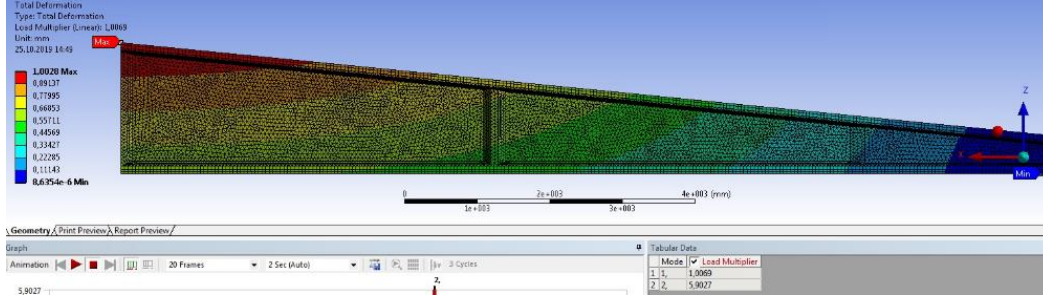
Şekil 5.55 634 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait mesh görüntüsü

Kiriş ortasında bulunan prefabrik aşık kirişi için 60.500 N diğer aşık kirişleri için 86.500 N tekil yük uygulanmıştır. Uygulanan yükler ve mesnet koşulları Şekil 5.56’da verilmektedir.



Şekil 5.56. 634 mm üst başlık genişlikli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları

Uygulanan aşık yükleri için burkulma faktörü Şekil 5.57’de gösterildiği gibi 1.0069 olarak bulunmuştur. Yapılan analiz sonucu seçilen çatı makası için muhtemel burkulma yükü 86.500 N olarak hesaplanmıştır.



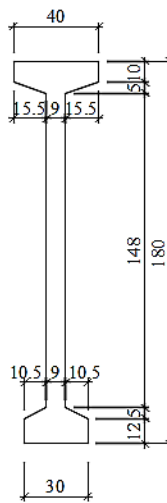
Şekil 5.57 634 mm üst başlık genişliği olan kirişe ait burkulma yük faktörü

5.4. Betonarme Kirişlerde Öngerilme Kuvvetinin ve Normal Donatının Doğrusal Yanal Burkulma Yüküne Etkisi

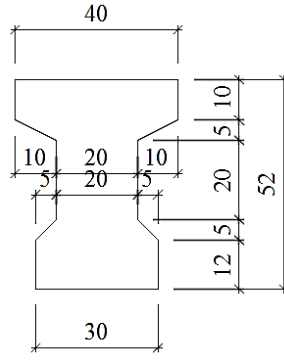
Bölüm 5.3.2’de üst başlık genişliği 400 mm olan çatı kirişi modeli ile doğrusal burkulma yükü boy donatı ve öngerilme kuvveti olmadan burkulmaya neden olacak kritik aşık yükü 47.500 N olarak hesaplanmıştı. Hazırlanan ANSYS modeline alt donatı ve öngerilme kuvveti eklenerek öngerilme kuvvetinin ve normal donatının burkulma yüküne etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Üst başlık burkulma hesabı yapılacak makas kirişi mesnette 52 cm yükseklikte ve açıklık ortasında 180 cm olacak şekilde kesitleri Şekil 5.58 ve Şekil 5.59 ile verilmektedir. Modellenen makas kirişi üst başlık genişliği 40 cm’dir. Net kiriş açıklığının üst başlık genişliğine oranı 63,1 olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{L_n}{B} = \frac{25,24}{40} = 63,1 \quad (5.1)$$

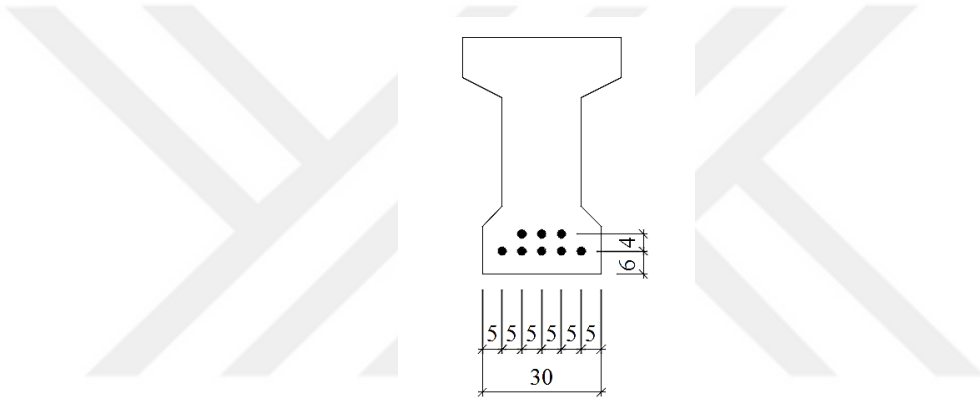


Şekil 5.58. Öngermeli kiriş açıklık ortasında en kesit ve ölçüleri



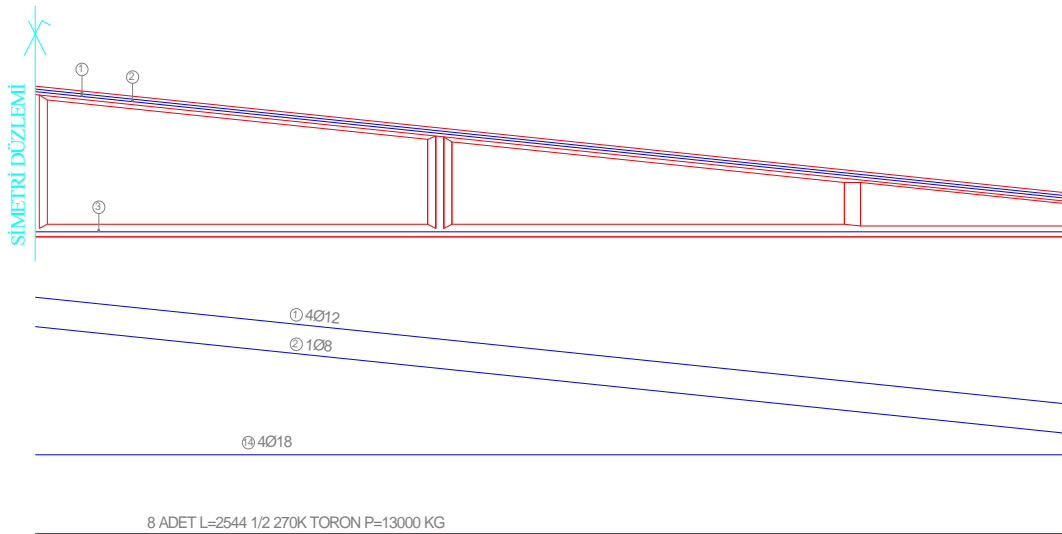
Şekil 5.59. Öngermeli kiriş mesnette kesit ölçüleri

Analizlerde kullanılan çatı makası elemanı uygulamada 2 sıra halinde alt sırada 5 adet, 2'nci Sırada 3 adet olmak üzere toplam 8 adet 0,5 inç çapında öngermme halatı kullanılmaktadır. Modele ait öngermme şablonu Şekil 5.60'da verilmektedir.

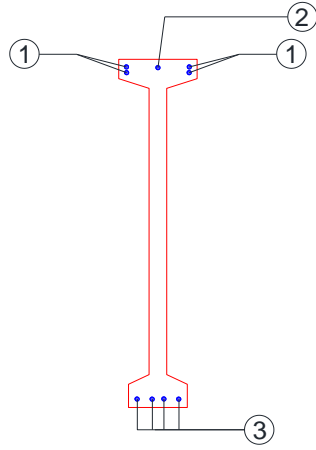


Şekil 5.60. Öngermeli kirişte öngermme şablonu, mesnette en kesit ve ölçüleri

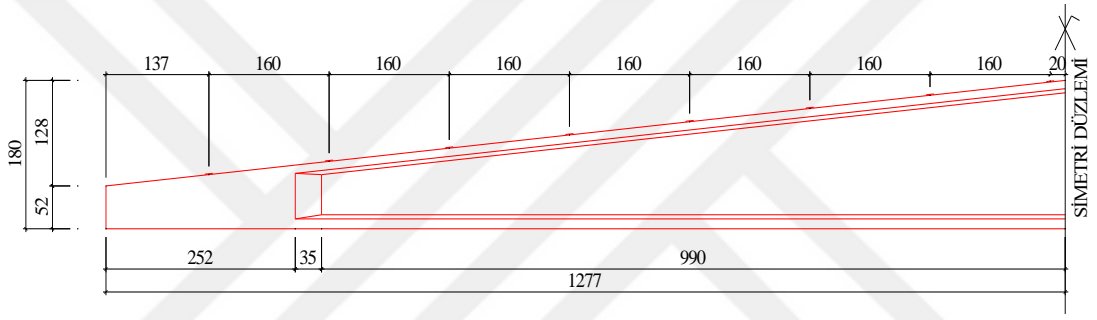
Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde alt boy donatıları, üst montaj donatıları, öngermme donatısı modellenmiştir. Modellenen donatıların adet ve çapları Şekil 5.61 ve Şekil 5.62'de verilmektedir.



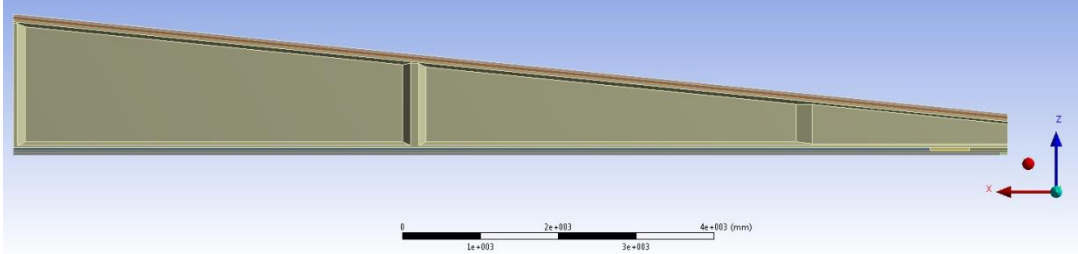
Şekil 5.61. Öngermeli kirişte boy donatıları



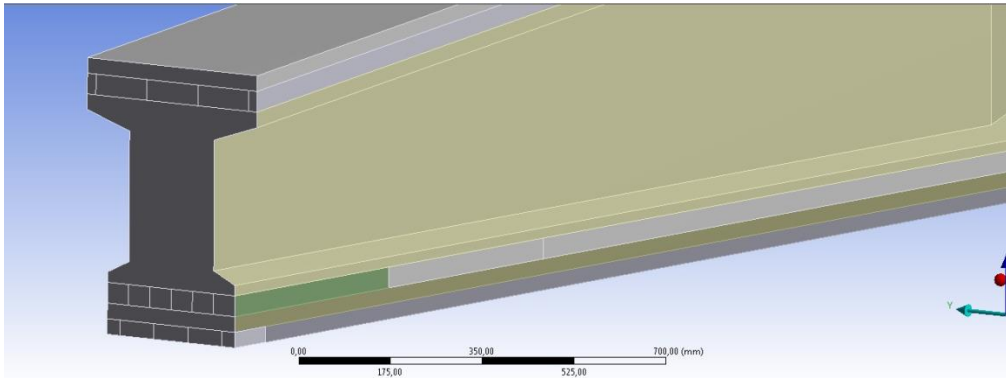
Şekil 5.62. Öngermeli kiriş normal donatı yerleşimi



Şekil 5.63. Öngermeli kiriş ölçüleri

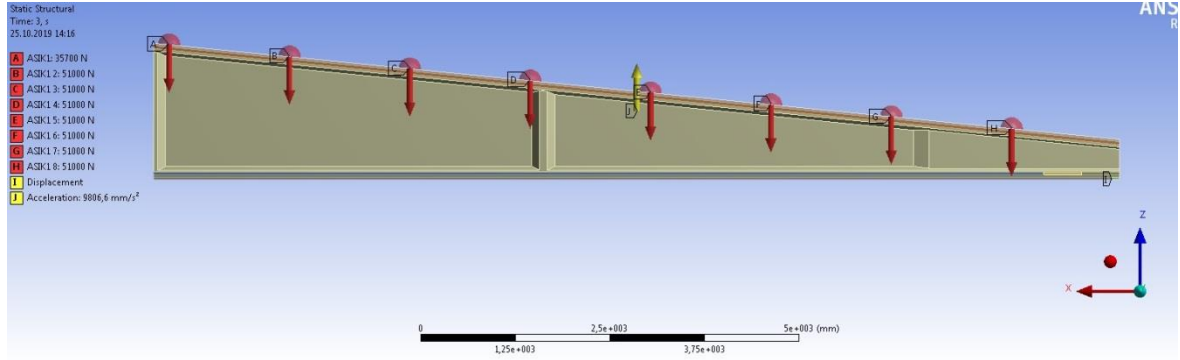


Şekil 5.64. Öngermeli kiriş katı modeli



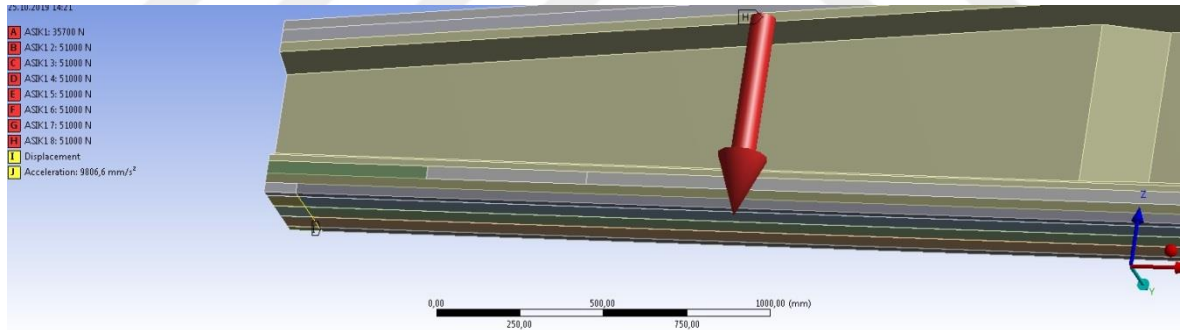
Şekil 5.65. Öngermeli kiriş model bölmeleri

Burkulma analizi öncesi hazırlanan statik model ve uygulanan dış yükler Şekil 5.66 ile verilmektedir. Kiriş ortasında 2 adet aşık bulunması sebebi ile kiriş ortasındaki herbir aşık elemanına çatı kaplamasından diğer aşıkların yarısı kadar yük gelecektir. Bu sebeple ortadaki aşık diğer aşıklara oranla daha az yük etki ettirilmiştir.



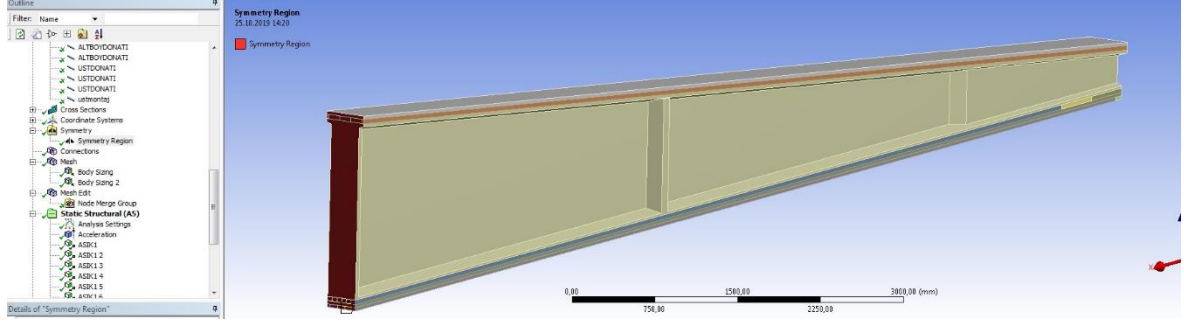
Şekil 5.66. Öngermeli kirişe uygulanan yükler ve mesnet koşulları

Çatı kirişinde mesnetler kiriş ucundan 100 mm mesafede tanımlanmıştır. Uygulamada çatı kirişi prefabrik kolonlarda bulunan guse üzerine oturmaktadır. Analizler için çatı kirişinin kolon gusesine oturduğunu alanın ortası seçilerek mesnet tanımlaması yapılabilir. Analiz modelinde tanımlanan mesnet Şekil 5.67’de gösterilmektedir.



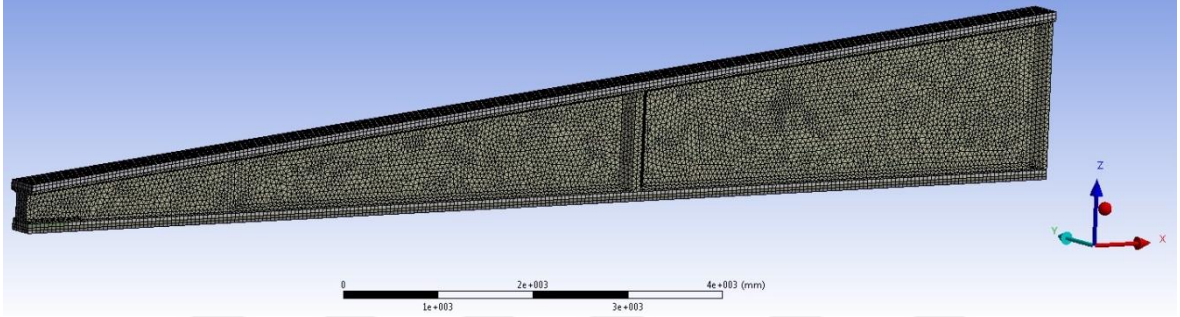
Şekil 5.67. Öngermeli kiriş ucundan 10 cm uzaklıktaki mesnet yeri

Çatı kirişi elemanında geometrik ve yüklemde tam simetri olması sebebi ile yarım model kullanılmıştır. Simetri ANSYS programında bulunan “Symmetry Region” komutu kullanılarak tanımlanmıştır. Tanımlanan simetri koşulu Şekil 5.68’de gösterilmektedir.



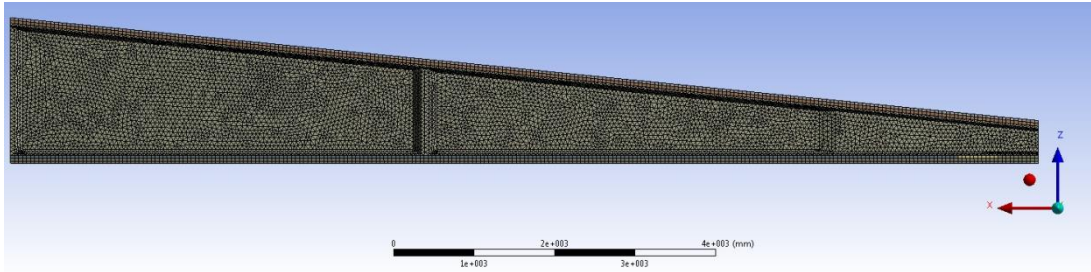
Şekil 5.68. Öngermeli kiriş simetri sınır koşulu uygulanan kesit görüntüsü

Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde en büyük eleman kenar uzunluğu 50 mm olarak seçilmiştir. Model 244.577 adet düğüm noktası ve 132.925 adet elemandan oluşmaktadır. Model mesh yapısı Şekil 5.69’da verilmektedir.



Şekil 5.69. Öngermeli kiriş mesh yapısı perspektif görüntüsü

Kiriş alt başlığı ve üst başlığında normal donatı ve öngerilme halatlarının bulunduğu düzlemlerden kesilen beton hacimde alt başlık ve üst başlıklar quadrilateral (dörtgen) mesh uygulanmıştır. Beton gövde sonlu elemanlar modelinde 239.963 adet düğüm noktası ve 128.311 adet elemandan oluşmaktadır. Model mesh yapısı yan görüntüsü Şekil 5.70.’te verilmektedir.



Şekil 5.70. Öngermeli kiriş mesh yapısı yan görüntüsü

Öngerme halatlarının herbiri 3 parçaya bölünerek farklı öngerme yükleri uygulanmıştır. Aktarmaya boyunun modelle dahil edilmesi amacıyla halatların kiriş ucundan ilk 50 cm boyunca öngerme yükü uygulanmamıştır. Kiriş ucundan 50 cm ile 100

cm arasında öngerme gerilmesinin yarısı olan 550 MPa halatlara öngerme başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır. Öngerilme uygulama amacıyla kullanılan komutlar aşağıda verilmektedir.

```
inistate,SET,mat,matid
```

```
inistate,dtyp,stre
```

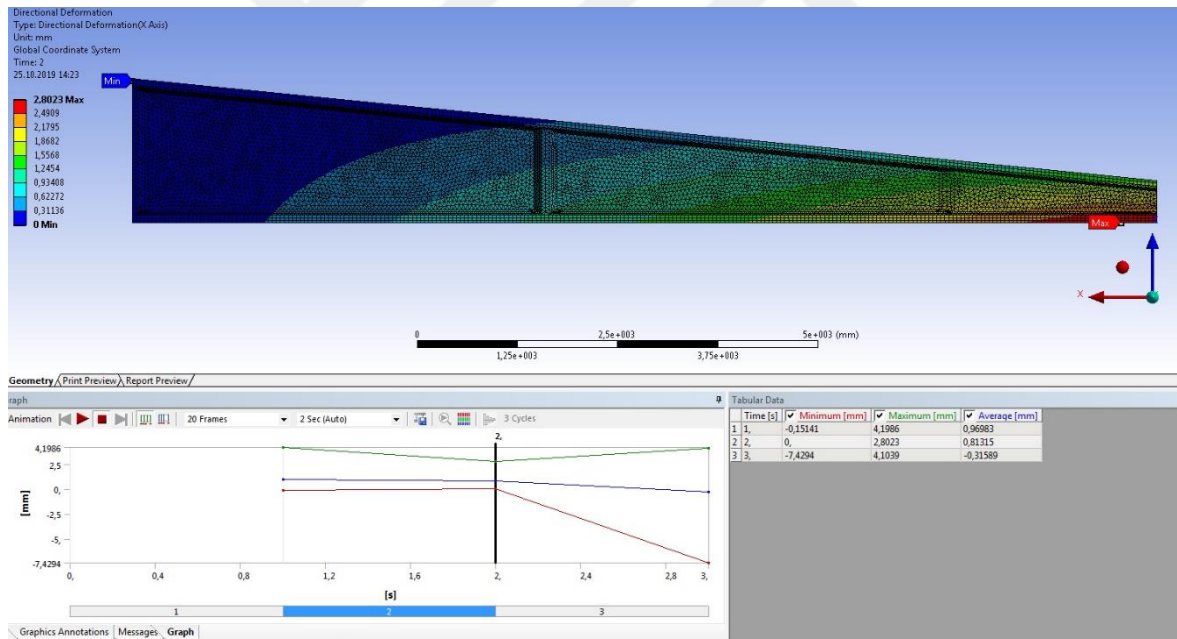
```
inistate,defi,,,,,550
```

Kiriş ucundan 100 cm ile simetri düzlemine kadar öngerilme yükünün tamamı olan 1100 MPa halatlara öngerme başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır. Öngerilme uygulama amacıyla kullanılan komutlar aşağıda verilmektedir.

```
inistate,SET,mat,matid
```

```
inistate,dtyp,stre
```

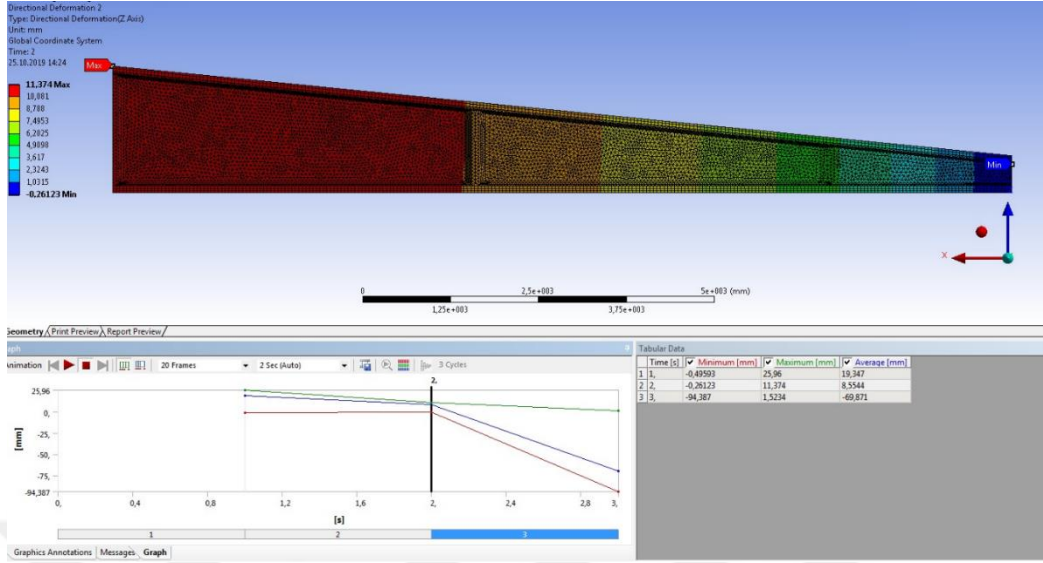
```
inistate,defi,,,,,1100
```



Şekil 5.71. Öngerme ve kiriş ağırlığı uygulandıktan sonra kiriş X yönü deplasmanları

Uygulanan öngerilme kuvveti kiriş ağırlığı olmadan çatı kirişinin Şekil 4.71’de gösterildiği gibi mesnetlerde X ekseninde 4,2 mm ve açıklık ortasında ise Şekil 5.72’de gösterildiği gibi düşey doğrultuda yukarı doğru 25,96 mm deplasman yapmasına neden olacaktır. Öngerilme kuvvetinin etkisi ile kiriş ağırlığıda analize dahil edildiğinde çatı kirişinin açıklık ortasında düşey doğrultuda yukarı doğru 11,4 mm deplasman yapacağı hesaplanmıştır. Tüm yüklerin analize dahil edilmesi ile çatı kirişinin açıklık ortasında

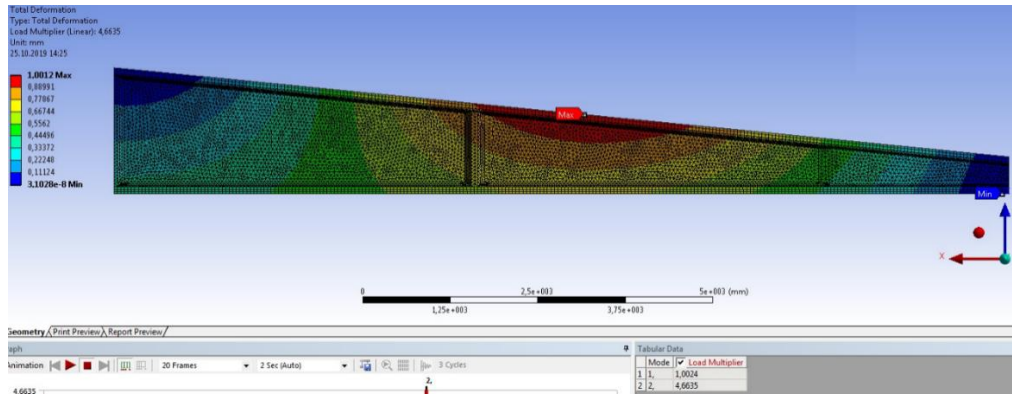
düşey doğrultuda aşağı doğru 94,4 mm deplasman yapmaktadır.



Şekil 5.72. Öngerme ve kiriş ağırlığı uygulandıktan sonra kiriş Z yönü (düşey)

Statik analiz ve burkulma analizi sonuçları aşağıda verilmektedir. Burkulma analizi sonucu bulunan burkulma yük faktörü Şekil 5.73'te gösterildiği gibi 1,0024 olarak bulunmuştur. Kiriş net açıklığı 25.240 mm'dir. TS500 Çizelge 13.3 sehim sınırları tablosunda bölme duvarsız çatı elemanları için verilen $L_n/180$ sınırına uygun olmasına rağmen burkulma sebebi ile hasar görecektir.

$$94,4 = \frac{L_n}{264,8} \quad (5.2)$$



Şekil 5.73. Burkulma analizi sonucu burkulma yük faktörü

Modellenen çatı kirişi elemanında açıklık ortasında kiriş en kesit alanı 231.200 mm^2 ve ağırlık merkezinden geçen yatay eksen etrafında atalet momenti $91,56 \times 10^9 \text{ mm}^4$ ve mukavemet momenti $10,1 \times 10^7 \text{ mm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Çatı kirişinde her birinde 110.000 N öngerme kuvveti bulunan 8 adet öngerme halatı bulunmaktadır. Öngerme

halatları tarafından kirişe uygulanan toplam kuvvet 880.000 N olarak hesaplanmaktadır. Halatların ağırlık merkezi ile kiriş ağırlık merkezi arasındaki uzaklık 793,6 mm olarak hesaplanmıştır. Kiriş kendi ağırlığından dolayı üst başlıkta 4,07 Mpa ($\sigma_{güst}$) basınç gerilmesi, alt başlıkta 3,90 MPa (σ_{galt}) çekme gerilmesi oluşmaktadır. Çatı kirişinde, öngörme ve kiriş ağırlığından kaynaklanan net gerilme üst başlıkta Denklem 5.1 ve alt başlıkta Denklem 5.2'ye göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{üst} = \sigma_{güst} + \sigma_{Püst} = \sigma_{güst} + \frac{F_p}{A} + \frac{F_p \times d_p}{W} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{üst} = 4,07 + \frac{880.000}{231.200} - \frac{880.000 \times 793,6}{1,01 \times 10^9} = 0,96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{alt} = \sigma_{galt} + \sigma_{Palt} = \sigma_{galt} + \frac{F_p}{A} - \frac{F_p \times d_p}{W} \quad (5.4)$$

$$\sigma_{alt} = -3,90 + \frac{880.000}{231.200} + \frac{880.000 \times 793,6}{1,01 \times 10^9} = 6,82 \text{ MPa}$$

6. SAP2000 PROGRAMIYLA YAPILAN ANALİZLER

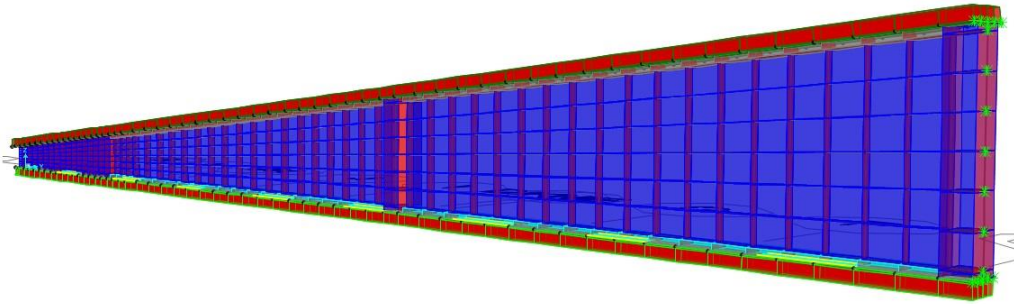
Doğrusal burkulma analizindeki sapmalar, kuvvetler ve reaksiyonlar bir yapının normalleştirilmiş burkulma şekline karşılık geldiğinden, gerçek yer değiştirmeleri, kuvvetleri ve reaksiyonları elde etmek için Doğrusal Olmayan burkulma analizi yapılmalıdır (<https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Eigenvalue+vs.+Nonlinear+buckling+analysis>).

ANSYS programı ile doğrusal olmayan burkulma analizi yapılmak istendiğinde beton ve donatı malzemelerinin doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin tam olarak tanımlanmasında zorluklar yaşanmaktadır. Gerilme-genleme deney sonuçları ile malzemenin doğrusal olmayan davranışının modellenmesi durumunda beton ve donatı için en yüksek gerilme değerine ulaşması sonrası dayanımda meydana gelen azalmalar tanımlanamamaktadır. Örnek olarak; donatıda 0,09 genleme değerinde 500 MPa gerilme meydana gelirken 0,108 genleme değerinde 122 MPa gerilme değeri oluşmaktadır. Genleme değeri artarken gerilmenin düşmesi durumu ANSYS programı ile analize dahil edilememesi sebebi ile çatı kirişine ait üst başlıktaki doğrusal olmaya burkulma analizi SAP2000 programı ile yapılmıştır. SAP2000 programı ile beton ve donatı malzemeleri için doğrusal olmayan gerçek gerilme-genleme değerleri tanımlanabilmektedir.

6.1. SAP2000 Programıyla Yapılan Öngerilmesiz Kirişte Doğrusal Burkulma Analizi

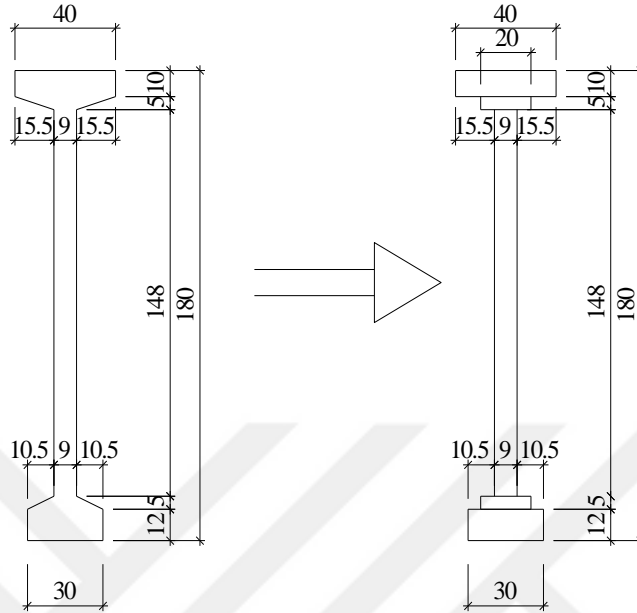
Malzemenin doğrusal olmayan davranışının analiz sırasında program tarafından kullanılabilmesi için çatı makası elemanının tamamen shell elemanlar ile modellenmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı çatı kirişi elemanı tamamen “Shell” ile modellenmiştir.

SAP2000 programı ile shell elemanlar kullanılarak hazırlanan modelin doğrulanması gerekmektedir. Doğrulama amacıyla SAP2000 programı ile hazırlanan model ile doğrusal burkulma analizi yapılarak ANSYS programı ile yapılan doğrusal burkulma analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan modelin 3 boyutlu görüntüsü Şekil 6.1’de gösterilmektedir.



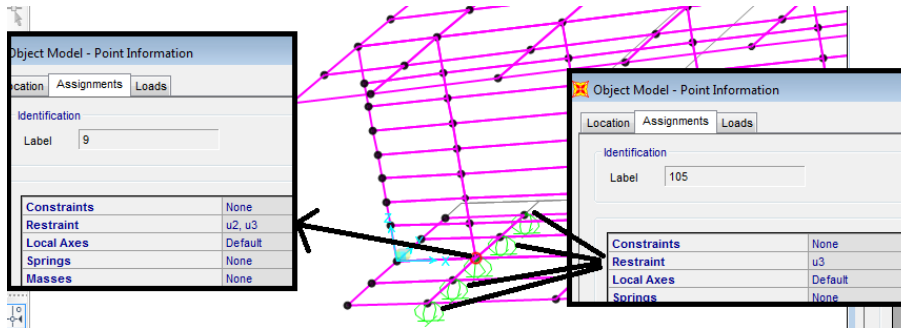
Şekil 6.1. Betonarme kiriş SAP2000 modeli perspektif görüntüsü

Alt başlık ve üst başlık geçiş bölgesi eğimli olması sebebi ile eşdeğer Shell eleman ile modellenmiştir. SAP2000’de modellenen eşdeğer kesit Şekil 6.2’de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Alt başlık ve üst başlık geçiş bölgesinin SAP2000’de modellenmesi

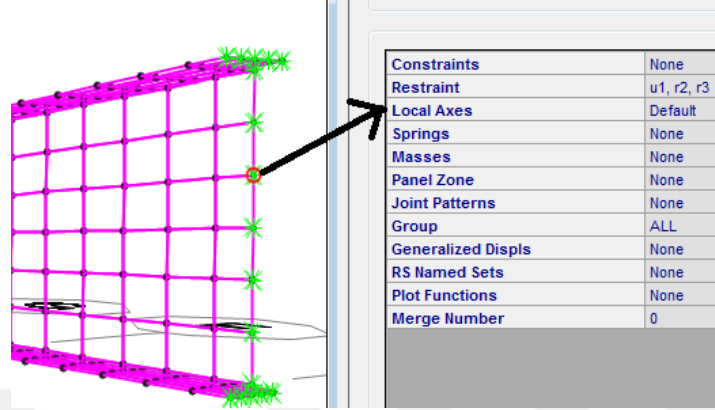
ANSYS modelinde olduğu gibi SAP2000 modelinde de mesnetler kiriş ucuna 10 cm uzaklıkta tanımlanmıştır. Mesnet tanımlanan 5 adet düğüm noktası u3 (düşeyde) yer değiştirmeleri tutulmuştur. Ayrıca ortada bulunan düğüm noktası makas düzlemine dik doğrultuda (u2) yer değiştirmesi tutulmuştur. Her beş düğüm noktasının da u2 ve u3 doğrultularındaki hareketleri kısıtlanması durumunda makas alt başlığının u3 etrafında dönmesi de kısıtlanmış olacaktır. Kiriş ucunda uygulanan sınır şartları Şekil 6.3’de gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Kiriş ucu mesnet koşulları

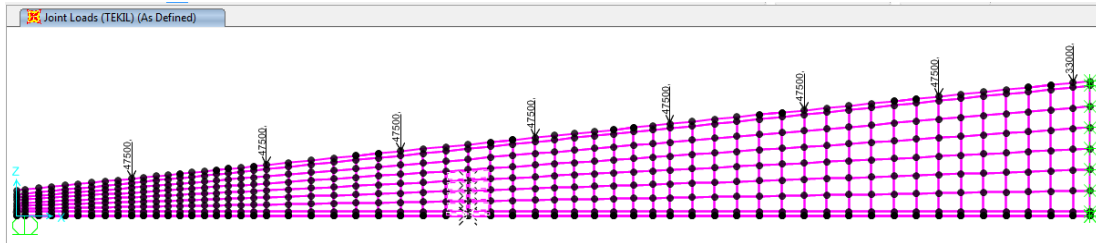
Çatı kirişi elemanı geometrisi ve yüklemesinde tam simetri olması sebebi ile SAP2000 ile yapılan analizde de yarım model kullanılmıştır. Simetri sınır şartlarının

sağlanması için kiriş ortasında bulunan düğüm noktaları kiriş eksenı boyunca (u1) yer değiştirmeleri ile kiriş düzlemine dik doğrultu (u2) ve dūřey eksen (u3) etrafındaki dōnmeleri tutulmuştur. Kiriř ortasında bulunan düğüm noktalarına uygulanan simetri sınır şartları Őekil 6.4’de gōsterilmektedir.



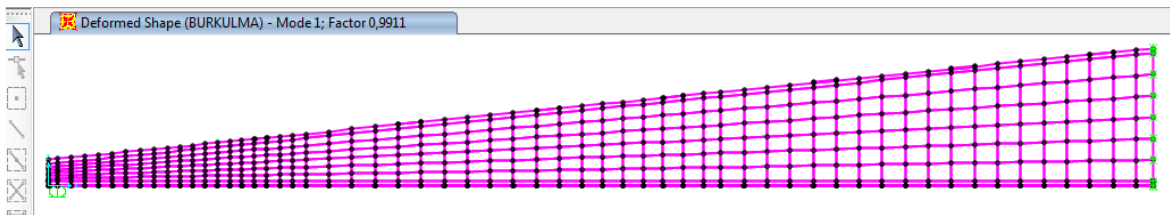
Şekil 6.4 Kiriş ortası mesnet koşulları (simetri düzlemi)

ANSYS programı ile öngerilmeli çatı makası doğrusal burkulma analizi modelinde kullanılan ve Şekil 5.63’de verilen ölçüleri uygun aralıklarla Şekil 5.48’de gōsterilen aşık yükleri verilmiştir. SAP2000 modelinde ise aşık hizasına gelen yerlerde düğüm noktası olacak şekilde shell elemanları oluşturulmuştur. SAP 2000 Modelinde Kirişin kendi ağırlığı ayrıca analize dahil edilmiş olup çatı kirişi elemanına uygulanan aşık yükleri Şekil 6.5’de gōsterilmektedir.



Şekil 6.5. Uygulanan tekil yükler

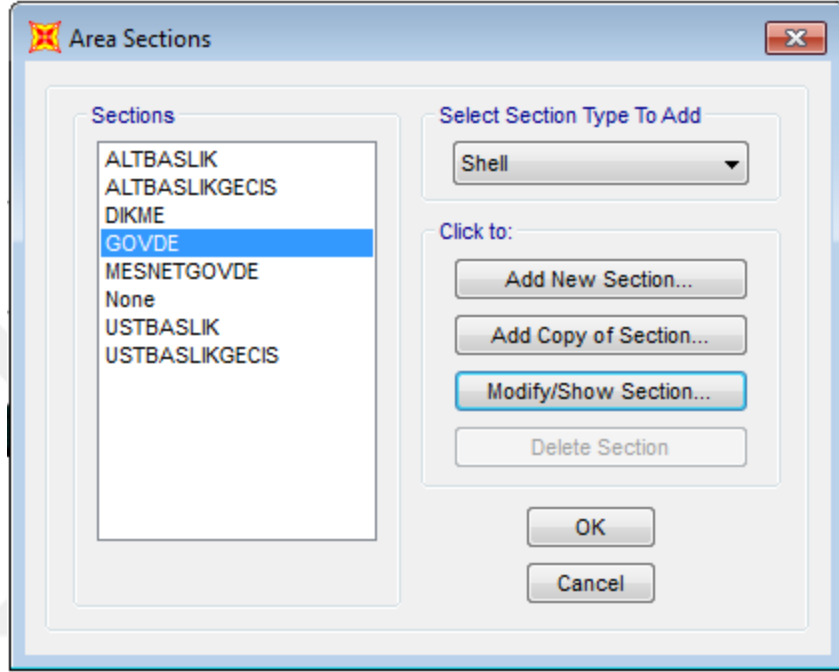
Kiriş ağıllığı ve aşık yüklerinin dahil edildiği doğrusal burkulma analizi sonucunda burkulma yük faktōri 0,9911 olarak bulunmuştur. Bu değer ANSYS ile bulunan değere oldukça yakındır. Burkulma yük faktōri Şekil 6.6’da gōsterilmektedir.



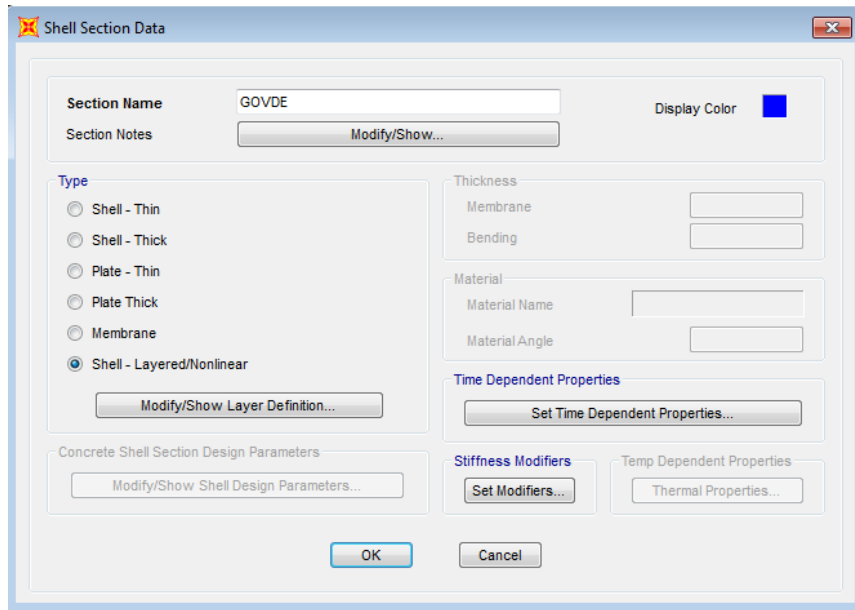
Şekil 6.6 Burkulma analizi sonucu burkulma yük faktōri

6.2. SAP2000 Programıyla Doğrusal Olmayan Eğilme Analizi

SAP2000 programıyla doğrusal olmayan malzeme özellikleri verilen beton ve donatı kullanılarak doğrusal olmayan eğilme analizi yapılmıştır. Bu analizde öngerilme kuvveti, çatı kirişi elemanı içerisinde bulunan boy donatı ve etriyeler de modele dahil edilmiştir. Mesnet koşulları, simentli sınır şartları ve aşık yükleri Bölüm 6.1’de bulunan modele uygun olarak verilmiştir.

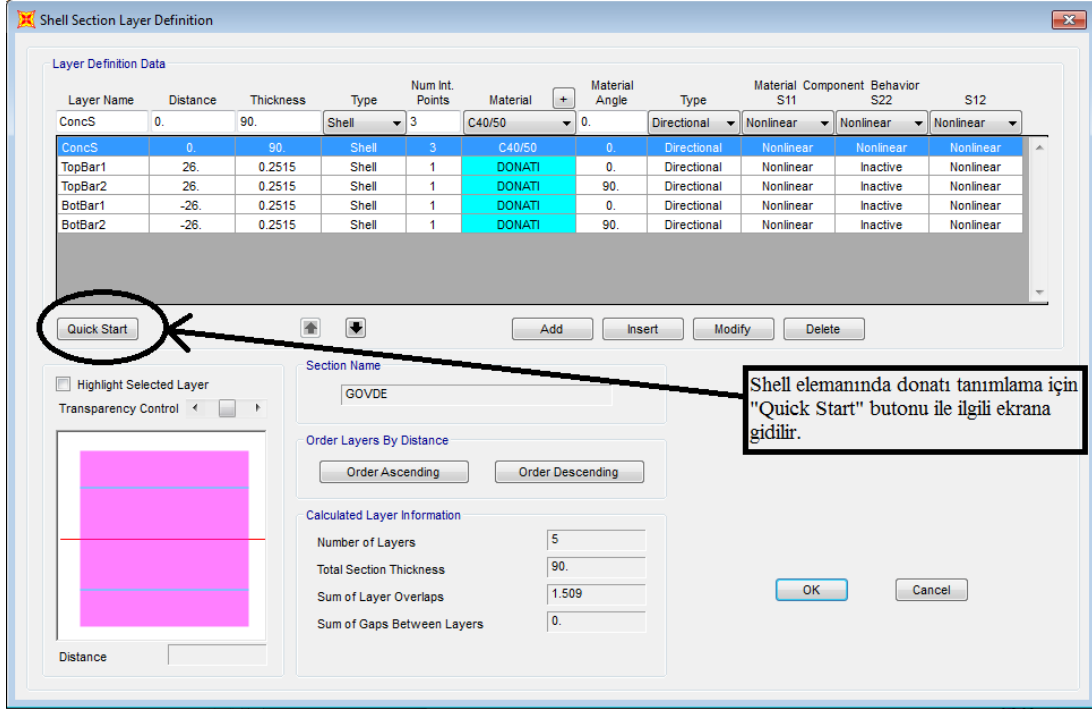


Şekil 6.7. Kirişi modellemek için kullanılan kesitler



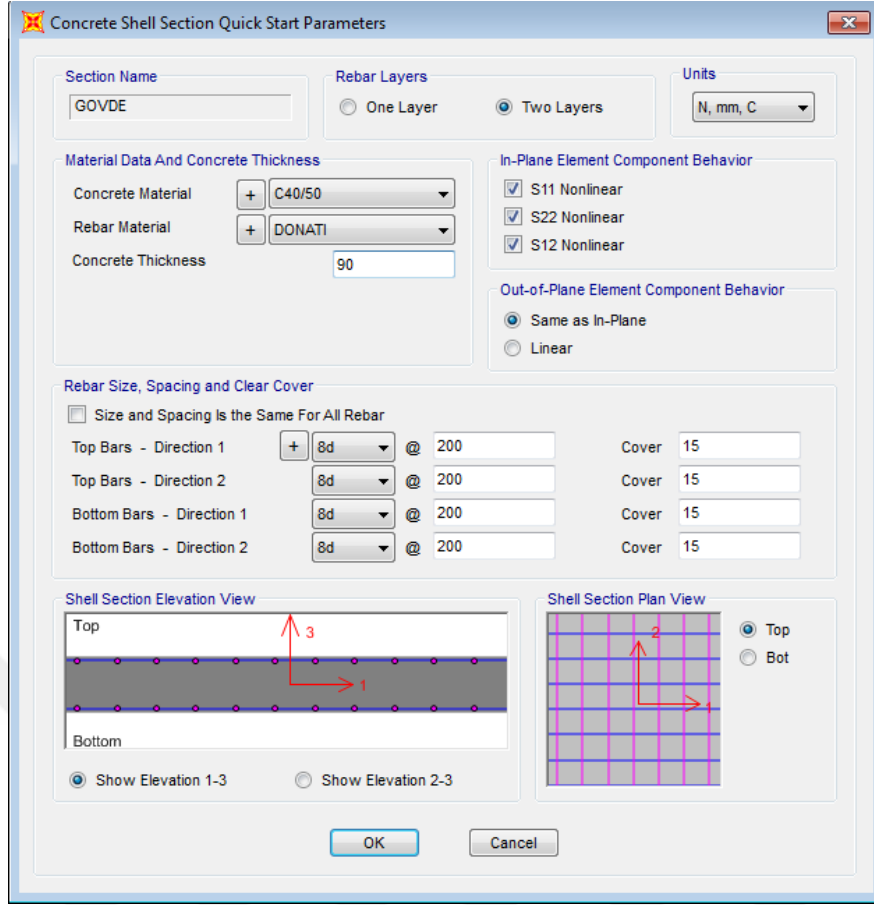
Şekil 6.8. "Shell Section" düzenleme ekran görüntüsü

"Shell Section Data" düzenleme ekranında Şekil 6.8’de gösterilen “Modify/Show Layer Definition” düğmesi yardımıyla “Shell Section Layer Definition” ekranı açılarak shell katmanlarına ait bilgi girişi yapılmaktadır. Şekil 6.9’de gösterilen ekrandan beton ve donatı bilgileri katman olarak girilebildiği gibi “Quick Start” düğmesi yardımıyla donatı bilgisi çap ve aralık bilgi girişi yapılarak tanımlanabilmektedir.

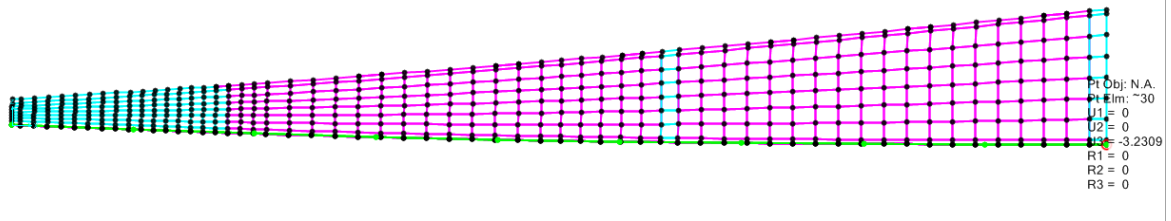


Şekil 6.9. Multilayered Shell tanımlama ekran görüntüsü

Şekil 6.10’da gösterilen “Concrete Shell Section Quick Start Parameters” ekranında beton kalınlığı ve malzeme modeli bilgisi, donatı malzemesi, çap ve aralıkları ile paspayı değerleri bilgi girişleri yapılmaktadır. Doğrusal olmayan analizlerde malzeme davranışının program tarafından kullanılabilmesi için beton ve donatıların shell düzlemi ve düzlem dışı davranışlarının “Nonlinear” olarak seçilmesi gerekmektedir.

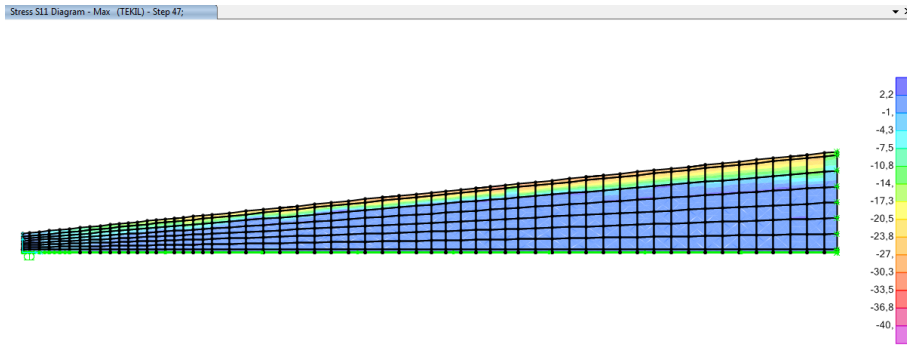


Şekil 6.10. Kiriş gövdesinde etriye ve gövde donatısının tanımlanma ekran görüntüsü

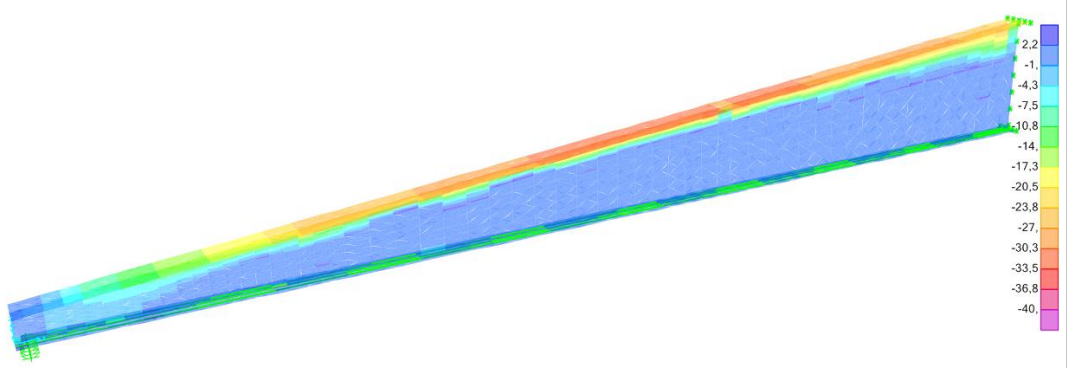


Şekil 6.11. Üstbaşlık açıklık ortası deplasmanları

Kiriş düzlemine göre geometri ve yüklemdeki tam simetriden dolayı kirişin düzlemi dışındaki deplasmanı 0 olarak bulunmuştur.



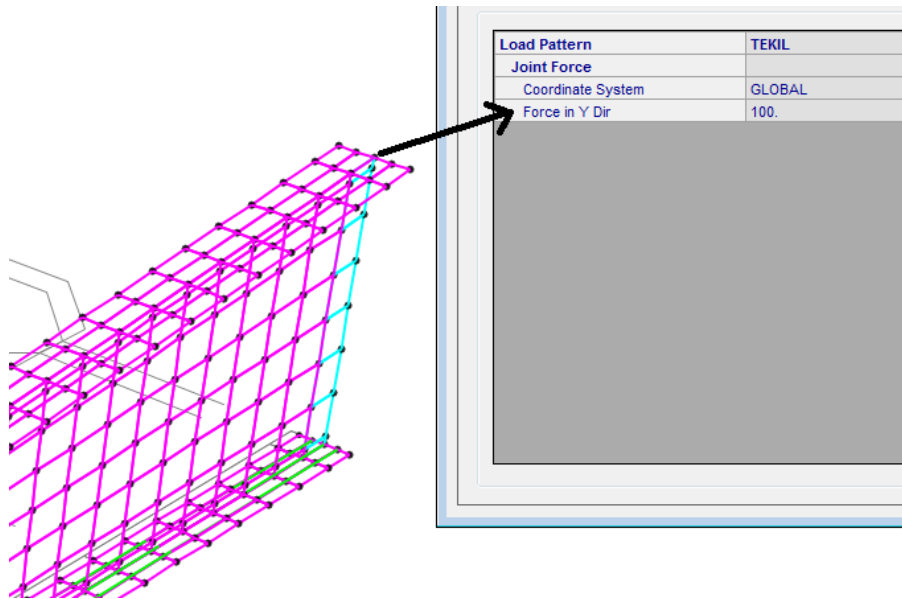
Şekil 6.12. Doğrusal olmayan eğilme analizi sonucu kirişte gerilme dağılımı



Şekil 6.13. Doğrusal olmayan eğilme analizi sonucu kirişte gerilme dağılımı perspektif görünüşü

6.3. SAP2000 Programıyla Doğrusal Olmayan Burkulma Analizi

Bölüm 6.2’de doğrusal olmayan eğilme analizi yapılan model ile doğrusal olmayan burkulma analizi yapılabilir. Çatı kirişinin doğrusal olmayan burkulma analizi için modele geometrik veya yüklemelerden kaynaklanan küçük bir hata eklenmesi gerekmektedir. Eklenen bu hata ile modellenen kiriş, düzlemi dışına çıkarak dış yüklerin etkisi ile burkulacaktır. Bölüm 6.2’de kullanılan modele kiriş düzlemine dik doğrultuda 100 N yatay kuvvet etki ettirilmiştir. Gerçekte bu kuvvet, makasın düzlemi dışında montaj edilmesi gibi çok ufak montaj hataları olarak düşünülebilir. Çatı kirişinin düzlemine dik eklenen 100 N yatay kuvvet Şekil 6.12’de gösterilmektedir. SAP2000 ile doğrusal olmayan burkulma analizi yapılırken ara çözüm sonuçları kaydedilmiştir. Analiz ile en az 50, en fazla 100 adım sonucunu kaydedilmiştir.



Şekil 6.14. Kiriş ortası üst başlıkta uygulanan kuvvet

Çatı kirişi tamamen shell elemanlar ile modellenmiştir. Aynı şekilde kesitin alt başlık kısmının modellenmesinde shell elemanlar kullanılmıştır. Çatı kirişi elemanında iki sıra halinde 8 adet 0,5” inç öngerme halatı bulunmaktadır. SAP2000 analizinde alt modelleme sıkıntılarından dolayı alt başlıkta tek sıra halinde 3 tendon olarak modellenmiştir.

Çizelge 6.1. AASHTO ve ACI standartlarına göre öngerme transfer uzunluğu eşitlikleri

| Code | Section | | English Units |
|--------|------------|----------|------------------------------|
| ACI | Code | 11.4.3 | 50d _b |
| | | 11.4.4 | 50d _b |
| | Commentary | R12.9 | $L_t = \frac{f_{sc}}{3} d_b$ |
| AASHTO | Standard | 9.20.2.4 | 50d _b |
| | LRFD | 5.8.2.3 | 60d _b |

Öngerme donatısında tam kenetlenmenin sağlandığı yere kadar (kenetlenme boyu) gerilme değişken olmaktadır. Çizelge 6.1’de verilen AASHTO LRFD verilen 60*d_b eşitliğine göre transfer uzunluğu hesaplanarak modele eklenmiştir. Bu ifadeye göre 0,5” (12,7 mm) çapında olan öngerme halatlarının transfer uzunluğu;

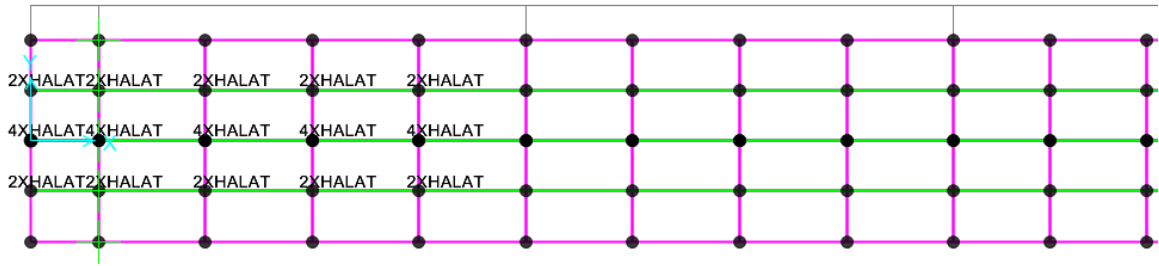
$$L_t = 60 \times d_b = 60 \times 12,70 = 762 \text{ mm} \quad (6.1.)$$

Eşitlik yardımıyla hesaplanan öngerme donatısı kenetlenme boyu 735 mm kabul edilmiştir. Kenetlenme boyu, Şekil 6.13’de gösterildiği gibi tendon elemanlarının 6 bölgeye ayrılarak farklı öngerme yükleri tanımlanması ile modellenmiştir. Her bir tendon elemanına tanımlanan öngerme yükleri Çizelge 6.2’de verilmektedir.

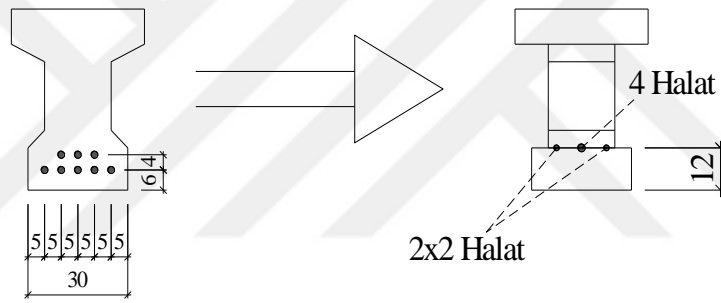
Çizelge 6.2. SAP2000 modelinde tendon gerilmeleri

| Tendon konumu (Kiriş ucundan) | | 2 halat öngerme kuvveti (N) | 4 halat öngerme kuvveti (N) |
|----------------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Başlangıç (mm) | Bitiş (mm) | | |
| 0 | 100 | 0 | 0 |
| 100 | 258,8 | 44.000 | 88.000 |
| 258,8 | 735 | 88.000 | 176.000 |
| 417,5 | 576,3 | 132.000 | 264.000 |
| 576,3 | 735 | 176.000 | 352.000 |
| 735 | 12770 | 220.000 | 440.000 |

Modelde aktarma boyu içerisinde gerilmenin kademeli olarak artırılmasının analiz açısından önemi bulunmaktadır. Öngerme kuvvetinin tek kademede verilmesi durumunda mesnet bölgesinde kiriş alt başlık betonunda çok yüksek basınç gerilmeleri oluşmakta ve beton dayanımı öngerilme sebebi ile önce mesnet bölgesinde aşılmakta ve analiz çok daha küçük yük kademelerinde program tarafından sonlandırılmaktadır.



Şekil 6.15. Kirişte tanımlanan tendonlar

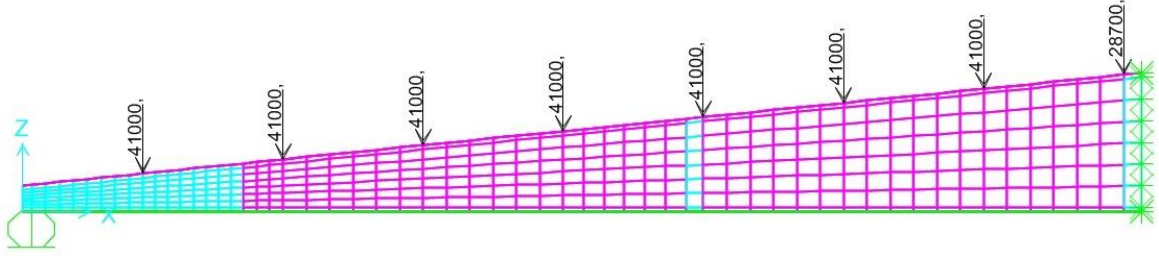


Şekil 6.16. Öngerme şablonunun SAP2000'de modellenmesi

Çatı kirişi elemanı 1.003 adet düğüm noktası, 928 adet multilayered shell ve 18 (3 tendon 6 bölgeye ayrılmıştır) tendon ile modellenmiştir.

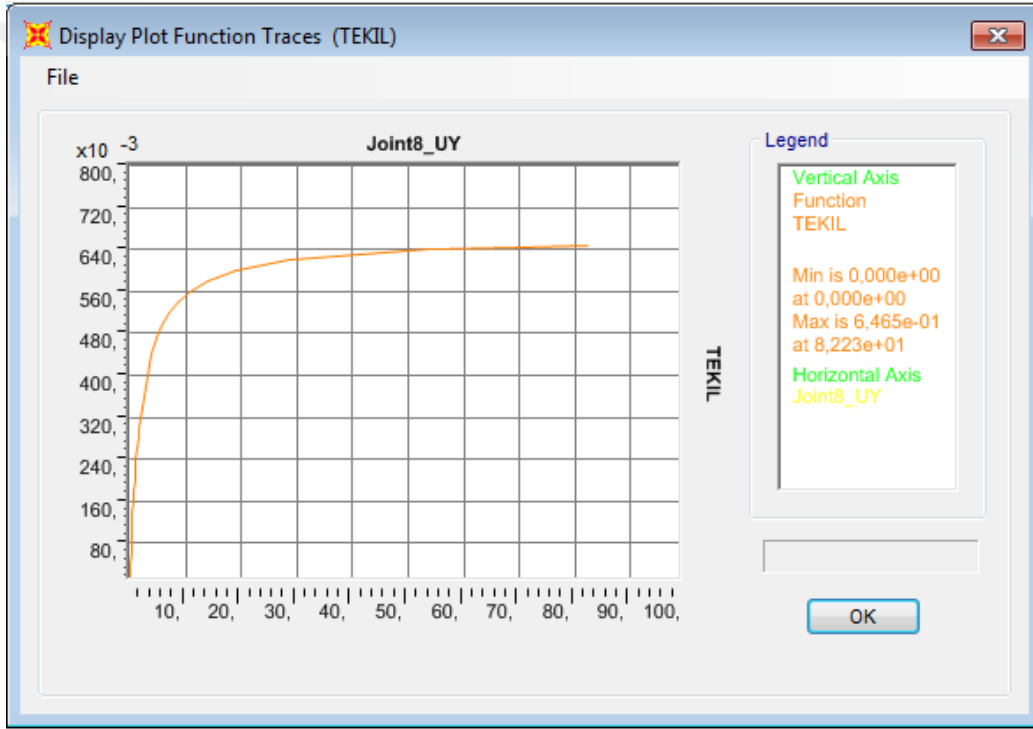
6.3.1. B=350 mm üst başlık genişliği için doğrusal olmayan burkulma analizi

Bölüm 5.3.1'de doğrusal burkulma analizi yapılan ve üst başlık genişliği 350 mm olan kirişe, ortasında bulunan aşık için 28.700 N diğer aşık kirişleri için 41.000 N tekil yük uygulanarak doğrusal olmayan burkulma analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan burkulma analizi için çatı kirişine uygulanan düşey yükler Şekil 6.17'de gösterilmektedir.

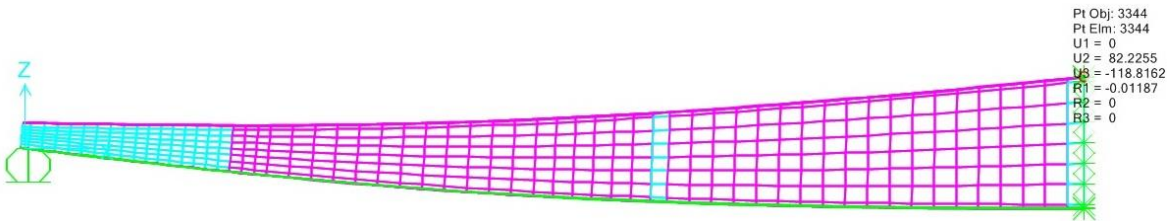


Şekil 6.17. 350 mm üst başlık genişliği için uygulanan yükler

Üst başlık genişliği 350 mm olan çatı kirişi için yük ve açıklık ortasında üst başlığın kirişe dik doğrultudaki yer değiştirme grafiği Şekil 6.18’de verilmektedir. Analiz burkulma sebebi ile 0,6465’inci saniyede sonlanmıştır. Burkulma anına kadar kiriş üst başlığı makasa dik doğrultuda 82 mm deplasman yapmıştır.

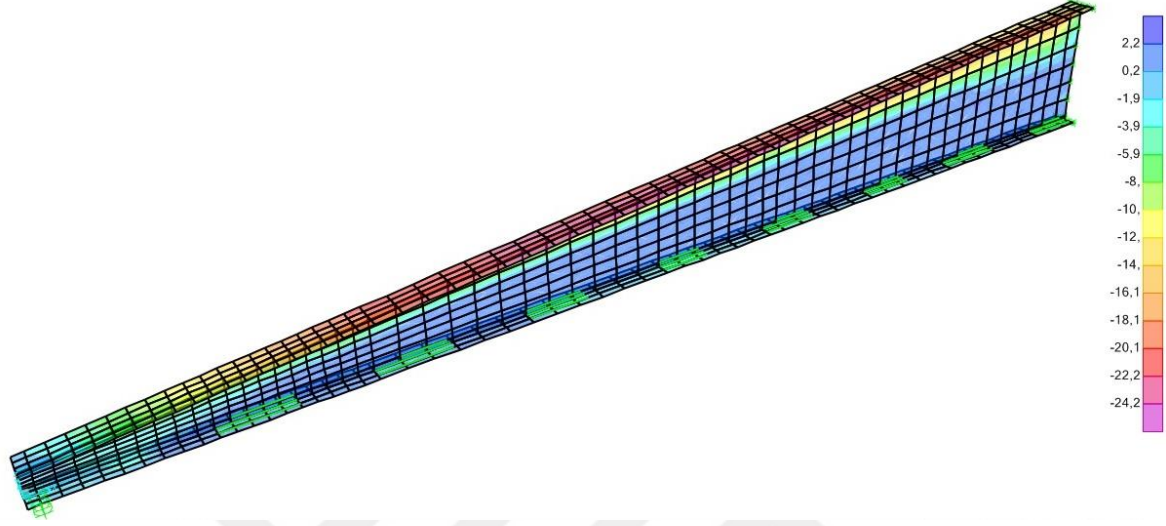


Şekil 6.18. 350 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği



Şekil 6.19. 350 mm üst başlık genişliği için deplasmanlar

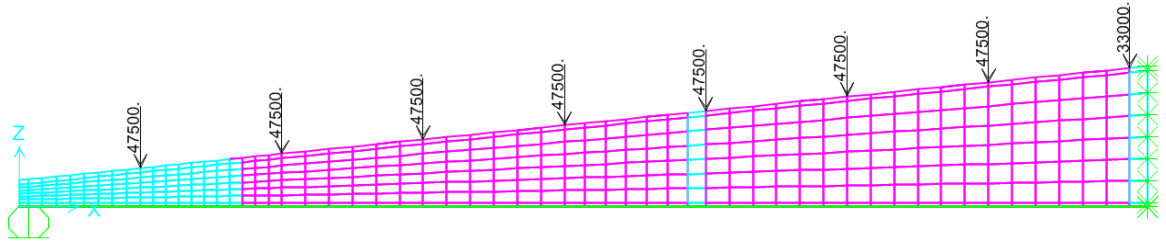
Üst başlık genişliği 350 mm olan kirişte yapılan doğrusal olmayan burkulma analizi neticesinde elde edilen gerilmeler gerçek gerilmeleri vermektedir. Çatı kirişi elemanında burkulma esnasında meydana gelen gerilme dağılımı Şekil 6.20’de gösterilmektedir.



Şekil 6.20. 350 mm üst başlık genişliği için gerilmeler

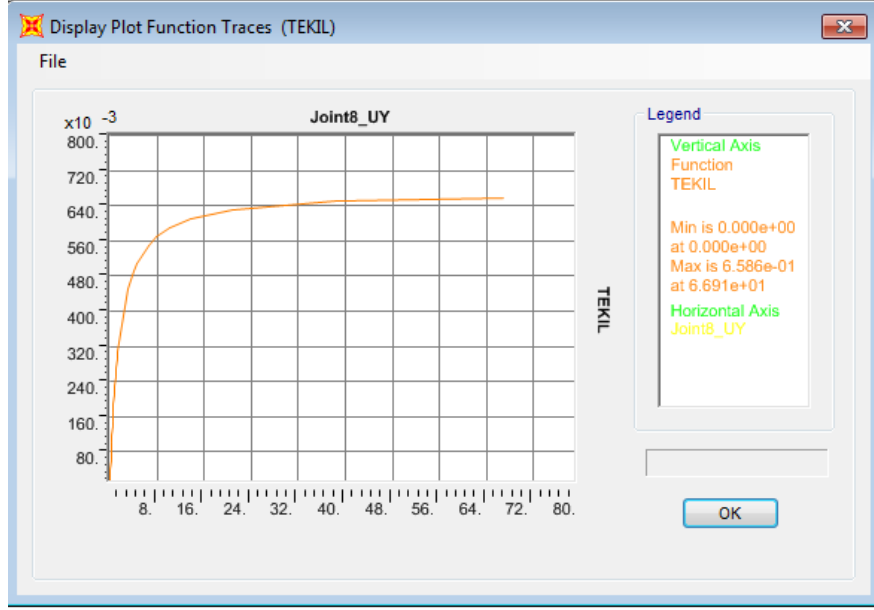
6.3.2. B=400 mm üst başlık genişliği için doğrusal olmayan burkulma analizi

Bölüm 5.3.2’de doğrusal burkulma analizi yapılan üst başlık genişliği 400 mm olan kirişe, kiriş ortasında bulunan aşık için 33.000 N diğer aşık kirişleri için 47.500 N tekil yük uygulanarak doğrusal olmayan burkulma analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan burkulma analizi için çatı kirişine uygulanan düşey yükler Şekil 6.21’de gösterilmektedir.

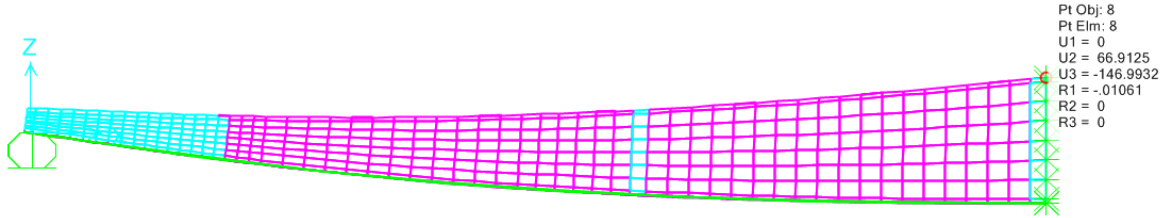


Şekil 6.21. 400 mm üst başlık genişliği için uygulanan yükler

Üst başlık genişliği 350 mm olan çatı kirişi için yük ve açıklık ortasında üst başlığın kirişe dik doğrultudaki yer değiştirme grafiği Şekil 6.22’de verilmektedir. Analiz burkulma sebebi ile 0,6586’nci saniyede sonlanmıştır. Burkulma anına kadar kiriş üst başlığı makasa dik doğrultuda 67 mm deplasman yapmıştır

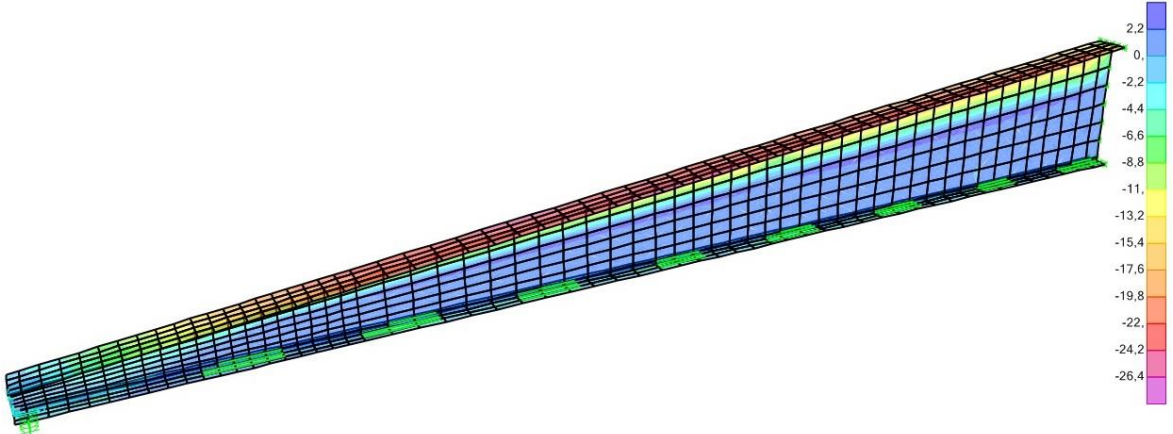


Şekil 6.22. 400 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği



Şekil 6.23. 400 mm üst başlık genişliği için deplasmanlar

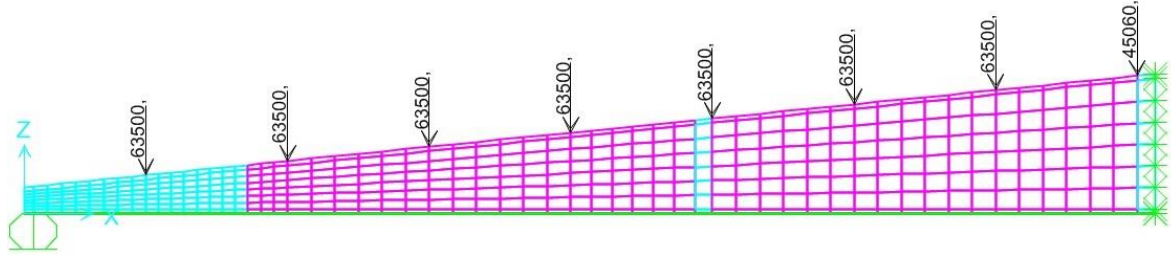
Çatı kirişi elemanında burkulma esnasında meydana gelen gerilme dağılımı Şekil 6.24'de gösterilmektedir.



Şekil 6.24. 400 mm üst başlık genişliği için gerilmeler

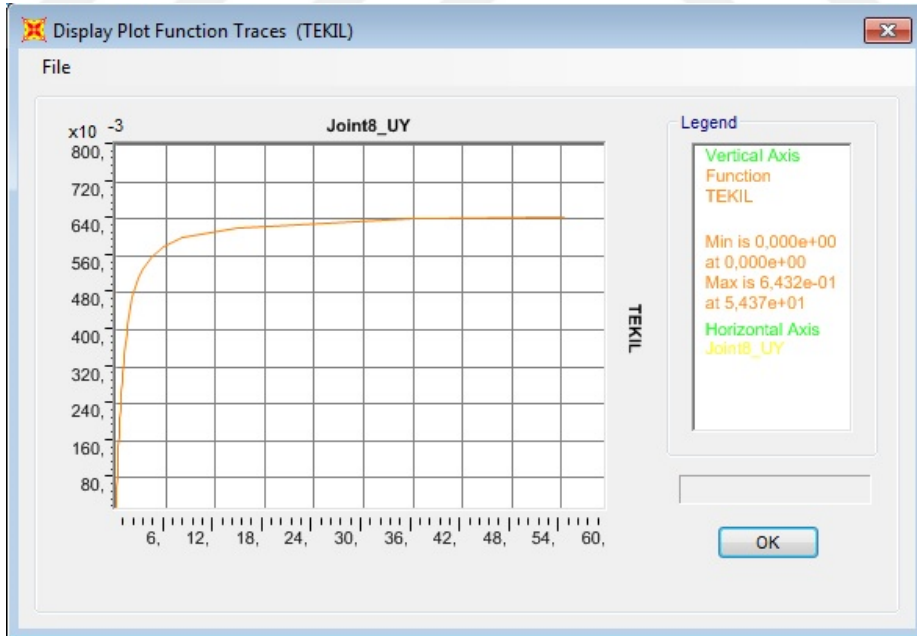
6.3.3. B=508 mm üst başlık genişliği için doğrusal olmayan burkulma analizi

Bölüm 5.3.3’de doğrusal burkulma analizi yapılan üst başlık genişliği 508 mm olan kirişe, kiriş ortasında bulunan aşık kirişi için 45.060 N diğer aşık kirişleri için 63.500 N tekil yük uygulanarak doğrusal olmayan burkulma analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan burkulma analizi için çatı kirişine uygulanan düşey yükler Şekil 6.25’de gösterilmektedir.

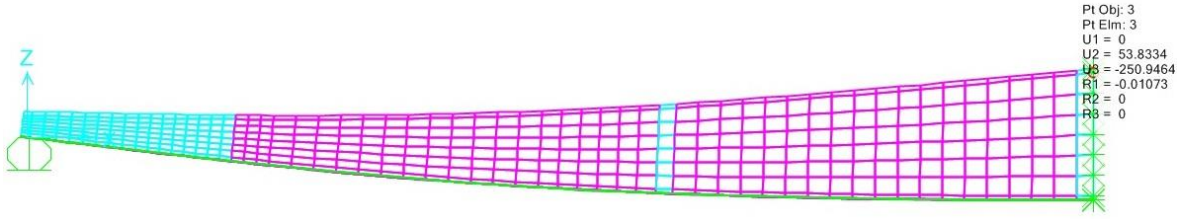


Şekil 6.25. 508 mm üst başlık genişliği için uygulanan yükler

Üst başlık genişliği 508 mm olan çatı kirişi için yük ve açıklık ortasında üst başlığın kirişe dik doğrultudaki yer değiştirme grafiği Şekil 6.26’da verilmektedir. Analiz burkulma sebebi ile 0,6432’inci saniyede sonlanmıştır. Burkulma anına kadar kiriş üst başlığı makasa dik doğrultuda 54 mm deplasman yapmıştır.

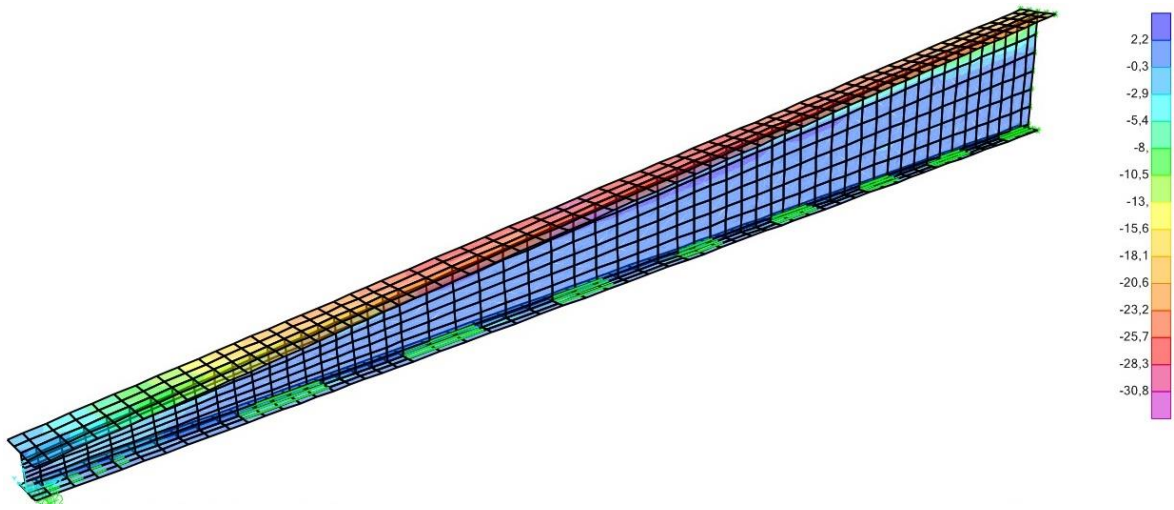


Şekil 6.26. 508 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği



Şekil 6.27. 508 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği

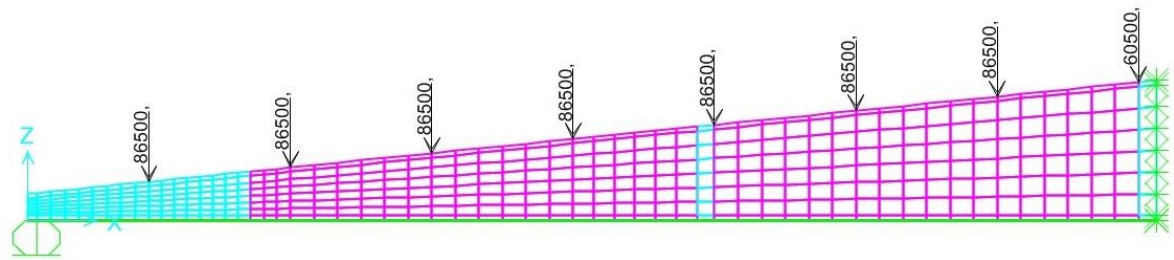
Çatı kirişi elemanında burkulma esnasında meydana gelen gerilme dağılımı Şekil 6.28’de gösterilmektedir.



Şekil 6.28. 508 mm üst başlık genişliği için gerilmeler

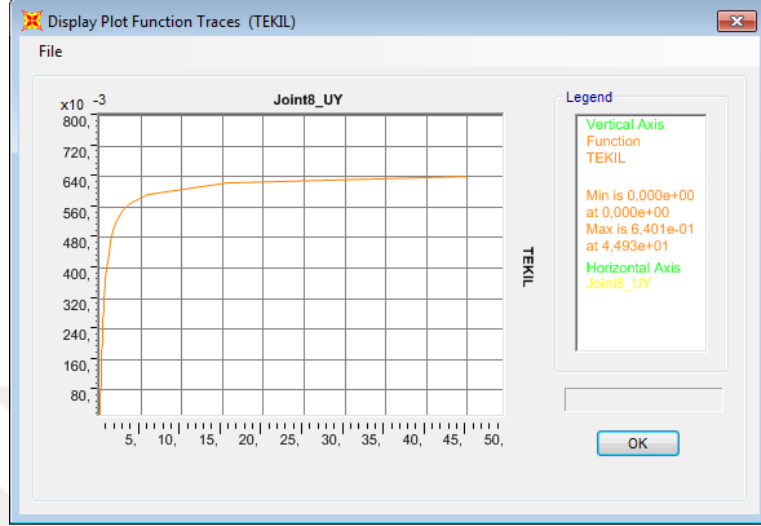
6.3.4. B=634 mm üst başlık genişliği için doğrusal olmayan burkulma analizi

Bölüm 5.3.4’de doğrusal burkulma analizi yapılan üst başlık genişliği 634 mm olan kirişe, kiriş ortasında bulunan prefabrik aşık için 60.500 N diğer aşık kirişleri için 86.500 N tekil yük uygulanarak doğrusal olmayan burkulma analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan burkulma analizi için çatı kirişine uygulanan düşey yükler Şekil 6.29’da gösterilmektedir.

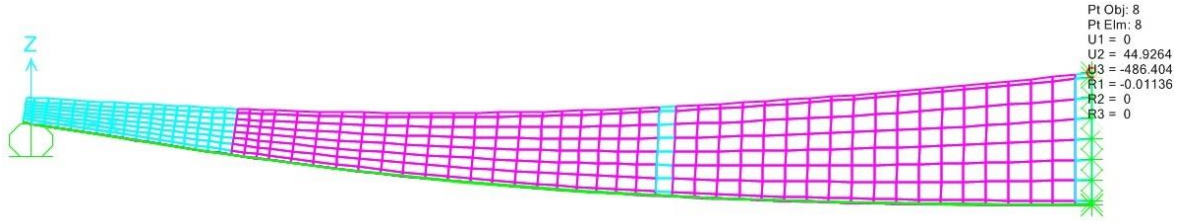


Şekil 6.29. 508 mm üst başlık genişliği için uygulanan yükler

Üst başlık genişliği 634 mm olan çatı kirişi için yük ve açıklık ortasında üst başlığın kirişe dik doğrultudaki yer değiştirme grafiği Şekil 6.30'da verilmektedir. Analiz burkulma sebebi ile 0,6401'inci saniyede sonlanmıştır. Burkulma anına kadar kiriş üst başlığı makasa dik doğrultuda 45 mm deplasman yapmıştır.

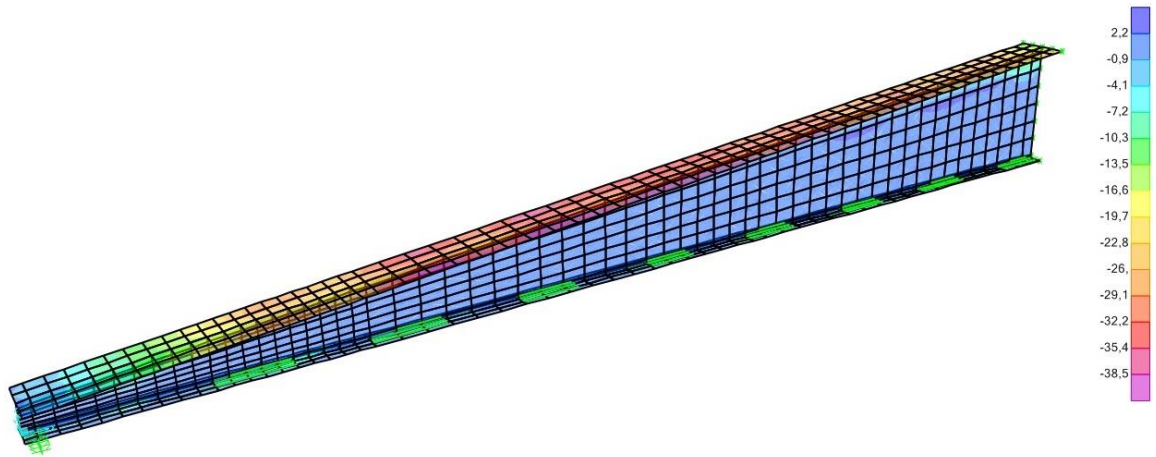


Şekil 6.30. 634 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği



Şekil 6.31. 634 mm üst başlık genişliği için yük-deplasman grafiği

Çatı kirişi elemanında burkulma esnasında meydana gelen gerilme dağılımı Şekil 6.32'de gösterilmektedir.



Şekil 6.32. 634 mm üst başlık genişliği için gerilmeler

7. SONUÇLAR

7.1. ANSYS Programı İçin Yapılan Doğrulama Analizleri

Bölüm 5.2’de Coşkun’un (2014) çalışmasında bulunan modellerin ANSYS programı ile analiz edilerek elde edilen sonuçlar Çizelge 7.1’de verilmektedir. ANSYS programı ile elde edilen doğrusal burkulma yüklerinin Elastik teori ile bulunan sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.1. Doğrulama çalışması sonuçları

| Malzeme | Kesit | Yükleme | Mesnet Teori | SAP2000 | ANSYS |
|---------|------------------|-------------|--------------|---------|--------|
| Çelik | I | Konsol Ucu | | | |
| | | Tekil Yük | Konsol | 103,79 | 101,04 |
| Çelik | I | Tekil Yük | Basit | | |
| | | | Mesnet | 340,70 | 311,57 |
| Çelik | I | Yayıllı Yük | Basit | | |
| | | | Mesnet | 47,19 | 41,59 |
| Beton | I | Tekil Yük | Basit | | |
| | | | Mesnet | 663,66 | 730,07 |
| Beton | I-Mesnet Dolu | Tekil Yük | Basit | | |
| | | | Mesnet | - | 872,84 |
| Beton | I | Yayıllı Yük | Basit | | |
| | | | Mesnet | 44,05 | 49,84 |
| Beton | I | Tekil Yük | Basit | | |
| | | | Mesnet | - | 774,71 |

7.2. Üst Başlık Genişliğinin Burkulma Yüküne Etkisi

Çatı kirişlerinde üst başlık genişliğinin incelendiği Bölüm 5.3’ te yapılan analizlere ait sonuçlar Çizelge 7.2’de verilmektedir. Net açıklık sabit kalması koşulu ile üst başlık genişliğinin değiştirildiği analizlerde kiriş ağırlığındaki ve hesaplanan kritik burkulma yükündeki değişim belirlenmiştir.

Çizelge 7.2. Yapılan 4 adet analize ait kritik burkulma yükleri

| Analiz no | L_n (m) | B (mm) | L_n/B | ½ Çatı kirişi ağırlığı (N) | Kritik aşık yükü P_k (N) | $0.45P_k$ (N) |
|-----------|-----------|----------|---------|----------------------------|----------------------------|---------------|
| 1 | 25,40 | 350 | 72,57 | 53.358 | 41.000 | 18.450 |
| 2 | 25,40 | 400 | 63,50 | 55.179 | 47.500 | 21.375 |
| 3 | 25,40 | 508 | 50 | 59.083 | 63.500 | 28.575 |
| 4 | 25,40 | 634 | 40 | 63.740 | 86.500 | 38.925 |

Çizelge 7.2’de Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile kısıtlanan tabla üst başlık genişliğinin en az $L_n/50$ koşuluna uyan 3 ve 4 nolu analizlerde burkulma yükü açısından

güvenli olduğu, 1 ve 2 nolu analizlerin yanal stabilitelerinin yetersiz olduğu görülmektedir. Kirişi üst başlık genişliğinin artırılması aynı zamanda kiriş ağırlığını arttırmaktadır. 2 ve 3 nolu modeller karşılaştırıldığında çatı makası ağırlığı %7 artarken kritik burkulma yükü %30 artmaktadır.

7.3. Öngerilme Kuvvetinin Kritik Burkulma Yüküne Etkisi

Bölüm 5.3'de üst başlık genişliği 400 mm olan çatı kirişi modeli ile doğrusal burkulma yükü boy donatı ve öngerilme kuvveti olmadan burkulmaya neden olacak kritik aşık yükü 47.500 N olarak hesaplanmıştı. Bölüm 8'de ise üst başlık genişliği 400 mm olan çatı kirişi modeli ile doğrusal burkulma yükü boy donatı ve öngerilme kuvveti dahil edildiğinde burkulmaya neden olacak kritik aşık yükü 51.000 N olarak hesaplandı. Öngerilme kuvveti doğrusal burkulma yükünde %7,3 lük artış sağlamıştır.

Öngerilmeli kirişte kritik burkulma yükünün artması öngerilme kuvvetinin makasın üst başlık bölgesinde çekme gerilmelerine neden olması sebebi ile kiriş kendi ağırlığı ve hareketli yükler altında oluşacak toplam basınç kuvvetinin azalmasına sebep olması ile açıklanabilir.

7.4. SAP200 Programı ile yapılan Analiz Sonuçları

Bölüm 6.1'de, Bölüm 5.3.2'de ANSYS programı ile doğrusal burkulma analizi yapılan çatı kirişi SAP2000 programı ile de modellenerek doğrusal burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Doğrusal malzeme özelliklerinin kullanıldığı her iki analizde de kiriş ortasında bulunan prefabrik aşık kirişi için 33.000 N diğer aşık kirişleri için 47.500 N tekil yük uygulanmıştır. ANSYS programı ile burkulma yük faktörü 1,0035 iken SAP2000 programı ile bulunan yük faktörü 0,9911 olarak bulunmuştur. Her iki analiz sonucunun çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bölüm 6.2'de SAP2000 programı ile çatı kirişinin doğrusal olmayan malzeme özellikleri kullanılarak ve öngerme kuvvetleri de dahil edilerek yapılan analizde kirişe ait doğrusal olmayan eğilme kapasitesi bulunmuştur. Analizde kiriş ortasında bulunan aşık kirişi için 37.500 N diğer aşık kirişleri için 51.000 N tekil yük uygulanmıştır. 1 sn olarak başlatılan analiz program tarafında 0,9201 sn'de sonlandırılmıştır. Doğrusal olmayan aşık yükü $51.000 \times 0,92010 = 46.925$ N olarak bulunmuştur.

Bölüm 6.3'de SAP2000 programı ile çatı kirişinin doğrusal olmayan malzeme özellikleri ve öngerme kuvvetleri de dahil edilerek doğrusal olmayan burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bölüm 6.3.1'de üst başlık genişliği 350 mm olan kiriş için 41.000 N

dış yükleme ile yapılan analiz, program tarafından 0,6465 sn'de sonlandırılmıştır. Bu durumda burkulma yükü $41.000 \times 0,6465 = 26.506$ N olarak hesaplanmaktadır. Bölüm 6.3.2'de üst başlık genişliği 400 mm olan kiriş için 47.500 N dış yükleme ile yapılan analiz, program tarafından 0,6586 sn'de sonlandırılmıştır. Bu durumda burkulma yükü $47.500 \times 0,6586 = 31.283$ N olarak hesaplanmaktadır. Bölüm 6.3.3'de üst başlık genişliği 508 mm olan kiriş için 63.500 N dış yükleme ile yapılan analiz, program tarafından 0,6432 sn'de sonlandırılmıştır. Bu durumda burkulma yükü $63.500 \times 0,6432 = 40.843$ N olarak hesaplanmaktadır. Bölüm 6.3.4'te üst başlık genişliği 634 mm olan kiriş için 86.500 N dış yükleme ile yapılan analiz, program tarafından 0,6401 sn'de sonlandırılmıştır. Bu durumda burkulma yükü $86.500 \times 0,6401 = 55.368$ N olarak hesaplanmaktadır.



8. DEĞERLENDİRMELER

İlk defa, 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile getirilen çatı kirişi üst başlık genişliğinin $L_n/50$ olma şartı düşey ve yatay yükler için yatay stabilite kontrolünü sağlanması amaçlanmaktadır. Ancak konu ile ilgili çalışmaların azlığı sebebi ile farklı kar yükü ve en büyük yer ivmesine göre çatı makası üst başlık genişliği sınırının yönetmelikçe çeşitlendirilmesi daha ekonomik ve güvenli tasarımlar yapılmasına yardımcı olacaktır.

Prefabrik çatı kirişlerinde öngerilme etkisiyle aynı kesit için burkulma yükü %7,3 artmıştır. Bu durum öngerilme kuvvetinin burkulmaya sebep olan ve üst başlıkta meydana gelen basınç kuvvetini azaltıcı etkisinden kaynaklanmaktadır.

Çatı makası kirişine ait doğrusal olmayan burkulma analizi sonucu bulunan kritik burkulma yükü doğrusal analiz sonucu bulunan burkulma yükünün %62'si mertebesinde bulunmuştur. Düşey yükler altında çatı kirişinde üst başlık burkulmasının doğrusal olmayan modeller ile incelenmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

SAP2000 programı ile oluşturulan model, prefabrik çatı makası veya köprü kirişi elemanlarında aktarma, kaldırmada taşımada veya montajda mesnetlenme koşullarına göre burkulma analizlerinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 318, 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19), American Concrete Institute, Detroit Michigan, 2019
- American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO), LRFD Bridge Design Specification, 8th Edition, 2017, ISBN978-1-56051-654-5, USA
- Ansys Workbench (2018). Ansys Inc, Canonsburg Pennsylvania.
- Barka, A.G., Kulaksızoğlu, A., 2013. Prefabrike Çatı Kirişlerinde Üst Başlık İçin Uygulanabilir Hesap Yöntemi. Beton Prefabrikasyon Dergisi, Sayı 105, 5-9s.
- Coşkun, C., 2014. I Enkesitli, Değişken Yükseklikli Prefabrik Betonarme Kirişlerde Yanal Burkulmanın İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Celep, Z., 2009. Betonarme Yapılar. ISBN: 978-975-95405-3-3, İstanbul
- Durmaz, M., 2011. Eksantrik Yüklü Korniyerlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Geometri Ve Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Burkulma Analizi. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon.
- Eigenvalue Bucling Analysis, URL (erişim tarihi: 01.10.2018)
https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb_sim/ds_buckling_analysis_type.html
- Kalkan, İ., Ertenli, M.F., Baş, S. , Petek Kirişlerde Yanal Stabilite Sorunun İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Sonuçlar. 6ncı Çelik Yapılar Sempozyumu. Eskişehir
- Keyder, E., Öngermeli Kirişlerde Yanal Burkulma. Beton Prefabrikasyon Dergisi, Sayı 123, s.15-16
- Kurt, S., 2007. Değişken En Kesitli Kolonların Etkin Burkulma Boy Katsayısının Hesaplanması. Bitirme Projesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. İzmir.
- Külekcı, S., 2006. Değişken En Kesitli Kolonların Etkin Burkulma Boy Katsayısının Hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Mast, R.F.(1989), Lateral Stability of Long Prestressed Concrete Beams – Part I, PCI Journal, V.34, 34-53
- Mast, R.F.(1993), Lateral Stability of Long Prestressed Concrete Beams – Part II, PCI Journal, V.38, 70-88
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T. C. Resmi Gazete, 30364 (Mükerrer), 18 Mart 2018
- Yazıcı, A.P., 2018. Değişken Kesitli Kolonların Elastik Burkulma Yüklerinin Kuvvet Serileri Yöntemiyle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kocaeli.

Yüksel, E., Özkaynak, H., Soydan, C., Güllü, A. (2019). Sandviç Panellerin Düzlem İçi Yükler Etkisindeki Davranışı ve Çatı Düzlem İçi Rijitliğine Katkıları, Beton Prefabrikasyon Dergisi, Sayı 129, 5-13s.

2016 yılı sektör raporu, URL (erişim tarihi: 05.10.2018), <http://www.prefab.org.tr/userfiles/file/sr2016.pdf>

<https://www.prilhofer.com/precast-industrial-buildings>

<http://www.prefab.org.tr/tr/Default.aspx>

<https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/concrete/225-pre-stressed-concrete>

<https://sites.ualberta.ca/~wmoussa/AnsysTutorial/IT/Buckling/Buckling.html>

<https://theconstructor.org/concrete/prestressed-concrete/353/>,

https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html

https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_BEAM188.html

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Erdoğan GÖKKAYA
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 16.12.1976 Kahramanmaraş
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (535) 542 21 87
Faks :
e-posta : erdogan46@gmail.com.

Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi | Mezuniyet tarihi |
|--------|----------------------------------|------------------|
| Lisans | İTÜ/ İşletme Mühendisliği Bölümü | 2001 |
| Lisans | İTÜ/ İnşaat Mühendisliği Bölümü | 1998 |
| Lise | Şişli Kurtuluş Lisesi | 1993 |

İş Deneyimi

| Yıl | Yer | Görev |
|-----------|----------------------------|------------------|
| 2002-2003 | As Beton San. ve Tic. A.Ş. | İnşaat Mühendisi |
| 2003-2010 | KKK 1. ABMK | İnşaat Mühendisi |
| 2011- | DSİ 20. Bölge Müdürlüğü | İnşaat Mühendisi |

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Prefabrik Çatı Kirişlerinde Üst Başlık Genişliğinin Burkulma Yüküne Etkisinin Analitik Yöntemlerle Belirlenmesi , ISADET 2019, Kahramanmaraş

Hobiler

Doğa bilimleri, Basketbol, Yüzme