

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARAYOLU KUTU MENFEZ YAPILARINDA FARKLI TASARIM YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Sema ÖZEL

**HAZİRAN 2019
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Sema ÖZEL Tarafından Hazırlanan**

**KARAYOLU KUTU MENFEZ YAPILARINDA FARKLI TASARIM YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28 / 05 / 2019 gün ve 1806 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Şevket ATEŞ



Üye : Prof. Dr. Süleyman ADANUR



Üye : Prof. Dr. Tufan ÇAKIR



Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

‘Karayolu Kutu Menfez Yapılarında Farklı Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması’ adlı bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde değerli bilgilerini, tecrübelerini ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şevket ATEŞ’e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca destekleri olan değerli arkadaşlarım ve meslektaşlarım İnş. Yük. Müh. Ebru KALKAN’a, İnş. Müh. Fatma ÖNALAN’a, İnş. Yük. Müh. Hatice ERDOĞMUŞ ve Nadire KÜREKÇİ’ye teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak yanımda olan ve beni daima destekleyen annem Zahide CEVKE, babam Süleyman CEVKE, ablam Meryem DAVARCI’ya; çalışmalarım sırasında yanımda olan sevgili eşim, değerli meslektaşım Öğr. Gör. Alperen ÖZEL’e bütün emekleri, anlayışı ve sonsuz destekleri için teşekkür eder, tüm ailemin onlara daima minnettar kalacağımı bilmelerini isterim. Bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Sema ÖZEL
Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “KARAYOLU KUTU MENFEZ YAPILARINDA FARKLI TASARIM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şevket ATEŞ’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.17/06/2019

Sema ÖZEL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Menfezlerin Tarihsel Gelişimi	2
1.3. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	3
1.4. Karayolu Menfezleri	6
1.4.1. Boru Menfezler	7
1.4.2. Kutu Menfezler	7
1.4.3. Tabliyeli Menfezler.....	10
1.5. Menfezlerin Tasarım Esasları	10
1.5.1. Malzeme Seçimi.....	10
1.5.2. Menfezlerin Yatay ve Düşey Yerleşimi.....	11
1.5.3. Menfez Giriş ve Çıkış Yapıları	13
1.5.4. Menfez Akış Kontrol Tipleri.....	14
1.5.5. Hidrolik Tasarım Yöntemleri ve Debi Hesabı	15
1.5.5.1. Rasyonel Yöntem.....	16
1.5.5.2. Mcmath Metodu.....	19
1.5.5.3. Sentetik Yöntem.....	20
1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	25
2.1. Menfezin Yapısal Geometrisi ve Malzeme Özellikleri.....	25
2.2. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....	27

2.2.1.	Proje Akslarının Oluşturulması.....	27
2.2.2.	Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması.....	28
2.2.3.	Kesit Özelliklerinin Oluşturulması	28
2.2.4.	Modelin Sonlu Elemanlara Ayrılması	30
2.2.5.	Temel Zemin Etkileşiminin Tanımlanması	30
2.2.6.	Yüklemelerin Menfez Modeline Tanımlanması	32
2.2.6.1.	Dolgu Yüğü.....	32
2.2.6.2.	Menfez Tabanında Oluşan Su Etkisi.....	33
2.2.6.3.	Yanal Toprak Basıncı	34
2.2.6.4.	Deprem Etkisi Altında Dinamik Toprak İtkisi.....	39
2.2.6.5.	Taşıt Yüğü.....	45
2.2.7.	Yük Birleşimleri.....	45
2.2.8.	Menfezin 3 Boyutlu Görünüşleri	46
2.3.	Çerçeve Sistem Modelinin Oluşturulması	49
2.4.	Menfez Modellerinin Analizi.....	51
3.	İRDELEME	52
3.1.	Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Modelinin Analiz Sonuçları.....	52
3.1.1.	Yer Değişirmeler.....	52
3.1.2.	Kesit Tesirleri.....	54
3.1.3.	Donatı Hesabı.....	56
3.2.	Düzlem Çerçeve Sistemin Analiz Sonuçları.....	57
3.2.1.	Yer Değişirmeler.....	57
3.2.2.	Kesit Tesir Diyagramları.....	58
3.2.3.	Menfez Temelinde Emniyet Gerilmesi ve Kesme Kontrolü.....	59
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
5.	KAYNAKLAR	62

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

KARAYOLU KUTU MENFEZ YAPILARINDA FARKLI TASARIM
YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Sema ÖZEL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şevket ATEŞ
2019, 64 Sayfa

Bu tez çalışmasında, karayolu drenaj yapılarının önemli bir parçası olan betonarme kutu menfezlerin çözüm yöntemleri karşılaştırılmalı olarak ele alınmıştır. Sıklıkla kullanılan düzlem çerçeve sistem yöntemi, gerçeğe daha yakın analiz imkânı sağlayan üç boyutlu sonlu elemanlar yönetimi ile kıyaslanmıştır. Hazırlanan bu tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde karayolu menfezlerinin tanımı, kullanım alanları, türleri ve hidrolik tasarım yöntemleri açıklanmıştır. İkinci bölümde; bu çalışmaya konu olan Amasya-Turhal karayolu güzergahı üzerinde yapılan betonarme kutu menfeze ait yapısal özellikler belirlenerek, düzlem çerçeve ve üç boyutlu model SAP2000 sonlu elemanlar programında oluşturulmuştur. Daha sonra yapısal yükler tanımlanmış ve modellerin analizleri yapılmıştır. Üçüncü bölümde iki yönteme ait analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Modellere ait şekil değiştirme miktarları, moment ve kesme kuvvetlerinin maksimum değerleri ve kesit tesir diyagramları iki yöntem için de sunulmuştur. Dördüncü bölümde bu çalışmadan çıkarılabilecek başlıca sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda her iki yöntem incelendiğinde, analiz sonuçlarının büyük oranda benzerlik gösterdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Menfezler, Sonlu Elemanlar, Çerçeve Sistem, Yapısal Analiz, Tasarım Yöntemleri

Master Thesis

Summary

COMPARASSION OF DIFFERENT DESIGN METHODS FOR HIGHWAY BOX
CULVELTS

Sema ÖZEL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şevket ATEŞ
2019, 64 Pages

As box culverts are crucial components of any highway drainage system, in this thesis, various solutions will be examined in comparatively fashion. The frequently adopted solution, namely, frame system in plane and 3D finite-element management solution - which also yields to a more realistic analysis opportunity - are compared against each other. This thesis consists of four sections. The first section will attempt to define culverts which are used specifically in road construction; their various usage, types, and hydraulic designs will also be covered in detail. The second section will identify the structural features of RC box culverts that are used in Amasya Turhal highway; frame model and 3D finite-element models in SAP 2000 will be put forward. Furthermore, this section will describe the structural loads of deployed solution and analyze generated models. The third section will conduct a comparative analysis and evaluation of these methods; specifically, by their deformations, cross-sectional diagrams, maximum values for bending moment and shear forces. The fourth section will summarize a general consensus of evaluated methods above. Although similar results have been achieved by deployment of these methods, this section will conclude with recommendations for future applications.

Key Words: Reinforcement Concrete Culverts, Finite Elements, Structural Frame Systems , Structural Analysis, Design Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Amasya-Turhal yolu üzerinde yapılan kutu kesitli betonarme menfez	1
Şekil 2.	Menfez vb. yapılar için üretilen ilk beton borular (URL-1, 2019)	2
Şekil 3.	Boru kesitli betonarme menfez örneği (URL-4, 2019).....	7
Şekil 4.	Kutu kesitli betonarme menfez örneği, Amasya-Turhal karayolu.....	8
Şekil 5.	Menfez anosu birleşim detayı ve su tutucu bant yerleşim	9
Şekil 6.	Tipik kutu menfez en kesiti.....	9
Şekil 7.	Yüksek yoğunluklu polietilen boru menfez (URL-5, 2019).....	10
Şekil 8.	Oluklu Çelik Menfez (URL-6, 2019).....	11
Şekil 9.	Menfezlerin yerleşim planı	12
Şekil 10.	Menfezlerin yol güzergâhı boyunca düşey yerleşimi – en kesitler.....	12
Şekil 11.	Menfez girişinde akım kontrolü (FHWA, 2012)	13
Şekil 12.	Menfez Girişi – Plan	14
Şekil 14.	Türkiye’deki kritik yağış süreleri (KTEK, 2016)	22
Şekil 15.	Türkiye’de yağışın zaman içerisindeki dağılımı (KTEK, 2016).....	23
Şekil 16.	Menfezin yol platformuna göre planı.....	25
Şekil 17.	Menfez boy-kesiti	26
Şekil 18.	Menfez en-kesiti.....	26
Şekil 19.	Proje akslarının görünümü	27
Şekil 20.	Malzeme özelliklerinin tanımlanması.....	28
Şekil 21.	Menfez tavan kesitinin programda tanımlanması	29
Şekil 22.	Modelin sonlu elemanlara ayrılması	30
Şekil 23.	Yük türlerinin tanımlanması	32
Şekil 24.	Yapısal dolgu yükü	33
Şekil 25.	Sükûnet, aktif ve pasif durumlar için yanal toprak basınçları	34
Şekil 26.	Z derinliğinde oluşan düşey ve yatay gerilmeler	35
Şekil 27.	Menfez cidarlarına etkiyen yanal toprak basınçları	36
Şekil 28.	Toprak itkisine ait yükleme değerleri, XZ görünümü.....	38
Şekil 29.	Sol cıvarda oluşan yanal toprak itkisi	38

Şekil 30. AFAD Türkiye deprem tehlike haritaları uygulaması (URL-7, 2019).	40
Şekil 31. Deprem durumdaki yanal toprak basıncı	42
Şekil 32. Deprem durumdaki yükleme geometrisine ait değerler	43
Şekil 33. Deprem durumda sol cidara gelen yanal basınç kuvvetleri	44
Şekil 34. Deprem durumda sağ cidara gelen yanal basınç kuvvetleri.....	44
Şekil 34. Hareketli yüklemde dikkate alınan.....	45
Şekil 35. 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli (SAP2000).....	46
Şekil 36. Katı modele ait görünüş – yol ile birlikte (SketchUp).....	47
Şekil 37. Katı modele ait saydam görünüş – yol ile birlikte (SketchUp).....	47
Şekil 38. Katı modele ait 3D görünüş (SketchUp).....	47
Şekil 39. Çalışmaya konu olan menfez (inşaat süreci)	48
Şekil 40. Çalışmaya konu olan menfez (Amasya-Turhal karayolu)	48
Şekil 41. Çerçeve sistem frame elemanları	49
Şekil 42. G ve Q yüklemeleri	50
Şekil 43. Statik ve dinamik durumdaki yanal toprak itkisi (H ve DH)	50
Şekil 44. Düzlem çerçeve sistem sonlu elemanlar modeli	51
Şekil 45. 1 ve 2 numaralı yük birleşimlerinden elde edilen yer değiştirmeler.....	52
Şekil 46. 4 ve 5 numaralı yük birleşimlerinden elde edilen yer değiştirmeler.....	53
Şekil 47. Cidarda oluşan M22 momentlerine ait kontur diyagramları.....	54
Şekil 48. Taban ve tavanda oluşan M11 momentlerine ait kontur diyagramları	54
Şekil 49. Zarf yüklemesine ait V23 kesme kuvveti diyagramı	55
Şekil 50. Zarf yüklemesine ait V13 kesme kuvveti diyagramı	55
Şekil 51. Cidarlarda gerekli donatı alanı (A_{st})	56
Şekil 52. 4 ve 2 numaralı yük birleşimlerinden elde edilen moment diyagramları	58

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Drenaj elemanlarının taşkın tekerrür aralıkları	17
Tablo 2. Yüzeysel akış katsayıları (Karayolları Tasarım El Kitabı, 2016)	18
Tablo 6. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeline göre maksimum yer değiştirmeler	53
Tablo 7. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeline göre eğilme momentleri	55
Tablo 8. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeline göre kesme kuvvetleri	56
Tablo 9. Düzlem çerçeve modeline ait maksimum yer değiştirmeler	57
Tablo 10. Çerçeve sistem modeline göre maksimum eğilme momentleri	59
Tablo 11. Çerçeve sistem modeline göre maksimum kesme kuvvetleri	59

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Alan
A_i	: Farklı zemin yapılarının yüzey alanı
b_w	: Genişlik
C	: Akış katsayısı
C_B	: Bitki örtüsüne bağlı yüzeysel akış katsayısı
C_i	: Farklı zemin yapıları için akış katsayıları
C_T	: Topografik yapıya bağlı yüzeysel akış katsayısı
C_Z	: Zemin cinsine bağlı yüzeysel akış katsayısı
d	: Kalınlık
DD-2	: Standart tasarım deprem yer hareketi
f_{ctd}	: Betonun tasarım çekme dayanımı
F_r	: Froude sayısı
F_S	: Yerel zemin etki katsayısı
H_i	: Dere yatağındaki kot farkı
h_a	: Akışa geçen yağış miktarı
I	: Maksimum akış şiddeti
K	: Toprak basıncı katsayısı
K_d	: Dinamik durum toprak basıncı katsayısı
k_h	: Yatay statik-eşdeğer deprem katsayısı
K_t	: Toplam yanal toprak basıncı katsayısı
k_v	: Düşey statik-eşdeğer deprem katsayısı
L_1	: Arazi üstü akış uzunluğu
L_i	: Dere yatağının uzunluğu
P	: Yanal toprak basıncı
PGA	: En büyük yer ivmesi
PGV	: En büyük yer hızı
S	: Dere yatağının eğimi
S_h	: Dere yatağının harmonik eğimi
S_1	: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı

S_{DS}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
t_1	: Arazi üstü akış süresi
t_c	: Konsantrasyon süresi
t_i	: Ana dere yatağındaki mecrâ akış süresi
T_p	: Hidrografın yükseltme zamanı
V_d	: Kesme Dayanımı
V_1	: Arazi üstü akış hızı
z	: Basınç derinliği
β	: Zemin yüzeyinin yataya göre eğim açısı
γ	: Birim hacim ağırlığı
Q	: Akış debisi
q_p	: 1mm'lik akışa neden olan izafi debi
δ_h	: Yanal gerilme değeri
δ_v	: Düşey gerilme değeri
Φ'_d	: Zemin kayma direnci açısı
δ_d	: Zemin ile duvar arasındaki sürtünme açısı
ψ	: Duvarın yatayla yaptığı açı
θ	: Sismik açı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Menfezler karayollarının veya demiryollarının altına inşa edilen tünel benzeri geçit yapılarıdır. Özellikle yağışla birlikte akışa geçen suyun drenajını sağlayarak yolun zarar görmesini engellemek veya kablo, boru vb. malzemeleri yolun altından geçirebilmek amacıyla inşa edilirler. Kullanım amacına veya bulunduğu yere göre farklı türleri olan menfezlerin temel görevi yolun bir tarafından diğer tarafına enine geçişler sağlamaktır. Menfezler yaya veya trafik geçişine uygun yapıda tasarlanması durumunda altgeçit görevi de görmektedirler.

Karayollarında Şekil 1’de gösterildiği gibi özellikle betonarme menfezler tercih edilse de çeşitli şekil ve boyutlarda çelik veya boru tipi plastik menfezler de kullanılmaktadır. Özellikle daha basit yapıdaki eski tip menfezlerde ise taş duvarlara veya killi yapılara rastlanmaktadır. Bunların yanı sıra yapıların kapalı bölümlerindeki havalandırma çıkışları da menfez olarak anılmaktadır.



Şekil 1. Amasya-Turhal yolu üzerinde yapılan kutu kesitli betonarme menfez

1.2. Menfezlerin Tarihsel Gelişimi

Tarihte insanların yerleşik hayata geçmesiyle birlikte yaşam alanlarda bir takım barınma ihtiyaçları doğmuştur. Bu ihtiyaçlar neticesinde insanlar kendilerine barınma alanları inşa ederek ilk yerleşim örneklerinin temelini oluşturmuşlardır.

Romalılar bağlayıcı özelliğini keşfettikleri çimentonun günümüzdeki haline yakın bir formunu geliştirerek şehirlerinde büyük binaların, farklı yapıların, geçitlerin ve su kanallarının inşasında kullanmışlardır. Romalıların kullandığı bu geçit benzeri kanallar aslında ilk menfez yapısının temelini oluşturmaktadır.

Günümüzdeki haline benzer yapıdaki ilk menfez örneği beton borular kullanılarak 1842 yılında Amerika'nın New York şehrinde yapılmıştır (ASCE, 2008). Bu menfezlerin yapımında kullanılan beton borularda çelik donatı olmaması sebebiyle zaman içerisinde daha sağlam borulara ihtiyaç duyulmuştur. Fransız Joseph Monier'in 1867 yılında patentini aldığı çelik hasır takviyeli beton bloklar üretme fikri neticesinde betonarme menfezlerin temeli atılmıştır. Bunun gelişmeyle birlikte Fransızlar 1896 yılında çelik donatılarla güçlendirilmiş betonarme borular üreterek daha sağlam menfezlerin inşa edilmesine olanak sağlamışlardır. 1900'lü yılların başında betonarme borularda seri üretime geçilmesi ile birlikte bu yenilik farklı ülkelere yayılmış ve şehirlerde betonarme menfezler inşa edilmeye başlamıştır.



Şekil 2. Menfez vb. yapılar için üretilen ilk beton borular (URL-1, 2019)

1.3. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Menfezler, geçit benzeri yer altı kanalları, havalandırma boşlukları veya bazı mezarlar aslında yapısal olarak birbirleriyle benzerlik gösteren ve tarih boyunca sürekli olarak karşılaşılan inşaat yapılarıdır. Bu yapıların ilk örnekleri belirli bir standart veya yapım kuralına dayanmadan oldukça basit formlarda ve gelişi güzel bir şekilde inşa edilmiştir. Zaman içerisinde artan ihtiyaçlar ve bilimsel alandaki gelişmeler sonucunda bu belirsizlikler yerini birtakım yapım kurallarına bırakmıştır. Bu kuralların zamanla bir standart haline getirilmesi sonucunda farklı yapı türleri için teknik şartnameler ve yönetmelikler geliştirilmiştir. Menfezler yapılan bu çalışmaların neticesinde en basit halinden başlayarak günümüze kadar sürekli bir gelişim göstermiştir.

Mulvany (1851), yaptığı çalışmalar sonucunda günümüzde de halen kullanılan rasyonel yöntemi ortaya atan ilk mühendis olmuştur. Thomas Mulvany maksimum debiyi elde etmek amacıyla havza alanını, akış katsayısını ve yağış şiddetini içeren bir bağıntı ortaya atmıştır. Böylece menfez tasarımına yönelik ilerleyen yıllarda yapılacak olan hidrolik hesapların temelini oluşturmuştur.

Gillespie (1853), çalışmalarını yol yapım kuralları ve uygulamaları isimli bir yönetmelikte toplayarak menfez yapımına dair bazı temel prensipleri ortaya atmıştır. Gillespie bu çalışmasında menfez boyutlarının oluşması muhtemel en büyük taşkın miktarıyla orantılı olarak belirlenmesi gerektiğinden bahsetmiştir. Ayrıca menfezlerin bir kişinin içerisine girip temizleyebilmesine imkân tanıyacak yeterlilikte geniş olması gerektiğini savunmuştur. Gillespie ekonomik olmayan ve oldukça büyük boyutlu tasarımlara yol açan en eski ampirik formülleri geliştirmiştir.

Byrne (1908), karayolu inşaatı ve düzenlemesine dair yaptığı incelemelerde menfez tasarımındaki ekonomik kaygılara dikkat çekerek menfezlerin optimum boyutlarda tasarlanması gerektiğini savunmuştur. Boyutlandırmadaki abartının ekonomik olmayan sonuçlar tasarımlar doğurduğunu belirtmiş ve çalışmalarını boyutlandırma esasları üzerinde yoğunlaştırmıştır.

1900'lü yıllarda geliştirilen Dun drenaj tablosu (1906) ile akarsu akışı ve/veya yağış miktarına bağlı olarak belirlenen frekans (tekerrür süresinin) değerlerini içeren tabloların yardımıyla hidrolik hesaplarda kullanılan ampirik formüller biraz daha geliştirilmiştir (URL-2, 2019).

1926 yılında Iowa Üniversitesi ve Amerikan Karayolları Ofisinin yapmış olduğu çalışmada menfezlerde malzemeye bağlı olarak hidrolik pürüzlülük katsayısının dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Aynı çalışmada menfezlerin mansap giriş (ağız) ve çıkış kısımlarında akım kontrolünün önemi de dikkat çekilmiştir (Şen, 2017).

1965 yılında Amerikan Federal Karayolu İdaresinin (FHWA) karayolu menfezlerinin seçimi için çizelgeler yayınlamasıyla birlikte menfezlerin hidrolik tasarımında daha gelişmiş yöntemlere geçilmiştir. FHWA tarafından yapılan çalışmada menfezlerin hidrolik kapasitelerinin belirlenmesi için giriş ve çıkış kontrolünde farklı faktörlerden ve formüllerden yararlanılmıştır. Menfezlerde giriş bölgesinin kontrolünde menfez en kesiti, giriş geometrisi ve akışa geçen debiye vurgu yapılmıştır. Çıkış kontrolünde ise kuyruk suyunun yüksekliği, eğim, pürüzlülük ve menfez uzunluğu gibi etkenler dikkate alınmıştır. (HEC 5, 1965).

Normann (1975), FHWA için yapmış olduğu bir çalışmada, standart bir karayolu menfezini genellikle taban ve tavanında sabit bir eğimde ve bütün kanalı boyunca aynı kesitte olan menfez olarak tanımlamaktadır. Normann, bu menfezlerin ağız yapısındaki akış koşullarının geliştirilmesi sonucunda daha fazla su akışına izin vereceğini ortaya koymuştur. Geliştirilmiş ağız yapısına sahip menfezlerde gövde pürüzlülüğün azaltılmasının menfez kapasitesi artırdığına dikkat çekmiştir (URL-3, 2019).

Öztürk vd. (2003), taşkın debilerine göre boyutlandırılan menfezler üzerinde yaptıkları çalışmada farklı debi tahmin yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Seçilen farklı derelere sırasıyla Mockus, DSİ sentetik ve rasyonel yöntemleri uygulamışlardır. Çalışma sonunda en büyük debinin Mockus yöntemi ile elde edildiği gözlenmiştir. Bu sonuçlara bakılarak özellikle 100 yıllık taşkınlarda en güvenilir sonuçları Mockus yönteminin verdiği anlaşılmaktadır. Buna göre menfez tasarımında Rasyonel yöntem yerine Mockus yönteminin kullanılmasının daha doğru olacağı tavsiye edilmiştir.

Çalışkan (2007), karayolları drenaj sistemlerinde ele alınan hidrolik tasarım yöntemlerini incelemiş ve bu alanda özellikle ülkemizde hidrolik kriterlerin dikkate alınması konusundaki eksikliklere vurgu yapmıştır. Yaygın olarak kullanılan yöntemlerde debinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için farklı tasarım koşullarının dikkate alınması gerektiğini savunmuştur.

Kim ve Yoo (2005), dolgu yüksekliğinin fazla olduğu kutu menfezlerde zemin yapı etkileşimini daha gerçekçi bir yaklaşımla inceleyebilmek amacıyla, dolgu derinliği 15m ile 61m arasında değişen kutu menfezlerin sonlu elamanlar yöntemine göre analizlerini

gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada elde ettikleri verileri değerlendirmişler ve zemin birim hacim ağırlıkları da içeren formüller yardımıyla toprak itkisi benzeri zemin etkilerini yapıya gerçekçi bir biçimde yansıtabilecek denklemler geliştirmeye çalışmışlardır.

Kang vd. (2009), kritik fırtına süresini hesaba kattıkları birim hidrograf modelinden elde ettikleri akış parametrelerinin, çalışmalarında gözlemledikleri verilerle yakın bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Rasyonel yöntemle elde ettikleri taşkın tasarım değerlerinin ise bu değerlerden daha düşük olduğunu hesaplamışlardır. Taşkın tasarımında ve uygun menfez boyutlarının belirlenmesinde kullanılan farklı yöntemler olsa da tasarımlarda kritik fırtına süresinin önemine dikkat çekmişlerdir.

Kolate vd. (2014), kutu menfezlerle ilgili yaptıkları çalışmada bu menfezlerin yükü zemine daha güvenli bir biçimde yayması nedeniyle özellikle yumuşak zeminlerde avantajlı olabileceğini göstermişlerdir. Çalışmalarında ayrıca menfez üzerindeki dolgu yüksekliğinin artması durumunda hareketli yük etkisinin azalacağını savunmuşlardır.

Abuhajar vd. (2015), statik yükler altında kutu kesitli betonarme menfezlerin zemin ile olan etkileşiminde hangi parametrelerin etkili olduğunu araştırmışlardır. Bu amaçla laboratuvar ortamında test edilmek üzere normal bir menfeze oranla küçültülmüş menfez modelleri kullanılmışlardır. Deneyde dolgu yüksekliğinin, zemin birim hacim ağırlığının ve menfez geometrisinin bu etkileşimdeki etkisini incelemişlerdir. Elde edilen verileri ise menfezlerin statik yüklere göstereceği davranışı araştırmak amacıyla kullandıkları sayısal modelde ele almışlardır. Yapılan çalışma sonucuna göre zemin menfez etkileşiminde sadece dolgu yüksekliğinin etkili olmadığı; bununla birlikte menfez kalınlığının, zeminin elastisite modülünün ve poisson oranının da etkili olduğunu gözlemlemişlerdir.

Krishna ve Rao (2017), menfezlerde zemin yapı etkileşiminin kesit tesirleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla seçmiş oldukları menfezi, zemin yapı etkileşiminin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda sonlu elemanlar yöntemine göre iki farklı şekilde modellemişlerdir. Yaptıkları analiz sonuçlarına göre, zemin yapı etkileşiminin dikkate alınmaması durumunda cidarlarda ve tavanda eğilme momentlerinin %15 ile %19 arasında arttığını, kesme kuvvetlerindeki artışın ise yine aynı elemanlarda %27 ile %31 arasında değişiklik gösterdiğini belirlemişlerdir.

Betonarme menfezlerde zamanla meydana gelen bozulma etkilerini azaltmak veya değişen yük etkilerine karşı dayanımının artırılması amacıyla güçlendirme gerekebilir. Simpson vd. (2017), yaptıkları deneysel çalışmada boru kesitli betonarme menfezlerin

güçlendirilmesinde kullanılan kazısız güçlendirme (sliplining) yöntemini incelemişlerdir. Bu amaçla aynı tip iki hasarlı boru tipi menfez belirli bir derinliğe gömülerek içerisine yüksek yoğunluklu polietilen malzemedan üretilmiş dairesel kesitli bir katman yerleştirilmiştir. Aradaki boşluk ise yüksek dayanımlı harçla doldurulmuş ve menfezler bu işlemin öncesinde ve sonrasında yük altında test edilmiştir. Yapılan deney sonucunda menfez dayanımının önemli ölçüde arttığı ve deformasyonların %90'a varan miktarda azaldığı tespit edilmiştir.

Kheradi vd. (2018), eski depremlerde ciddi hasarlar almış zemine gömülü yapılardan yola çıkarak, daha önce yapılmış ve özellikle yumuşak zemine gömülü bazı kutu menfezlerin sismik gereksinimleri yeterli oranda karşılayamayacağını ön görmüşlerdir. Bu sebeple bu tip menfezlerin sismik dayanımlarında, yapılacak olan zemin iyileştirmesinin etkisini araştırmışlardır. Buna göre ele aldıkları modele laboratuvar ortamında sarsma deneyleri uygulamışlar ve aynı zamanda yapıyı sonlu elemanlar yöntemine göre modelleyerek 2 boyutlu dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri verilere göre, deprem anında zemin yapı etkileşiminin önemine dikkat çekerek, zemin iyileştirmesinin menfezlerin deprem dayanımlarının artırılmasına katkı sağladığını kanıtlamışlardır.

1.4. Karayolu Menfezleri

Karayolu menfezleri yol güzergâhı ile akım çizgileri çakışan havza, dere ve akarsuların akışlarını devam ettirmek; inşa edilecek yol yapılarının işletme ömrü boyunca sudan zarar görmesini engellemek; yol üstyapısı altından yaya, hayvan ve araç geçişlerine izin vermek amacıyla inşa edilen sanat yapılarıdır.

Karayolu menfezlerinde kullanım amacı, kesit biçimi veya yapıldığı malzeme türü gibi özellikler dikkate alınarak farklı sınıflandırmalar yapılır. Yaygın olarak kullanılan sınıflandırmada kesit biçimine göre menfezler 4'e ayrılır.

- Boru Menfezler (Büz Menfezler)
- Kutu Menfezler (Box Menfezler)
- Kemer Menfezler
- Tabliyeli Menfezler (Standart Köprüler)

Drenaj amaçlı kullanılan menfezlerde en önemli faktör hidrolik kapasitedir. Menfezler eşit hidrolik kapasiteye sahip farklı kesit biçimlerinde inşa edilebilir. Yaya,

hayvan veya araç altgeçidi olarak kullanılan menfezlerde ise yol dolgusu kotu kesit boyutlarını belirler. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından belirli açıklıklar için tip proje abakları hazırlanmıştır. Menfezler drene edilecek suyun debisine göre uygun tip seçilip akar kotları belirlenerek inşa edilirler.

1.4.1. Boru Menfezler

Boru menfezler veya diğer adıyla büzler genellikle dolgu yüksekliğinin az olduğu yol bölümlerinde uygulanırlar. Dairesel kesitli, sepet kulplu gibi farklı şekillerde inşa edilirler. Beton ya da betonarme olarak önceden dökümü yapılan boru menfezler acil durum yol projelerinde veya bakım amaçlı işlerde kullanılırlar. Büz tipleri, cidar kalınlıkları, büzlerin yerleşimi, üretimlerinde kullanılan beton ve donatı çeliği Karayolları Teknik Şartnamesinde standart hale getirilmiştir (KTŞ, 2013).



Şekil 3. Boru kesitli betonarme menfez örneği (URL-4, 2019)

1.4.2. Kutu Menfezler

Kutu menfezler en yaygın olarak kullanılan menfez tipidir. Üst plak, alt plak, yan duvarlar (cidarlar), memba ve mansap tarafındaki kanat duvarlardan oluşan dikdörtgen kesitli (box) menfezler olup betonarme olarak inşa edilirler. Tek gözlü, çift gözlü ve üç gözlü tasarlanabilirler. Diğer kesit tiplerinden farklı olarak yüksekliği sabit tutulup açıklık

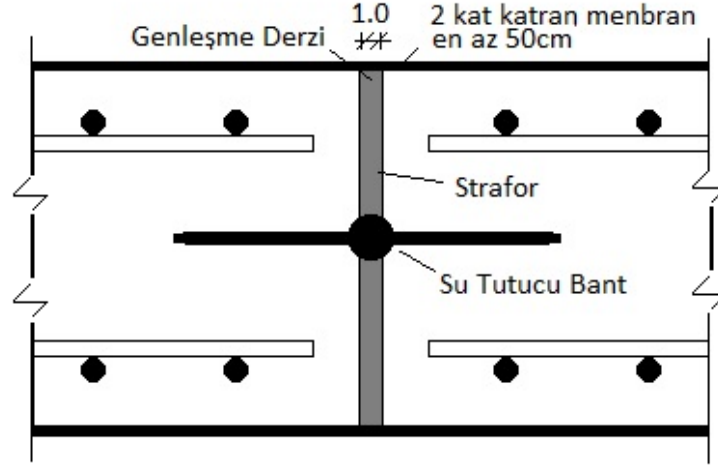
arttırılmasıyla hidrolik kapasitesi yükseltilebilir. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan ‘Standart Tek Gözlü Kutu Menfez Tipleri 2005’ ve ‘Standart Kutu Menfez Tipleri 2012’ kitapçıklarında farklı dolgu yükseklikleri için çeşitli ebatlardaki menfezlerin donatı detayları, proje ve yapıma dair notlar verilmiştir.



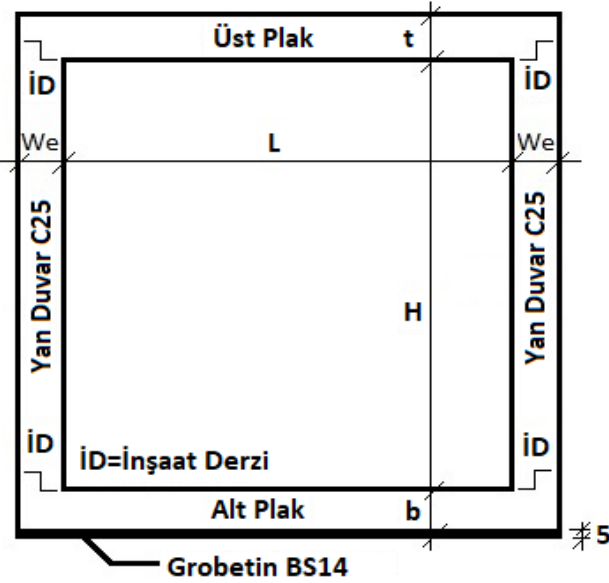
Şekil 4. Kutu kesitli betonarme menfez örneği, Amasya-Turhal karayolu

KGM Standart Kutu Menfez Tipleri kitapçığında yer alan bazı yapım notları;

- Menfezlerin yapımı sırasında temelin imal edileceği temiz bir zemin oluşturmak amaçlı tip kesitlerde belirtilen kalınlıkta C16 sınıfı grobeton dökülmelidir.
- Tipik Menfez Kesitinde gösterildiği gibi alt plak, yan duvarlar ve üst plakta beton dökümü sırasında inşaat derzi uygulanmalıdır.
- Menfezin zemin ile temas eden kısımları (üst plak, yan duvarlar) iki kat katran boya ile boyanmalıdır.
- Menfez boyunun 12 m’yi geçtiği durumlarda imalat anolar şeklinde yapılmalıdır. (Ano boyları en az 6 m olmalıdır). Ano boylarının 24 m’yi geçtiği durumlarda ise genişleme derzi yapılmalıdır. İnşaat derzi ve genişleme derzi detayları Şekil 5 ve Şekil 6’da gösterilmiştir. Genişleme derzi yapılan kısımlarda menfez eğiminin %2’den az olduğu durumlarda yastık, eğimin %2’den daha fazla olduğu durumlarda ise betonarme brit imal edilmelidir.
- Menfez giriş ve çıkış ağzlarında yol dolgusunu tutması için bordür uygulanmalıdır.



Şekil 5. Menfez anosu birleşim detayı ve su tutucu bant yerleşim



Şekil 6. Tipik kutu menfez en kesiti

1.4.3. Kemer Menfezler

Kemer menfezler, büz ve kutu menfezlerin aksine yüksek dolgular altında tercih edilirler. Kâgir ve beton kemerli şeklinde inşa edilirler. Kemer menfez imalatlarında KGM tarafından hazırlanan “Köprü Tipleri - Kemerli Menfez” kitapçığı kullanılır.

1.4.3. Tabliyeli Menfezler

Tabliyeli menfezler üst tabliye, beton veya kâgir kenar ayaklar ve ricat duvarlarından oluşan menfezlerdir. Beton tabliyeli ve kâgir tabliyeli şekilde imal edilirler. KGM tarafından hazırlanan ‘Standart Tabliyeli ve Kemerli Menfez’ kitapçığı imalat sırasında kullanılır.

1.5. Menfezlerin Tasarım Esasları

1.5.1. Malzeme Seçimi

Menfezler yaygın şekilde beton, betonarme, PVC, alüminyum veya çelikten üretilir. Malzeme seçimleri yapısal dayanıma, korozyona, aşınma dayanımına, yapım kolaylığına ve hidrolik pürüzlülüğe bağlıdır. Yaygın kullanılan malzemelere ek olarak korozyon ve aşınmayı engellemek için galvanizli oluklu çelik menfezlere asfaltlı beton ile kaplama yapılır.



Şekil 7. Yüksek yoğunluklu polietilen boru menfez (URL-5, 2019)



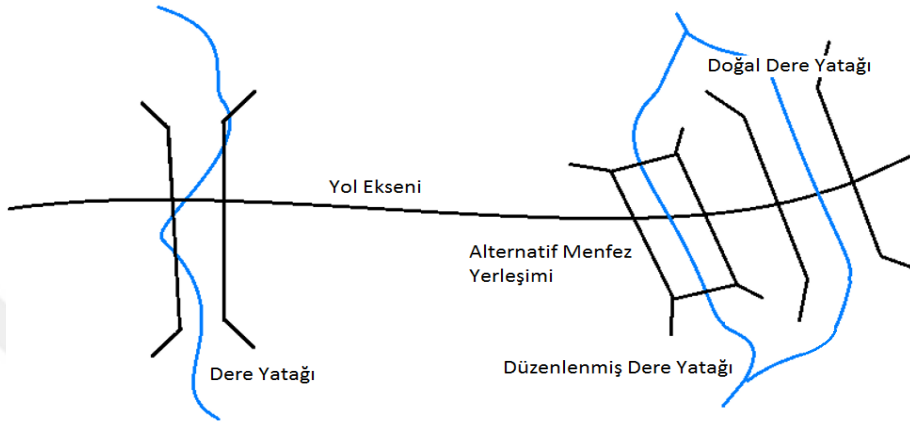
Şekil 8. Oluklu Çelik Menfez (URL-6, 2019)

1.5.2. Menfezlerin Yatay ve Düşey Yerleşimi

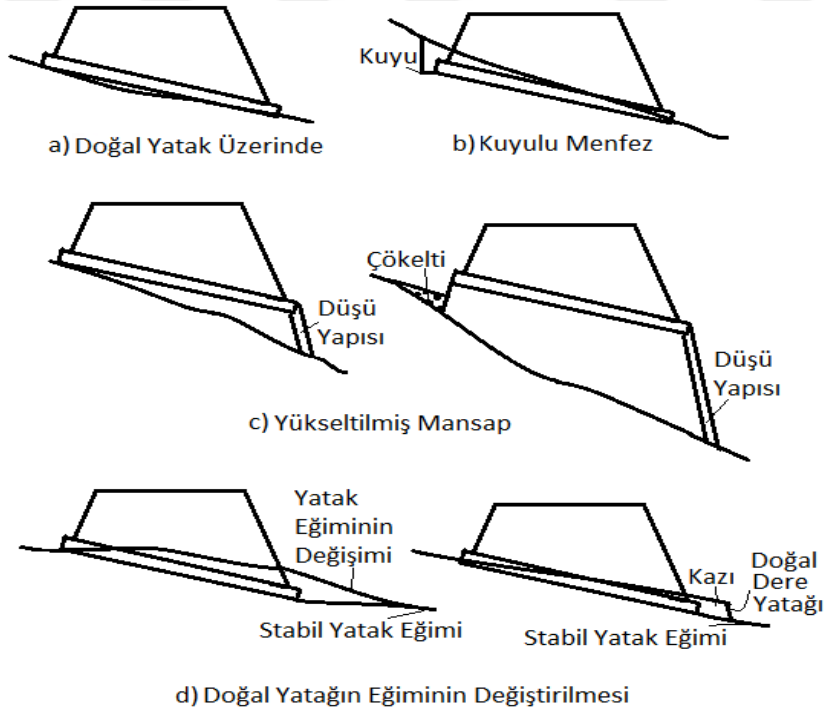
Menfezlerin dere yataklarına yerleşimi drenaj sistemlerinin doğru ve yeterli çalışması açısından büyük öneme sahiptir. Menfez kesitleri yeterli olsa dahi uygun yerleştirilmeyen menfez hidrolik kapasiteyi karşılamayabilir. Bu nedenle menfez yatay yerleşiminde dikkat edilmesi gereken en önemli adım yapısal stabiliteyi korumak, yapım ve bakım maliyetini en aza indirmek ve doğal dere yatağıyla uyumlu çalışmasını sağlamak için menfezin doğal dere yatağının yatay eksenine üzerine yerleştirilmesidir. Bu durum her zaman mümkün olmayabilir. Bazı dere yatakları kıvrımlı yapılarından dolayı tek menfezle geçilemez. Böyle durumlarda doğal dere yatağında düzenlemeler Şekil 9’da gösterildiği gibi yapılmalıdır. Yol üst yapısının kotundan dolayı menfezler dolgu tabanlarına yerleştirilir. Bu durum tercih edilen bir yöntem olmayıp menfez temelleri mümkün olduğunca doğal zemine oturtulmalıdır.

Menfezlerin düşey yerleşiminde ise doğal dere yatağının düşey eksenine takip edilir. Yol en kesitinin eğiminin uygun olmadığı durumlarda menfez konumu değiştirilmelidir. Menfez akar kotları ise dere akar kotuna göre belirlenir. Akarsu havzasının konumu, dere eğimi gibi bazı nedenlerden dolayı memba ve mansap taraflarında teressübat (akarsulardaki katı madde) birikmesi, oyulma gibi sorunlar oluşabilir. Bu sorunlara ilave kazı, beton veya anroşman kaplama vb. önlemler alınarak çözüm bulunur. Ekonomik,

hidrolik sebeplerden dolayı menfez profili ya da doğal dere eğiminin değiştirilmesi söz konusu olabilir. Böyle durumlarda doğal akışın bozulmasını önlemek, sedimentasyonu minimuma indirmek ve hidrolik performansı arttırmak için boyutlarında değişiklik yapılmalı ve ilave önlemler alınmalıdır.



Şekil 9. Menfezlerin yerleşim planı

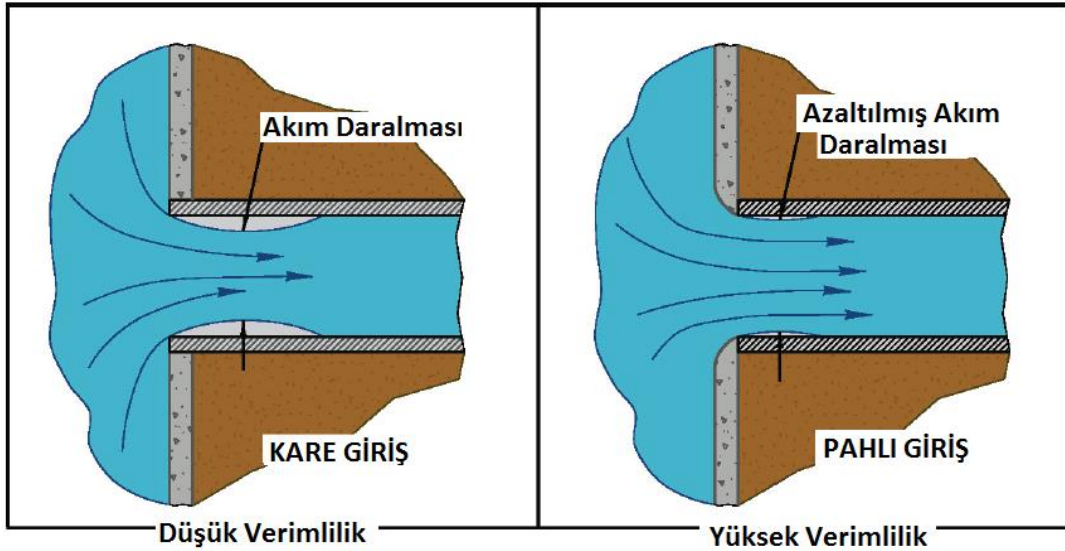


Şekil 10. Menfezlerin yol güzergâhı boyunca düşey yerleşimi – en kesitler

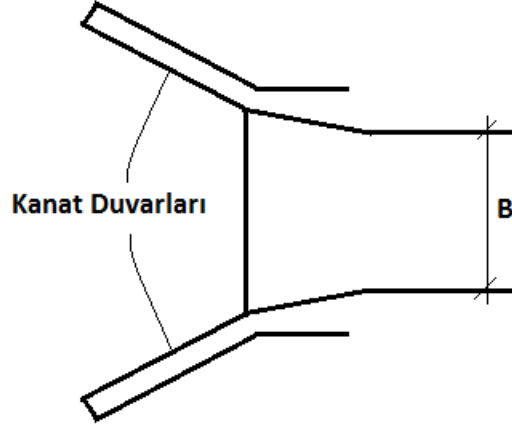
Doğal dere yatağının eğiminin %10 geçtiği durumlarda ise su akış hızının fazlalığı menfez tabanında aşınmaya neden olur. Çözüm olarak memba kısmına enerji kırıcı yapılması gibi önlemler alınarak akış hızı azaltılmalıdır.

1.5.3. Menfez Giriş ve Çıkış Yapıları

Menfez giriş ve çıkış yapılarının tasarımında yapısal stabilite, estetiklik, erozyon kontrolü ve yol dolgusunu tutma özellikleri dikkate alınır ve çoğunlukla yerinde dökme veya prefabrik olarak imal edilir. Menfezlerin hidrolik kapasiteleri giriş yapılarının tasarımıyla geliştirilebilir. Doğal dere menfez ağzından daha geniş olduğu için menfez girişinde akım daralır ve birincil akış kontrollü sağlanır. Kare girişlere nazaran pahlı girişler kademeli akış geçişini sağladığı için enerji kaybını azaltarak hidrolik olarak verimliliği artırır (Şekil 11). Yaygın olarak kullanılan geliştirilmiş giriş olarak adlandırılan konik girişler (kanat duvarları) enerji kaybını daha da azaltmaktadır (Şekil 12). Menfez çıkış yapıları ise akış hızını azaltıp doğal dere akış hızına yaklaştırmak, dolgu kısımlarını desteklemek için yapılır.



Şekil 11. Menfez girişinde akım kontrolü (FHWA, 2012)



Şekil 12. Menfez Girişi – Plan

1.5.4. Menfez Akış Kontrol Tipleri

Menfezlerde akım yarı dolu akım (partly full flow) ve tam dolu akım (full flow) olmak üzere iki şekilde incelenir. Menfezin tam dolu akış hali basınçlı akım olarak adlandırılır (FHWA, 2012). Yarı dolu akım ise aşağıda verilen (1) denklemi yardımıyla hesaplanan froude sayısına göre belirlenir. Burada v , hızı (m/sn); g , yerçekimi ivmesini ($9,81 \text{ m/sn}^2$) ve h , hidrolik derinliği göstermektedir.

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

Hesaplanan froude sayısına göre menfez içerisindeki su akımı aşağıda verilen kriterlere göre değerlendirilir.

$F_r > 1$ çok kritik akım (su seviyesi düşük, hız yüksek)

$F_r = 1$ kritik akım

$F_r < 1$ kritik altı akım (su seviyesi yüksek, hız düşük)

Menfezlerde pürüzlülük, eğim, giriş ve çıkış yapıları gibi faktörlerden dolayı farklı akış koşulları oluşabilir. Akımın çok kritik, kritik veya kritik altı olması akış kontrol tipinin ve türünü belirlenmesine yardımcı olur. Hidrolik tasarımda kullanılan NBS (Ulusal Standartlar Bürosu) ve FHWA (Amerikan Federal Karayolları idaresi) tarafından yapılan

araştırmada tanımlanan iki temel akış kontrol tipi vardır. Menfezlerin debi ve hız hesapları kontrol tiplerine göre hesaplanır.

- Giriş Kontrollü (Menfez Girişinde Su Kabarması)
- Çıkış Kontrollü (Menfez Çıkışında Su Kabarması)

1.5.5. Hidrolik Tasarım Yöntemleri ve Debi Hesabı

Karayolları üstyapı tabakasında yüzeysel suların ve yeraltı sularının drenajı yolun performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle karayolu projelerinde güzergâh seçimi, kaplamaların belirlenmesi gibi aşamalarda drenaj sistemleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Yetersiz drenajda yol üstyapısında (asfalt tabakası) meydana gelebilecek bölgesel oturmalar, çökmeler, kabarmalar ve enine çatlaklar kalıcı deformasyonlar olup trafik güvenliğini tehlikeye atmakta ve yol bakım maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle karayolu güzergâhı boyunca drenaj sistemlerinin önceden planlanması gerekmektedir.

Karayolu drenajı tasarımı iki bölümde planlanır.

- Yüzeysel drenaj yapıları
- Yeraltı drenaj yapıları

Menfezler yüzeysel drenaj yapıları olup yağışla birlikte akışa geçen yüzeysel suları toparlayarak güvenli bir şekilde yolun diğer tarafına geçiren yapılardır. Menfez tasarımında yol platformuna uygun geometrinin seçimi, menfezin hidrolik verimi ve ekonomik şartlar optimum ölçüde dikkate alınır. Aynı zamanda diğer drenaj yapıları ile uyumlu bir şekilde projelendirilmesi karayolunu drenajı açısından önemlidir.

Menfezler uygun tasarlanmadığı takdirde aşırı yağışla birlikte akışa geçen yüzeysel sular yolun dolgu olan kısımlarında erozyona neden olur. Bu durum dolgu zeminin stabilitesini azaltır ve üst yapı kaplamalarında menfez üstüne gelen kesimlerde deformasyon, oturma gibi bozulmalar gözlemlenir.

Menfez tasarımlarında öncelikli olarak çevre şartları değerlendirilerek menfez tipi seçilir ve kesit boyutlandırılır. Menfez tipi seçimi ve boyutlandırma için en önemli faktör akışa geçmesi beklenen su miktarı olup, öncelikli olarak menfeze gelecek debinin bulunması gerekir. Bu amaçla karayolu projelerinde güzergâh boyunca dere yatakları ve havza alanları belirlenmelidir. Bununla birlikte bölgenin yağış miktarına ve güzergahın

geçtiği bölgede meydana gelebilecek en şiddetli taşkına göre akış miktarı hesaplanır. Akış miktarının hesabında farklı yöntemler kullanılsa da genellikle bölge için gerçeğe en uygun debiyi veya maksimum debiyi veren yöntemin seçilmesi hidrolik tasarımda önemli bir kriterdir.

Yağış sonucu akışa geçen maksimum debi hesabında istatistiksel verilere dayanan yöntemlerin yanında; DSİ sentetik yöntem, Mockus yöntemi, Snyder yöntemi, Rasyonel yöntem ve Mc Math yöntemi gibi farklı metotlar kullanılmaktadır. Hidrolik tasarım menfez tasarım aşamalarının önemli bir parçası olup bu aşamada hesaplanan debinin doğru tahmin edilmiş olması menfezin verimliliği açısından çok önemlidir.

Olması gerekenden daha az miktarda bir debiyi proje debisi olarak dikkate almak drenaj yapısının kapasitesini düşüreceğinden, karayolu projesinin yer yer zarar görmesine sebep olmaktadır.

Proje debisinin gereksiz bir biçimde çok yüksek seçilmesi ise proje yapım maliyetini arttıracığından dolayı ekonomik olmayan sonuçlar doğurmaktadır.

1.5.5.1. Rasyonel Yöntem

Menfez tasarımında yağışla birlikte akışa geçen debinin bulunmasında en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi rasyonel metottur. Karayolları menfez tasarımında genellikle bu yöntemi kullanılmaktadır. Rasyonel Metot alanı 10-15 km²'yi geçmeyen havzalardaki menfez tasarımları için uygun olsa da 5 km²'den küçük alanlarda daha iyi sonuçlar vermektedir (KTEK, 2016). Bu yöntemle göre menfez boyutlandırılmasında dikkate alınacak debi aşağıda belirtilen (2) denkleme göre hesaplanmaktadır. Burada Q, akış debisini (m³/sn); C, akış katsayısını; I, maksimum yağış şiddetini (mm/h) ve A, yağış alanını (ha) göstermektedir.

$$Q = CIA / 360 \quad (2)$$

Yağmur sularının toplandığı sınırlı bir alan için yağışın meydana getirdiği yüzeysel akış miktarı yağış şiddetiyle bağıntılıdır. Yağış şiddeti ise yağış tekrür sayısı ile doğru orantılı, yağış süresi ve yağış alanıyla ters orantılıdır.

Yol güzergâhının geçtiği bölgedeki en yakın istasyon verilerine göre Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan yağış şiddeti - süre - tekrür eğrilerine göre yağış şiddeti belirlenir.

Arazi üstü akış süresi ve mecra akış süresinin toplamı olan konsantrasyon süresi (T_c) ile meteorolojik kayıtlara bağlı abaklar yardımıyla yağış şiddeti (I_n) değeri bulunur.

Tablo 1. Drenaj elemanlarının taşkın tekerrür aralıkları

Drenaj Elemanı	Taşkın Tekerrür Aralığı
Refüj, Kenar, Kafa, Topuk Hendekleri	10 Yıl
Palye Hendekleri	10 Yıl
Kademeli Hendekler	10 Yıl
Özel Hendekler	10-25 Yıl
Toplayıcı Borular (Kollektörler)	2-10 Yıl
Enine Deşarj Yapıları	2-10 Yıl
Asfalt Bordür ve Düşük Olukları	10 Yıl
Şütler (Kolektöre Deşarj Durumunda)	10 Yıl
Şütler (Menfeze Deşarj Durumunda)	10 Yıl
Menfezler (Projelendirme için)	Önemine Göre Seçilecek
Menfezler (Kontrol için)	10 Yıl
Menfezler (Taşkın Alanının Önemine göre)	100 Yıl
Menfez Giriş ve Çıkış Yapıları	10 Yıl
Köprüler	100 Yıl - 500 Yıl

Yağışın başlamasından suyun menfeze ulaşması arasındaki geçen süreye konsantrasyon süresi denir. Bu sürenin sonunda yüzeysel akış debisi maksimum seviyeye ulaşır. Maksimum yüzeysel akış debisi ile suyu emniyetle drene edebilecek menfezin boyutları belirlenir.

Konsantrasyon süresi (T_c), arazi üstü akış süresi (t_1) ve ana dere yatağındaki mecra akış süresinin (t_i) toplamına eşittir. Arazi üstü akış süresi (t_1) aşağıda belirtilen (3) denklemi yardımıyla hesaplanır. Burada L_1 , arazi üstü akış uzunluğunu; V_1 , arazi üstü akış hızını göstermektedir.

$$t_1 = L_1 / (V_1 \cdot 60) \quad (3)$$

V_1 arazi eğimi %2'den küçük ise 0,08-0,15 m/s; %2 ve %4 arası ise 0,15-0,21 m/s ve %4 'ten büyük ise 0,21-0,30 m/s alınmalıdır (KTEK, 2016).

Ana dere üzerinde mecra akış süresi (t_i) ise (4) denklemi yardımıyla hesaplanır. Burada L_i , dere yatağı uzunluğunu ve H_i , dere yatağındaki kot farkını belirtmektedir.

$$t_i = 0,0195(L_i^3 / H_i)^{0,0385} \quad (4)$$

Yağış havzasında yağmur sularının bir kısmı zemin içerisine doğru sızmaktadır. Havzanın zemin özellikleri ve eğimine göre yağışın bir kısmı yüzeysel akışa dönüşür. Yağışın yüzeysel akışa geçen kısmının oranını bulmak için yüzeysel akış katsayısından yararlanılır. Yüzeysel akış katsayısı arazinin eğimi ile doğru orantılı olup bitki örtüsü ile ters orantılıdır.

Bazı zemin türlerine göre sızma miktarları önceden belirlenmiştir. Örneğin bu değer kumlu zeminlerde 10 – 25 mm/saat, killi zeminlerde 0,3 – 3 mm/saat, kayalık zeminlerde ise 0,1 – 0,3 mm/saat şeklindedir.

Yağış havzasında farklı zemin grupları görülüyor ise yüzeysel akış katsayısı (5) denklemi yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada C_i , farklı zemin yapıları için yüzeysel akış katsayısını; A_i , farklı zemin yapılarının yüzey alanlarını belirtmektedir.

$$C = (C_1A_1 + C_2A_2 + \dots + C_nA_n) / (A_1 + A_2 + \dots + A_n) \quad (5)$$

Tablo 2. Yüzeysel akış katsayıları (Karayolları Tasarım El Kitabı, 2016)

Yol Platformu İçin	C Akış Katsayıları
Yol Platformu ve Kaplanmış Alanlar	0,9
Yüksek Eğimli Yarma veya Dolgu Şeyleri ($\alpha > 45^\circ$)	0,8
Düşük Eğimli Yarma veya Dolgu Şeyleri ($\alpha \leq 45^\circ$)	0,5
Düzenlenmiş Düşük Eğimli Alanlar (Refüj vs.)	0,3
Kırsal Havlar İçin	
Geçirimsiz	0,9 - 0,95
Düz-Çıplak	0,80 - 0,90
Dalgalı-Çıplak	0,60 - 0,80
Yumuşak-Çıplak	0,50 - 0,70
Dalgalı Çayırılık	0,40 - 0,65
Yaprakları Dökülen Orman	0,35 - 0,60
Çam Ormanı	0,25 - 0,50
Meyve Ağaçlıklı	0,15 - 0,40
Ziraat Arazisi	0,15 - 0,40
Kentsel Havzalar İçin	
Yoğun ve Kesintisiz Biçimde Yapılaşmış Kentsel Alan	0,80 - 0,90
Ticari/Kentsel Alan, Yakın Yapılaşma	0,70 - 0,85
Kentsel Konut Alanı, Sınırlı Bahçeler	0,45 - 0,75
Banliyöde Bahçeli Konut Alanı	0,35 - 0,65
Kum Tabakası Üzerinde Bütünüyle Yapılaşmış Banliyo	0,25 - 0,55
Park Bahçe ve Çayır	0,15 - 0,40

Yağış şiddeti ve yüzeysel akış katsayılarının belirlenmesiyle yüzeysel akış debisi (Q_{10}) hesaplanır. Yüzeysel akış debisine bağlı olarak menfezdeki su kabarma miktarı bulunur. Bu değer menfez yüksekliğinin en fazla 20 cm üstünde olmalıdır. Bu kritere uygun olan yüzeysel akış debisine göre menfez kesitine karar verilir.

Belirlenen bu kesitin ikinci bir şartı sağlaması gerekmektedir. Bunun için Q_n yüzeysel akış debisine göre su kabarma miktarı yeniden belirlenir. Bulunan değer menfez yüksekliğinin 3 katı kadar ve yol üstyapısının kırmızı kotunun yaklaşık 1,25 m altında ise menfez kesitinin yeterli olduğuna karar verilir.

Q_{10} ve Q_n yüzeysel akış debilerine göre yukarıda belirtilen şartların hepsi sağlanıyor ise menfez kesiti doğrulanıp projesi hazırlanır.

1.5.5.2. Mcmath Metodu

Mcmath metodu alanı 10 – 15 km²'den daha fazla olan havzalardaki menfez tasarımları için kullanılan yöntemdir. Bu metoda göre yüzeysel akış debisi (6) denklemi ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Q = 0,0023CIA^{4/5}S^{1/5} \quad (6)$$

Burada Q, dere yatağının debisini; C, yüzeysel akış katsayısını; I, yağış şiddetini; A, yağış havzasının alanını ve S, dere yatağının eğimini göstermektedir.

Yüzeysel akış debilerinin (Q_{10} ve Q_n) bulunması için rasyonel yöntemle benzer olarak (3) ve (4) denklemleri ile bulunan konsantrasyon süresi (t_c) dikkate alınarak frekans – yağış süresi – yağış abaklarından yağış şiddetleri (I_{10} ve I_n) belirlenir.

Debi formülünde yer alan bir başka değer ise yatak eğimidir. Bu değer dere yatağının 1 km'lik kısmındaki düşü miktarı olarak bilinmektedir. Dere yatağının harmonik eğimi ise (7) denklemi ile bulunur (KTEK, 2016).

$$S_h = (10/\sum 1/\sqrt{S_i})^2 \quad (7)$$

Burada S_h , dere yatağının harmonik eğimini ve S_i , 10 ayrı parçaya bölünmüş dere yatağında her bir parça için eğimi göstermektedir.

Yüzeysel akış katsayısı (C) ise bitki örtüsüne bağlı katsayı (C_B), zemin cinsine bağlı katsayı (C_Z) ve topografik yapıya bağlı katsayının (C_T) toplanması ile bulunur. Bu katsayılar akım şartlarına ve zeminin fiziki durumuna bağlı olarak Tablo 3'den alınır.

Tablo 3. Yüzeysel akış katsayıları (McMath yöntemi)

Akım Şartları	CB		Cz		CT	
	Düşük	Çok iyi örtülü	0,08	Kumlu	0,08	Düz
Düşük - Orta	İyi örtülü	0,12	Hafif	0,12	Hafif Eğimli	0,06
Orta	Oldukça örtülü	0,16	Orta	0,16	Dalgalı	0,08
Yüksek	Seyrek örtülü	0,22	Ağır	0,22	Çok dalgalı	0,11
Çok yüksek	Çıplak	0,30	Kaya	0,30	Dik	0,15

1.5.5.3. Sentetik Yöntem

Sentetik yöntem havzası alanının 1000 km²'ye kadar olduğu menfez projelerinde pik debiyi hesaplamak için kullanılır. Bu yöntem birim hidrograf yöntemi olarak da bilinmektedir. Sentetik yöntemde akış debisinin hesabında aşağıda verilen (8) denklemi kullanılır. Denklemden Q, maksimum akış debisini; A, havza alanını; q_p, 1mm'lik akışa neden olan izafi debiyi ve h_a, akışa geçen yağış miktarını belirtmektedir.

$$Q = Aq_p h_a 10^{-3} \quad (8)$$

Akışa geçen yağış miktarı (h_a) ile bulunan debi 1 mm'lik akıştan bulunan debinin h_a katı olur ve birim hidrografa göre maksimum taşkın debisi (8) denklemine göre bulunur. Bu yöntemde göre harmonik eğimin hesaplanmasında kullanılan denklem (9) aşağıda verilmiştir. Burada S, doğal dere yatağının harmonik eğimini; s_i, kısmi eğimi ifade etmektedir.

$$\sqrt{S} = [10 / (\sum 1 / \sqrt{s_i})] \quad (9)$$

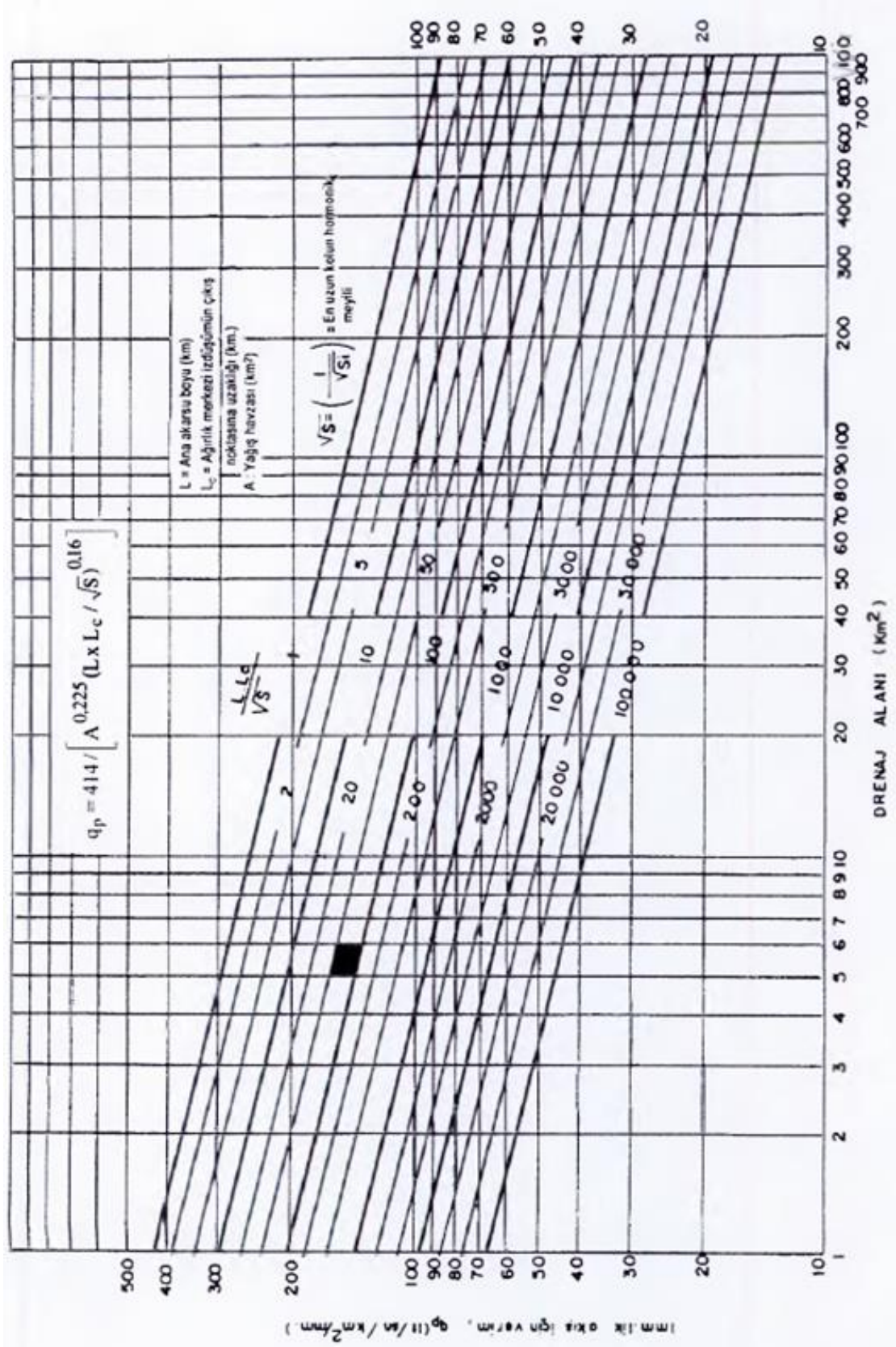
İzafi debi aşağıda belirtilen (10) denklemi ile veya yağış havza alanı, doğal dere yatağı uzunluğu ve harmonik eğim dikkate alınarak Şekil 13'den elde edilir.

$$q_p = 414 / [A^{0,25} (L L_c / S^{0,5})^{0,16}] \quad (10)$$

Burada L, doğal dere yatağının uzunluğunu; L_c, yağış alanı merkezinin izdüşümü ile menfez arasındaki mesafe; A, havza alanını ifade etmektedir.

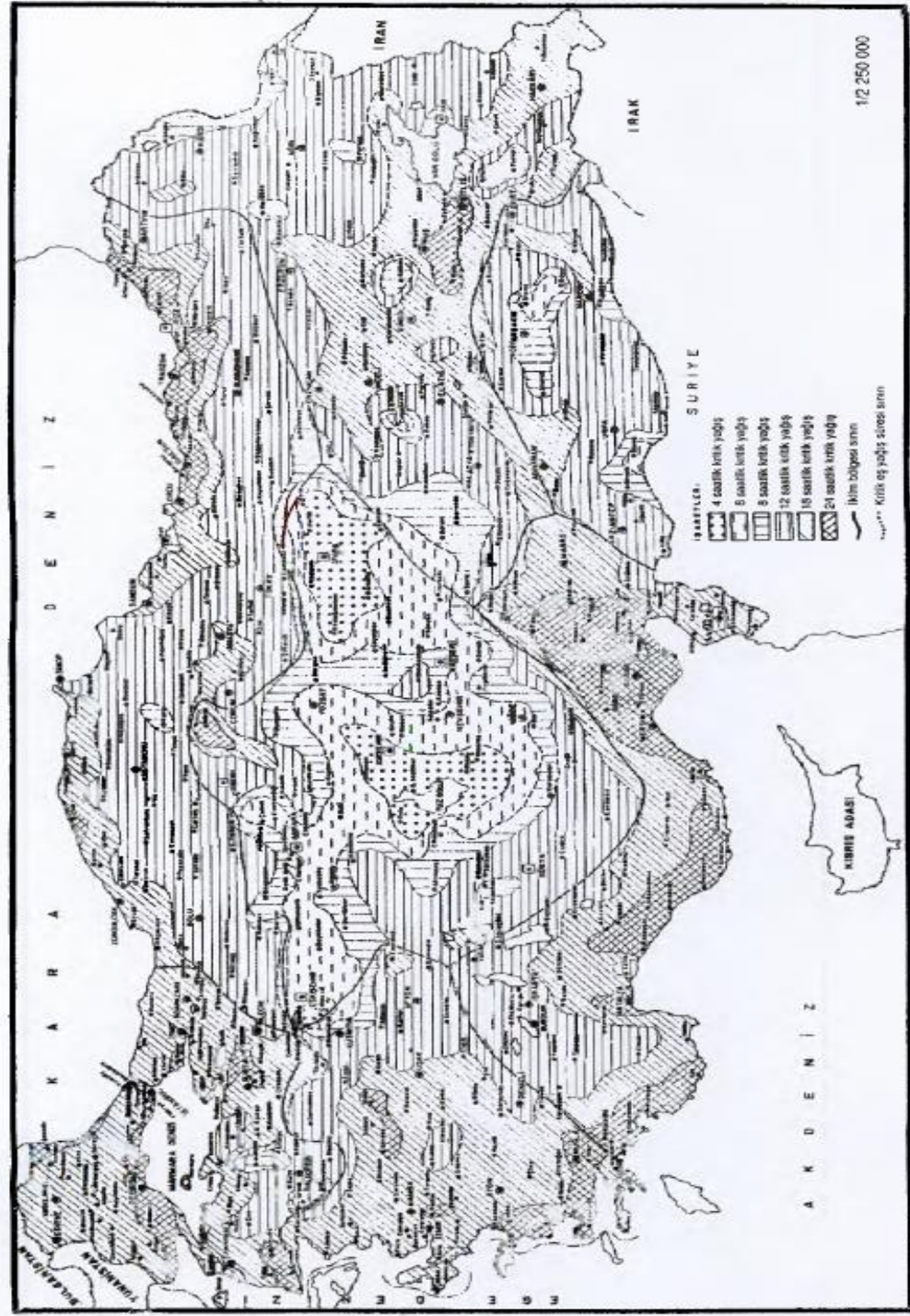
İzafi debinin belirlenmesiyle 1 mm'lik akış için debi, (11) denklemi ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q = Aq_p 10^{-3} \quad (11)$$



Şekil 13. Yağış havza alanı – verim grafiği (KTEK, 2016)

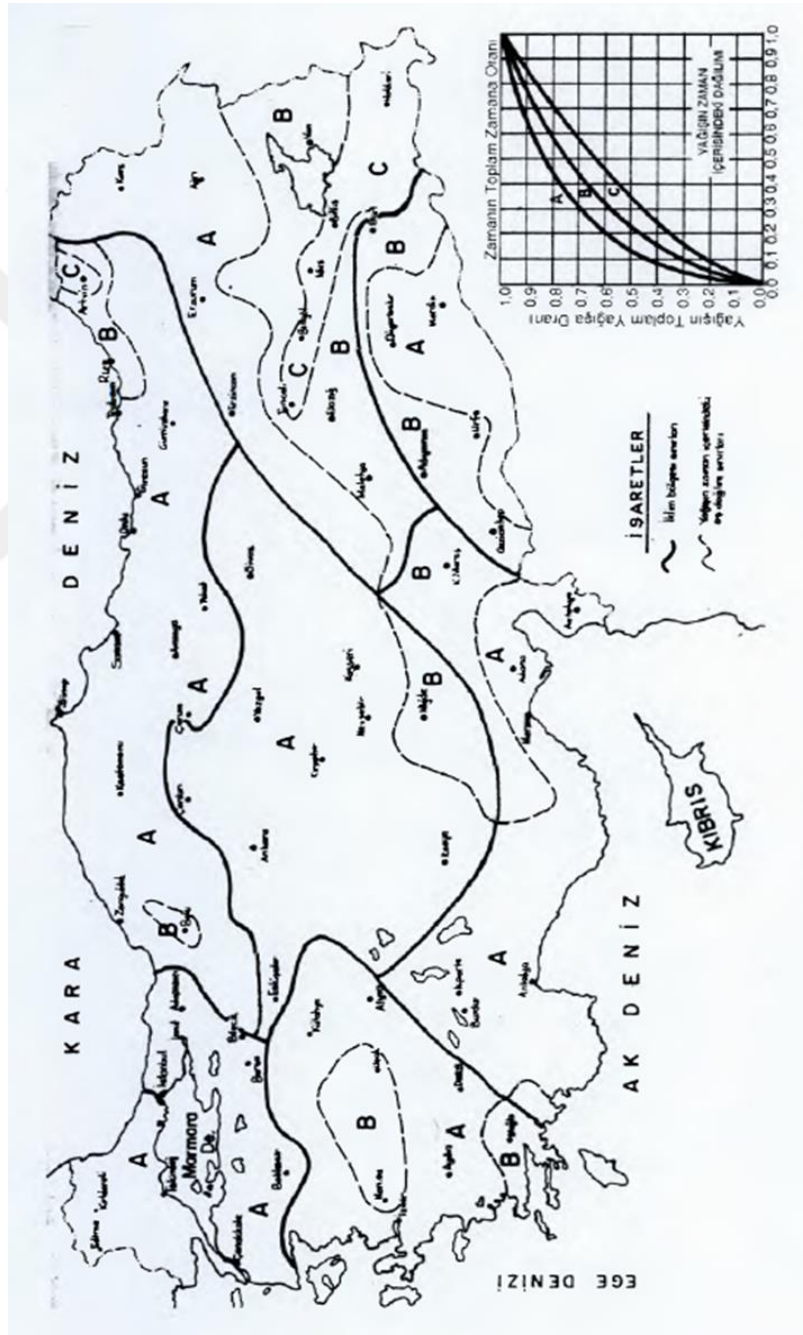
Yağış süresi Şekil 14’de verilen kritik yağış haritasından belirlenir. Hidrografın yükseltme zamanı (T_p) ve konsantrasyon süresi (T_c) bulunarak en uzun olanı yağış sağanak süresi olarak belirlenir. Daha sonra sentetik metot birim hidrograf koordinatları yardımıyla birim hidrograf çizilir.



Şekil 14. Türkiye’deki kritik yağış süreleri (KTEK, 2016)

Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanmış yağış eğrilerinden sağanak süresine göre yağış şiddeti alınır ve yağış sağanak süresi ile çarpılarak akış yüksekliği (h_y) bulunur. Yağış sağanak süresi toplam zaman olarak kabul edilir. Daha sonra bulunan dağılım oranlarının akış yüksekliği ile çarpımı sonucu drenaj alanı yağışı bulunur.

Her sağanak süresi için tasarım debileri bulunarak (Q_{10} , Q_n) Rasyonel Yöntemdeki adımlara benzer olarak menfez boyutlandırılması yapılır.



Şekil 15. Türkiye’de yağışın zaman içerisindeki dağılımı (KTEK, 2016)

1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı

Karayolu ulaşım ağının önemli bir parçası olan menfezler, yağış sonucu akışa geçen suyun yol yapısına verebileceği zararları önlemek amacıyla tasarlanmaktadır. Günümüzde gelişen yöntemlerle birlikte çok daha detaylı olarak projelendirilen menfezler, bu sayede daha etkili bir drenaj yapısı olarak karşımıza çıkmaktadırlar.

Ülkemizde menfezlerin tasarım ve yapım süreçlerinde Karayolları Teknik Şartnamesinden ve ilgili yapım yönetmeliklerinden yararlanır. Menfez tasarımında ilk öncelik hidrolik verileri değerlendirerek oluşabilecek taşkın debisini hesaplamak ve bu debiyi güvenle taşıyabilecek kesiti bulmaktır. İlk boyutlandırmanın yapılmasıyla birlikte etkili olacak yüklemeler belirlenir ve menfezin bu etkileri güvenle karşılayabilecek rijitlikte olması hedeflenir. Tüm bunlar değerlendirildiğinde tasarım sürecinin aslında hidrolik tasarım ve nihai boyutlandırma olmak üzere iki aşamalı olduğu gözlenmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde literatürde daha çok hidrolik kısım ve veya zemin-yapı etkileşimiyle ilgili çalışmalara rastlanmaktadır. Bu konular önemli olmakla beraber menfezlerin nihai boyutlandırılmasında seçilecek tasarım yönteminin ve yapı modelinin analiz sonuçları üzerinde ne gibi farklılıklar doğuracağı dikkat çeken diğer bir konudur.

Bu kapsamda yapılan tez çalışmasının amacı; farklı yüklere maruz kalan bir menfezde, seçilecek tasarım yönteminin ve oluşturulan yapı modelinin analiz sonuçlarına etkisini araştırmaktır. Bu amaçla Amasya-Turhal Karayolu Km: 56+820'de yapılmakta olan bir menfez örnek olarak seçilmiştir. Seçilen menfez SAP2000 programında çerçeve sistem ve 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli olmak üzere 2 farklı şekilde modellenmiştir. Daha sonra bu modeller; toprak etkisi, dolgu ağırlığı, taşıt yükü ve deprem etkisi hesaba katılarak sonlu elemanlar yöntemine göre analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre çerçeve sistem ve 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli karşılaştırılmış olup; Karayolları Teknik Şartnamesine göre yapılmakta olan bir menfezde 2 farklı tasarım yöntemi sonuçların yakınlığı ve uygunluğu bakımından değerlendirilmiştir.

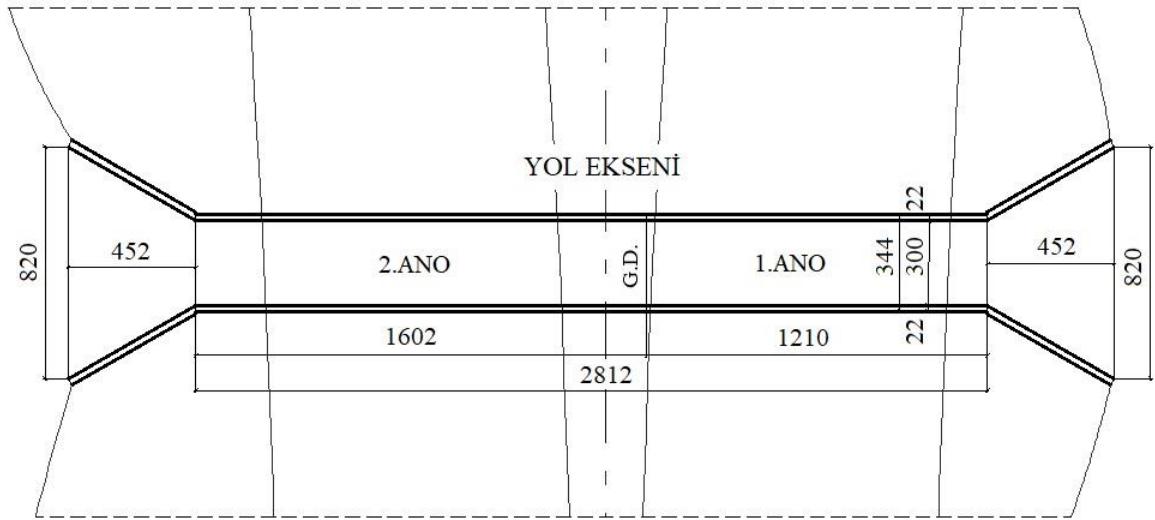
Yapılan çalışmanın, Karayollarında mevcut bulunan hazır menfez abaklarını güvenilirlik ve ekonomiklik yönünden test etmesi, aynı zamanda menfez tasarımında hangi yöntemin daha uygun olduğunun tespitine de katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

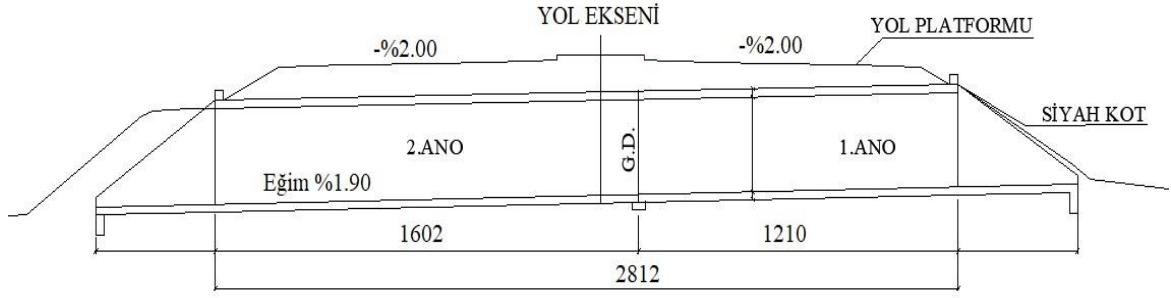
Bu bölümde, Amasya – Turhal karayolu üzerinde yapılmakta olan betonarme tek gözlü kutu menfez, SAP2000 yapısal analiz programında çerçeve sistem ve 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli olmak üzere 2 farklı şekilde modellenecektir. Çalışmaya konu olan betonarme kutu menfezin yapısal geometrisi ve malzeme özellikleri Bölüm 2.1’de belirtilmiştir.

2.1. Menfezin Yapısal Geometrisi ve Malzeme Özellikleri

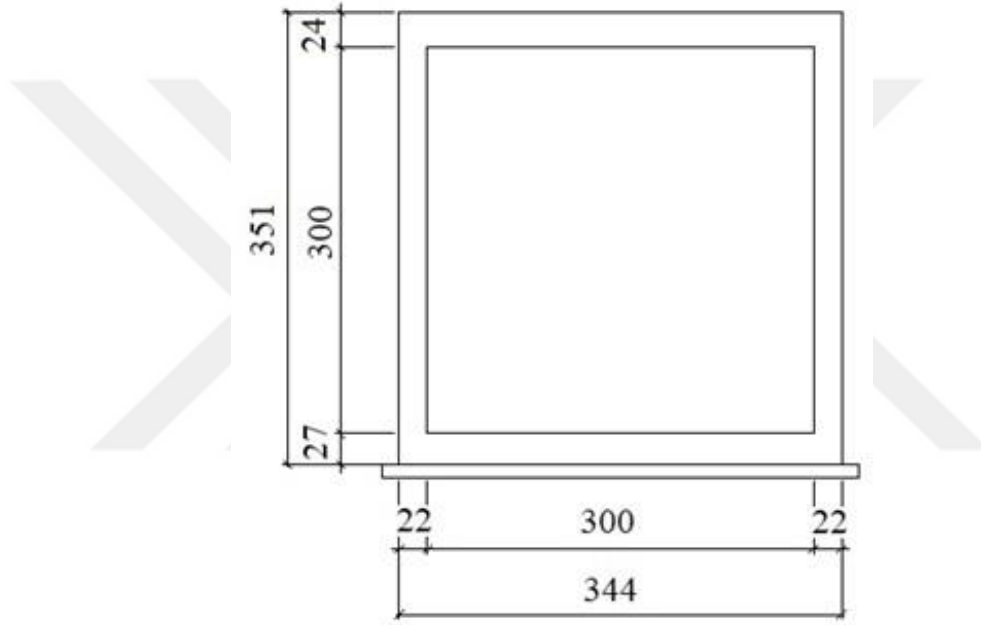
Amasya – Turhal arası yol yapım işi Km:56+820’deki menfez 3.00m x 3.00m ebatlarında boyutlandırılmış olup, kesit ve planı yol platformunun geometrik özelliklerine göre oluşturulmuştur. Menfeze ait plan (Şekil 16) ve kesitler (Şekil 16 ve 17) aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 16. Menfezin yol platformuna göre planı



Şekil 17. Menfez boy-kesiti



Şekil 18. Menfez en-kesiti

Modelleme aşamasında kullanılacak gerekli kesit değerleri ve malzeme özellikleri aşağıda gösterilmiştir.

- Taban Kalınlığı : 24cm
- Tavan Kalınlığı : 27cm
- Cidar Kalınlığı : 22cm
- Menfez Yüksekliği : 351cm
- Menfez Ano Boyu : 1210cm
- Beton ve Donatı Sınıfı : C25/30 – S420
- Zemin Yatak Katsayısı ve Emniyet Gerilmesi : 42000 kN/m³ – 200 kN/m²

2.2. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

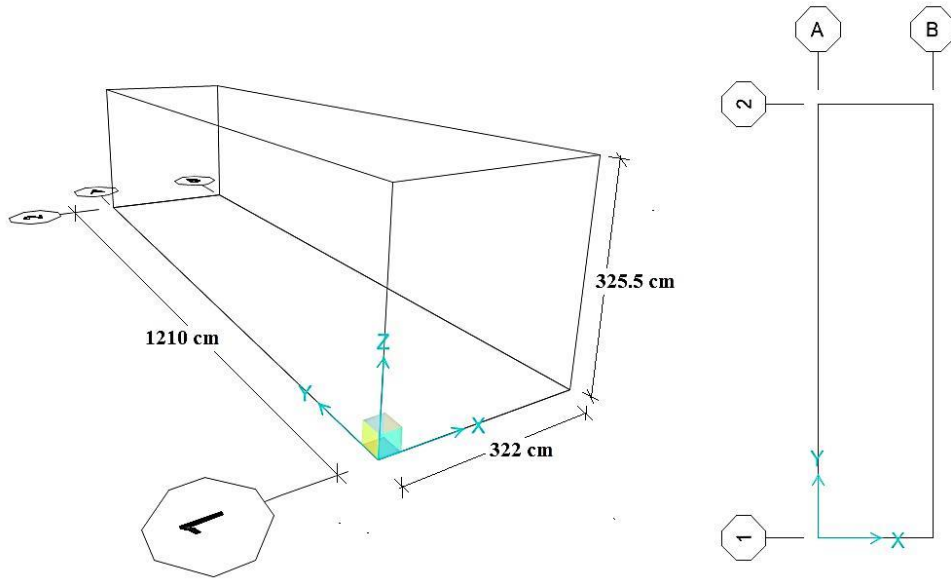
Menfez boyu 24 m'den daha uzun olduğu için refüj altına bir adet genişleme derzi planlanmıştır. Bu çalışmada menfezin genişleme derzinin proje yönüne göre sağ kısmında kalan 1210 cm uzunluğundaki 1.Ano'nun modellenmesi yapılacaktır.

2.2.1. Proje Akslarının Oluşturulması

Modellemede öncelikli olarak KN, m, C birim sistemi seçilmiş olup, menfez geometrisine uygun olarak oluşturulan akslar Şekil 19'da gösterilmiştir. Programda yatay yön X yönü, düşey yön Z yönü ve sayfa düzlemine dik doğrultudaki yön ise Y yönü olarak tanımlıdır.

Menfez modelinin oluşturulabilmesi amacıyla, X yönü doğrultusunda 322 cm aralıkla A ve B aksları; Y yönü doğrultusunda ise 1210 cm aralıkla 1 ve 2 aksları tanımlanmıştır. Programda menfez tavanının oluşturulabilmesi için aks penceresinde, Z yönündeki aralık değeri 325,5 cm olarak girilmiştir.

Aks aralıklarının tanımlanması sonrasında proje akslarına uygun olarak betonarme menfezin taban (tabliye), tavan (temel) ve cidarları dikdörtgen alan olarak "Draw Rectangular Area" komutu ile oluşturulur.



Şekil 19. Proje akslarının görünümü

2.2.2. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan “Standart Tek Gözlü Kutu Menfez Tipleri 2005 (SKMT 2005)” kitapçığında yer alan menfezde beton sınıfı C25/30, donatı sınıfı ise S420 olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda programda “Define – Materials” komutları kullanılarak, C25 betonu ve S420 çeliğine ait malzeme özellikleri tanımlanmıştır (Şekil 20). Programa girilen dayanım değerleri ve elastisite modülleri her iki malzeme içinde TS500 standardından alınmıştır.

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Material Property Data' dialog box in a software application. The left window is for 'C25/30 Concrete' and the right window is for 'S420 Rebar'. Both windows show various material properties such as weight, modulus of elasticity, and strength values.

Property	C25/30 Concrete	S420 Rebar
Material Name and Display Color	C25/30	S420
Material Type	Concrete	Rebar
Material Grade	C25/30	
Weight per Unit Volume	24,9926	76,9729
Mass per Unit Volume	2,5485	7,849
Modulus Of Elasticity, E	31000000	2,000E+08
Poisson, U	0,2	0,
Coefficient Of Thermal Expansion, A	1,000E-05	1,170E-05
Shear Modulus, G	12916667	
Specified Concrete Compressive Strength, f _c	25000	
Expected Concrete Compressive Strength	25000	
Minimum Yield Stress, F _y		420000
Minimum Tensile Stress, F _u		500000
Expected Yield Stress, F _{ye}		420000
Expected Tensile Stress, F _{ue}		500000

Şekil 20. Malzeme özelliklerinin tanımlanması

2.2.3. Kesit Özelliklerinin Oluşturulması

Menfez modelinde tabliye, temel ve cidar kalınlıkları farklı boyutlarda olduğundan dolayı, bu kısımlar için 3 farklı kesit tanımlaması gerekmektedir. Programda dikdörtgen elemanların kesitlerini tanımlamak amacıyla “Define – Section Properties – Area Sections”

komutları kullanılmıştır. Bu komut aracılığıyla her bir kesitin kesit kalınlığı, tipi ve malzeme cinsi programa girilmiştir (Şekil 21).

Modelleme yapılırken alan elemanlarının tanımı sırasında “Shell – Thin” eleman tipi seçilmiştir. Shell, genel anlamda yüzeysel sistemleri tanımlamak için kullanılır ve alan elemanlarının (kabuk elemanlarının) analiz sırasında bütün kuvvetler ve momentler altında hesaplarının yapılmasını sağlar. Thin ise yüzeylerin ince plak teorisine göre çözümleneceği anlamına gelmektedir. Programda diğer seçenek olan membrane, düzlemi doğrultusunda yük alan yüzeysel elemanlarda, düzleme dik doğrultudaki momentleri de dikkate almak için; plate ise düzlemine dik doğrultuda kesme kuvveti alıp, eğilmeye çalışan elemanlarda kullanılır.

Kesit özellikleri tanımlanan menfez modelinde bu değerler “Assign” komutu kullanılarak alan eleman olarak oluşturulan taban, tavan ve cidarlara atanmıştır. Kesitlerin ilgili elemanlara atanması sonucunda menfez modelinin geometrik yapısı projeye uygun olarak tamamlanmıştır.

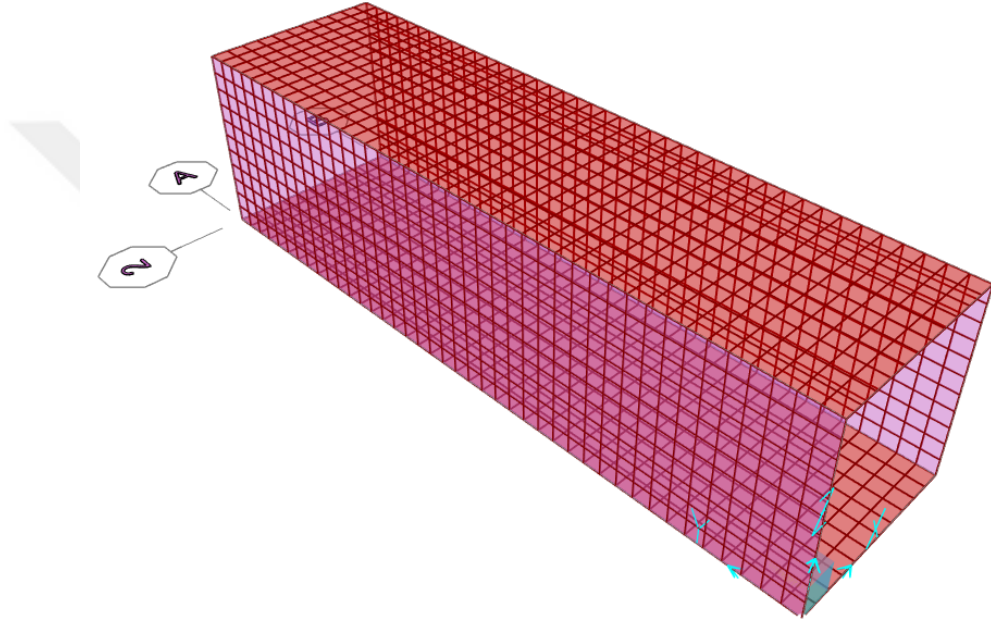
The screenshot shows the 'Shell Section Data' dialog box with the following details:

- Section Name:** TAVAN
- Section Notes:** Modify/Show...
- Type:** Shell - Thin (selected)
- Thickness:** Membrane: 0,27; Bending: 0,27
- Material:** Material Name: C25/30; Material Angle: 0
- Time Dependent Properties:** Set Time Dependent Properties...
- Concrete Shell Section Design Parameters:** Modify/Show Shell Design Parameters...
- Stiffness Modifiers:** Set Modifiers...
- Temp Dependent Properties:** Thermal Properties...
- Buttons:** OK, Cancel

Şekil 21. Menfez tavan kesitinin programda tanımlanması

2.2.4. Modelin Sonlu Elemanlara Ayrılması

Sonlu elemanlar yapısal analiz metodunda amaç, kompleks yapıları küçük sonlu elemanlara ayırarak çözümleri gerçek çözüme yaklaştırmaktır. Analiz süresi de göz önünde bulundurularak betonarme kutu menfez modeli 30cm x 30cm ebatlarında parçalara ayrılmış olup, optimum sayıda parça ile gerçek çözüme yakın bir analiz yapılması hedeflenmiştir.



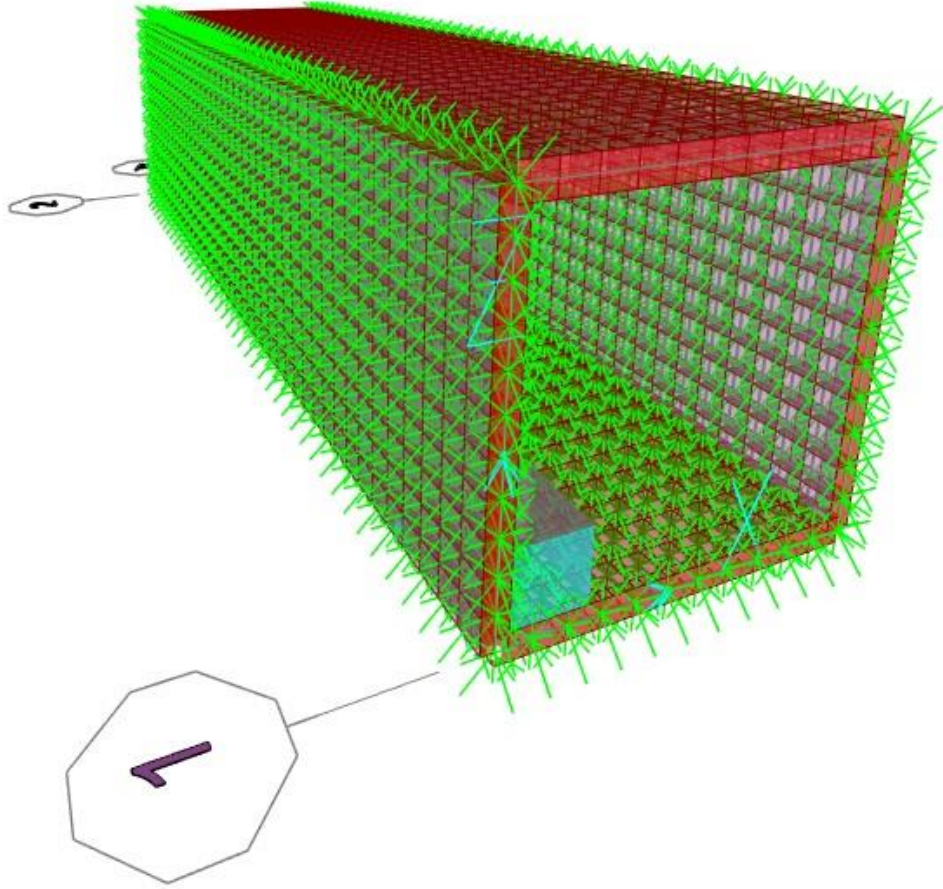
Şekil 22. Modelin sonlu elemanlara ayrılması

2.2.5. Temel Zemin Etkileşiminin Tanımlanması

Menfezin taban ve cidarları zemin ile temas halindedir. Bu durumdaki yapının zemin ile etkileşimini ifade edebilmek amacıyla betonarme kutu menfezin temel ve cidar yüzeylerinde yaylar tanımlanmıştır. Bu işlem için programın “Assign – Area – Area Springs” komutları kullanılmıştır. Zemini temsil eden yay elemanları için yay katsayıları kısmına yatay ve düşey yatak katsayıları girilmiş olup; yayların çalışma doğrultuları, eleman düzlemlerine dik olacak şekilde seçilmiştir (yerel eksen takımına göre 3 eksenli doğrultusunda). Taban elemanda ve menfezin sol cidarında yay için yerleşim yüzeyi “alt” olarak seçilirken, sağ cidarda bu seçenek “üst” olarak belirlenmiştir.

Zemin yatak katsayısı birim alana gelen basıncın, o noktadaki oturmaya oranıdır. Bu aşamada, betonarme kutu menfezin inşa edileceği yol güzergâhındaki zemin özellikleri dikkate alınarak, düşey yatak katsayısı 42000 kN/m^3 , yatay yatak katsayısı ise 18000 kN/m^3 olarak belirlenmiştir (Bowles, 1996).

Zemine gömülü haldeki yapıda temel davranışını tanımlamak amacıyla tabandaki düğüm noktaları seçilerek mesnet ataması yapılmıştır. Bu amaçla düğüm noktalarında tanımlı mesnetlerde Translation 1, Translation 2 ve Rotation 3 seçenekleri seçilmiş, diğer yer değiştirme ve dönme bileşenlerine ise yapı davranışıyla uyumlu olacak şekilde serbestlik bırakılmıştır. Cidarlardaki düğüm noktalarında ise sadece Translation 2 ötelenmesi engellenmiştir. Bu aşamada mesnetlerde zemini temsil eden yayların çalışma doğrultusundaki ötelenme hareketine, zemin etkisini dikkate alabilmek amacıyla serbestlik tanınmıştır.



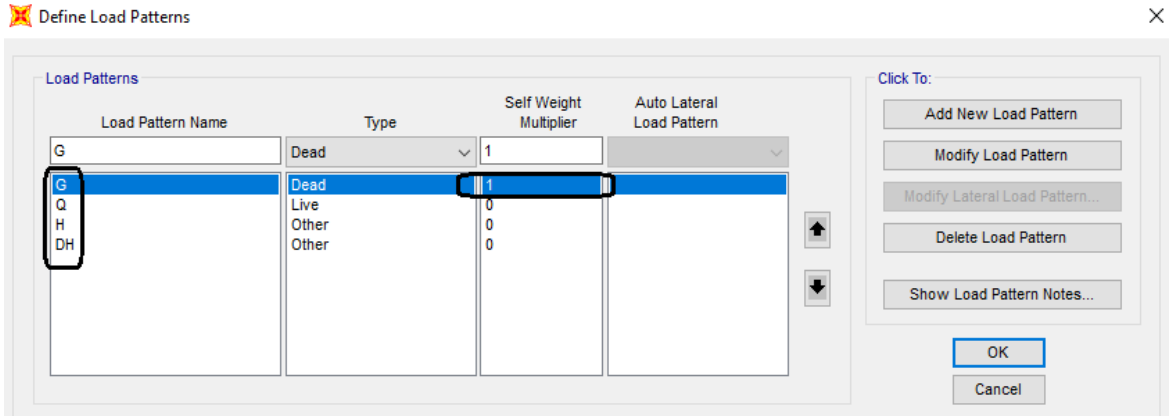
Şekil 23. Düğüm noktalarında tanımlı mesnetler

2.2.6. Yüklemelerin Menfez Modeline Tanımlanması

Bu bölümde, modellenmesi tamamlanan menfezin tavan bölgesine düşey olarak dolgu ağırlığı ve üzerinden geçen taşıt yükü, cidarlarına ise statik durumdaki yanal toprak etkisi ve deprem durumunda dikkate alınan dinamik toprak basıncı yayılı yükler olarak tanımlanacaktır. Dolgu ağırlığı ve taşıt yükü düzgün yayılı yük olarak etki ederken, yanal toprak basıncı üçgen yayılı yük olarak tanımlanmaktadır.

Menfez içerisinde akış durumunda oluşan su yükü, menfez tabanına düşey olarak etki etki ettirilmiş olup; cidarlara etkileyen yanal su basıncı menfez modelinde dikkate alınmamıştır.

Analizlerde dikkate alınacak yükleme türlerinin programda tanımlanması için “Define – Load Patterns” komutundan yararlanılmıştır. Bu aşamada sabit yükler G, hareketli yükler Q, toprak itkisi H ve deprem durumdaki dinamik toprak itkisi DH olarak tanımlanmıştır. Menfezin kendi öz ağırlığı ise G yüklemesinde “self weight multiplier” kısmına 1 yazılarak dikkate alınmıştır (Şekil 23).

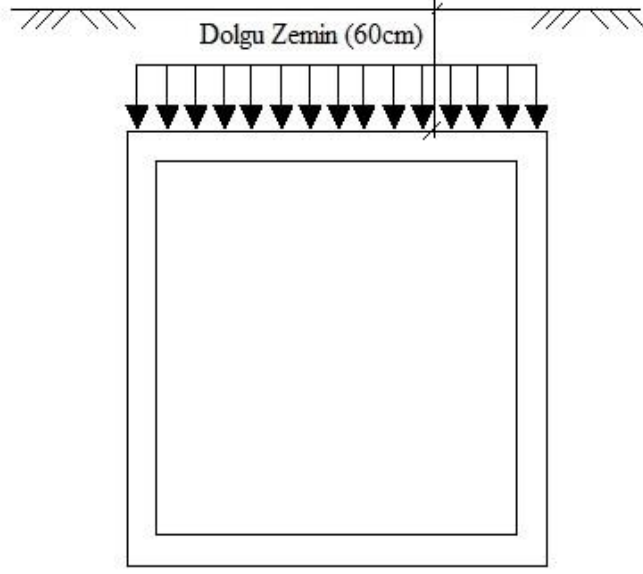


Şekil 23. Yük türlerinin tanımlanması

2.2.6.1. Dolgu Yüğü

Menfez üzerindeki yapısal dolgu ağırlığından dolayı oluşan bu yükleme, menfezin tavan alanına düzgün yayılı yük olarak etki etmektedir. Birim alana etki eden yük, dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı (γ) ile dolgu yüksekliğinin (H) çarpılması sonucu aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Burada dolgu zeminin birim hacim ağırlığı 18 kN/m^3 alınmış olup, dolgu yüksekliği 60 cm 'dir (Şekil 24).

- Birim alana etkiyen dolgu yükü (q_d) = $0,6 \times 18 = 10,8 \text{ kN/m}^2$



Şekil 24. Yapısal dolgu yükü

Alana düzgün yayılı yük olarak hesaplanan dolgu yükü ($10,8 \text{ kN/m}^2$) “Assing – Area Loads – Uniform (Shell)” komutu kullanılarak menfezin tavan alanına etki ettirilmiştir. Bu aşamada yükleme genel eksen takımına göre $-Z$ yönünde tanımlanmış, yükleme türü ise G (Sabit Yük) olarak seçilmiştir.

2.2.6.2. Menfez Tabanında Oluşan Su Etkisi

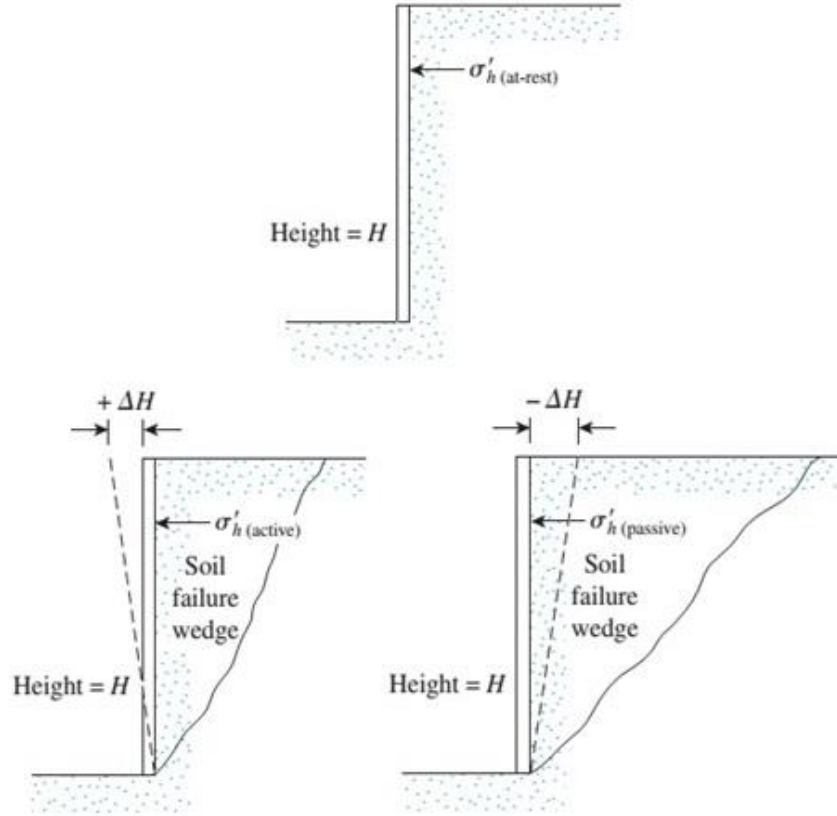
Menfez içerisinde akışa geçen suyun oluşturacağı basınç, menfez taban alanına düşey doğrultuda düzgün yayılı yük olarak etki ettirilmiştir. Birim alana etki eden q yükü, suyun birim hacim ağırlığı ile menfez içerisindeki su yüksekliğinin çarpılması sonucu hesaplanmıştır. Bu hesaplamada su yüksekliği 2 m, suyun birim hacim ağırlığı ise 10 kN/m^3 olarak alınmıştır. Cidarlara etkiyen yanal su basıncı, bu hesaplamada toprak etkisi ile zıt yönde olması sebebiyle dikkate alınmamıştır.

- Birim alana etkiyen su yükü (q_s) = $2 \times 10 = 20 \text{ kN/m}^2$

Bu değer genel eksen takımına göre $-Z$ yönünde sabit yük (G) olarak programa tanımlanmıştır.

2.2.6.3. Yanal Toprak Basıncı

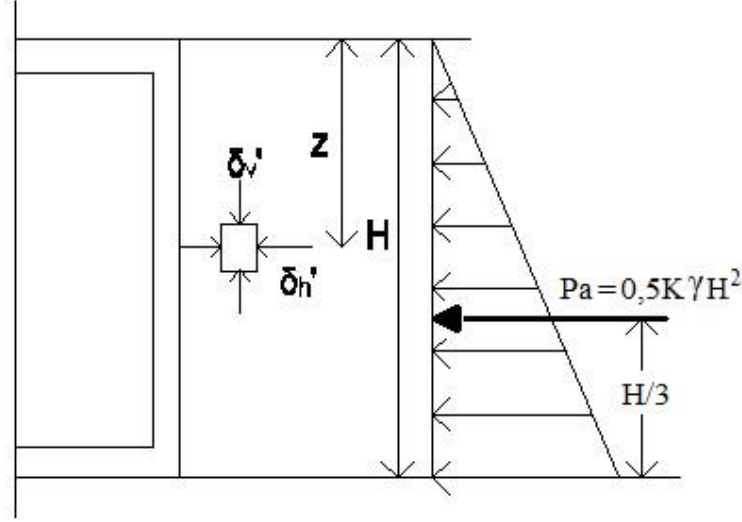
Toprak ile temas halindeki yapılara etkiyen yanal zemin basıncı, aktif toprak basıncı ve pasif toprak basıncı olmak üzere iki durumda incelenir. Yanal zemin basınçlarının yapılara etkisi üzerine çalışmalar Coulomb (1776) ve Rankine (1857) tarafından yapılmıştır.



Şekil 25. Sükûnet, aktif ve pasif durumlar için yanal toprak basınçları

Menfez cidarına etki eden ve zemin derinliğine (z) bağlı olarak değişen yanal toprak basıncı aşağıda verilen (12) denklemine göre hesaplanmaktadır. Burada γ , zeminin birim hacim ağırlığı; z , basınç derinliği ve K , statik toprak basınç katsayısı olup; yanal gerilme değerinin (δ_h), zeminin kendi ağırlığından kaynaklanan gerilmeye (δ_v) oranıdır.

$$\delta_h = K\gamma z \quad (12)$$



Şekil 26. Z derinliğinde oluşan düşey ve yatay gerilmeler

Bu çalışmada menfezin gömülü olduğu tabii zemin için statik durumdaki yanal basınç katsayısı TBDY 2018 (16.12.2.4)'e göre aşağıda verilen (13) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Burada Φ'_d , zeminin kayma direnci açısını; δ_d , zemin ile duvar arasındaki sürtünme açısını; β duvar arkası zemin yüzeyinin yataya göre eğim açısını, ψ ise duvarın yataya göre ölçülen açısını göstermektedir.

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \Phi'_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_d) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\Phi'_d + \delta_d) \sin(\Phi'_d - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \theta - \delta_d) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2} \quad (13)$$

TBDY 2018 (16.12.2.7)'ye göre statik durumdaki K katsayısının bulunması için θ açısı 0 olarak alınmalıdır. Bu doğrultuda (13) denklemde Φ'_d için 35, δ_d ve β için 0, ψ için ise 90 değerleri girilerek statik durumdaki toprak basınç katsayısı 0,22 olarak hesaplanmıştır.

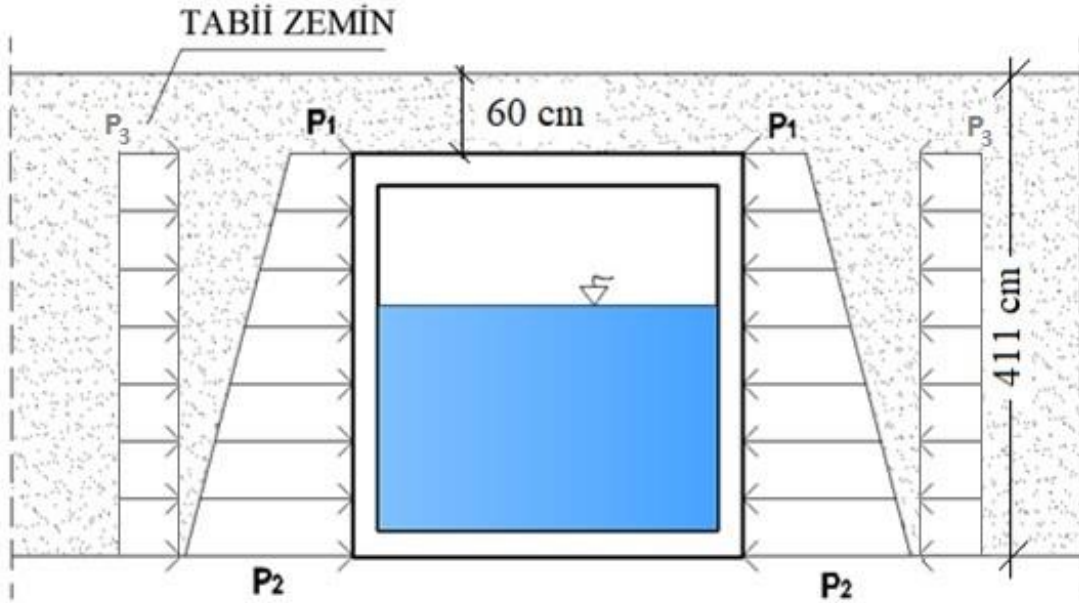
Yanal toprak basıncının hesaplanmasında kullanılan (12) denklemde; K katsayısı 0,22 alınmış olup, zeminin birim hacim ağırlığı ise 18 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda 60 cm derinlikteki menfez tavanına gelen yanal toprak basıncı (P_1), 411 cm derinliğindeki menfez tabanına etkiyen yanal toprak basıncı (P_2) ve taşıt yükünden dolayı oluşacak yanal basınç (P_3) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- $P_1 = 0,22 \times 18 \times 0,6 = 2,38 \text{ kN/m}^2$ (tavan seviyesindeki yanal toprak basıncı)
- $P_2 = 0,22 \times 18 \times 4,11 = 16,28 \text{ kN/m}^2$ (taban seviyesindeki yanal toprak basıncı)

Taşıt yükünden dolayı oluşacak yanal basın hesabında, AASHTO'da tanımlı H20-44 kamyon yükü dikkate alınmıştır. Bu yük menfezin yapısal dolgu yüksekliğine göre cidarlara yanal ek yük olarak etki ettirilir. Yapısal dolgu yüksekliği 0 – 60 cm arasında ise yanal tekil yük, 60 – 250 cm arasında ise yanal düzgün yayılı yük olarak dikkate alınır. 250 cm ve daha yüksek dolgu yüksekliklerinde ise ek yük uygulanmaz. Bu çalışmada menfez üzerindeki 60 cm dolgu yüksekliği dikkate alındığında, taşıt yükünden dolayı cidarlara düzgün yayılı yük etki etmektedir.

H20-44 kamyonunun toplam ağırlığı 32 ton (315 kN), en kısa dingil mesafesi 4,26 m ve bu mesafedeki dingil yükleri toplamı 180 kN'dur. Bu değerler dikkate alındığında çift şeritli yolda 3,44 metre genişliğindeki menfez üzerinde etkili olacak taşıt yükü ve bu yük nedeniyle oluşacak yanal (P_3) kuvveti aşağıda hesaplanmıştır.

- Menfeze etki eden toplam taşıt yükü = $180 \times 2 \times 3,44 / 4,26 = 290,7 \text{ kN}$
- Taşıt yüküyle oluşan yanal kuvvet (P_3) = $0,22 \times 290,7 / (3,44 \times 12,1) = 1,54 \text{ kN/m}^2$



Şekil 27. Menfez cidarlarına etkiyen yanal toprak basınçları

Yanal toprak basıncı, gömülü yapıda zemin etkisinden dolayı yamuk yayılı yük olarak; taşıt yükünden dolayı ise düzgün yayılı yük olarak menfez cidarlarına etki etmektedir. Bu kuvvetler bir arada düşünüldüğünde, statik durumda cidarlara etki eden toplam yanal kuvvet yamuk yayılı yük olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- $P_{üst} = P_1 + P_3 = 2,38 + 7 = 9,38 \text{ kN/m}^2$ (tavan seviyesinde)
- $P_{alt} = P_2 + P_3 = 16,28 + 7 = 23,28 \text{ kN/m}^2$ (taban seviyesinde)

Zeminden ve taşıt ağırlığından dolayı oluşan yanal itki kuvvetleri, yük birleşimlerindeki katsayılar dikkate alındığından dolayı programda ayrı ayrı tanımlanmıştır. Bu aşamada taşıt yükü nedeniyle oluşan yanal itki kuvvetleri cidarlara düzgün yayılı yük olarak tanımlanmış olup, bu etki hareketli yük (Q) sınıfına dahil edilmiştir.

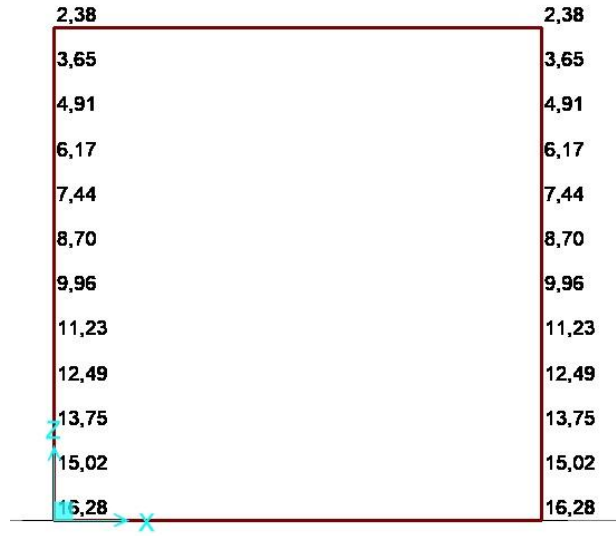
Menfez cidarlarının üst ve alt uçlarında zemin etkisiyle oluşan yanal kuvvetleri tanımlamak amacıyla, öncelikli olarak “Assign – Joint Patterns” komutu kullanılmıştır. Bu komut aracılığıyla yamuk yayılı yük için yükleme geometrisi, aşağıda verilen (14) denkleminde yararlanılarak oluşturulmuştur.

$$\text{Değer (PV)} = Ax + By + Cz + D \quad (14)$$

Burada yamuk yayılı yükün geometrisine uygun olarak PV değeri, tavana karşılık gelen gerilmeyi ($2,38 \text{ kN/m}^2$); D değeri, taban seviyesindeki gerilme değerini ($16,28 \text{ kN/m}^2$); z değeri, menfez yüksekliğine bağlı aks aralığını ($3,255 \text{ m}$) ve C katsayısı, menfez yüksekliği boyunca birim uzunluğa karşılık gelen yük değişimini belirtmektedir. Bu amaçla (14) denkleminde x ve y değerleri 0'a eşit olmak üzere, C katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

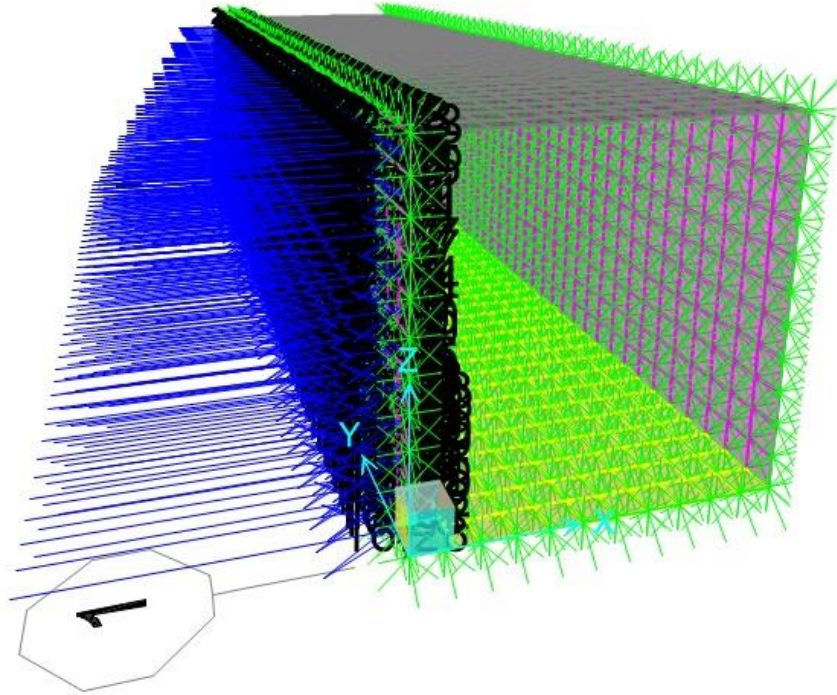
- $0 + 0 + (C \times 3,255) + 16,28 = 2,38 \text{ kN/m}^2$ olmak üzere $C = - 4,27$

C ve D değerleri (14) denkleminde yerine yazılarak oluşturulan yamuk yükleme geometrisine ait değerler Şekil 28'de gösterilmiştir. Buradaki değerler her bir sonlu elemanın uç noktalarına karşılık gelen itki kuvvetleridir.



Şekil 28. Toprak itkisine ait yükleme değerleri, XZ görünümü

Bu adımdan sonra, toprak itkisinden dolayı oluşan yayılı yük “Assign - Area Loads – Surface Pressure” komutu yardımıyla, Şekil 29’da gösterildiği gibi menfez cidarlarına tanımlanmıştır. Bu yükleme durumu sabit yük (G) sınıfına dahil edilmiştir.



Şekil 29. Sol cidarda oluşan yanal toprak itkisi

2.2.6.4. Deprem Etkisi Altında Dinamik Toprak İtkisi

Gömülü yapılarda deprem durumunda oluşan dinamik etki, toprak hareketlerini de önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu sebeple menfez cidarlarına etki eden toprak itkisi, dinamik durum için ayrıca dikkate alınmalıdır. Bu etki statik durumdaki toprak basıncına ilave bir yük olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, deprem etkisi altındaki toprak basınçlarının hesabı Mononobe-Okabe Yöntemiyle uyumlu olarak TBDY (2018) yönetmeliğine göre yapılmıştır.

Bu amaçla TBDY 2018 (16.12.2.1)'e göre öncelikli olarak yatay ve düşey statik-eşdeğer deprem katsayıları (k_h ve k_v) aşağıda verilen (15) ve (16) bağıntıları kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\bullet \quad k_h = \frac{0,4S_{DS}}{r} \quad (15)$$

$$\bullet \quad k_v = 0,5 k_h \quad (16)$$

Burada r katsayısı Deprem Yönetmeliğinde belirtilen Tablo 16.7'den 1 olarak alınmıştır.

(15) Bağıntısında verilen kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısının (S_{DS}) hesaplanabilmesi için, ilk olarak TBDY 2018 (2.1.2)'ye göre yürürlüğe konulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları kullanılmıştır. Bu haritalara, farklı deprem yer hareketi düzeyleri için deprem verilerini belirlemek amacıyla, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının (AFAD) resmi internet sitesinden ulaşılmaktadır.

Bu amaçla menfez projesinin uygulandığı bölgenin (Amasya-Turhal Karayolu, Albayrak Mahallesi) koordinatları AFAD haritaları üzerinden işaretlenmiştir. TBDY 2018 (2.2)'den yapıya uygun olarak standart tasarım deprem yer hareketi (DD-2) seçilmiştir. Bu yer hareketi yönetmelikte spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir (TBDY, 2018).

Spektral ivme katsayısının belirlenmesi için gerekli bir diğer veri, yerel zemin sınıfıdır. Menfezin inşa edildiği bölgenin zemin verileri dikkate alındığında yerel zemin Tablo 4 yardımıyla ZC olarak belirlenmiştir.

Tablo 4. Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe/ 30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	-	-
ZB	Az ayrıışmış, orta sağlam kayalar	760 - 1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrıışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 - 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 - 360	15 - 50	70 - 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak - katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşıbilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (>35m) yumuşak veya orta katı killer.			

Bulunan veriler AFAD'ın resmi sitesinde yer alan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasına girilmiştir (Şekil 30).



Şekil 30. AFAD Türkiye deprem tehlike haritaları uygulaması (URL-7, 2019).

Uygulamadan elde edilen sismik detay raporu neticesinde kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (S_S), 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_1), en büyük yer ivmesi (PGA) ve en büyük yer hızı (PGV) verilerine ulaşılmıştır.

- $S_S = 1,050$
- $S_1 = 0,321$
- $PGA = 0,441$ g
- $PGV = 30,277$ cm/sn

Dinamik toprak etkilerinin hesabında gerekli olan S_{DS} , (17) bağıntısında verildiği üzere; kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (S_S) ile yerel zemin etki katsayısının (F_S) çarpılması sonucu bulunmaktadır.

$$S_{DS} = S_S F_S \quad (17)$$

Burada gerekli olan bir diğer değer (F_S) ise aşağıda verilen Tablo 5 yardımıyla belirlenmiştir. Tabloya göre yerel zemin sınıfı ZC seçilip, S_S değeri 1,050 olarak alındığında F_S katsayısı 1,2 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için <i>Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S</i>					
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S = 1.25$	$S_S \leq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	<i>Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.</i>					

Bu doğrultuda deprem yönetmeliğinde belirtilen SDS değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- $S_{DS} = S_S F_S = 1,050 \times 1,2 = 1,26$

Düsey statik-eşdeğer deprem katsayıları hesabı (15) ve (16) bağıntılarıyla uyumlu olarak aşağıdaki gibi yapılmıştır.

- $k_h = \frac{0,4S_{DS}}{r} = \frac{0,4 \times 1,26}{1} = 0,504$
- $k_v = 0,5 k_h = 0,5 \times 0,504 = 0,252$

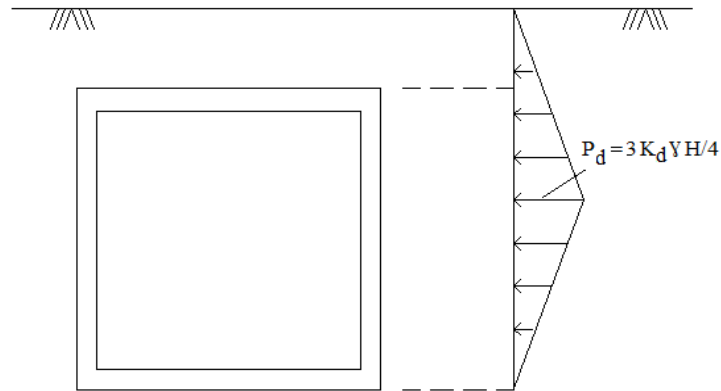
Statik-eşdeğer deprem katsayısına bağlı açı aşağıda verilen (18) bağıntısından elde edilmektedir. (TBDY, 2018). Burada k_h ve k_v değerleri yerine yazıldığında θ değeri 33,97 olarak hesaplanmıştır.

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{k_h}{1 \pm k_v} \right] \quad (18)$$

Son olarak toplam yanal basınç katsayısı K_t , (13) bağıntısı yardımıyla 1,17 olarak bulunmuş olup, bu değer statik ve dinamik durumlardaki yanal toprak basınç katsayılarının toplamıdır. Bu doğrultuda dinamik toprak basıncı katsayısı (K_d) aşağıda gösterildiği gibi 0,95 olarak hesaplanmıştır.

- $K_d = K_t - K = 1,17 - 0,22 = 0,95$

Deprem anındaki toprak hareketlerinden dolayı oluşan yanal kuvvetler cidarlara parabolik yayılı yük olarak etki etmekte olup, bu yükleme veri giriş kolaylığı nedeniyle Şekil 31'deki gibi yamuk yayılı yüke dönüştürülmüştür. Burada yamuk yüklemenin maksimum değeri (P_5), (19) denklemine göre hesaplanmaktadır.



Şekil 31. Deprem durumdaki yanal toprak basıncı

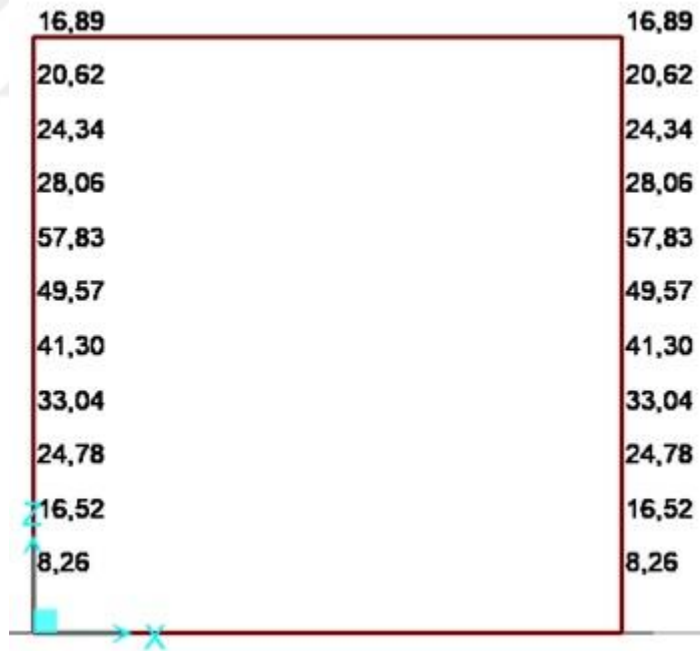
$$P_5 = 3K_d \gamma H / 4 \quad (19)$$

- $P_5 = 3 \times 0,95 \times 18 \times 4,51 / 4 = 57,83 \text{ kN/m}^2$ (dinamik durumdaki yanal basıncın maksimum değeri)
- $P_4 = [(3 \times 0,95 \times 18 \times 4,51 / 4) \times 0,6] / 2,055 = 16,89 \text{ kN/m}^2$ (tavan kotundaki dinamik yanal basınç)

Dinamik durumdaki yanal basınç kuvvetlerinin geometrisini programda tanımlamak amacıyla aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır.

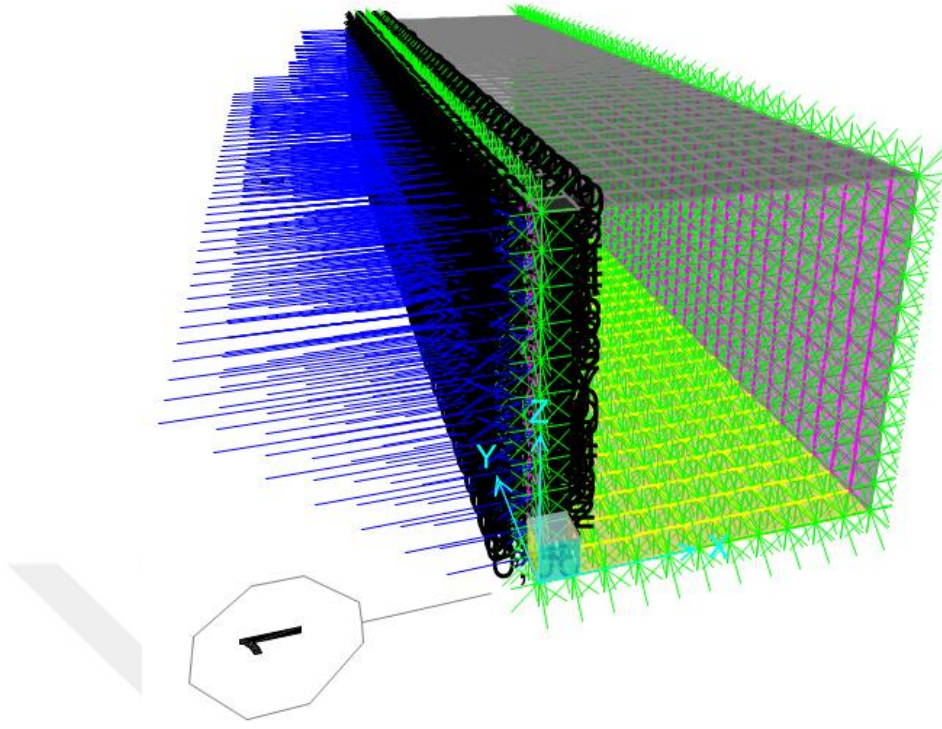
- $0 + 0 + (C \times 3,255) + 57,83 = 16,89 \text{ kN/m}^2$ olmak üzere $C = -12,56$ (Tavan Kotunda)
- $0 + 0 + (C \times 2,075) + 0 = 57,83 \text{ kN/m}^2$ olmak üzere $C = 27,874$ (Taban Kotunda)

Elde edilen değerler programa "Assign – Joint Patterns" komutuyla girilmiş olup, yükleme geometrisini gösteren Şekil 32 aşağıda verilmiştir.

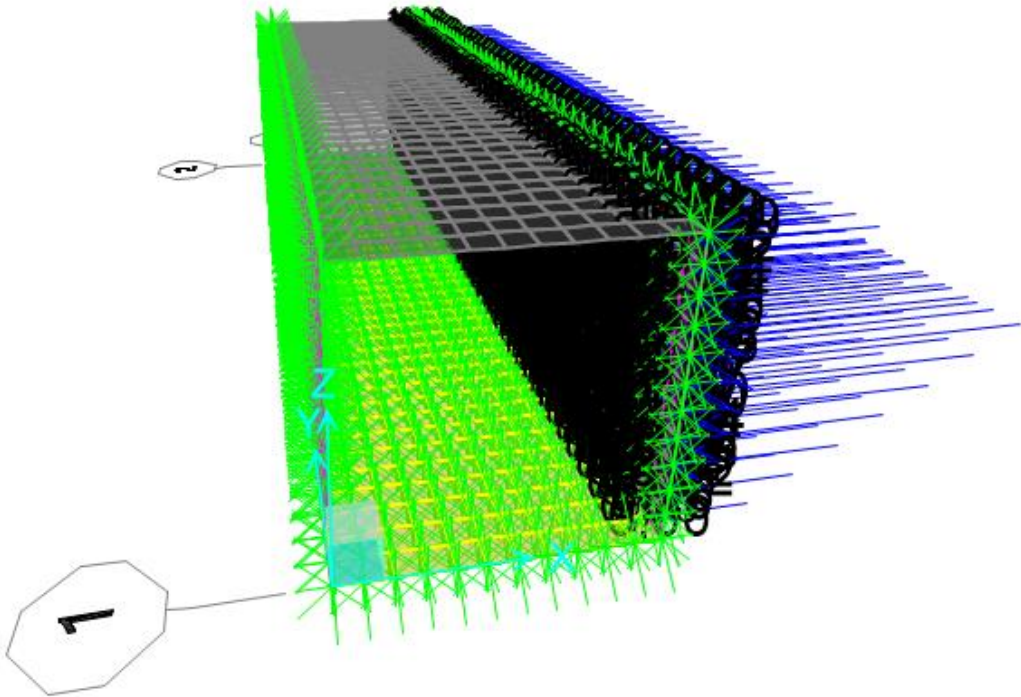


Şekil 32. Deprem durumdaki yükleme geometrisine ait değerler

Belirlenen yük geometrisine göre menfez cidarlarına (sol ve sağ) yüklenen dinamik yanal basınç kuvvetleri Şekil 33 ve Şekil 34'te gösterilmiştir. Bu yükleme programda DH olarak yüklemesine dahil edilmiştir.



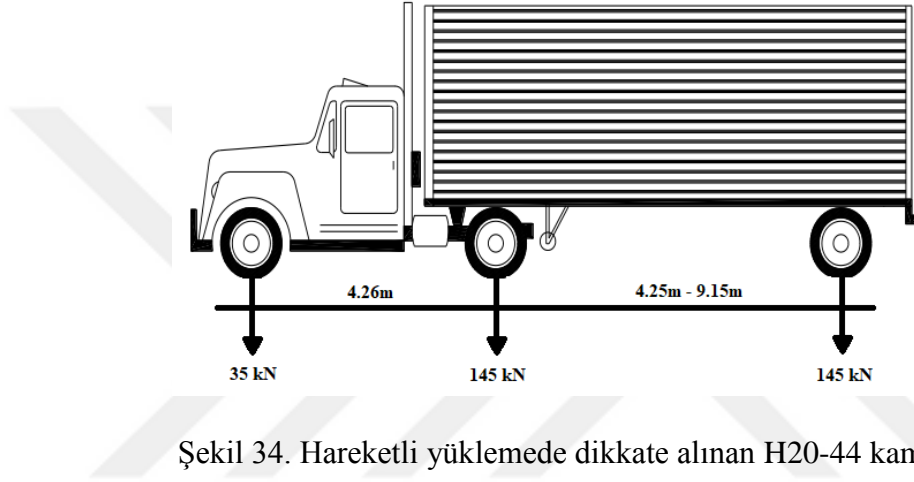
Şekil 33. Deprem durumunda sol cidara gelen yanıl basınç kuvvetleri



Şekil 34. Deprem durumunda sağ cidara gelen yanıl basınç kuvvetleri

2.2.6.5. Taşıt Yüğü

Hareketli yükleme durumunda dikkate alınacak taşıt yüğü olarak AASHTO'da tanımlı H20-44 kamyonu dikkate alınmıştır (Şekil 35). Dolgu yüksekliğinin 60 cm olmasından dolayı taşıt yüklemesinden dolayı oluşan ek yanıl basınç kuvvetleri yanıl basınç başlığı altında anlatılmıştır. Bu kısımda ise hareketli yüklemenin düşey etkileri menfez tavanına alana yayılı yük olarak etki ettirilmiş olup, Q yüklemesi olarak tanımlanmıştır.



Şekil 34. Hareketli yüklemede dikkate alınan H20-44 kamyonu

Menfez üzerinde etkili olan alana yayılı taşıt yüğü; 3,44 m'lik menfez genişliğı, 4,26 m'lik kısa dingil aralığı ve bu aralıkta etkili 180 kN'luk kuvvet dikkate alındığında aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- Taşıt yüğü (q_t) = $[(180 \times 2 \times 3,44) / 4,26] / (3,44 \times 12,1) = 6,98 \text{ kN/m}^2$

2.2.7. Yüğü Birleşimleri

Menfez modellerinin analizinde dikkate alınan yüğü birleşimleri TS500'den alınmış olup, bu birleşimler yüğü katsayıları ile beraber aşağıda verilmiştir. Burada G, sabit yükleri; Q, hareketli yükleri; H, yanıl toprak basınçlarını; DH, dinamik toprak itkisini temsil etmektedir.

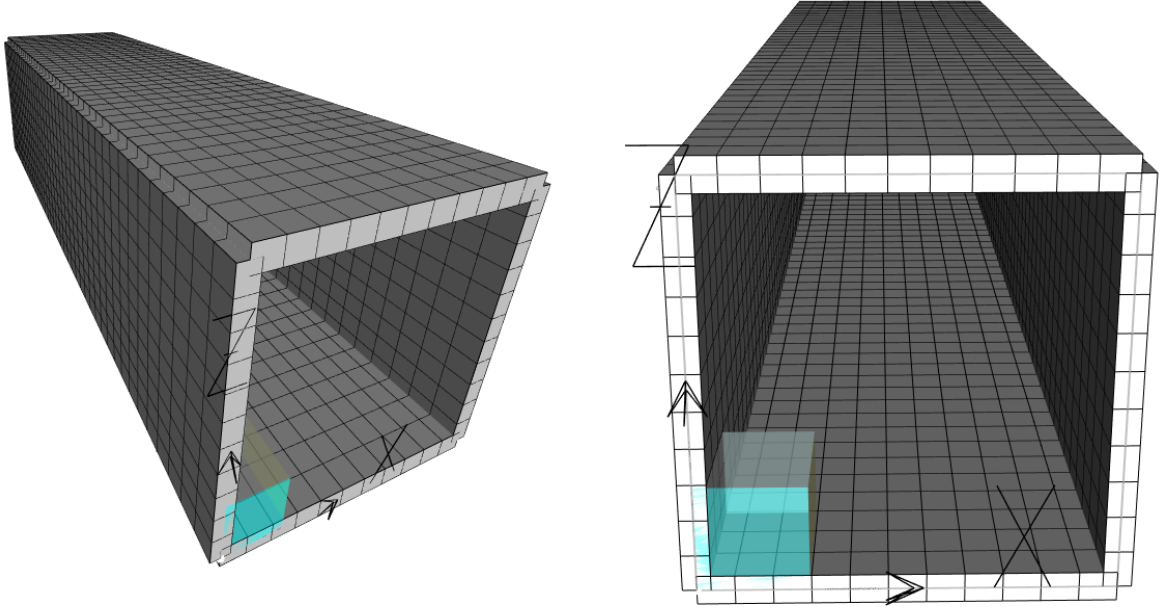
- YB1 = 1,4 G + 1,6 Q
- YB2 = 1,4 G + 1,6 Q + 1,6 H

- $YB3 = 0,9 G + 1,6 H$
- $YB4 = G + Q + 1,6 H + 1,6 DH$
- $YB5$ (Zarf Yükleme) = $YB1 + YB2 + YB3 + YB4$

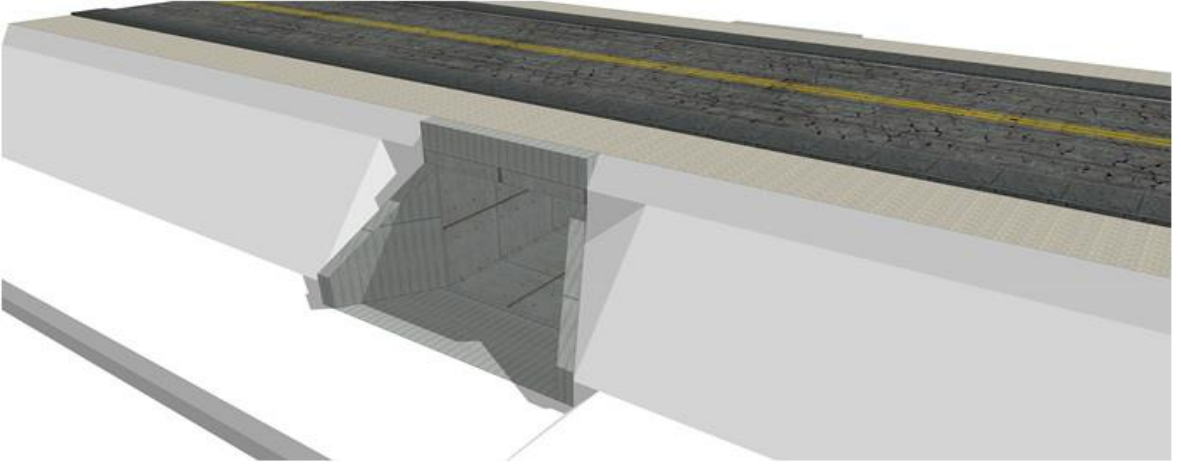
Yük birleşimlerine ilave edilen ve içerisinde tüm durumları barındıran zarf yüklemesi, elemanlarda oluşan en kritik etkilerin bir arada görüntülenebilmesi amacıyla oluşturulmuştur.

2.2.8. Menfezin 3 Boyutlu Görünüşleri

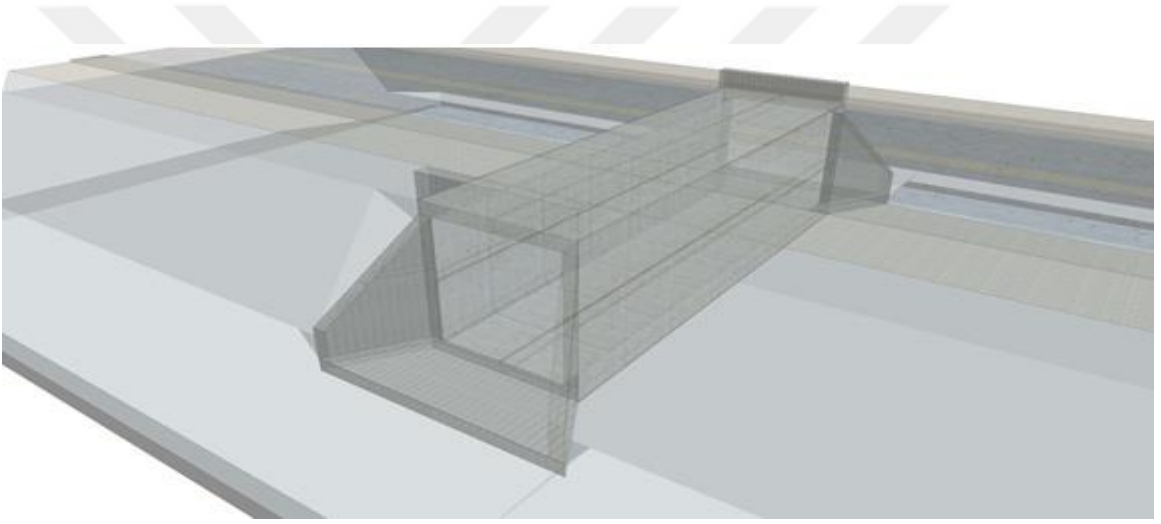
Yük birleşimlerinin tanımlanmasıyla birlikte menfezin modelleme aşamaları tamamlanmış olup, oluşturulan 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli aşağıda gösterilmiştir. Ayrıca Amasya-Turhal yolu üzerinde inşa edilen menfezin, inşaat süreçlerinde çekilen resimleri ile SketchUp programında çizilen katı modele ait genel görünüşler (render) aşağıda gösterilmiştir.



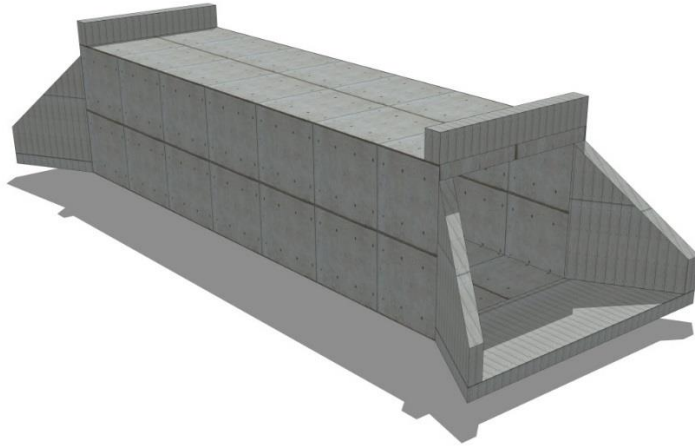
Şekil 35. 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli (SAP2000)



Şekil 36. Katı modele ait görünüş – yol ile birlikte (SketchUp)



Şekil 37. Katı modele ait saydam görünüş – yol ile birlikte (SketchUp)



Şekil 38. Katı modele ait 3D görünüş (SketchUp)



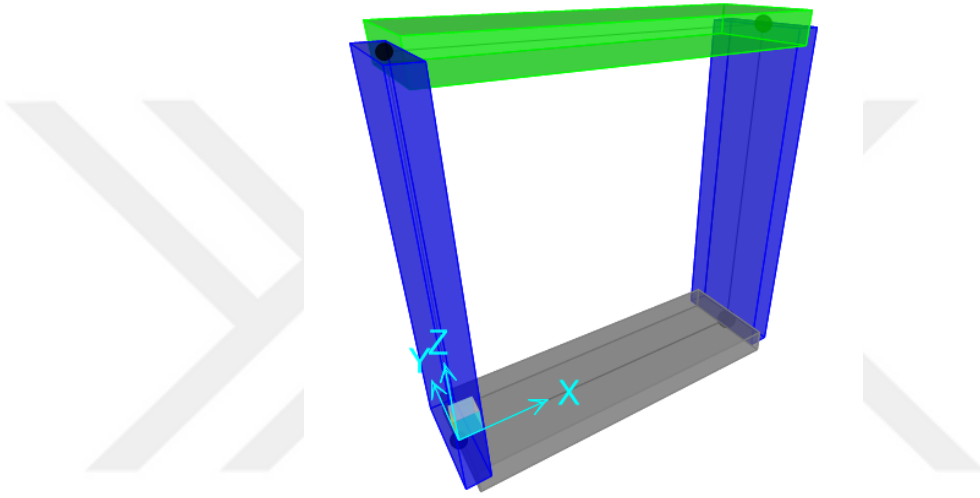
Şekil 39. Çalışmaya konu olan menfez (inşaat süreci)



Şekil 40. Çalışmaya konu olan menfez (Amasya-Turhal karayolu)

2.3. Çerçeve Sistem Modelinin Oluşturulması

Bu bölümde betonarme kutun menfezin düzlem çerçeve modeli oluşturulacak olup, hesap genişliği 1 m olarak belirlenmiştir. Çerçeve modelin oluşturulmasında öncelikli olarak iki boyutlu yapıya uygun olarak aks mesafeleri X-Z düzleminde girilmiş ve frame elemanlar kullanılarak menfez geometrisi oluşturulmuştur. Malzeme özellikleri ise üç boyutlu modeldekine benzer şekilde tanımlanmıştır.

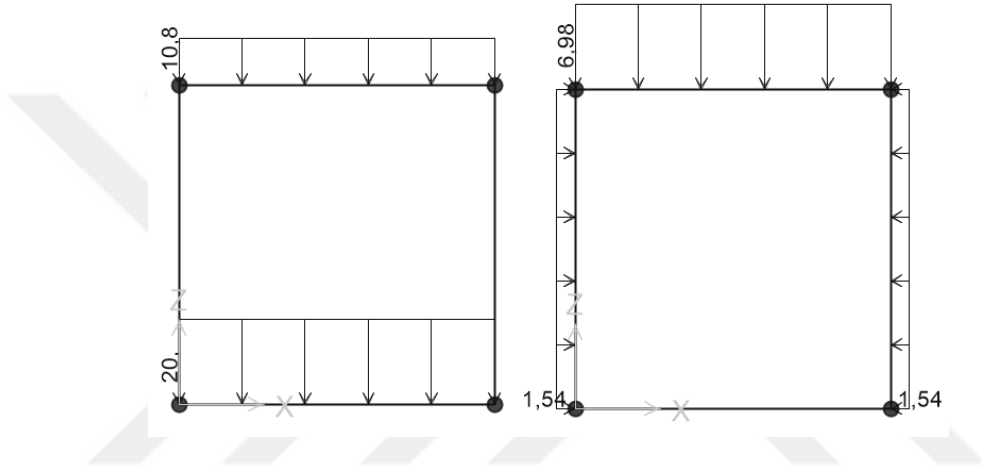


Şekil 41. Çerçeve sistem frame elemanları

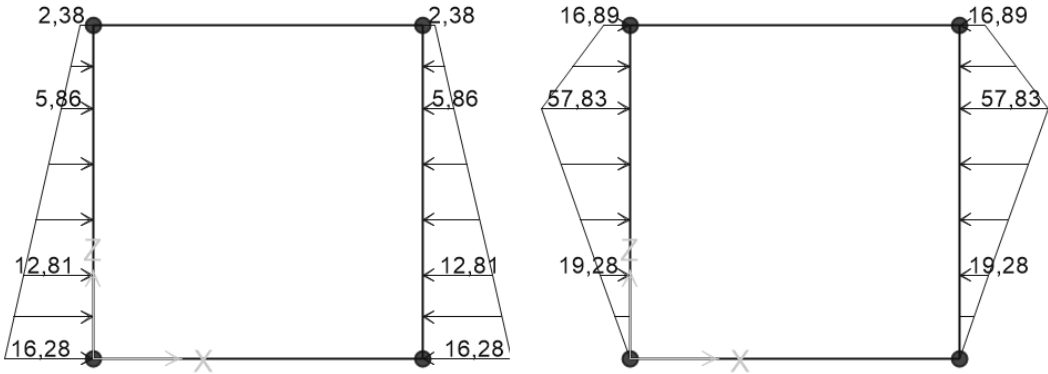
Üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde hesaplanan yük değerleri, 1 m'lik hesap genişliği dikkate alınarak çerçeve sisteme uyarlanmıştır. Bu aşamada farklı tipteki yüklemelerden dolayı oluşan etkiler menfez tavanında düzgün yayılı çizgisel yük, cidarlarda ise hem düzgün hem de yamuk yayılı yük olarak dikkate alınmıştır. Çerçeve sistem frame elemanları için hesaplanan yük değerleri ve yükleme durumları aşağıda gösterilmiştir.

- Dolgu yükü (q_d) = $0,6 \times 1 \times 18 = 10,8$ kN/m
- Su yükü (q_s) = $2 \times 1 \times 10 = 20$ kN/m
- Yanal toprak basıncı (P_1) = $0,22 \times 18 \times 0,6 \times 1 = 2,38$ kN/m (tavan seviyesi)
- Yanal toprak basıncı (P_2) = $0,22 \times 18 \times 4,11 \times 1 = 16,28$ kN/m (taban seviyesi)

- Taşıt yüküyle oluşan yanal kuvvet (P_3) = $[0,22 \times 290,7 / (3,44 \times 12,1)] \times 1 = 1,54$ kN/m
- $P_5 = [3 \times 0,95 \times 18 \times 4,51 / 4] \times 1 = 57,83$ kN/m (dinamik durumdaki yanal basıncın maksimum değeri)
- $P_4 = [(3 \times 0,95 \times 18 \times 4,51 / 4) \times 0,6] \times 1 / 2,055 = 16,89$ kN/m (dinamik durumda tavan seviyesindeki yanal basınç)
- Taşıt yükü (q_t) = $[(180 \times 2 \times 3,44) / 4,26] \times 1 / (3,44 \times 12,1) = 6,98$ kN/m



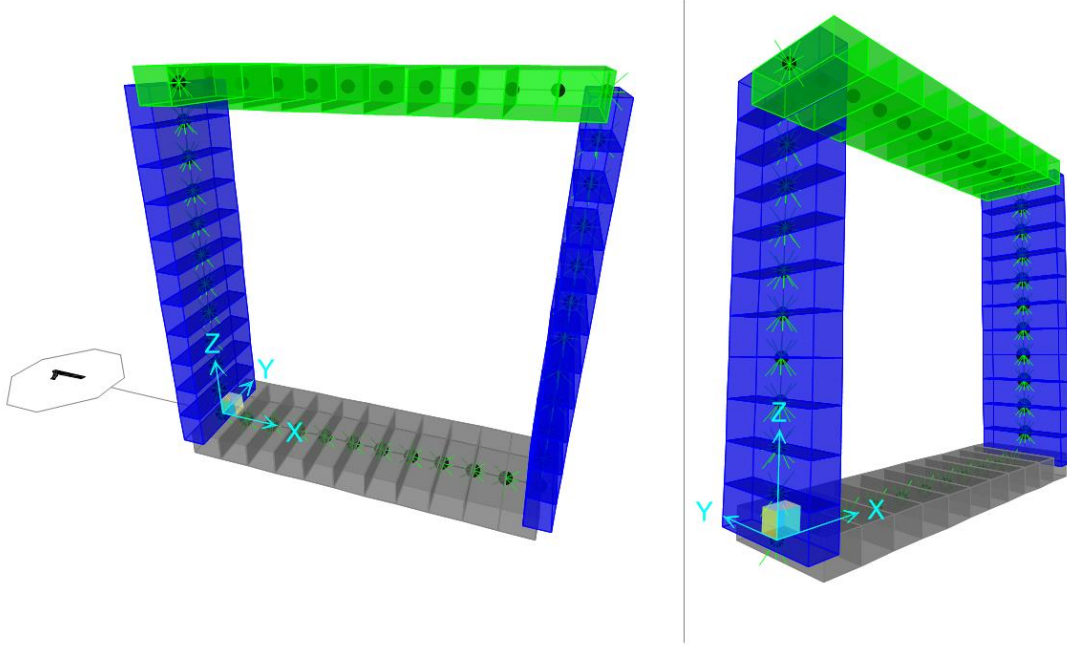
Şekil 42. G ve Q yüklemeleri



Şekil 43. Statik ve dinamik durumdaki yanal toprak itkisi (H ve DH)

Yapı elemanları sonlu elemanlar yöntemine uygun olarak 3 boyutu modeldekine benzer şekilde sonlu elemanlara ayrılarak (mesh aralığı 30 cm), eleman düğüm noktalarında gerekli mesnet koşulları oluşturulmuştur.

Daha sonra menfez tabanındaki düğüm noktalarına zemin yatak katsayısı dikkate alınarak, yapı zemin etkileşimini temsil etmesi için yaylar eklenmiştir. Çerçeve sistem analizi için gerekli olan yük birleşimleri Bölüm 2.2.7’de belirtildiği şekilde uygulanmıştır. Menfezin 1 metre hesap genişliğinde düzlem çerçeve sistem olarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 44. Düzlem çerçeve sistem sonlu elemanlar modeli

2.4. Menfez Modellerinin Analizi

Düzlem çerçeve sistem modeli ve üç boyutlu sonlu elemanlar modeli SAP2000 programında Bölüm 2.2.7’de belirtilen yük birleşimlerine göre lineer statik olarak analiz edilmiştir. Her iki modele ait analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak 3.Bölümde incelenmiştir.

3. İRDELEME

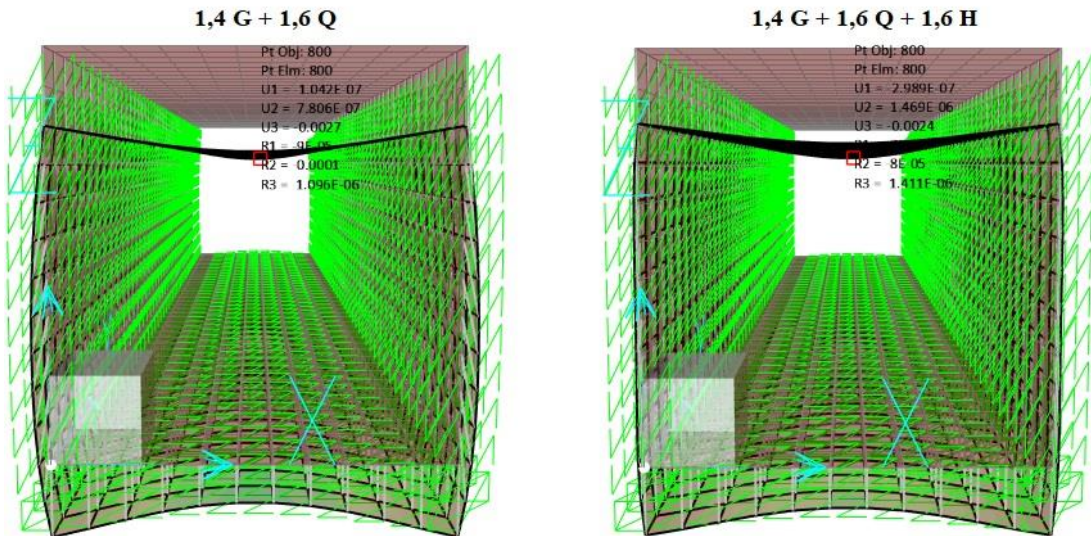
Bu bölümde, yapılan çalışmaya konu olan kutu kesitli betonarme menfezin, iki farklı yönteme göre oluşturulmuş sonlu elemanlar modellerinden elde edilen analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak yer almaktadır.

Analiz sonuçlarında her iki yöntem içinde şekil değiştirme biçimleri, yer değiştirme miktarları, kesit tesir değerleri ve bunlara bağlı elde edilen kontur diyagramları irdelenmiştir. Ayrıca programdan elde edilen donatı alanına bağlı olarak yaklaşık donatı miktarı ve aralıkları belirlenmiş olup, bu değerler Karayolları abaklarıyla kıyaslanmıştır. Eğilme ve kesme etkileri ise abaklardaki kesit boyutlarının yeterliliği bakımından incelenmiştir.

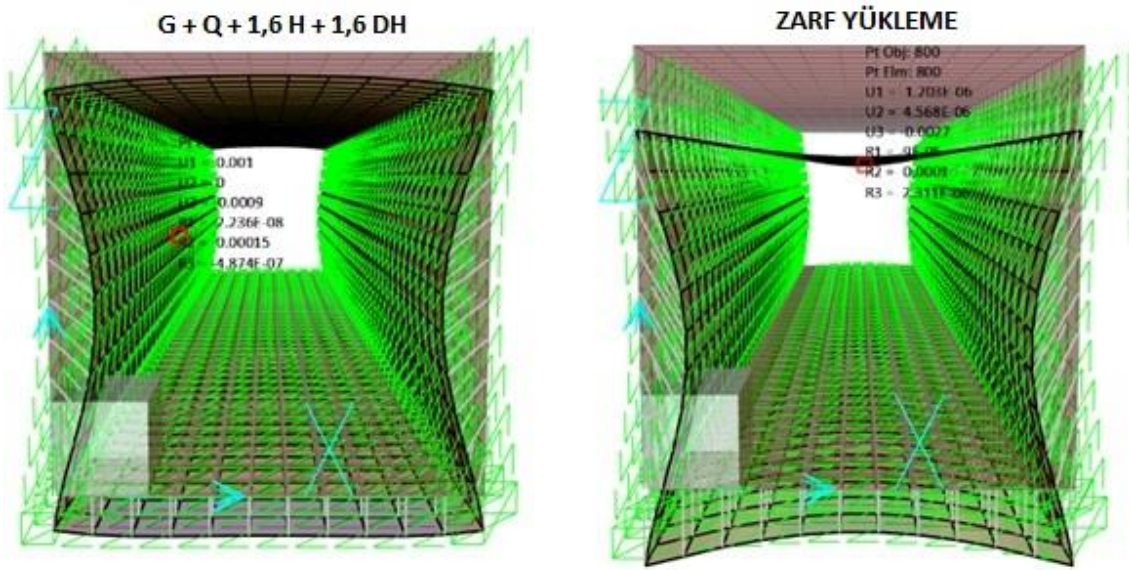
3.1. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Modelinin Analiz Sonuçları

Tanımlanan yük birleşimlerine göre yapılan 3 boyutlu sonlu elemanlar analizine göre, menfezde oluşan şekil değiştirme diyagramları, maksimum yer değiştirmeler ve kesit tesirlerine ait kontur diyagramları aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Yer Değiştirmeler



Şekil 45. 1 ve 2 numaralı yük birleşimlerinden elde edilen yer değiştirmeler



Şekil 46. 4 ve 5 numaralı yük birleşimlerinden elde edilen yer değiştirmeler

Farklı yük birleşimleri değerlendirildiğinde elemanlarda oluşan maksimum yer değiştirme değerleri Tablo 6’da verilmiştir.

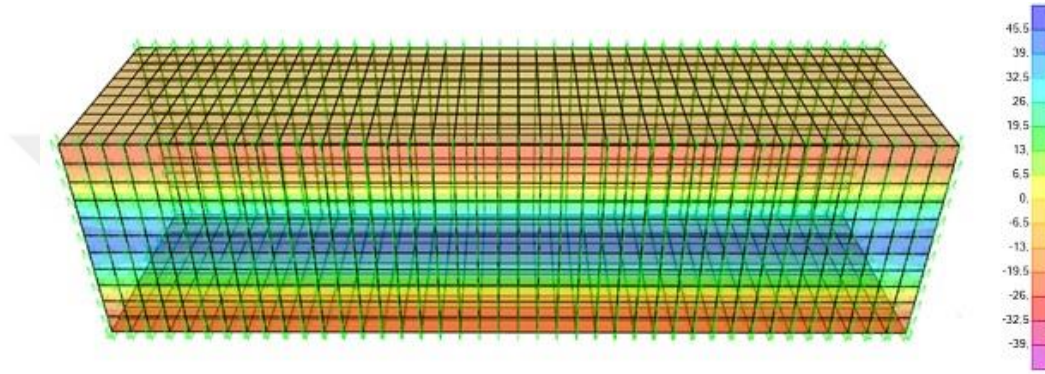
Tablo 6. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeline göre maksimum yer değiştirmeler

Eleman	Düğüm Noktası	Maksimum Yer Değiştirme (cm)	Yer Değiştirme Yönü (Local Axes)	Yük Birleşimi
Tavan	717-758 759-800	-0,238	U3 (Çökme)	1,4G+1,6Q+1,6H
Taban	13-15 506-507	-0,1971	U3 (Çökme)	1,4G+1,6Q+1,6H
Cidarlar	1440-1844	0,1125	U1 (Yatay Ötelenme)	G+Q+1,6H+1,6DH

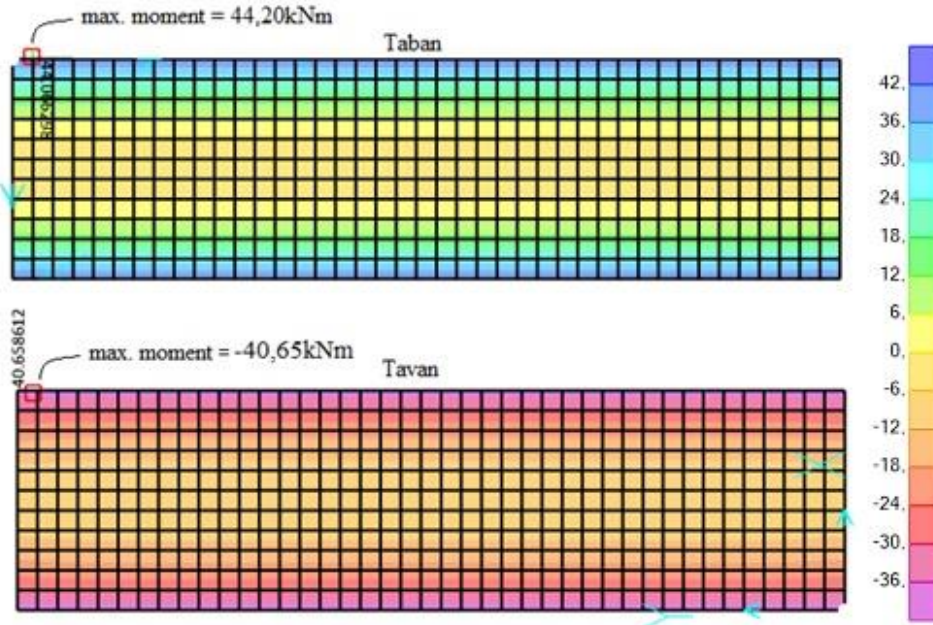
Buna göre üç boyutlu sonlu elemanlar yönteminde en büyük yer değiştirme değeri 0.238 cm (çökme) ile 1,4G+1,6Q+1,6H yüklemesi sonucu tavan ortasında oluşmaktadır. Cidarlarda ise dinamik toprak etkisinin dahil olduğu 4 numaralı yük birleşimi (G+Q+1,6H+1,6DH) 0,113 cm büyüklüğünde yanal ötelenmeye neden olmaktadır.

3.1.2. Kesit Tesirleri

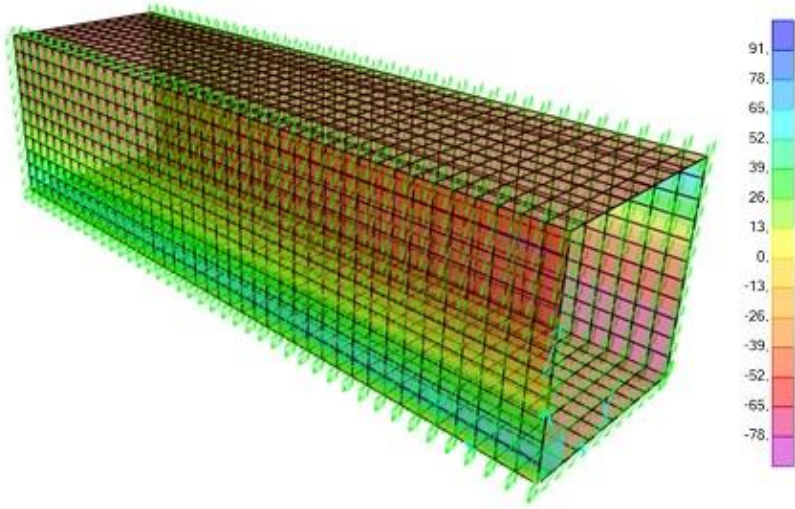
Farklı yük birleşimleri etkisiyle oluşabilecek en büyük kesit tesirlerini bir arada görebilmek amacıyla oluşturulan zarf yüklemesine ait eğilme momentlerine (M11-M22) ve kesme kuvvetlerine (V13-V23) ait diyagramlar aşağıda verilmiştir. Diyagramlardan elde edilen maksimum momentler ve kesme kuvvetleri ise Tablo 7 ve Tablo 8'de yer almaktadır.



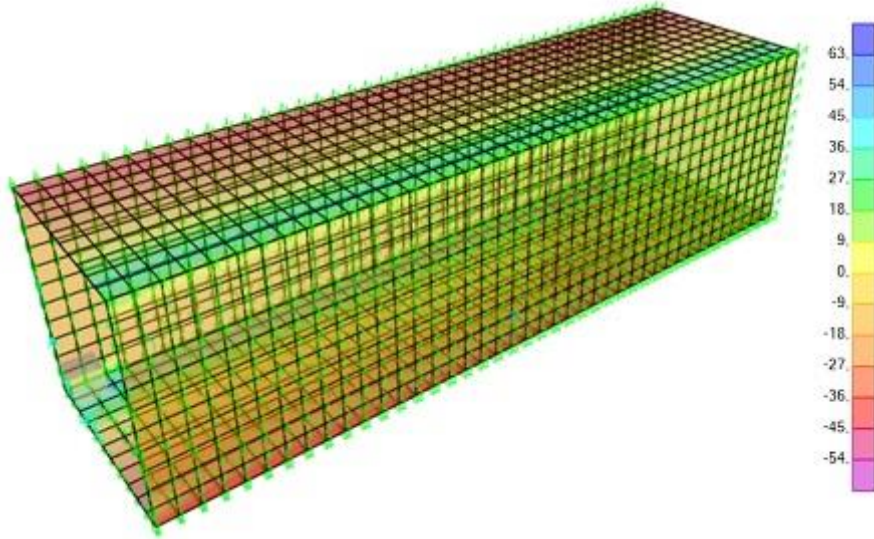
Şekil 47. Cidarda oluşan M22 momentlerine ait kontur diyagramları



Şekil 48. Taban ve tavanda oluşan M11 momentlerine ait kontur diyagramları



Şekil 49. Zarf yüklemesine ait V23 kesme kuvveti diyagramı



Şekil 50. Zarf yüklemesine ait V13 kesme kuvveti diyagramı

Tablo 7. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeline göre eğilme momentleri

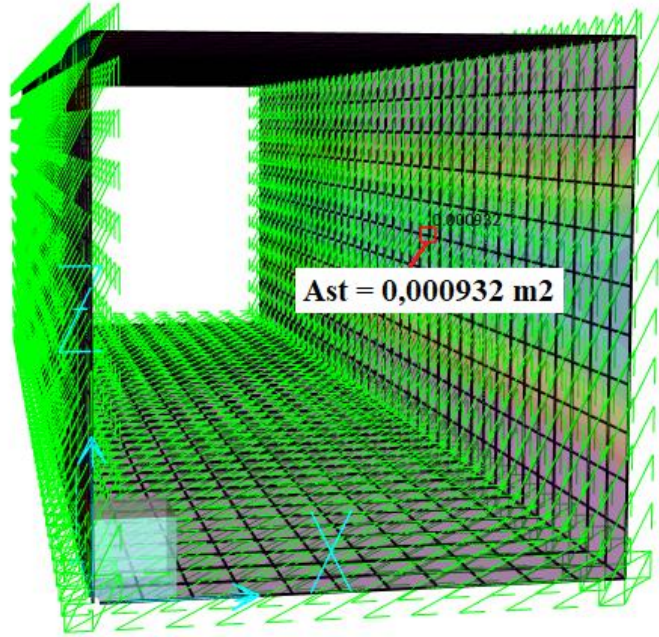
Eleman	Maksimum Eğilme Momenti (kNm)	Türü	Yük Birleşimi
Tavan	-40,65	M11	G+Q+1,6H+1,6DH
Taban	44,20	M11	G+Q+1,6H+1,6DH
Cidarlar	44,1	M22	G+Q+1,6H+1,6DH

Tablo 8. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeline göre kesme kuvvetleri

Eleman	Maksimum Kesme Kuvveti (kN)		Yük Birleşimi
Tavan	55,19	V13	1,4G+1,6Q+1,6H
Taban	77,56	V13	1,4G+1,6Q+1,6H
Cidarlar	88,73	V23	G+Q+1,6H+1,6DH

3.1.3. Donatı Hesabı

Kesit tesir diyagramları ve bu diyagramlara ait maksimum değerlerin verildiği tablolara göre en çok zorlanan bölgenin G+Q+1,6H+1,6DH yüklemesi sonucu cidarlar olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple donatı hesabında cidarlarda kontrol edilecektir.

Şekil 51. Cidarlarda gerekli donatı alanı (A_{st})

Gerekli donatı alanını karşılaması için $\phi 16$ 'lık donatı çapı seçilmiştir. Bu doğrultuda donatılar mesafesi aşağıda hesaplanmıştır.

- $\phi 16$ donatı alanı = $2,01 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

- Gerekli donatı alanı = 0,000932 m²
- Donatı adeti = 0,000932 / 2,01x10⁻⁴ = 5 adet
- Gerekli donatı = ϕ 16/20

Cidarlara gerekli donatı ϕ 16/20 olarak hesap edilmiştir. Aynı standartlardaki menfez için Karayolları abaklarında dolgu yüksekliği ve ebatlara bağlı olarak donatı düzeni ϕ 16/15 olarak belirtilmiştir. Bu durumda abaklarda verilen değerlerin yeteri kadar güvenli tarafta olduğu teyit edilmiştir.

3.2. Düzlem Çerçeve Sistemin Analiz Sonuçları

Bu bölümde üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile düzlem çerçeve sistemi karşılaştırmak amacıyla analiz sonuçlarına (yer değiştirmeler ve kesit tesir diyagramları) yer verilmiştir. Ayrıca iki yöntem ile elde edilen maksimum çökme değerlerinden büyük olanı alınarak zemin emniyet gerilmesi kontrolü yapılmıştır.

3.2.1. Yer Değiştirmeler

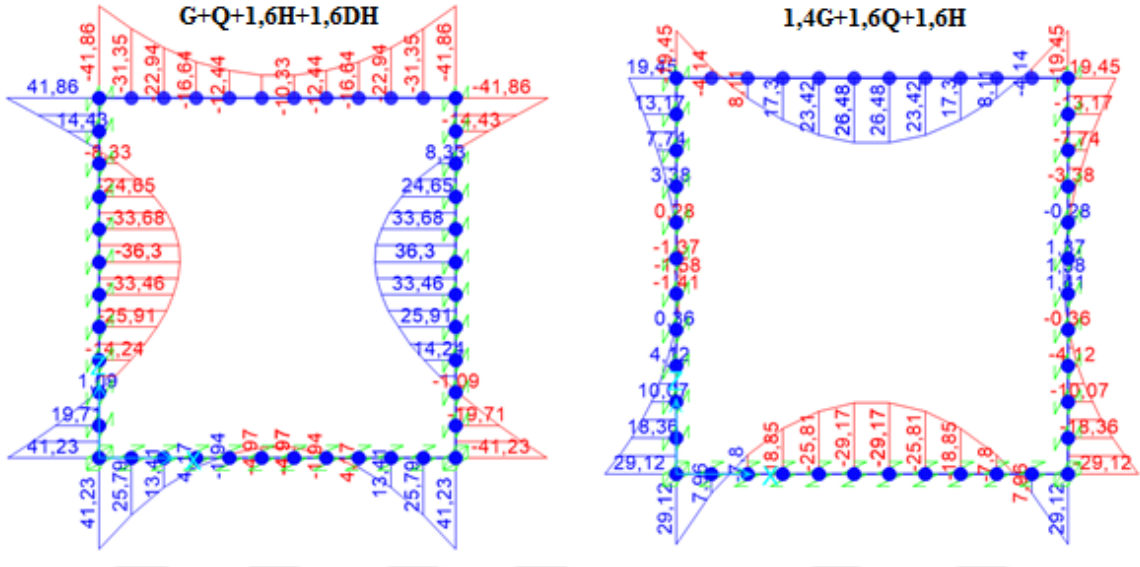
Maksimum yer değiştirmeler tavan ve tabanda 1,4G+1,6Q+1,6H yüklemesinden, cidarlarda ise G+Q+1,6H+1,6DH yüklemesinden elde edilmiş olup, sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 9. Düzlem çerçeve modeline ait maksimum yer değiştirmeler

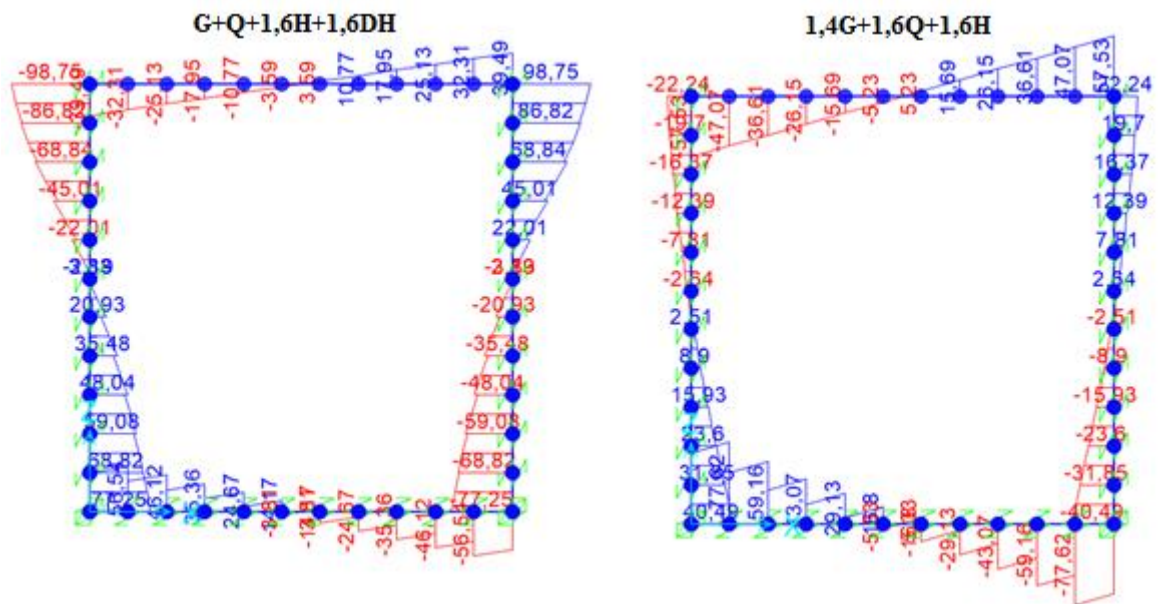
Eleman	Düğüm Noktası	Maksimum Yer Değiştirme (cm)	Yer Değiştirme Yönü (Local Axes)	Yük Birleşimi
Tavan	39-40	-0,307	U3 (Çökme)	1,4G+1,6Q+1,6H
Taban	1-3	-0,189	U3 (Çökme)	1,4G+1,6Q+1,6H
Cidarlar	10	0,1132	U1 (Yatay Ötelenme)	G+Q+1,6H+1,6DH

3.2.2. Kesit Tesir Diyagramları

Analiz sonuçlarına göre tavan, taban ve cidarlarda meydana gelen maksimum moment ve kesme kuvvetlerine neden olan yüklemelere ait diyagramlar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 52. 4 ve 2 numaralı yük birleşimlerinden elde edilen moment diyagramları



Şekil 53. 4 ve 2 numaralı yük birleşimlerinden elde edilen kesme kuvveti diyagramları

Düzlem çerçeve sisteme ait kesit tesir diyagramlarının maksimum değerleri aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 10. Çerçeve sistem modeline göre maksimum eğilme momentleri

Eleman	Maksimum Eğilme Momenti (kNm)	Türü	Yük Birleşimi
Tavan	-41,86	M3-3	G+Q+1,6H+1,6DH
Taban	41,23	M3-3	G+Q+1,6H+1,6DH
Cidarlar	36,3	M3-3	G+Q+1,6H+1,6DH

Tablo 11. Çerçeve sistem modeline göre maksimum kesme kuvvetleri

Eleman	Maksimum Kesme Kuvveti (kN)		Yük Birleşimi
Tavan	57,53	V2-2	1,4G+1,6Q+1,6H
Taban	77,62	V2-2	1,4G+1,6Q+1,6H
Cidarlar	98,75	V2-2	G+Q+1,6H+1,6DH

3.2.3. Menfez Temelinde Emniyet Gerilmesi ve Kesme Kontrolü

Menfez tabanında oluşan en büyük çökme değeri üç boyutlu sonlu elemanlar yönteminde 1,4G+1,6Q+1,6H yüklemesi ile elde edilmiş olup, bu değer zemin yatak katsayısı ile çarpılarak zeminde oluşan en büyük gerilme aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- Zeminde oluşan gerilme = $0,001971 \times 42000 = 82,78 \text{ kN/m}^2 < 200 \text{ kN/m}^2$

Hesaplanan bu değer, Bölüm 2.1’de verilen zemin emniyet gerilmesinden (200 kN/m^2) küçük olduğu için yeterlidir. Bu sonuç ayrıca, Karayolları abaklarında bu standartta bir menfez için belirtilen zemin emniyet gerilmesinin en az 150 kN/m^2 olması zorunluluğunu da doğrulamaktadır. Son olarak menfez tabanında (temelde) oluşan en büyük kesme kuvvetine göre temel kalınlığı kontrol edilmiştir. Bu doğrultuda C25/30 betonu dikkate alınarak yapılan hesap aşağıda belirtilmiştir. Elde edilen 724 kN , $77,62 \text{ kN}$ ’dan büyük olduğu için abaklarda belirtilen taban kalınlığı projeye uygundur.

- $V_d = 0,65f_{ctd}b_wd = [0,65 \times (1,8 / 1,5) \times 3440 \times 270] / 1000 = 724 \text{ kN} > 77,62 \text{ kN}$

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, menfezlerin tasarımında seçilecek yöntemin ve oluşturulan yapı modelinin analiz sonuçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Amasya-Turhal Karayolunda üzerinde inşa edilen bir menfez, sonuçların karşılaştırılması ve abaklarla uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ele alınmıştır. Bu doğrultuda menfez, Karayolları abaklarında belirtilen koşullar dikkate alınarak SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemine göre modellenmiştir. Modelleme işlemi; üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ve iki boyutlu çerçeve sistem olmak üzere iki aşamada tamamlanmıştır. Yük hesabı yapılan her iki modele de dolgu ağırlığı, su etkisi, taşıt yükü, statik durumdaki yanal toprak basıncı ve deprem anında oluşan dinamik itki aynı şekilde uygulanmıştır. Deprem anındaki dinamik toprak basınçlarının hesabında, 2018 yılında yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği esas alınmıştır. Zemin, temel seviyesinde yaylarla temsil edilmiş olup; gerekli mesnet koşulları düğüm noktalarına tanımlanmıştır. Modelleme aşamasının tamamlanması ve yüklerin oluşturulması sonucunda analiz kısmına geçilmiştir.

Üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde, çerçeve sistemden farklı olarak yapının gerçek geometrisine uygun biçimde sayfa düzlemine dik doğrultudaki etkiler de dikkate alınmıştır. Bu sayede menfez çözümlerinde daha çok kullanılan çerçeve sisteme göre daha farklı bir analiz modeli elde edilmiştir.

Farklı yük birleşimlerinin her iki yöntemde de dikkate alınması sonucu gerçekleştirilen yapısal analizlerden çıkarılabilecek başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Bu doğrultuda elde edilen veriler incelendiğinde; üç boyutlu modelin analiz sonuçları, çerçeve sistem modeline oldukça yakın çıkmıştır. Çerçeve sistem modelinden elde edilen kesme kuvvetlerinin, eğilme momentlerinin ve yer değiştirmelerin maksimum olduğu yerler benzer olmakla beraber, bunlara neden olan yük birleşimleri her iki yöntemde de aynıdır.
2. Her iki yöntemde de maksimum momentler ile cidarlarda oluşan maksimum kesme kuvvetleri dinamik etkinin dikkate alındığı yük birleşiminden ($G+Q+1,6H+1,6DH$) elde edilmiş; tavan ve taban kesme kuvvetleri ise $1,4G+1,6Q+1,6H$ yüklemesiyle maksimum değerlerini ulaştırmıştır.

3. Yer değiştirme miktarları her iki yöntemde de oldukça küçük olup, bu boyutlardaki bir menfez için yönetmelik dikkate alındığında kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır (TS 500, 2000).
4. Tabanda oluşan maksimum çökme değerinin, yatak katsayısı ile çarpılması sonucu bulunan gerilme değeri, emniyet gerilmesinden düşük çıkmıştır. Bu sebeple, abaklarda bu standartlarda bir menfezin yapılacağı zemin için verilen minimum zemin emniyet gerilmesi değeri projeye uygundur.
5. Analiz sonucuna göre cidarlarda $\phi 16/20$ olarak hesaplanan donatı miktarı dikkate alındığında, abaklarda verilen donatının ($\phi 16/15$) incelenen menfez için yeterince güvenli olduğu anlaşılmıştır.
6. Menfez çözümlerinde sıklıkla kullanılan düzlem çerçeve sistemin, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle yakın sonuçlar vermesi; bu yöntem yerine de pratik olarak kullanılabilieceği sonucunu doğurmuştur. Ayrıca her iki yöntem ile elde edilen sonuçlar, genel olarak Karayolları abaklarıyla örtüşmektedir.

5. KAYNAKLAR

- AASHTO LRFD, 2012. Bridge Desing Specifications, Washington,DC, Sixth Edition,
- Abuhajar, O., Naggar, H., E. Ve Newson, T., 2015. Static Soil Culvert Interaction the Effect of Box Culvert Geometric, Configurations and Soil Properties, Computers and Geotechnics, 69, 219–235.
- ASCE, 2008. ACPA Technical Series, Concrete Pipe Historical Overview of the RPC Industry Materials & Manufacturing Process for Reinforced Concrete Pipe I-2, Reston.
- Bowles, J.E., 1996. Foundation Analysis and Design, 5th Edition, The McGraw-Hill Companies, New York.
- Byrne, A., T., 1908. A Traitise on Highway Construction, Fifth Edition, New York.
- Çalışkan, U., 2007. Karayolu Ulaşım Ağlarında Yüzeysel Drenaj Sistemleri ve Hidrolik Tasarım Esasları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- FHWA, 2012. HIF-12-026, Hydraulic Design Of Highway Culverts, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Colorado, Third Edition.
- Gillespie, W., M., 1853. A Manual of The Principles and Practices of Roadmaking, Sixth Edition, A. S. Barnes & Co., New York.
- HEC 5, 1965. Hydraulic Charts for the Selection of Highway Culverts, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Colorado.
- Kang, M., S., Koo, J., H., Chun, J., A., Her, Y., G., Park, S., W. ve Yoo, K., 2009. Design of Drainage Culverts Considering Critical Storm Duration, Biosystems Engineering, I, 04, 425-434.
- Kheradi, H., Nagano, K., Nishi, H. ve Zhang, F., 2018. 1-G Shaking Table Tests on Seismic Enhancement of Existing Box Culvert with Partial Ground-Improvement Method and Its 2D Dynamic Simulation, Soils and Foundations, 58, 563–581.
- Kim, K. ve Yoo, C., H., 2005. Design Loading on Deeply Buried Box Culvert, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 131, 1.
- Kolate, N., Mathew, M., ve Mali, S., 2014. Analysis and Design of RCC Box Culvert, International Journal of Scientific & Engineering Research, 5, 12.

- Krishna, S., R. ve Rao, H., 2017. Study on Box Culvert Soil Interaction, International Journal of Civil Engineering and Technology, 8, 1.
- KTEK, 2016. Karayolları Tasarım El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- KTŞ, 2013. Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Mulvany, T, J, 1851. On the Use of Self-Registrating Rain and Flood Gauges, Trans Institution Civil Engineers, 4, 18-33.
- Norman, J, M, 1975. Improved Inlets for Highway Culverts, ASCE - Civil Engineering, 45, 3.
- Öztürk, M., Kaya, N., ve Aşkan, A., H., 2003. Menfezlerin Projelendirilmesinde Kullanılan Taşkın Hesap Metotlarının Değerlendirilmesi, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7, 2, 68-71.
- Simpson, B., Hoult, N., A. ve Moore, I., D., 2017. Rehabilitated Reinforced Concrete Culvert Performance Under Surface Loading, Tunnelling and Underground Space Technology, 69, 52–63.
- SKMT, 2005. Standart Tek Kutu Menfez Tipleri, Karayolları Genel Müdürlüğü Köprüler Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Şen, Z., 2017. Flood Modeling, Prediction and Mitigation, Springer International Publishing, New York.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- URL-1, <https://www.cpaas.asn.au/General/history.html>, 05 Ocak 2019.
- URL-2, <http://oregonewrg.org/wp-content/uploads/2015/12/Sheean-Culvert-Presentation.pdf>, A History of Culvert Design, 05 Ocak 2019.
- URL-3, <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/9435.pdf>, Geliştirilmiş Menfez Giriş Ağzları Kavramlarının Uygulanışı, 05 Ocak 2019.
- URL-4, <https://www.humes.co.nz/concrete-precaster/wing-walls/>, Concrete Precast Wing Walls, 05 Ocak 2019.
- URL-5, <http://drainage.armtec.com/>, HDPE Pipe, 05 Ocak 2019.

URL-6, <http://canadaculvert.com/products/corrugated-steel-pipe/steelcor/>, Corrugated Steel Pipe, 05 Ocak 2019.

URL-7, <https://tdth.afad.gov.tr/>, AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları, 05 Ocak 2019.



ÖZGEÇMİŞ

Sema ÖZEL, 1991 yılında Denizli ilinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Denizli' de tamamladı. 2009-2014 yılları arası Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında başladığı Karayolları 7. Bölge Müdürlüğü, Proje İzleme ve Toprak İşleri Kontrol Mühendisliği görevine halen devam etmektedir.

