

Seda YEDEK



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**YAPILARDA DON  
DERİNLİĞİNİN  
İNCELENMESİ**

**Seda YEDEK**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

EYLÜL 2020

EYLÜL 2020



# YAPILARDA DON DERİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

Seda YEDEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2020

Seda YEDEK tarafından hazırlanan “YAPILARDA DON DERİNLİĞİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Murat BİKÇE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....  
...

**Başkan:** Prof. Dr. Murat BİKÇE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....  
...

**Üye:**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Akdeniz Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....  
...

**Üye:**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....  
...

Tez Savunma

Tarihi: 09/09/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Tolga DEPCİ

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**ETİK BEYAN**

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Seda YEDEK

09/09/2020

YAPILARDA DON DERİNLİĞİNİN İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Seda YEDEK

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Ülkemizdeki soğuk iklimlerin yaşandığı bölgelerde inşa edilen yapıların tasarımında, zeminde oluşan donma ve çözülmenin, yapının zemininde oluşturacağı olumsuz etki ve değişimler hesaba katılmalıdır. Özellikle yüzeysel temel derinliğinin belirlenmesinde don penetrasyon derinliğinin göz önünde bulundurulması oldukça önemlidir. Donma-çözülme döngüsünün yapı temeli üzerinde olumsuz birçok etkiye yol açması sebebiyle, yüzeysel temellerin don derinliğinin altında tasarlanması gerekmektedir. Tahmini don derinliği haritasına sahip bölgelerde, bu değer haritadan direkt alınabilirken, haritası bulunmayan bölgelerde, tasarımcının bu değeri belirlemek için çaba sarf etmesi gerekmektedir. Türkiye'nin bazı bölgeleri kışın uzun süre don etkisine maruz kalmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye'de sadece esnek ulaşım yapıları için KGM tarafından sınırlı meteorolojik verilerle hazırlanmış donma derinliği haritası bulunmaktadır. Zemin özellikleri göz önüne alınmayarak yalnızca hava sıcaklığına bağlı olarak oluşturulan bu haritanın güncellenme gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Don derinliğinin belirlenmesinde çeşitli mekanik, amprik ve deneysel birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada, birçok araştırmacının yaygın olarak kullandığı ve deneysel ölçümlerle desteklediği ModBerggren yöntemi kullanılarak, Türkiye tahmini don penetrasyon derinliği değerlerinin hesaplanması ve güncel don penetrasyon haritasının oluşturulması amaçlanmıştır. Her il için, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde yer alan zemin sınıfları dikkate alınmıştır. Zemin sınıfına ait parametrik veriler yönteme dahil edilmiştir. Doğu Anadolu Bölgesi üzerinde yöntem uygulanmış ve harita üzerinde gösterilmiştir. Çalışma sonunda Türkiye geneli verileri ve oluşturulan harita ayrı bir dosya olarak eklenmiştir. Çalışma kapsamında, don derinliğinin zemin sınıflarına göre belirlenmesi ve ona uygun olacak şekilde yapı temelinin tasarımı hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Yüzeysel temel derinliği, don derinliği, donma-çözülme problemi, don kabarması, ModBerggren yöntemi, Türkiye don derinliği haritası

Sayfa Adedi : 59

Danışman : Prof. Dr. Murat BİKÇE

## INVESTIGATION OF FROST DEPTH IN STRUCTURE

(M. Sc. Thesis)

Seda YEDEK

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

September 2020

## ABSTRACT

In the design of the structures built in regions where cold climates are experienced in our country, the effects and changes of freezing and thawing on the ground should be taken into account. Especially, determination of frost penetration depth is very important in determining the shallow foundation depth. Since the freeze-thaw cycle has many negative effects on the building foundation, superficial foundations must be designed below the frost depth. While this value can be taken directly in regions with an estimated frost depth map, the designer should make an effort to determine the value in regions not available. Some regions of Turkey are exposed to long-term effects of winter frost. In this context, limited depth of freezing map in Turkey, despite its limited meteorological data, it has been prepared by the General Directorate of Highways for flexible access structures. Since the values in the prepared map are created only depending on the air temperature, regardless of the ground features, a new map is created. Various mechanical empirical and experimental methods have been developed for determining frost depth. In this study, the ModBerggren method, which is widely used by many researchers and supported by experimental measurements, was used. Turkey estimate of the value of frost penetration depth and aimed at building the a map. For each province, in 2018 Turkey earthquake Building Ground-class taken into account in the Regulation and parametric data pertaining to each floor were included in the class method considering the values set out in previous studies. In order to indicate how the method is applied in general and which equations are used, values are calculated in detail on the Eastern Anatolia Region and shown on the map. Turkey has been added as a separate file to the end of all data generated maps and work in general. Within the scope of the study, it was aimed to determine the frost depth according to the ground classes and to help design the foundation of the building in accordance with it.

Key Words : Shallow foundation depth, frost depth, freeze-thaw problems, frost heave, frost depth map Turkey  
Page Number : 59  
Supervisor : Prof. Dr. Murat BİKÇE

## TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tezimin hazırlanması sürecinde bilgi birikimleri ile hiçbir yardımcı esirgmeden destek olan ve daha iyisini yapmam için beni cesaretlendiren çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Murat BİKÇE'ye sonsuz saygı ve teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez çalışmamın araştırma ve değerlendirme kısımlarında büyük katkıları bulunan Dr. Öğr. Üyesi Müge Elif ORAKOĞLU FIRAT hocama teşekkürlerimi sunarım. Lisans ve yüksek lisans boyunca üzerimde büyük emekleri bulunan İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm hocalarıma çok teşekkür ederim. Her zaman manevi ve maddi desteği ile yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Lisans döneminden itibaren çalışmalarımın çoğunda yanımda olan ve tez çalışmamda desteğini esirgemeyen sevgili arkadaşım Osman Fatih BAYRAK, Zehra GİŐİ ve Nilay SABAHOĞLU'na teşekkürlerimi bildiririm.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİM LİSTESİ .....	xi
HARİTA LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	5
3. ULUSAL VE ULUSLARARASI ALANDA DON DERİNLİĞİ İLE İLGİLİ YÖNETMELİK VE STANDARTLAR	23
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
4.1. Mekanik Ampirik Modeller.....	27
4.1.1.Stefan Yöntemi .....	27
4.1.2.ModBerggren Yöntemi.....	28
4.1.3. Chisholm ve Phang Yöntemi .....	31
4.2. Ampirik Modeller .....	32
4.3. Nümerik Modeller.....	34
4.3.1. UNSAT-H Modeli.....	34
4.3.2. PCASE Yazılımı .....	35
4.4. Deneysel Yöntem.....	36



5. DOĞU ANADOLU BÖLGESİNİN DON DERİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ .....	39
6. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	46
7. SONUÇ ve ÖNERİLER .....	48
7.1. Sonuçlar.....	48
7.2. Öneriler .....	48
KAYNAKLAR .....	50
EK A .....	54
ÖZGEÇMİŞ .....	57

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Yalıtımsız zemindeki temel derinliği.....	24
Çizelge 3.2. Temel derinliği ve köşe yalıtımı.....	25
Çizelge 3.3. Yalıtımsız zemindeki temel derinliği (ince taneli zemin).....	25
Çizelge 3.4. Yalıtımsız zemindeki temel derinliği (iri taneli zemin).....	25
Çizelge 5.1. Kars-Hasankale yolu üzerinde yapılan ölçümler sonucu don derinlikleri.	40
Çizelge 5.2. Cihazların kullanıldığı yerler ve elde edilen don derinlikleri .....	40
Çizelge 5.3. 2018 TBDY de belirtilen zemin sınıfları ve literatürde belirtilen özellikleri.....	42
Çizelge 5.4. 1927-2018 ölçüm periyodunda aylara göre ortalama hava sıcaklıkları (°C).....	43
Çizelge 5.5. Don derinliği parametreleri .....	43
Çizelge 5.6. Erzurum ili için don derinliğinin belirlenmesinde kullanılan değerler.....	44

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Binadaki donma derinliğinin şematik gösterimi .....	1
Şekil 1.2. Zeminlerde donma etkisi (a) buz merceklerinin büyümesi, (b) zemin taneleri çevresinde basınç gradyanının oluşumu (Andersons ve Ozola, 2013).....	2
Şekil 4.1. Füzyon parametresine karşılık gelen korelasyon katsayısı (Baladi ve Rajaei, 2015a).....	30
Şekil 4.2. Donma tüpünün bileşenleri .....	37
Şekil 4.3. a) Bir donma tüpünün şematik diyagramı, b) Zemin donma döneminde donma tüpü ve c) Zemin çözülme döneminde donma tüpü (Iwata vd., 2012) ..	37
Şekil 5.1. DAB Zemin Sınıflarına Göre Don Penetrasyon Derinlikleri.....	44
Şekil 5.2. Zemin sınıflarına göre hesaplanan don derinlikleri ve KGM tarafından verilen derinlik değerlerinin 1997 ABYYHY ve ISO 13793'de verilen temel değerlerine göre kıyaslanması .....	45
Şekil 6.1. Hesaplanan don derinliği değerleri ile KGM tarafından tahmin edilen don derinliklerinin karşılaştırılması .....	46

## RESİM LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 1.1. 1970 yılında Ulan Batur'da don kabarması sebebiyle hasar görmüş yapılar (Dalai, 2010).....	3
Resim 1.2. a-b) Ulan Batur'da ofis binasında don kabarmasının sebep olduğu çatlaklar, c) Garajın önündeki betonun altında don kabarması nedeniyle zeminin yükselmesi ve kapıların tamamen açılmaması (Dalai, 2010).....	3
Resim 2.1. Asfalt yüzey kaplamalarında maksimum don penetrasyon derinliği.....	8
Resim 2.2. Bozulmamış ve kardan temizlenmiş zeminlerde maksimum don derinliği .	8
Resim 2.3. Güney Ontario'nun donma indeksi haritası.....	10
Resim 2.4. a) Donma derinliği sensörünün yol alt tabanına yerleştirilmesi, Orta: Elektrik iletkenliği, sıcaklık ve faz (su / buz) için kullanıcı arayüzü okumaları, b) Yol ağında rota analizi örneği.....	11
Resim 2.5. Test dönemi için model sonuçları.....	11
Resim 2.6. Güney Kore'de yerleştirilen don göstergesi konumları .....	12
Resim 2.7. Ölçülen don derinlikleri ve en uygun model.....	13
Resim 2.8. Stefan, ModBerggren ve Chisholm ve Phang denklemleri kullanılarak hesaplanan ve zamana bağlı olarak ölçülen don derinliği değerleri.....	15
Resim 2.9. Öngörülen don penetrasyon derinlikleri kontur haritası ve Türkiye'nin doğusundaki ana ulaşım ağları.....	16
Resim 2.10. Urmia İstasyonu için farklı derinliklerdeki toprak sıcaklığının üç boyutlu (Greenwich), Ocak 1996 .....	17
Resim 2.11. Yazd İstasyonu için farklı derinliklerde toprakta günlük sıcaklığın üç boyutlu modeli (Greenwich), Ocak 1996.....	17
Resim 2.12. Moğolistan'ın, belirtilen çözülme/donma derinliklerine göre bölgelere ayrılması .....	19
Resim 2.13. İncelenen istasyonlarda enterpolasyonlu gerçek donma derinliği ve üç boyutlu modeli .....	20
Resim 2.14. İncelenen istasyonlarda Norveç indeksi tarafından tahmin edilen enterpolasyonlu donma derinliği ve üç boyutlu modeli.....	20

**Resim****Sayfa**

Resim 2.15. İncelenen istasyonlarda Finn indeksi tarafından tahmin edilen enterpolasyonlu donma derinliği ve üç boyutlu modeli .....	21
---	----



**HARİTA LİSTESİ**

<b>Harita</b>	<b>Sayfa</b>
Harita 2.1. Türkiye Don İndeksi ve Don Penetrasyon Derinliği (Güngör ve Sağlık, 2008).....	22
Harita 5.1. 2019-2020 kış mevsimi ortalama sıcaklık haritası (MGM, 2020).....	39



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>cm</b>	Santimetre
<b>FI</b>	Freezing Index (Donma endeksi)
<b>AFI</b>	Air Freezing Index (Hava donma endeksi)
<b>CFDD</b>	Cumulative Freezing Degree Day (Kümülatif donma derecesi günü)
<b>CTDD</b>	Cumulative Thaw Degree Day (Kümülatif çözülme derecesi günü)
<b>F<sub>d</sub></b>	Tasarım dondurma endeksi
<b><math>\lambda</math></b>	Korelasyon katsayısı
<b>L</b>	Latent ısısı
<b>C</b>	Hacimsel ısı kapasitesi
<b><math>\theta_e</math></b>	Yıllık ortalama dış hava sıcaklığı
<b><math>\gamma_d</math></b>	Kuru birim hacim ağırlık
<b>k<sub>f</sub></b>	Termal iletkenlik
<b>T<sub>max</sub></b>	Maksimum günlük hava sıcaklığı
<b>T<sub>min</sub></b>	Minimum günlük hava sıcaklığı
<b>T<sub>mean</sub></b>	Ortalama günlük hava sıcaklığı
<b><math>\alpha</math></b>	Termal oran
<b><math>\mu</math></b>	Füzyon parametresi
<b>v<sub>o</sub></b>	Başlangıç sıcaklığı
<b>v<sub>s</sub></b>	Yıllık ortalama sıcaklık
<b>I</b>	Hava donma endeksi
<b>t</b>	Donma çözülme sezonunda geçen zaman
<b>C<sub>u</sub></b>	Donmamış zemin hacimsel ısı kapasitesi
<b>C<sub>f</sub></b>	Donmuş zemin hacimsel ısı kapasitesi
<b>C<sub>avg</sub></b>	Genel zemin çesidi için ortalama ısı kapasitesi

$d_n$	n'inci katman derinliği
$R_n$	n'inci katman termal yayılma
$P_{corr}$	Düzeltilmiş don derinliği
$CI$	Güven aralığı, anlamlılık düzeyi fonksiyonu
$S_e$	Kare hatalarının toplamı
$X_i$	Ölçülen donma derinliği
$X_{mean}$	Ölçülen ortalama donma derinliği
$\theta_r$	Artan su içeriği
$\theta_s$	Doymuş su içeriği
$h$	Emme yüksekliği
$\beta, n, m$	Uyarlama parametreleri
$\theta$	Termal iletkenliğe karşı gelen su içeriği
$H_0$	Don derinliği
$H_f$	Duvarlar için temel derinliği
$H_{fc}$	Köşeler için temel derinliği
$L_c$	Köşe yalıtımının uzunluğu
$b_{gc}$	Köşede zemin yalıtım genişliği
$b_g$	Dış zeminden ölçülen zemin yalıtım genişliği
<b>A, B, C, D, E</b>	Fit edilen parametreler

### **Kısaltmalar**

### **Açıklamalar**

<b>ABD</b>	Amerika Bileşik Devletleri
<b>YASS</b>	Yeraltı Su Seviyesi
<b>ISO</b>	International Standart (Uluslararası Standart)
<b>TDY</b>	Türkiye Deprem Yönetmeliği
<b>TBDY</b>	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
<b>TS</b>	Türk Standardı
<b>KGM</b>	Karayolları Genel Müdürlüğu
<b>FPSF</b>	Frost-Protected Shallow Foundation (Donmaya Karşı Korumalı Sığ Temel)
<b>RWIS</b>	Road Weather Information Systems (Kuzey Ontario Yol Hava Durumu Bilgi Sistemi)

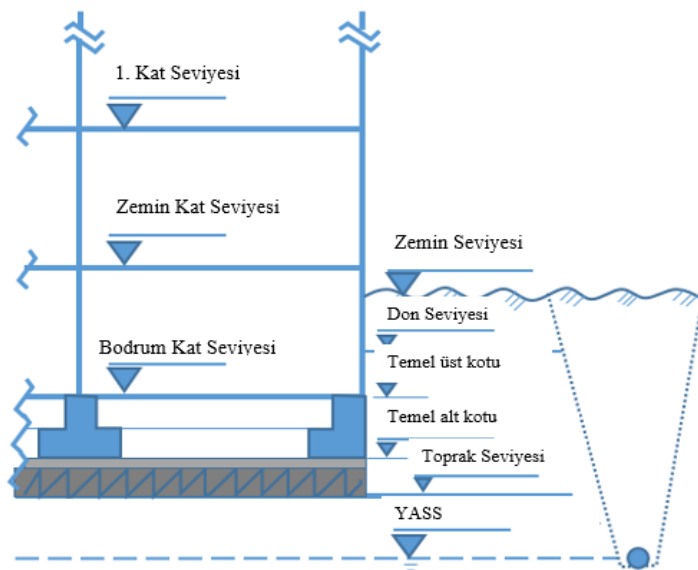


<b>UW</b>	Waterloo University (Waterloo Üniversitesi)
<b>MTO</b>	Transport Ministry of Ontario's (Ontario Ulaştırma Bakanlığı)
<b>NDAWN</b>	North Dakota Agricultural Air Network (Kuzey Dakota Tarımsal Hava Şebekesi)
<b>MDOT</b>	Michigan Department of Transportation (Michigan Ulaştırma Bakanlığı)
<b>UFC</b>	United Facilities Criteria (Birleşik Tesis Kriterleri)
<b>PCASE</b>	Pavement Transportation Computer Aided Structural Engineering (Üstyapı Taşımacılığı Bilgisayar Destekli Yapısal Mühendislik)
<b>ERDC</b>	Engineer Research and Development Center (Mühendis Araştırma ve Geliştirme Merkezi)
<b>SHAW</b>	Simultaneous Heat and Water Model (Eş zamanlı Isı ve Su Modeli)
<b>LTPP</b>	Long Term Pavement Performance (Uzun Süreli Kaplama Performansı)
<b>RC</b>	Reinforcement Concrete (Betonarme)
<b>ASCE</b>	American Society of Civil Engineers (Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği)
<b>DAB</b>	Doğu Anadolu Bölgesi)
<b>TBDY</b>	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
<b>MGM</b>	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
<b>SHA</b>	State Highway Agencies (Devlet Karayolu Ajansı)
<b>PST</b>	Pavement Surface Temperature (Kaldırım Yüzey Sıcaklığı)
<b>CPVC</b>	Chlorinated Polyvinyl Chloride (Klorlu Polivinil Klorür)

## 1. GİRİŞ

Soğuk iklimin hakim olduğu bölgelerde hava sıcaklığının  $0^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düşmesiyle birlikte belirli miktarda su içeriğine sahip zeminlerde donma ve çözülme döngüleri meydana gelmektedir. Dünya üzerindeki kara parçalarının yaklaşık olarak % 50'si yıllık döngü esnasında donmakta ve zeminde % 20 oranında permafrost tabaka oluşumuna neden olmaktadır (Sharratt vd., 1997; Sharratt ve McCool, 2005). Büyük oranda su içeren zeminlerde ise bu olay, buz mercceklerinin oluşması ve büyümesiyle beraber zeminde don kabarmaları şeklinde gözlenmektedir. Yer katmanları içerisinde suyun donması sebebiyle zemin yüzeyinin yükselmesi anlamına gelen don kabarması, deneysel olarak ilk defa 1930 yılında incelenmiştir (Taber, 1930).

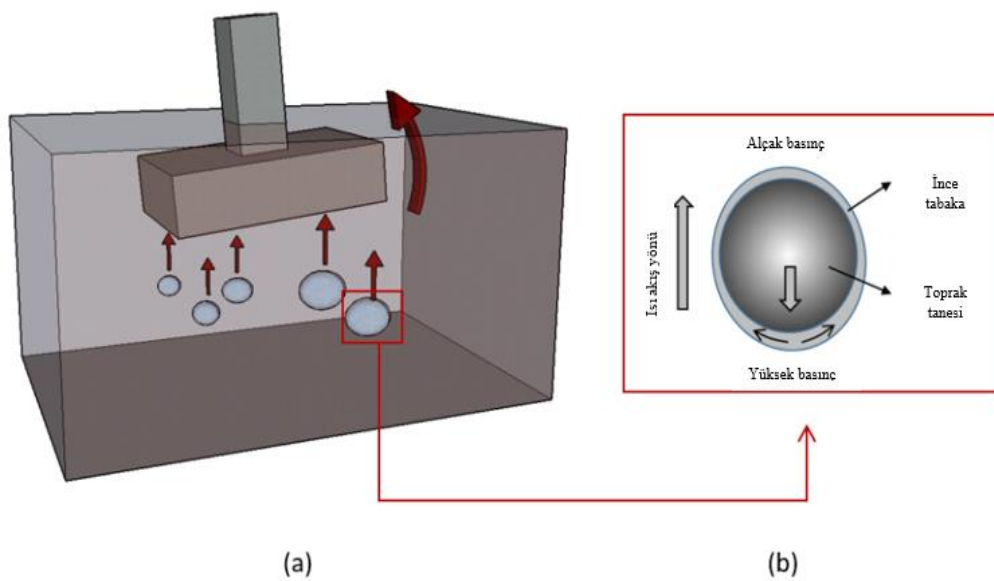
Donma-çözülme olayları, iklimsel değişiklikler ve jeolojik yapılanmadan dolayı ortaya çıkmaktadır. Tarımsal olarak dikkat gerektirdiği gibi inşaat mühendisliği yapılarının tasarımını da etkileyen önemli bir faktördür. Zemindeki donma-çözülme olayları, temeller, istinat yapıları, köprü ayakları ve ulaşım yapıları gibi yapının yerin altındaki elemanlarını gerilmelere maruz bırakmaktadır. Bu nedenle temel derinliği seçimi, zemin özellikleri, yer altı su seviyesi (YASS) ve yerel don derinliği göz önüne alınarak saptanmalıdır. Don derinliği, iklime bağlı olarak değişen ve tabii zemin kotundan aşağı ölçülen toprağın donma derinliğidir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Binadaki donma derinliğinin şematik gösterimi

Temel inşası sırasında YASS istenilen seviyede tutulması için drenaj sistemi gibi çözümler kullanılabilir (Şekil 1.1). Şekil 1.1’de görüldüğü gibi don kabarmasının zararlı etkilerini azaltabilmek için temel, en az don derinliğinin altına inilerek inşa edilmelidir. İklimle göre değişiklik gösteren don kabarmasına karşı, ülkeler yapılarını güvenlik altına almayı hedeflemektedir. Bu sebeple alınan önlemlerden biri, yapı temel derinlikleri için standart ve yönetmeliklerle çeşitli sınırlamalar getirilmektedir. International Standarda (ISO 13793) göre donma indeksi ve zeminin izole edilme durumuna bağlı olarak temel derinlikleri verilmiştir. Bu verilen temel derinliği değerlerine ek olarak bozulmamış zeminlerde donma indeksinin 2000 Kh’tan küçük olması durumunda temel derinliğinin en az 0,45 m olması gerektiği belirtilmiştir (ISO 13793, 2001).

Don kabarması, zeminin altındaki buz mercikleri nedeniyle bir binanın deformasyona uğramasına ve temellerin altında veya toprağa temas eden diğer yapısal elemanlarda hasar oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum soğuk iklimlerde, bina temellerinin minimum derinliğinin tasarımı ile ilgilidir. Don kabarması, zeminde donma çözülme etkisiyle temelin içinde yer aldığı tabakada ortaya çıkmaktadır. Temel don derinliğinde inşa edilirse, zeminde buz mercikleri oluşmaktadır. Bu mercıklar, hava sıcaklığının düşmesiyle suyun buza dönüşerek hacimce %9 oranında genişlemesi sonucunda ortaya çıkmaktadır (Andersons ve Ozola, 2013). Bu düzgün olmayan hacimsel değişim, yapı temellerinin düşey yönde yer değişimi göstermesine sebep olmaktadır (Şekil 1.2) (Andersons ve Ozola, 2013).

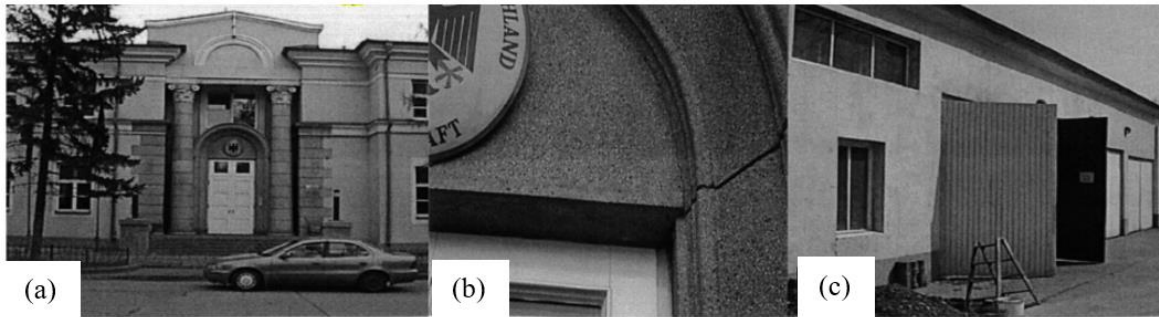


Şekil 1.2 Zeminlerde donma etkisi (a) buz mercıklarının büyümesi, (b) zemin taneleri çevresinde basınç gradyanının oluşumu (Andersons ve Ozola, 2013)

Dalai (2010), Moğolistan'ın Ulan Batur şehrinde yaptığı incelemeler ve araştırmalar sonucunda, 1970 yılında o zamanki 1528 evden 935'inin yani %61,2'sinin toprağın donması sebebiyle yapılarda önemli ölçüde hasar ve çatlaklara yol açtığını belirlemiştir. Don çatlaklarının, özellikle şehrin kuzeyindeki 6-8. mikro alanlarda bulunan birçok evin temellerini ciddi şekilde tahrip ettiğini belirtmiştir (Resim 1.1-1.2). 1950-1960 yıllarında kentin bu bölgesinde çoğunlukla 3-4 kat olarak inşa edilen birçok yapının temel derinliği beklenen donma tabakasının altında yapılmıştır. Buradaki binaların çoğunun bodrumunda yeraltı suyu sızıntısına uğradığı ve yapıların don kabarması nedeniyle hasar aldığını gözlemlemiştir (Resim 1.1, Resim 1.2).



Resim 1.1. 1970 yılında Ulan Batur'da don kabarması sebebiyle hasar görmüş yapılar (Dalai, 2010)



Resim 1.2. a-b) Ulan Batur'da ofis binasında don kabarmasının sebep olduğu çatlaklar, c) Garajın önündeki betonun altında don kabarması nedeniyle zeminin yükselmesi ve kapıların tamamen açılmaması (Dalai, 2010)

Temelerde oluşabilecek donma riskine karşı; temel derinliğinin donma derinliğinin altında ve yeterince derin olması, temeli yapmadan önce toprağın donmaya duyarlı olmayan bir malzeme ile değiştirilmesi veya yalıtım malzemelerinin temel altına donmayı önleyecek şekilde yerleştirilmesi gibi önlemler alınabilir.

Bazı ülke ve bölgelerde don derinlikleri henüz belirlenmemiştir. Örneğin, konuyla ilgili olarak TDY’de şu ifadeler yer almaktadır. 1975 - Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY), “Temel derinliği, yerel don derinliği göz önüne alınacağı”, 1997’de yayınlanan ABYYHY’te “*Temel derinliği, don derinliğinin altında olmak üzere, en az 80 cm olacağı*” belirtilmiş olsa da, binalar için açıklanmış don derinliği haritası olmayıp tamamen tasarımcıların inisiyatifine bırakılmıştır. Yazar tarafından, RC yapı standardında ve sonraki TDY’lerinde buna dair bir hükme rastlanmamıştır (TBDY, 2018; DBYBHY, 2007; TS500, 2000).

Bu çalışma, yılın önemli bir kısmında bazı bölgeleri sıfırın altında derecelerde aylarca kalan Türkiye’nin Doğu Anadolu Bölgesi’nin don derinliği tahminine yönelik ilk çalışmayı içermektedir.

Bu çalışmada, zeminde meydana gelen donma-çözülme olaylarının bina temellerinde oluşturacağı hasarı minimum düzeye indirmek amacıyla, Türkiye’deki tüm iller için don penetrasyon derinliği belirlenmiştir. Don derinliğinin belirlenmesi amacıyla değiştirilmiş Berggren (ModBerggren) yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada illerin son 80 yılın değişen sıcaklık değerleri dikkate alınmıştır. Her il için, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde yer alan zemin sınıfları dikkate alınmış ve her zemin sınıfına ait parametrik veriler önceki çalışmalarda yer alan değerler göz önünde bulundurularak yönteme dâhil edilmiştir. Yöntemin genel olarak nasıl uygulandığı ve hangi denklemlerin kullanıldığını belirtmek amacıyla Doğu Anadolu Bölgesi üzerinde ayrıntılı olarak değerler hesaplanmış ve harita üzerinde gösterilmiştir. Türkiye genelindeki tüm veriler ve oluşturulan tablo çalışma sonuna ayrı olarak eklenmiştir (Ek A). Çalışma kapsamında don derinliğini zemin sınıflarına göre belirlenmesi ve ona uygun şekilde yapı temel tasarımına yardımcı olacaktır. Elde edilen sonuçlar ilgili standartlarda belirtilen temel derinlikleri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bina temellerinde ve yollarda don kabarması sonucunda oluşan plastik deformasyonun yol açtığı çatlaklar soğuk bölgelerde ekonomik açıdan endişe duyulmasına yol açmaktadır (Sharratt ve McCool, 2005). Donma-çözülme olayının başlaması ve buz merceklerinin gelişmesiyle temeller istinat ve ulaşım yapıları, düşey ve yanal gerilmelere maruz kalmaktadır. Zeminde oluşan yer hareketleri ek baskı altındaki inşaat yapılarının hareket ederek hasar almasına sebep olmaktadır (Baladi ve Rajaei, 2015a; Sharratt ve McCool, 2005; Liu vd., 2012). Ancak bu hasarın, tasarım sürecinde zeminlerin don derinliğinin dikkate alınmasıyla en aza indirilebileceği belirlenmiştir. Özellikle temeller don olayının etkisiz hale getirilmesi için genellikle don çizgisinin altına inşa edilmektedir (Baladi ve Rajaei, 2015a).

Donma derinliği, hava sıcaklığına, zemin ısı özelliklerine, zemin su içeriğine, rüzgâr hızı ve yağış gibi iklim koşullarının bir fonksiyonu olarak nitelendirilmektedir (Baladi ve Rajaei, 2015a; Khalili vd., 2012). Tahmini don derinliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan birçok çalışmada farklı deneysel ve ampirik yöntemler uygulanmıştır (Aldrich Jr ve Paynter, 1953; Baladi ve Rajaei, 2015a; Bianchini ve Gonzalez, 2012; Chisholm ve Phang, 1983; Orakoglu vd., 2016; Sharratt ve McCool, 2005). Bu yöntemler donma ve çözülme sırasında zeminlerdeki ısı ve su transfer işlemlerinin farklılık derecelerine göre değişmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde donma- çözülme evresi sırasında toprağın mekanik ve fiziksel özelliklerinin değişmesiyle beraber temeller ve alt yapıların olumsuz etkilenebileceği belirlenmiştir (Baladi ve Rajaei, 2015; Bianchini ve Gonzalez, 2012). Zeminde donma miktarının belirlenmesinde en önemli faktör hava sıcaklığı olduğundan, birçok araştırmacı don derinliği ile hava sıcaklığını ilişkilendirmeye çalışmıştır (Fox, 1992; Stefan, 1890).

Stefan (1890), hava sıcaklığı gözlemlerini kullanarak zemin donma derinliğini belirlemek için “Stefan denklemi” olarak adlandırılan ampirik bir ilişki geliştirmiştir. Toprağın sabit yüzey sıcaklığı zaman ile çarpılarak, donma endeksine (FI) eşdeğer olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, hava sıcaklığını yüzey sıcaklığına dönüştürmek için boyutsuz bir çarpma parametresi (n) oluşturulan denkleme eklenmiştir. Stefan'ın denklemi toprağın ve suyun hacimsel ısı kapasitesini dikkate almadığından, sonuçların doğruluğu tartışmaya açık hale gelmiştir. Bu sebeple yeni araştırmaların gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Taber (1930), don kabarmasının özelliklerini deneysel olarak gösteren ilk çalışmayı hazırlamıştır. Yaptığı bu çalışmada suyun kapalı sistemlerde, yani mevcut suyun kaçamadığı ve içine ilave suyun giremediği sistemlerde donduğu deneyler sonucu ortaya çıkmıştır. İlk araştırmacıların deneyleri bu tür sistemlerle sınırlı olarak kalmıştır. 1914'teki don kabarması çalışmasında yazar, sıcaklığın yeterince düşük olduğu gecelerde açık sistemleri denemiştir. Çalışma, 1927 yılının Mart ayında, sıcaklığın yakından kontrol edilmesini mümkün kılan elektrikli bir soğutucu ile sürdürülmüştür.

Jumikis'in (1977), zeminde meydana gelen don derinliği tespiti için Stephan'ın analitik çözümünü kullanmaya yönelik araştırma yapılmıştır Haas ve Winters (1984), donma gözlenen günlerin sıcaklığına dayanan deneysel bir metod önermiştir. Callendar ve McCleod (1897) ise yaptıkları deneysel çalışmayla istasyonlardan alınan ilk sıcaklık değerlerini kullanarak toprağı bu sıcaklığa maruz bırakmış ve mevsimsel donmayı belirlemeyi amaçlamışlardır. Flerchinger (2013), don olayının, donma kabarması, aşınabilirlik, sızma, toplam stabilite ve çözünme hareketi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Thomas ve Trat (1984) iki boyutlu modellerde zeminlerin donması ve çözdürülmesi üzerinde çalışmıştır McCormick (1993), karayollarında oluşan don olayını araştırmıştır.

Agnieszka (1996) ve Steuer (1996), Hava Dondurma Endeksinin (AFI), don derinliğinin belirlenmesi için ana yönetim faktörü olduğunu önermiştir. Steuer yaptığı çalışma da hava dondurma indeksinin (AFI), 100 yıllık periyotta, bir bina temelini donma etkisinden korumak için gereken yalıtım miktarının bir göstergesi olduğunu ve donmaya karşı korumalı sığ temel (FPSF) tasarım kriterlerini geliştirmek amacıyla kullanmıştır. Bu yönde geliştirdiği çalışmalarda, AFI değerleri 100 yıllık dönüşüm periyotları için ABD iklim rejimlerine göre farklı uyum testi ve grafik analizlerine göre belirlemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda Weibull olasılık dağılımının, tüm ABD iklim rejimleri için AFI'nın 100 yıllık getiri dönemlerini tahmin etmek için en iyi seçim olduğunu göstermektedir. Bu indeks tamamen hava sıcaklığıyla ilgili olduğundan herhangi bir bölge için değerlendirilebilir ancak toprağına ait özelliklerin bilinmezliği nedeniyle doğruluğı tartışmaya açık bir konudur.

Tahmini don derinliğinin belirlenmesinde daha sağlıklı sonuçlar elde etmek için toprağın sıcaklığını belirlenmesi gerekir. Bu amaç doğrultusunda çeşitli modeller ve deneysel araçlar oluşturulmuştur. Fox (1992), Stefan denklemi ile zemin donma ve çözülmesinin, zemindeki su sızıntısı ve drenaj üzerindeki etkilerini açıklamak amacıyla bir hidroloji modeli

oluşturmuştur. Ancak oluşturulan bu modelde,  $n$  faktörlerini (yüzey çözülme derecesi-günlerin hava çözülme derecesi-günlere oranı) üretmek amacıyla ortam hava sıcaklıklarını yüzey sıcaklıklarına dönüştürmek için kullanılan yöntemin, duyarlılık analizi ve test çalışmalarında yer alan değişikliklerin çoğuna duyarsız olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple çalışmada  $n$  faktörü önceden tanımlanmamış, modelde sabit olarak ayarlanan farklı  $n$  faktörleri, kar ve toprağa ait termal iletkenlik kombinasyonları ile benzer sonuçlar alınabileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada kullanılan algoritmanın faydalı olduğu kanıtlanmış ancak daha fazla geliştirme ve teste ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

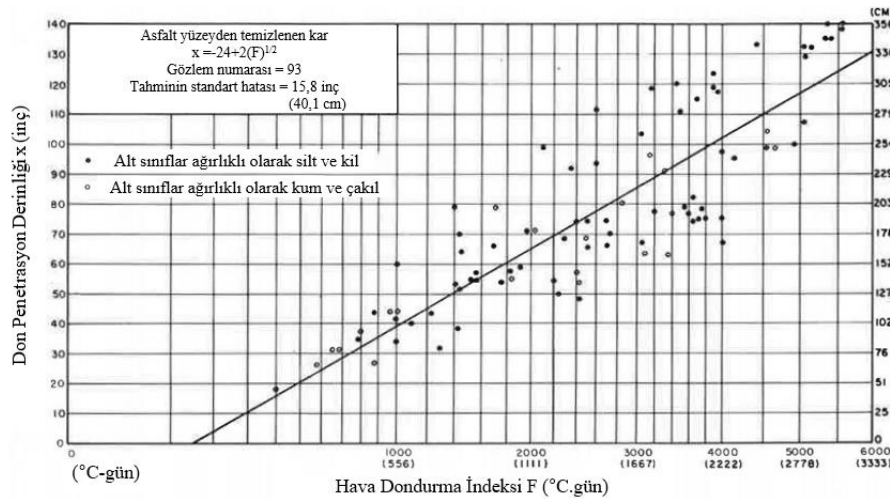
Mckeown ve Clark (1988), toprağa ait termal rejim ve çakılların donma sürecini incelemiştir. Donma derinliği ve zemin sıcaklıkları Tumbler'de 12 yerde 1983 ve 1985 yılları arasında düzenli olarak izlenmiştir. İncelenen zemin % 1,5-4 nem içeriğine sahip kuru çakıl olarak seçilmiştir. Kaydedilen maksimum don derinliği  $1.430^{\circ}\text{C-gün}$  olan bir kış için 3,98 m olarak belirlenmiştir. Stefan denklemi kullanılarak yapılan hesaplamalarda, hava ve yer dondurma endekslerine ilişkin  $n$  faktörü genellikle literatürde belirtilen değer aralığında olması sağlanmıştır. Çalışmanın sonucunda mevsimsel olarak donmuş bölgelerde kuru çakılların donma penetrasyonu genellikle donma endeksinin karekökü ile doğrusal olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde belirtilen  $n$  faktör göz önüne alındığında, donma indeksi ile donma derinliği ve karekök arasındaki orantısallık sabiti en iyi Stefan denklemi tarafından tahmin edildiği ortaya çıkmıştır.

Degaethano ve Cameron (2001) normal iklim verilerini kullanarak zeminlerin maksimum don penetrasyon derinliğini simüle etmiştir. Yapılan çalışmada batı ve orta ABD istasyonlarında yapılan 32 doğrulama çalışmasının sonuçları özetlenmiştir. Tüm bölgelerdeki değerler, gözlemlenen donma derinliği bölgelerine bağlı olarak ortalama fark (yani sapma) ile sadece 1,4 cm ve ortalama mutlak fark 5,4 cm olduğu belirlenmiştir. Nispeten sığ ve daha derin don derinliklerinin benzer mutlak doğrulukla tahmin edilebileceği, daha önemli olaylar için ortalama% 11'lik bir fark göz önünde bulundurularak daha sağlıklı sonuçlar elde edileceği belirtilmiştir.

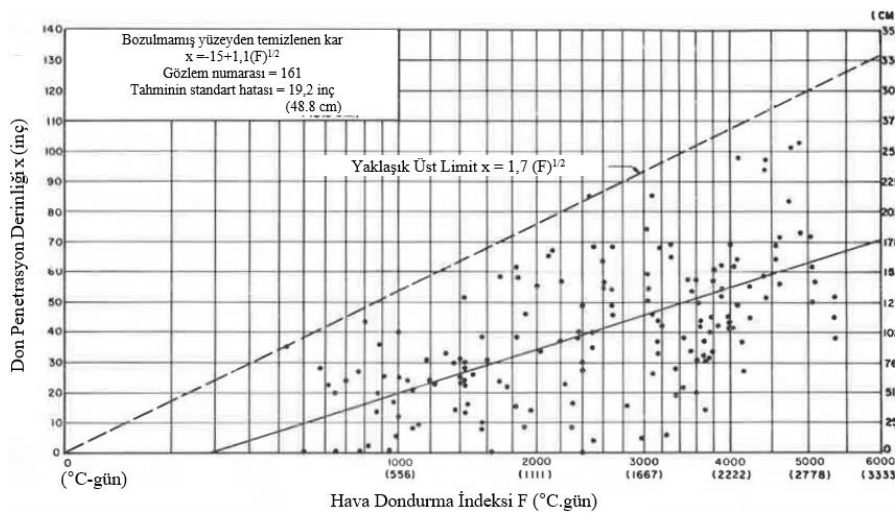
Argue ve Denyes (1974), maksimum don penetrasyon derinliği ile donma indeksi arasındaki ilişkiyi gösteren bir rapor hazırlamıştır. Kanada havaalanında belirli bir bölge için alınan hava donma indeksi ile hem asfalt hem de portland çimentosu beton kaplamalarının altındaki donma derinliğinin maksimum kışın kardan uzak tutulması arasında korelasyonlar



geliştirilmiştir (Resim 2.1, Resim 2.2). Bu korelasyonların standart hatası, sırasıyla yaklaşık 16 ve 12 inç (41 ve 30 cm) olduğu gözlemlenmiştir. Karla kaplı alanlarda beklenebilecek maksimum don penetrasyon derinliği, saha hava dondurma endeksi ile ilgili olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, permafrost alanlar için, çözülme penetrasyonu ve alan çözülme endeksi arasında ilişkiler geliştirilmiştir.



Resim 2.1. Asfalt yüzey kaplamalarında maksimum don penetrasyon derinliği (Argue Denyes, 1974)



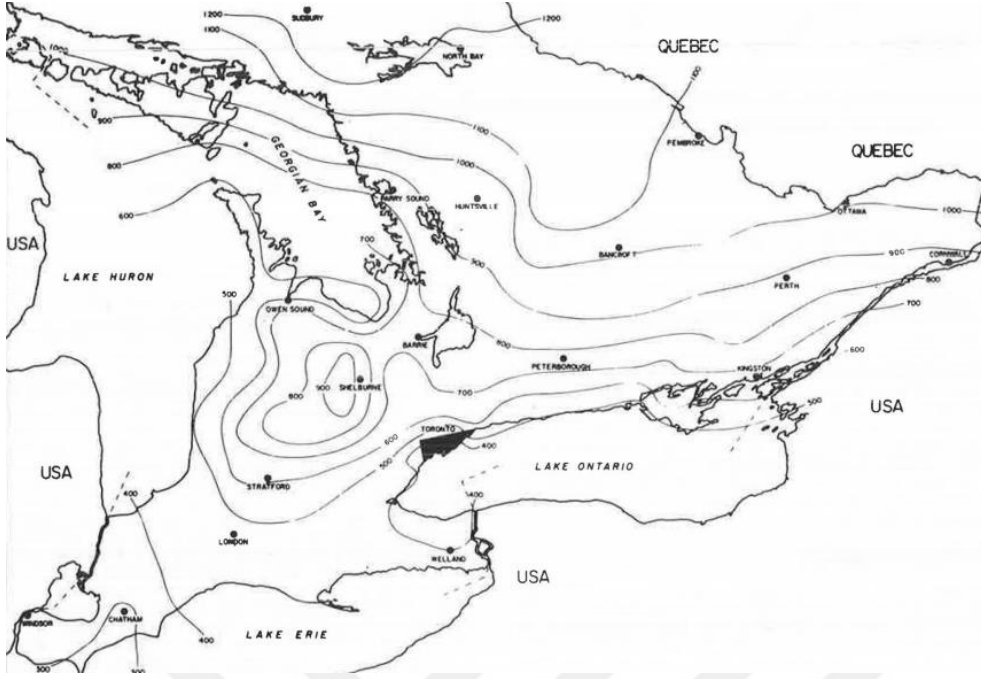
Resim 2.2. Bozulmamış ve kardan temizlenmiş zeminlerde maksimum don derinliği (Argue Denyes, 1974)

Zemin tipine ve karla kaplı olup olmamasına bağlı olarak donma endeksinden maksimum don derinliğini tahmin etmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Huen ve diğerleri Kuzey Ontario'da kurulan yol hava durumu bilgi sisteminden (RWIS) toplanan sıcaklık verileri ile don derinliğini tahmin etmeye çalışmıştır. Bu çalışmada donma ve çözülme indekslerine

dayalı olarak çözülme derinliğini tahmin etmek için modeller geliştirmek amaçlanmıştır. Saha veritabanı büyüdükçe, bu modellerin kalibrasyonu bu siteler için iyileştirilmesi hedef olarak belirlenmiştir (Huen vd., 2006).

Tighe ve diğerleri (2007) Kanada'nın Quebec kentinde don derinliğinin tahmini için deneye dayalı bir yöntem geliştirmek amacıyla araştırma yapmıştır. Bu araştırma, Waterloo Üniversitesi'nde (UW) Ontario Ulaştırma Bakanlığı (MTO) ile birlikte yürütülen iki yıllık bir projenin ikinci aşamasıdır. Projenin ilk aşamasında, kaldırımdaki don miktarını izlemek için Kuzey Ontario'ya deneysel alanlar kurulmuş, RWIS verilerinin ön analizi, karayolundaki don derinliği ile RWIS değişkenleri arasında makul bir korelasyon bulunmuştur. Yol Hava Bilgi Sistemleri (RWIS) gerçek zamanlı verilerini ve tahminlerini kullanarak projenin ikinci aşaması olan don ve çözülme derinlikleri için ampirik yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Araştırma kapsamına katman yüzeyi sıcaklığı ve kümülatif donma derecesi gününü dikkate alarak hesapladığı don derinliği değerlerini, gerçekte ölçülen değerlerle karşılaştırarak ilişkilendirmiş ve istatistiki bir denklem elde etmiştir.

Chisholm ve Phang (1983), Ontario'daki karayolları için farklı istasyonlardan gelen verileri kullanarak hesaplanan kümülatif donma derecesi günü ile don derinliğini belirlemek için spesifik bir ilişki geliştirilmiştir. Geliştirilen ampirik denklem kullanılarak İlin 224 lokasyonda alınan 30 yıllık hava sıcaklığı kayıtlarından oluşturulan revize donma endeks haritası sunulmuştur (Resim 2.3). Haritadan alınan ortalama donma endeksi, gerçek gözlemlerin  $\pm 300$  derece-gün aralığındadır. Çalışmanın sonucunda Modifiye İsveç tipi don derinliği göstergesi don penetrasyonunu ölçmek için ucuz ve güvenilir bir araç olduğu kanısına varılmıştır. Kaplama yapılarının altındaki don derinliğini tahmin edebilen bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program, araştırma ve tasarım mühendislerinin donma ıslahı uygulamaları veya otoyol yapımında denenmekte olan yeni yalıtım malzemeleri gibi teknikleri tam olarak değerlendirmelerini sağlaması amaçlanmıştır.

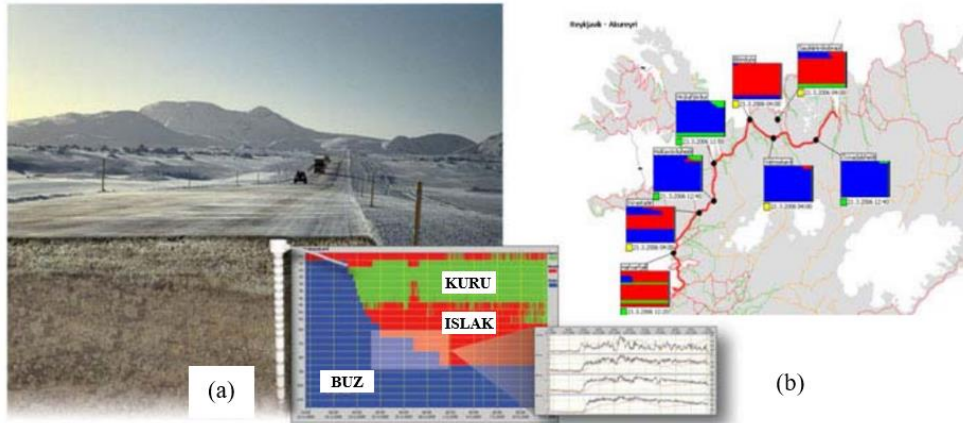


Resim 2.3. Güney Ontario'nun donma indeksi haritası (Chisholm ve Phang, 1983)

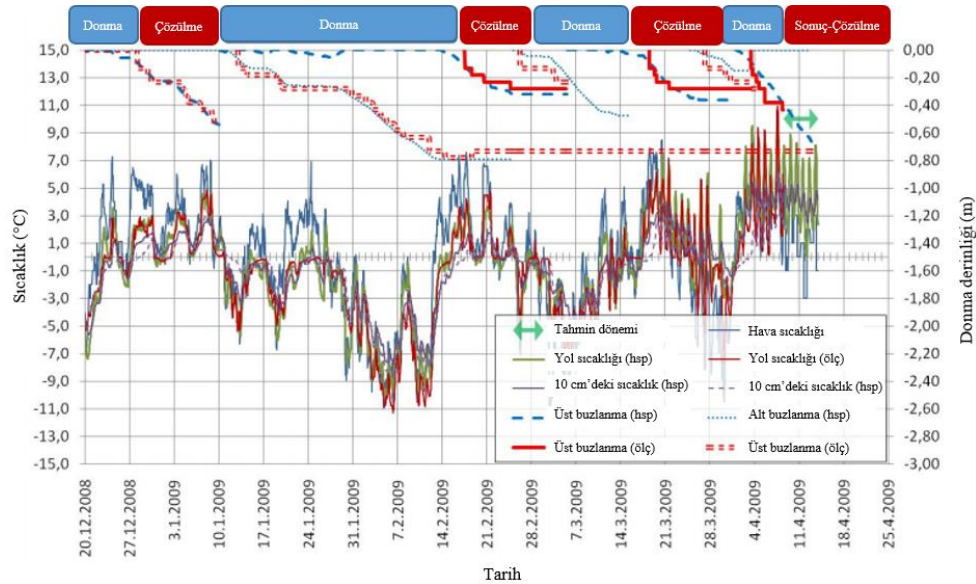
Berggren (1997) ise ısı faz değişimleri dikkate alarak Neumanın önerdiği denklemi geliştirmeye yönelik incelemeler yapmış ve rapor haline getirmiştir. Bu rapor, kış aylarında zemin altına yerleştirilen her test hücresinin altındaki maksimum don penetrasyon derinliğini hesaplamak için bir prosedür sunmuştur. Çalışmada, 1993-94, 1994-95 kışları için Mn / ROAD da yerleştirilen 40 test hücresi ile her birinin altındaki don derinliklerini hesaplayarak, hesaplanan derinlikler ile yerinde yapılan ölçümlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu değerler arasındaki farkların nedenleri incelenmiştir. Ek çalışmalar için sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

Farrington ve Gildea (2002) sayısal simülasyon, istatistiksel regresyon, mekânsal enterpolasyon ve CBS kullanarak bir don penetrasyonu tahmin modeli sunmuşlardır. Yöntemlerini kullanarak, mevsimsel maksimum don derinliğinin, asıl yıllık donma derecesi endeksi (AFDI) ile ilişkiyle, bölgeye özgü hava durumunu açıklayan meteorolojik veriler kullanılarak türetildiği sürece güvenilir yıllık olarak tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır. AFDI üzerinde maksimum mevsimsel don penetrasyon derinliğinin (gerçek iklim verilerini kullanan bir kaldırım yapısında dinamik sıcaklık ve nem akısının simülasyonlarından türetilmiş) gerilemesi güçlü bir pozitif korelasyon gerektiğini göstermiştir ve maksimum don derinliğinin tahmini üst limiti % 90 olarak belirlenmiştir

Thordarson ve diğerleri (2010), yol yüzeyi sıcaklığı ve alt taban don derinliği tahmini için bir model geliştirdi. Model donma derinliği, taban sıcaklık sensörüne ve modelin gerçek zamanlı olarak doğru çalışmasını sağlayan Otomatik Hava İstasyonu'na bağlı olarak geliştirilmiştir (Resim 2.4). 5 günlük hava tahmininden gelen girdi verilerini kullanarak, model yol alt tabanında donma veya çözülme gelişimini doğru bir şekilde tahmin edilmeye çalışılmıştır (Resim 2.5).



Resim 2.4. a) Donma derinliği sensörünün yol alt tabanına yerleştirilmesi ve elektrik iletkenliği, sıcaklık ve faz (su / buz) için kullanıcı arayüzü okumaları, b) Yol ağında rota analizi örneği (Thordarson vd., 2010).

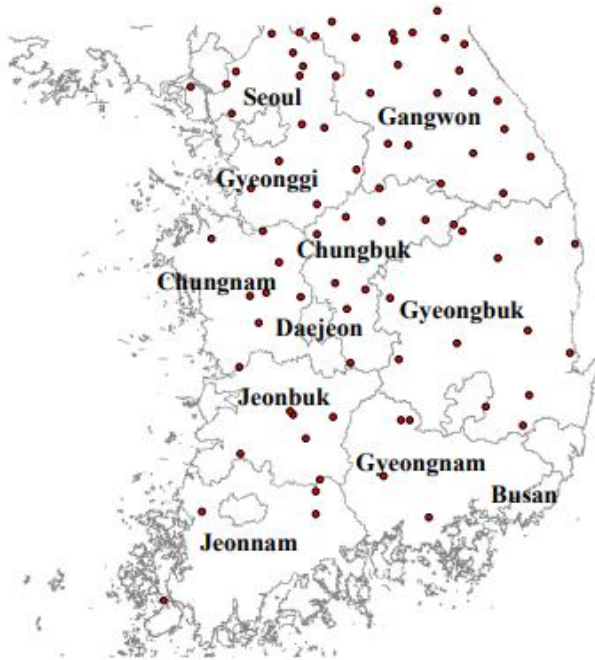


Resim 2.5. Test dönemi için model sonuçları (Thordarson vd., 2010).

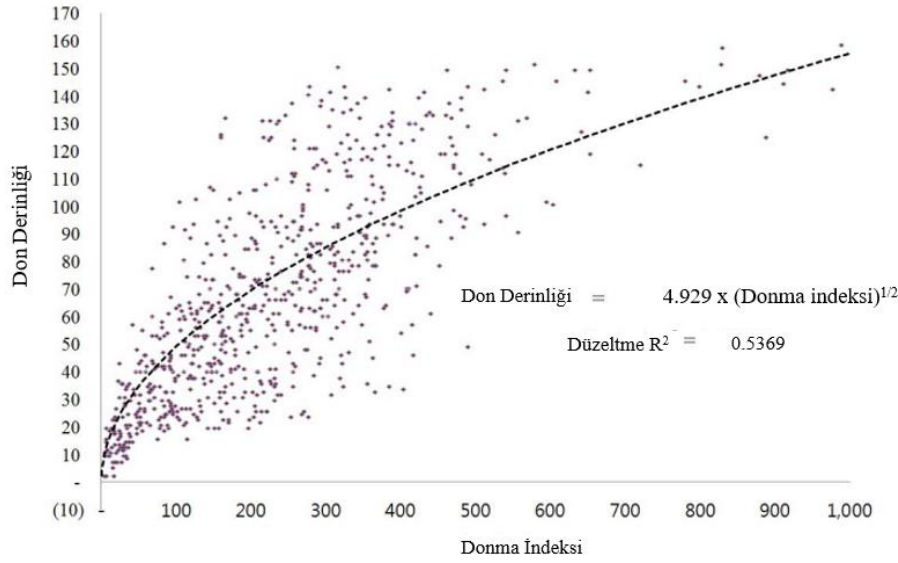
Soliman ve diğerleri (2008), Manitoba'daki don derinliğini tahmin etmek için basitleştirilmiş bir model geliştirmek için yapılan analizi tanıtmıştır. Çalışma, kaplama malzemelerinin özelliklerini ve mevsimsel değişimini daha iyi anlamayı amaçlayan çalışmanın bir bölümü

olarak sunulmuştur. Uzun Süreli Kaldırım Performansı (LTPP) Programı kapsamında toplanan Oak Lake test bölümünün iklimsel ve mevsimsel izleme verileri bu amaçla kullanılmıştır. Önerilen don penetrasyon modeli, Kuzey Ontario don penetrasyon modeliyle karşılaştırılmış ve aralarında tutarlı değerler bulunmuştur.

Lee (2013), donma derinliğini ölçmek için metilen mavisi çözeltisi yöntemi ile bir don göstergesi oluşturmuştur. Araştırılan projenin amacı, Güney Kore'de mevcut bilgileri kullanarak belirli bir tarihte don derinliğini doğru bir şekilde tahmin edebilen bir model geliştirmektir. Bu çalışmada, geçmiş zemin derinliği sıcaklığı ve hava durumu bilgisine ilişkin veriler, öncelikle NDAWN (Kuzey Dakota Tarımsal Hava Şebekesi) ve Fargo istasyonundan toplanmıştır. Don göstergeleri 1991'den 2010'a kadar olan dönemde asfaltlanmış ulusal karayollarında 80 noktaya yerleştirilmiştir. Don göstergelerinin gömülü olduğu yerler Resim 2,6'da gösterilmektedir. Ölçülen donderinliklerinin donma indisi arttıkça arttığı belirlenmiştir. Çalışma kapsamında sunulan denkleme en uygun eğriyi oluşturabilmek için regrasyon yaklaşımı uygulanmış ve düzeltme katsayısı belirlenmiştir (Resim 2.7).



Resim 2.6. Güney Kore'de yerleştirilen don göstergesi konumları (Lee, 2013)

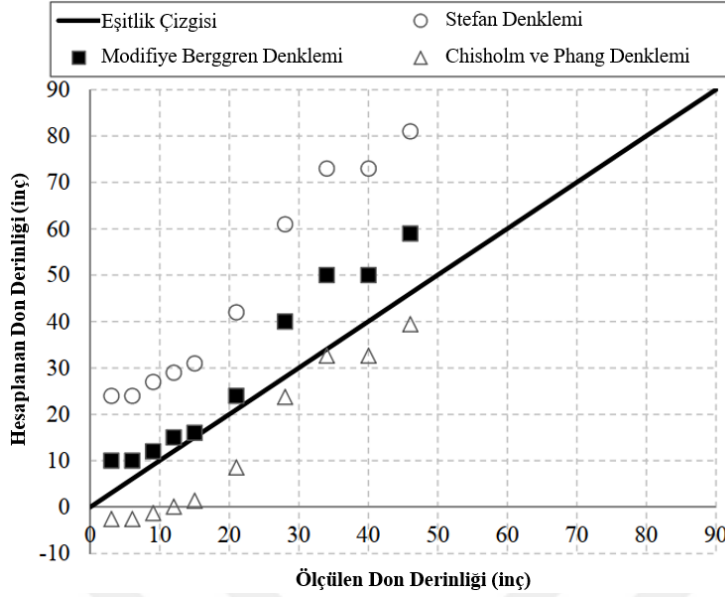


Resim 2.7. Ölçülen don derinlikleri ve en uygun model (Lee, 2013)

Baladi ve Rajaei (2015a), bu çalışmada yaptıkları kapsamlı literatür taramasından sonra mevcut çeşitli don derinliği modelleri tanımlamış ve test etmişlerdir. Bunlar UNSAT-H, Stefan, Modifiye Berggren ve Chisholm ve Phang modellerinin sonlu farkını içerir. Bu modellerin bazıları MDOT'ta bulunmayan önemli girdi verileri gerektirir ve tüm modeller yanlış sonuçlar vermiştir. Bu nedenle biri kum, diğeri kil zeminler için istatistiksel don derinliği modelleri geliştirilmiştir; İki model daha sonra MDOT tarafından sağlanan zemin örneklerinin termal iletkenliği ve ölçülen yüzey sıcaklıkları kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirilen istatistiksel model daha sonra MDOT ve Minnesota DOT tarafından toplanan don derinliği verileri kullanılarak doğrulanmıştır. İstatistiksel modele girdi verileri toprağın termal iletkenliğini ve CFDD içermektedir. Ayrıca, mevcut çözülme derinliği tahmin modellerini değerlendirmek için hesaplanan CTDD ve Michigan eyaletinde ölçülen çözülme derinliği verileri kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda doğru ve kabul edilebilir sonuçlar elde edilememiştir. Ayrıca, Gilpin'in mekanik-ampirik modeli, don kabarmasını tahmin etmek için kullanılmıştır. Modifiye edilmiş modelin doğruluğu, Michigan, Oakland County'deki 5 bölgede ölçülen donma kabarcığı verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, dört zemin tipi için donma kabarcığı ve kabarma basınçları arasındaki ilişki, son olarak, zemin katmanlarındaki ısı dengesine ve geliştirilen istatistiksel donma derinliği denklemine dayanarak, donun azaltılması için gerekli yalıtım kalınlığını tahmin etmek için bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, doğru ve güvenilir don derinliği tahmin modeli ve donma yüksekliği modeli geliştirmek ve tepe basıncını tahmin etmektir.

Luo (2014), yaptığı araştırma projesinde mevcut bilgileri kullanarak belirli bir tarihte don derinliğini doğru bir şekilde tahmin edebilen bir model geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu çalışmada, tarihsel zemin derinliği sıcaklığı ve hava durumu bilgileri için öncelikle NDAWN (Kuzey Dakota Tarım Hava Durumu Ağı) Fargo istasyonundan veri toplanmıştır. Bu proje, don derinliği hava ve zemin sıcaklığı verileri kullanılarak modellenmiştir. Lasso regresyon tekniği temel olarak don derinliğinin modellenmesinde kullanılmıştır. Analizler yoluyla, verilere düzenli Lasso regresyonu uygulandıktan sonra kalan veriler arasında korelasyon belirlenmiştir. Yapılan korelasyon ile Lasso regresyonunu kullanarak, don derinliğini modellemek için üç yöntem geliştirilmiştir. Bunlar; “Zemin Sıcaklığını Önce Tüm Derinliklerde Modelleme”, ”Zemin Sıcaklığını Önce Her Derinlikte Modelleme” ve “Doğrudan Don Derinliğinde Modelleme” olarak belirlenmiştir.

Rajaei ve Baladi (2015b), Michigan Eyaletinde ölçülen don derinliği verilerini, ölçülen verilerin tahmininde kullanılan modellerin doğruluğunu ve güvenilirliğini araştırmak için mekanik, mekanik-ampirik ve ampirik (Stefan, Modifiye Berggren ve Chisholm ve Phang) olmak üzere üç modelde kullanmış ve sonuçları karşılaştırmıştır (Resim 2.8). Fakat hiçbir yöntemin bu bölgede ölçüm yapılarak elde edilen don derinliği verileriyle benzerlik göstermediği belirlenmiştir. Bu nedenle, don derinliğini tahmin etmek için farklı istatistiksel modeller geliştirilmiştir. İlk olarak, Michigan eyaletinde ölçülen don derinliği verileri kullanılarak istatistiksel bir model oluşturulmuştur. İkinci olarak, modeli doğrulamak için ölçülen don derinliği ve MnDOT'tan elde edilen donma endeksi verileri kullanılmıştır. Sonuçlar modelin kalibrasyon olmadan başka bir durumda kullanılamayacağını göstermiştir. Bu nedenle, Michigan don derinliği verileri zemin tipi killi ve kumlu olmak üzere iki gruba ayrılarak ve her zemin tipi için iki istatistiksel model geliştirilerek incelenmiştir. İki model de MnDOT verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Ayrıca, iki istatistiksel model, MDOT'den elde edilen zemin numunelerinden elde edilmiştir.



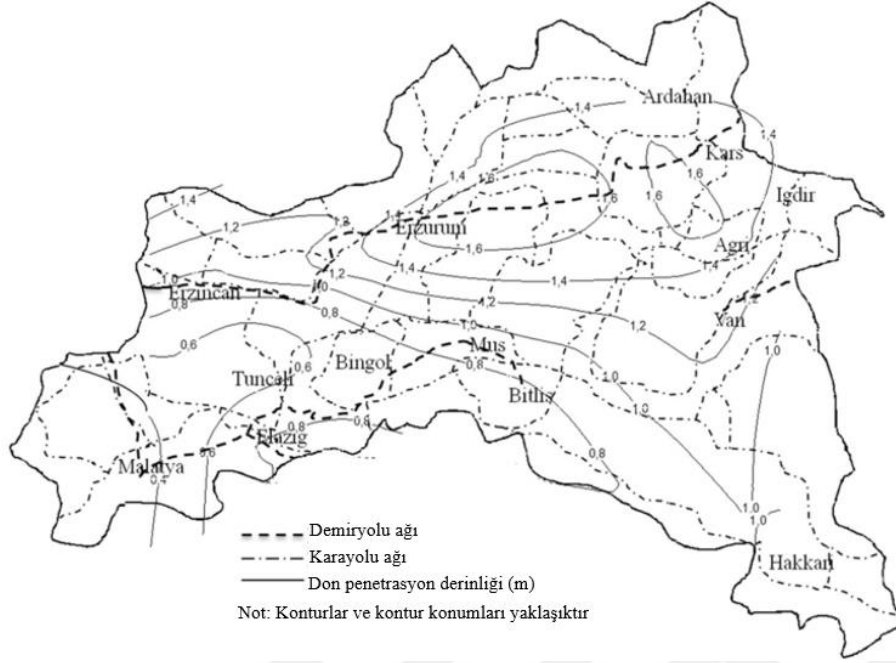
Resim 2.8. Stefan, ModBerggren ve Chisholm ve Phang denklemleri kullanılarak hesaplanan ve zamana bağlı olarak ölçülen don derinliği değerleri (Rajaei ve Baladi, 2015b)

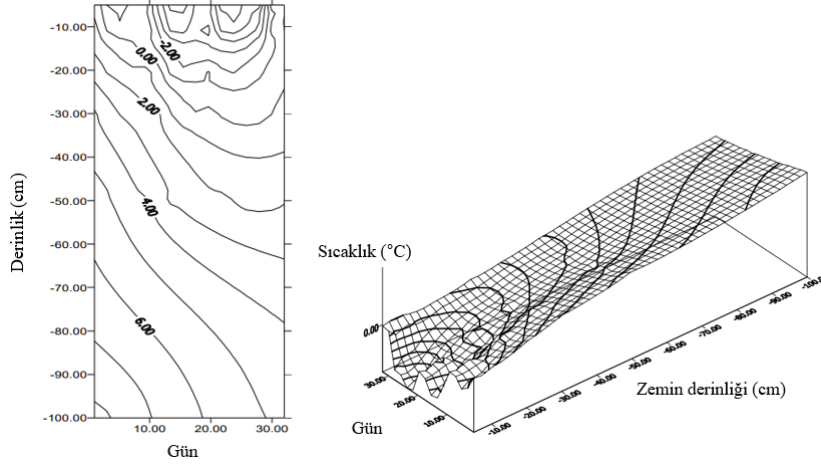
Don penetrasyonunu hesaplamak için ABD Savunma Bakanlığı (DoD), değiştirilmiş Berggren (ModBerggren) denklemini, Birleşik Tesis Kriterleri (UFC) 3-130-06 ise donma derinliğini manuel olarak hesaplamak için bir metodoloji içermektedir. Pavement-Transportation Bilgisayar Destekli Yapısal Mühendislik (PCASE) yazılımı, bazı durumlarda UFC'de açıklanan manuel çözümden biraz farklı değerler sağlayan ModBerggren denkleminin daha doğru bir sayısal çözümünü önermektedir. ABD Ordusu Mühendis Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nden (ERDC) araştırmacıları, aynı prosedürün neden don derinliğinin farklı değerleriyle sonuçlandığını açıklamamanın gerekli olduğunu belirlenmiştir. Bu amaçla Bianchini ve Gonzalez, PCASE yazılımında uygulanmış olan, iki boyutlu bir homojen ve izotropik tabakaya uygulanan ısı denkleminin çözümünü sunmuştur. Rapor ayrıca UFC ve PCASE ile hesaplanan çözümler arasındaki farkları da açıklamıştır (Bianchini ve Gonzalez, 2012).

Orakoğlu ve diğerleri (2016), Türkiye Doğu Anadolu bölgesinde don derinliklerinin Stefan denklemi ve son 50 yıldaki gerçek değerlere dayalı olarak değiştirilmiş Berggren (ModBerg) denklemi kullanılarak tahmin edilmesini amaçlamıştır. Donma-çözülmenin bölgedeki karayolları üzerindeki farklı zararlı etkileri açıklanmıştır. Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından belirlenen don derinlikleri ve karayolları ile demiryollarını gösteren bir kontur haritası sunulmuştur (Resim 2.9). Don derinlikleri için öngörülen bu sonuçların Türkiye'nin doğusunda karayolları ve demiryollarınının tasarımına ve donma-

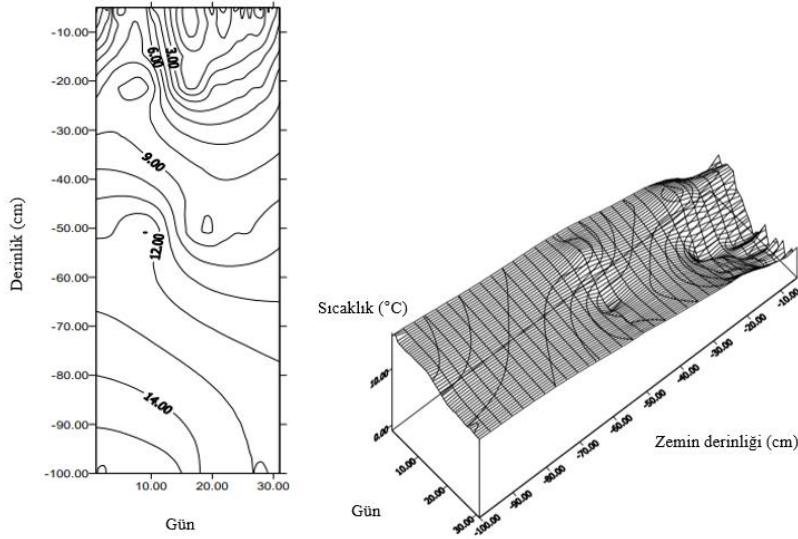


çözülmeyle ilgili problemlere yönelik tedavi yöntemleri geliştirilmesine faydalı bir şekilde dâhil edilmesi beklenmiştir.





Resim 2.10. Urmia İstasyonu için farklı derinliklerdeki toprak sıcaklığının üç boyutlu (Greenwich), Ocak 1996 (Khalili vd., 2007)



Resim 2.11. Yazd İstasyonu için farklı derinliklerde toprakta günlük sıcaklığın üç boyutlu modeli (Greenwich), Ocak 1996 (Khalili vd., 2007)

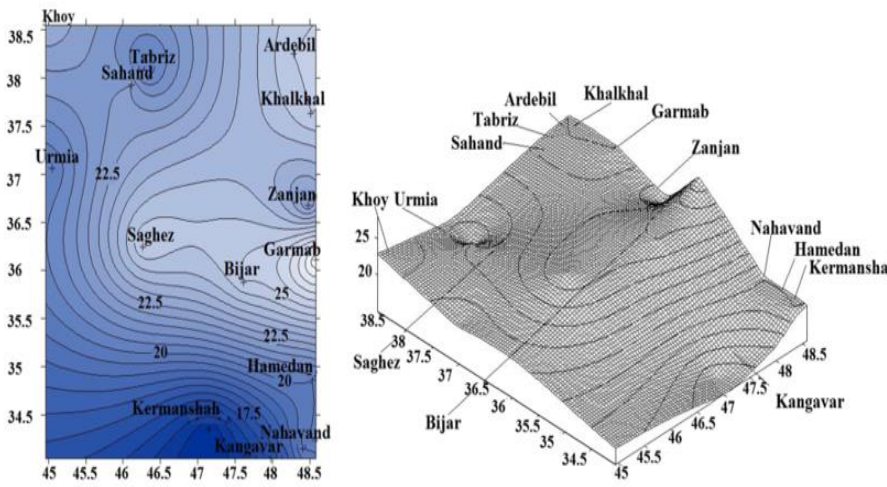
Khoshkhoo ve diğerleri (2015) tarafından, fiziksel tabanlı bir ısı ve kütle transfer modeli olan CoupModel'i kullanarak, İran'ın bir yayla bölgesinde 14 yıllık bir süre için kışın zemin sıcaklığını, zemin donma derinliğini ve kar derinliğini belirleyerek simüle etmeye çalışılmıştır. Performans kriterlerine dayalı kalibrasyon işlemi için Monte Carlo bazlı bir yaklaşım kullanılmıştır. Modelin duyarlılık ve belirsizlik analizleri 30 parametre seçilerek yapılmış ve model parametrelerinin belirsizlik aralığından alınan 22 000 örnek kullanılarak yürütülmüştür. Modelin duyarlılık analizinde zemin buharlaşması, zemin hidrolik özellikleri ve kar modellemesi ile ilişkili bazı parametreler hassas ve son derece önemli parametreler ortaya çıkmıştır. Modelin kış zemin sıcaklıkları için belirsizlik analizi, çoğu durumda simülasyonlar ve gözlemler arasında makul bir uyum olduğunu göstermiştir

Andersons ve Ozola (2013), yaptıkları bu çalışmada Avrupa Standardı LVS EN ISO 13793'te sunulan donmaya karşı sığ temel tasarım yönteminin uygulamasında doğru yõtme karar vermek amacıyla ön koşulların belirlenip seçilmesi amaçlanmıştır. Makalede dış hava sıcaklığı veri işleme sonuçları ve don mevsimlerinin referans süresine bağlı olarak donma endeksi değer varyasyonunun analizleri sunulmuştur. Isıtılmamış bir binanın temelleri için özel tasarım sonuçları elde edilmiş ve alt zemin toprağının donmasını önleyen temellerin altındaki zeminden ısı kaybını azaltmak için izole edilmiştir. Araştırma sonucunda, maddi ve işgücü tüketiminin karşılaştırılmasına dayalı olarak faydalar hakkında bir sonuç sunulmuştur. Isıtılmış temellerin maliyet etkinliğinin, donma toprağının türü ile yakından ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Killi çakıl zeminlerde donmaya karşı korumalı sığ temellerin kullanılmasının, kazılacak ve doldurulacak zemin hacminin artmasına neden olacağı ve temeller için beton tüketimi azalacağı öne sürülmüştür

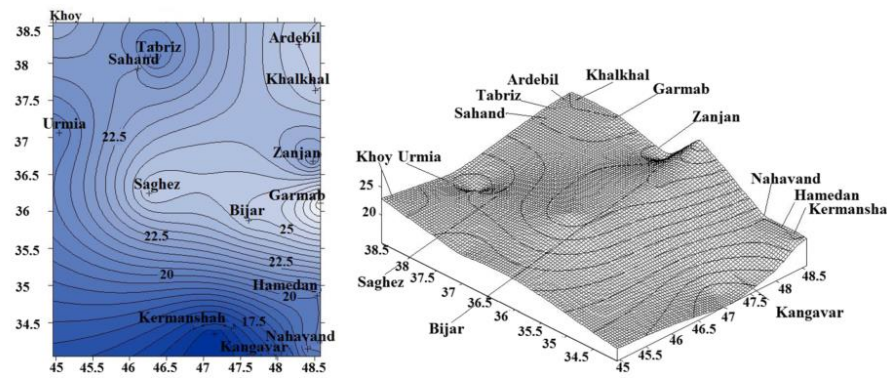
Dalai (2010), don kabarması olayının, donma döneminde yüzeysel temellerin yükselmesine ve çözülmesi sırasında farklı yerleşimlere sebep olacağını öne sürmüştür. Ayrıca Moğolistan'daki yapısal hasarların ana nedeni olarak gösterilebileceğini savunmuştur (Resim 2.12). Donma kuvvetlerinin büyüklüğünü, yoğunluğun meydana geldiği yeri ve derinliği belirlemek ve Ulan Batur şehrinin 7.mikrodisitesinde yer alan deneysel alanda don yoğunluğunun neden olduğu hasarlardan kaçınmak için alınması gereken önlemler üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu amaçla donma kuvveti ölçme özel cihazı deneysel alanda tasarlanmış ve başarıyla test edilmiştir ve donma kuvvetleri 1,0-1,5 m derinlikte en yüksek değerine (2,8 MPa'ya kadar) ulaşmıştır. Araştırma sonuçlarına dayanarak, donma yükü kuvvetlerinin belirlenmesi için yeni yöntem bilimi ve donma işleminin yapılara zarar vermesini önlemek için ayrıntılı analizi gerçekleştirilmiştir. İnşaat güvenliği endişelerini gidermek için bazı öneriler sunulmuştur.



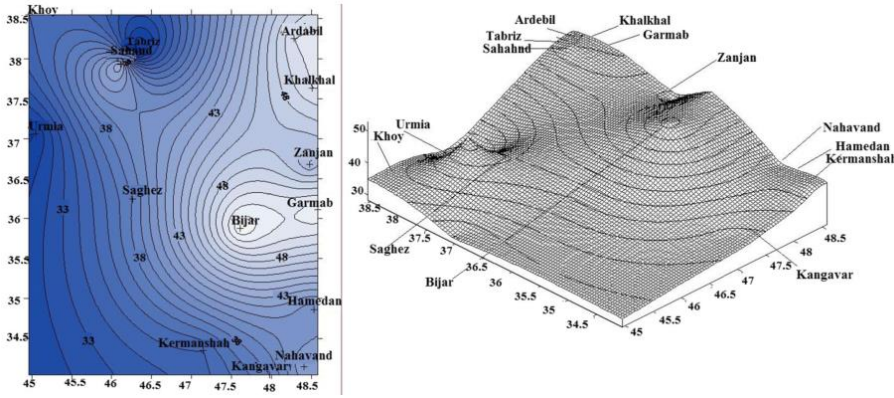
cm) hava ve zemin sıcaklığı arasındaki ilişki lineer regresyon kullanılarak analiz edilmiştir (Resim 2.13). Ardından, Norveç ve Finn AFI dahil olmak üzere iki farklı hava dondurma endeksi (AFI) uygulanmıştır (Resim 2.14, Resim 2.15). Son olarak, don penetrasyon derinliği McKeown yöntemi ve gerçek zemin don penetrasyon derinliği ile belirlenen modellerin doğruluğu ile hesaplanmıştır. Sonuçlar, çalışılan tüm istasyonlarda yüzeyin 30 cm altına kadar hava ve zemin derinliği sıcaklığı arasında anlamlı bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Ayrıca, sonuçlara göre, Norveç endeksi zemin don derinliği penetrasyonunun belirlenmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.



Resim 2.13. İncelenen istasyonlarda enterpolasyonlu gerçek donma derinliği ve üç boyutlu modeli (Mohammadi vd., 2016)



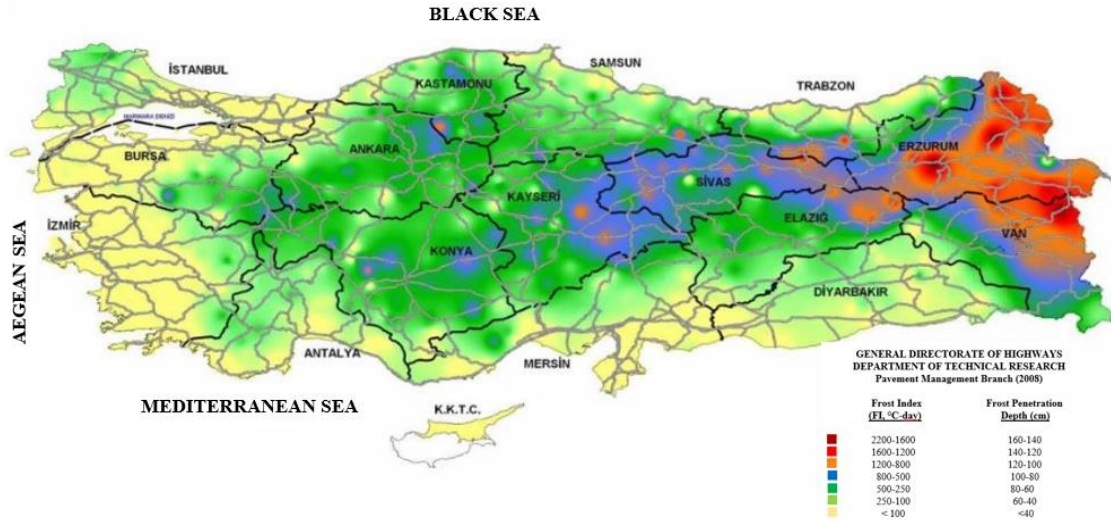
Resim 2.14. İncelenen istasyonlarda Norveç endeksi tarafından tahmin edilen enterpolasyonlu donma derinliği ve üç boyutlu modeli (Mohammadi vd., 2016)



Resim 2.15. İncelenen istasyonlarda Finn indeksi tarafından tahmin edilen enterpolasyonlu donma derinliği ve üç boyutlu modeli (Mohammadi vd., 2016)

Şentürk ve Köksal (1968), yaptıkları çalışmada karayolları tarafından imal edilen ve kullanılan yeni bir tip don penetrasyon ölçme cihazını kullanarak, Türkiye’de don olabilecek bölgelerde bulunan yollar için ölçüm yapmışlardır. Ayrıca don penetrasyonu ile donma indisi arasında ki amprik bağıntı grafik olarak sunulmuştur. Çalışma kapsamında Türkiye’nin birinci ve ikinci dereceden don olan bölgelerindeki karayollarının kritik yerlerine 1965-1966 kışında 30 adet, 1966-1967 kışında 350 adet ve 1967-198 kışında 180 adet yerleştirilen ölçüm aletleriyle bölgede ölçüm yapılmıştır.

Türkiye’de tüm bölgeleri kapsayan, KGM tarafından 2008 yılında ulaşım esnek yapıları için hazırlanmış don penetrasyon derinliği haritası bulunmaktadır (Harita 2.1) (Güngör ve Sağlık, 2008). Bu harita tüm mühendislik binaları, zemin tipleri, sıcaklık veya zemin ve hava dondurma endekslerinin değerleri göz önünde bulundurularak oluşturulmamıştır. Ulaşım yapılarının don derinliğini gösteren bu haritadan başka ülkemizde mühendislik binalarının zeminde meydana gelen donma ve çözülme olaylarından etkilenmesini önlemek için başka bir harita bulunmamaktadır. Bu faktörler göz önünde bulundurularak ülkemizde yapıların don derinliği ile ilgili yeni araştırmalar yapılmalıdır.



Harita 2.1. Türkiye Don İndeksi ve Don Penetrasyon Derinliği (Güngör ve Sağlık, 2008)

### 3. ULUSAL VE ULUSLARARASI ALANDA DON DERİNLİĞİ İLE İLGİLİ YÖNETMELİK VE STANDARTLAR

Don derinliğinin inşaat yapıları üzerinde özellikle temeller üzerinde oldukça etkilidir. Bu etkinin oldukça hissedildiği soğuk iklim kuşağında yer alan ülkelerin bir kısmı ulusal standartlarında bu sınırlamalara yer vermiştir. Bazı ülkeler ise uluslararası standartlara atıfta bulunarak aynı hesaplamaların yapılmasını tercih etmiştir.

Bazı ülke ve bölgelerde don derinlikleri henüz belirlenmemiştir. Örneğin, konuyla ilgili olarak TDY’de şu ifadeler yer almaktadır. 1975 - Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY), “Temel derinliği, yerel don derinliği göz önüne alınacağı”, 1997’de yayınlanan ABYYHY’te “*Temel derinliği, don derinliğinin altında olmak üzere, en az 80 cm olacağı*” belirtilmiş olsa da, binalar için açıklanmış don derinliği haritası olmayıp tamamen tasarımcıların inisiyatifine bırakılmıştır. Yazar tarafından, RC yapı standardında ve sonraki TDY’lerinde buna dair bir hükme rastlanmamıştır (TBDY, 2018; DBYBHY, 2007; TS500, 2000).

Uluslararası olan yönetmeliklerden biri olan ISO 13793’de; bozulmamış zeminde (yani binalar, kar örtüsü veya bitki örtüsü ile korunmayan zemin) en büyük don penetrasyon derinliği, iklime (donma indeksi ve yıllık ortalama hava sıcaklığı) ve zeminin termal özelliklerine bağlı olduğu ileri sürülmektedir (ISO 13793, 2001). Yine ISO 13793’e göre bozulmamış zeminlerde azami donma derinliği tasarım değerleri, ulusal haritalardan veya tablolardan elde edilebilir. Ancak aynı standartta don derinliği bilinmiyorsa, aşağıdaki eşitlik ile yaklaşık bir değer hesaplanabileceği belirtilmiştir:

$$H_0 = \sqrt{\frac{7200F_d\lambda_f}{L+C\bar{\theta}_e}} \quad (3.1)$$

Burada;  $F_d$ , K-h cinsinden tasarım dondurma endeksi,  $\lambda_f$  donmuş toprağın W/(m-K) cinsinden termal iletkenliğidir,  $L$ , toprağın her bir hacmi için zemindeki suyun J/m<sup>3</sup> cinsinden gizli donma ısısıdır,  $C$ , hacim başına donmamış toprağın J/(m<sup>3</sup>-K) cinsinden ısı kapasitesi,  $\bar{\theta}_e$ , °C cinsinden yıllık ortalama dış hava sıcaklığıdır.



ISO 13793 (2001), her türlü zeminin don yükselmesine karşı duyarlı olmadığını öngören bina temellerinin tasarımı ile ilgili bir standarttır. Ayrıca don derinliğinin yapısal nedenlerle gerekli minimum temel derinliğini aşabileceği iklimlerde uygulanmaktadır. Bu sebeple donma tehlikesine karşı alınabilecek çeşitli önlemler standartta belirtilmiştir. Önlemlerden birincisi, donma derinliğinin altında olacak şekilde temellerin yeterince derin inşa edilmesidir. İkinci bir önlem ise; donmaya duyarlı zemini, don nüfuz etme derinliğinin altında bir derinliğe kadar çıkarmak ve temelleri inşa etmeden önce donmaya karşı duyarlı olmayan bir malzeme ile değiştirmek olarak sunulmuştur. Donmayı engellemek için üçüncü önlem ise, temellerin izole edilmesidir. ISO 13793'a göre, soğuk iklimlerde ikinci seçenek, daha sığ temellere izin verdiği için genellikle en ekonomik olanıdır.

ISO 13793 prosedürleri İskandinav ülkelerinde uzun yıllar boyunca kullanılmıştır. Bu prosedürler, yıllık sıcaklık döngüsünü, zeminin ısı kapasitesini, suyun gizli donma ısısı gibi verileri dikkate alarak yapılardan alınan deneysel verilerle doğrulayan dinamik bilgisayar hesaplamalarının sonuçlarına dayanmaktadır. Standart, temelin altında donmaya duyarlı zeminin donmamasını sağlamaya dönük çalışmaları içermektedir.

ISO 13793'de donma indeksi, zeminin izole edilme durumu ve zemin çeşidine bağlı olarak hesaplanan temel derinlikleri verilmiştir. Verilen temel derinlikleri dönemsel donma indeksi değerlerine göre değişmektedir. Belirtilen parametreler ve temel derinlikleri gösterilmiştir (Çizelge 3.1, Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4). ISO 13793'de temel derinliği değerlerine ek olarak, bozulmamış zemindonma indeksinin 2000 Kh'tan küçük olması durumunda temel derinliğinin en az 0,45 m olarak alınması gerektiği belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Yalıtımsız zemindeki temel derinliği

<b>F<sub>d</sub> (K-h)</b>	<b>H<sub>r</sub> (m)</b>	<b>H<sub>fe</sub> (m)</b>	<b>L<sub>c</sub> (m)</b>
F <sub>d</sub> < 30 000	0,35	0,35	-
30 000 < F <sub>d</sub> < 35 000	0,40	0,60	1,0
35 000 < F <sub>d</sub> < 40 000	0,50	0,80	1,0
40 000 < F <sub>d</sub> < 45 000	0,60	1,00	1,5
45 000 < F <sub>d</sub> < 50 000	0,75	1,30	1,5
50 000 < F <sub>d</sub> < 55 000	0,90	1,60	1,5
55 000 < F <sub>d</sub> < 60 000	1,10	1,80	2,0
60 000 < F <sub>d</sub> < 65 000	1,30	2,00	2,0
65 000 < F <sub>d</sub> < 70 000	1,50	2,20	2,5

Çizelge 3.2. Temel derinliği ve köşe yalıtımı

<b>F<sub>d</sub> (K-h)</b>	<b>H<sub>f</sub> (m)</b>	<b>b<sub>gc</sub> (m)</b>	<b>b<sub>e</sub> (m)</b>
F <sub>d</sub> < 30 000	0,35	-	-
30 000 < F <sub>d</sub> < 35 000	0,40	0,5	1,0
35 000 < F <sub>d</sub> < 40 000	0,50	0,50	1,0
40 000 < F <sub>d</sub> < 45 000	0,60	0,50	1,5
45 000 < F <sub>d</sub> < 50 000	0,75	0,60	1,5
50 000 < F <sub>d</sub> < 55 000	0,90	0,80	1,5
55 000 < F <sub>d</sub> < 60 000	1,10	0,80	2,0
60 000 < F <sub>d</sub> < 65 000	1,30	0,80	2,0
65 000 < F <sub>d</sub> < 70 000	1,50	1,00	2,5

Çizelge 3.3. Yalıtımsız zemindeki temel derinliği (ince taneli zemin)

<b>F<sub>d</sub> (K-h)</b>	<b>H<sub>f</sub> (m)</b>	<b>H<sub>fc</sub> (m)</b>	<b>L<sub>c</sub> (m)</b>
35 000	1,00	1,30	1,5
40 000	1,10	1,40	1,5
45 000	1,20	1,50	1,5
50 000	1,30	1,60	1,5
55 000	1,40	1,70	2,0
60 000	1,50	1,85	2,0
65 000	1,60	2,00	2,5
70 000	1,75	2,15	2,5
75 000	1,90	2,30	2,5

Çizelge 3.4. Yalıtımsız zemindeki temel derinliği (iri taneli zemin)

<b>F<sub>d</sub> (K-h)</b>	<b>H<sub>f</sub> (m)</b>	<b>H<sub>fc</sub> (m)</b>	<b>L<sub>c</sub> (m)</b>
35 000	1,20	1,60	1,5
40 000	1,30	1,70	1,5
45 000	1,40	1,80	1,5
50 000	1,50	2,00	1,5
55 000	1,60	2,10	2,0
60 000	1,70	2,25	2,0
65 000	1,80	2,40	2,5
70 000	2,05	2,55	2,5
75 000	2,20	2,70	2,5

American Society of Civil Engineers 32-01 (ASCE, 2001), mevsimsel zemin donması ile soğuk iklimlerde donma hasarını önlemek için donmaya karşı korumalı sığ temellerin tasarımına ve yapımına yönelik oluşturulmuştur. Bu Standartta, aylık asgari iç ortam sıcaklığına göre; ısıtılmış, ısıtılmamış ve yarı ısıtılmış yapılar sınıflandırılarak ayrı ayrı ele alınmıştır.



## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Mekanik Ampirik Modeller

#### 4.1.1. Stefan Yöntemi

1890 yılında Joseph Stefan, herhangi bir ısı transferinin görülmediği donmamış bir bölgede, ısı transferi-faz değişim problemini çözerek don derinliğini tahmin eden bir denklem geliştirmiştir (Stefan, 1890). Stefan denklemi tahmini don derinliğini hesaplama amacıyla oluşturulan ilk formülasyonlardan biri olarak bilinmektedir (Baladi ve Rajaei, 2015; Bianchini ve Gonzalez, 2012). Bu denklem bazı SHA tarafından geliştirilen ve hala kullanılan bir yöntemdir. Aşağıda Stefan denklemi belirtilmiştir (Eş.4.1);

$$P = \sqrt{\frac{48k_f CFDDn}{L}} \quad (4.1)$$

$$L = 144\gamma_d w \quad (4.2)$$

Burada, P, don derinliğini,  $k_f$ , termal iletkenliği,  $CFDD$ , kümülatif donma indeksi, L, latent ısısını, w, su içeriğini,  $\gamma_d$ , kuru birim hacim ağırlığı tanımlanmaktadır (Baladi and Rajaei, 2015a). Formülde belirtilen yüzey indeksi, hava indeksinin, boyutsuz bir parametre olan n faktörüyle çarpımından elde edilmektedir. n faktörü literatür araştırmalarına göre 0,7-0,9 değerleri arasındadır ve bu çalışmada üst sınır olan 0,9 alınmıştır. Kümülatif donma indeksi ( $CFDD$ ) değerleri Eş.4.3'e göre hesaplanmıştır.

$$CFDD = \sum_{i=1}^n \text{Günlük Donma İndeksi (Derece - Gün)} \geq 0 \quad (4.3)$$

$$\text{Günlük Donma İndeksi} = \left( 32^\circ F - \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) (\text{Derece} - \text{Gün}) \quad (4.4)$$

Burada,  $T_{max}$ , günlük hava sıcaklığının en yüksek değeri ( $^\circ F$ ),  $T_{min}$ , günlük hava sıcaklığının en düşük olduğu değerdir. Bu yöntemde, kümülatif donma endeksinin her yıl 1 Temmuz ayında sıfırlandığı kabul edilmiştir (Rajaei ve Baladi, 2015).

Literatür araştırmaları incelendiğinde, Stefan denklemi sonucu elde edilen don derinliklerinin, doymuş durumdaki zeminde ölçölen don derinliğinden çok daha fazla olduğu belirlenmektedir (Baladi ve Rajaei, 2015a; 2015b). Hesaplanan ve ölçölen veriler arasında ki tutarsızlığın sebebi olarak, Stefan'ın oluşturduğu denklemde suyun ve toprağın hacimsel ısı kapasitesinin dikkate alınmamasından kaynaklanabileceği belirtilmektedir (Sharratt ve McCool, 2005; Stefan, 1890; Baladi ve Rajaei, 2015a; 2015b). Don derinliği tahminini geliştirmek amacıyla da çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Aldrich Jr ve Paynter, 1953; Nixon ve McRoberts, 1973).

#### 4.1.2.ModBerggren Yöntemi

Aldrich ve diğerleri, 1953 yılında Berggren denklemine bir korelasyon katsayısı uygulayarak Modifiye Berggren (ModBerggren) denklemini önermişlerdir (Aldrich Jr ve Paynter, 1953). Bu denklem oluşturulurken aşağıdaki varsayımlarda bulunulmuştur;

1. Isı transferi tek boyutlu bir sorundur ve donma başlamadan önce zemin ortalama yıllık sıcaklığındadır (USACE, 1998; Baladi ve Rajaei, 2015a).
2. Donma mevsiminin başlangıcında, yüzey sıcaklığı kademeli bir şekilde ortalama yıllık sıcaklıktan donma noktasının altına bir dereceye kadar düşer ve donma mevsimi boyunca sabit şekilde bu sıcaklıkta kalır (Baladi ve Rajaei, 2015a; Bianchini ve Gonzalez, 2012).

Yukarıdaki varsayımlar sonucunda geliştirilen korelasyon katsayısı ( $\lambda$ ) iki boyutlu parametrelerin fonksiyonu olarak belirlenen, termal oran ( $\alpha$ ) ve füzyon parametresinden ( $\mu$ ) elde edilmiştir. Zemin sıcaklık değişimlerini de dikkate alan bu parametreler, donma endeksine, bölgenin yıllık ortalama sıcaklığına ve zeminin termal özelliklerine bağlıdır (USACE, 1998). Termal oran ve füzyon parametresi hesaplamaları Eş. 4.5 ve Eş. 4.6'da verilmiştir.

$$\alpha = \frac{v_o}{v_s} \quad (4.5)$$

$$\mu = v_s x \frac{c}{L} \quad (4.6)$$

Verilen denklemlerde,  $v_o$ , başlangıç sıcaklığı (zemin yüzeyinin altındaki yıllık ortalama sıcaklık ile 32 °F arasındaki farkın mutlak değeri),  $v_s$ , yıllık ortalama sıcaklık değeri,  $C$  hacimsel ısı kapasitesi ve  $L$  hacimsel latent ısıdır (Baladi ve Rajaei, 2015a, 2015b; Bianchini ve Gonzalez, 2012). Mevsimsel donma veya çözülme derinliğini hesaplamak için  $v_s$  kullanılması durumunda, uygulanılabilecek olan formül Eş. 4.7 ve Eş. 4.8'de sunulmuştur;

$$v_s = \frac{nF}{t} \quad (4.7)$$

$$v_s = \frac{nI}{t} \quad (4.8)$$

Burada  $n$ , hava indeksinden yüzey indeksine dönüşüm faktörü,  $F$ , hava donma indeksi,  $I$ , hava çözülme indeksi,  $t$ , donma çözülme sezonu boyunca geçen zamanı ifade etmektedir.

Füzyon parametresini oluşturan denklemde kullanılan hacimsel ısı kapasitesi ( $C$ ), bir birim hacmin sıcaklığını 1 °F değiştirmek için gereken ısı miktarı olarak tanımlanmaktadır. Hacimsel ısı kapasitesi, zemin tipine, kuru birim hacim ağırlığına ve zeminin donmuş veya donmamış olma durumuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Bianchini ve Gonzalez, 2012). UFC 3-130-06, nemli zeminlere ait ortalama hacimsel ısı kapasitesini belirlemek amacıyla çeşitli grafikler içermektedir. Hacimsel ısı kapasitesinin toprağın donmuş veya donmamış olma durumlarına göre belirlenebilen hesap yöntemleri Eş. 4.9, Eş. 4.10 ve Eş. 4.11'de gösterilmiştir.

Donmamış zeminler için;

$$C_u = \gamma_d \left( c + 1,0 \frac{w}{100} \right) \quad (4.9)$$

Donmuş zeminlerde;

$$C_f = \gamma_d \left( c + 0,5 \frac{w}{100} \right) \quad (4.10)$$

Çoğu zemin çeşidi için ortalama değer;

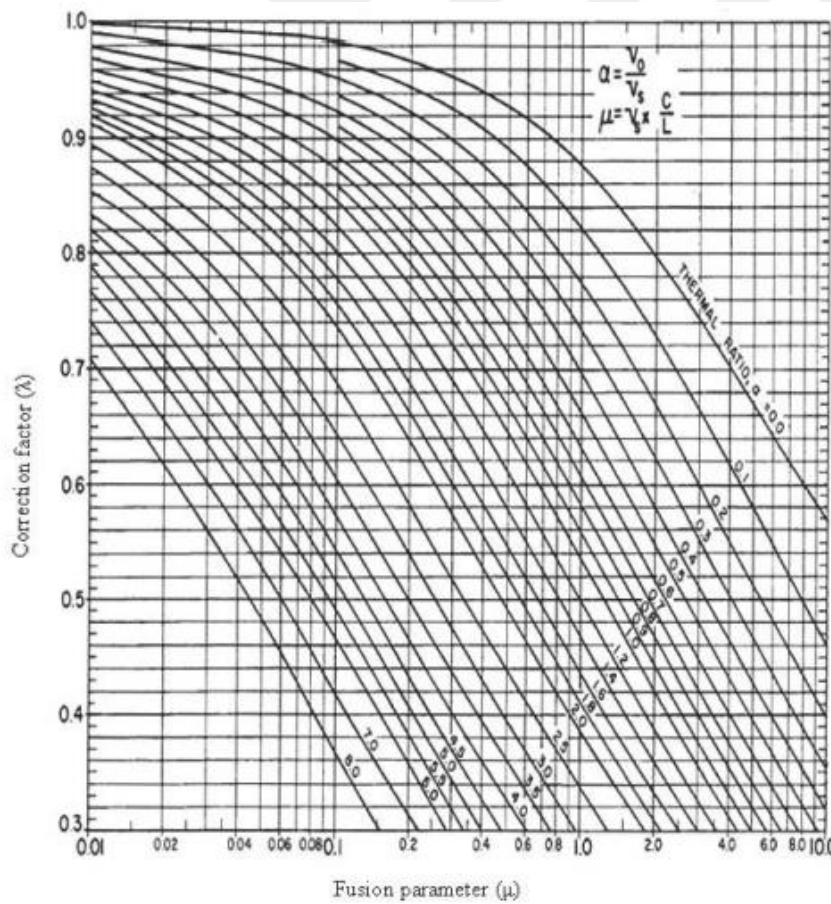
$$C_{avg} = \gamma_d \left( c + 0,75 \frac{w}{100} \right) \quad (4.11)$$

Burada,  $c$ , toprağın kendi özgül ısısı,  $w$ , zeminin yüzde olarak su içeriği,  $\gamma_d$ , zeminin kuru birim hacim ağırlığıdır.

Füzyon parametresi değişkenlerinden bir diğeri olan hacimsel latent ısısı, sistemin ısısında bir değişiklik olmadan buzu eritmek veya birim zemin hacminde bulunan suyu dondurmak için gereken ısı miktarıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$L = 144\gamma_d \frac{w}{100} \quad (4.12)$$

Berggren denklemini geliştirmek amacıyla uygulanan korelasyon katsayısı ( $\lambda$ ) termal oran ve füzyon parametresinin fonksiyonu olarak kabul edilmiş ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Füzyon parametresine karşılık gelen korelasyon katsayısı (Baladi ve Rajaei, 2015a)

Korelasyon katsayısı uygulanarak düzenlenmiş ModBerggren denklemi Eş. 4.13'de görülmektedir.

$$P = \lambda \sqrt{\frac{48k_f n CFDD}{L}} \quad (4.13)$$

Burada  $\lambda$ , düzeltme katsayısı diğer tüm parametreler Stefan denklemiyle aynıdır. Don derinliği tüm donmuş tabaka kalınlıklarının toplamı olarak ön görülmektedir (USACE, 1998). Literatür çalışmaları incelendiğinde ise ModBerggren denkleminin çok katmanlı tabakalarda donmanın nüfuz etmesi için gerekli kümülatif donma derecesi günü hesaplanarak homojen olmayan zeminlerde uygulanabileceği belirlenmiştir (Baladi ve Rajaei, 2015a; Orakoglu vd., 2016). n' inci katmana nüfuz etmek için gereken CFDD ise Eş. 4.14'deki gibi tanımlanmıştır.

$$CFDD_n = \frac{L_n d_n}{24} \left[ \left( \sum_1^{n-1} R_n \right) + \frac{R_n}{2} \right] \quad (4.14)$$

Burada,  $L_n$ , n' inci katmandaki volümetrik ısı kapasitesini,  $d_n$ , n' inci katman derinliğini ve  $R_n$ , n' inci katmandaki termal yayılmayı ifade etmektedir.

Üstyapı Taşımacılığı Bilgisayar Destekli Yapısal Mühendislik (PCASE) yazılımı, Modifiye Berggren denkleminin daha doğru bir sayısal çözümünü sağlamıştır (Bianchini ve Gonzalez, 2012). Yazılımın içeriği bölüm 4.4.2'de sunulmuştur.

### 4.1.3. Chisholm ve Phang Yöntemi

Chishom ve Phang, 1983 yılında Ontario'daki farklı istasyonlardan gelen verileri kullanarak hesaplanan kümülatif donma indeksi (CFDD) ve ölçülen don derinliklerini ilişkilendiren ampirik bir denklemi Eş.4.15'deki şekliyle geliştirmişlerdir (Baladi ve Rajaei, 2015a, 2015b).

$$P = 1,6968 \sqrt{CFDD} - 12,91 \quad (4.15)$$

Ontorio' daki yerel hava sıcaklıkları günlük olarak bilinmediğinden dolayı aylık hava sıcaklığına bağlı olarak CFDD değerleri hesaplanmıştır (Boyd, 1976). Bölgede ölçülen don



derinliği verilerinin % 80'nin, Eş. 4.15 sonucu tahmin edilen don derinlikleriyle arasındaki farkın yaklaşık 30,48 cm (12 inç) olduğu belirlenmiştir (Chisholm ve Phang, 1983). Chisholm ve Phang ampirik denklemin Ontario'daki ölçülen don derinliği verilerine dayanılarak geliştirildiği göz önüne alındığında, denklemin bölgesel olduğu ve kalibrasyon olmadan farklı bölgelerde kullanılmaması gerektiği belirlenmiştir (Sharratt and McCool 2005).

#### 4.2. Ampirik Modeller

Don penetrasyon derinliği her bölgenin coğrafi şartlarına ve hava sıcaklığına bağlı olarak değiştiği için tek bir denklem üzerinden yapılan hesaplar ile ölçülen değerler arasında tutarsızlıklar gözlenmektedir. Bu sebeple birçok araştırmacı tarafından don derinliğini deneysel yöntemler ile yerinde ölçüm yaparak, elde ettikleri verilere uygun ampirik yöntemler geliştirerek denklemler oluşturulmuştur.

Tighe ve diğerleri (2007), Kanada'da don derinliği için ampirik model geliştirmek amacıyla birçok araştırma yürütmüştür. İlk olarak ölçülen hava sıcaklıklarına dayanarak kaplama yüzey sıcaklığını (PST) tahmin etmek için Eş. 4.16'yı geliştirilmiştir. Belirlenen PST değerleri göz önünde bulundurularak kümülatif donma derecesi gününü (CFDD) hesaplamış ve Eş. 4.17 kullanılarak don derinliği tahmin edilmiştir. Son olarak ölçülen don derinliği değerleri ile formülden elde edilen değerler arasında korelasyon sağlayarak Eş. 4.18'i oluşturulmuştur.

$$PST = T_{MEAN} + [0,178(T_{MAX} - T_{MIN})] \quad (4.16)$$

$$P = C\sqrt{CFDD} \quad (4.17)$$

$$P_{corr} = P + \left[ CI(S_e) \left( 1 + \frac{1}{398} \right) + \left( \frac{(\sqrt{CFDD} - X_{MEAN})^2}{\sum (X_i - X_{MEAN})^2} \right)^{0,5} \right] \quad (4.18)$$

Burada  $T_{MAX}$ , maksimum günlük hava sıcaklığı ( $^{\circ}C$ ),  $T_{MIN}$ , minimum günlük hava sıcaklığı ( $^{\circ}C$ ),  $T_{MEAN}$ ,  $T_{MAX}$  ve  $T_{MIN}$  değerlerinin ortalaması,  $PST$ , tahmini kaplama yüzeyi sıcaklığı ( $^{\circ}C$ ),  $P$ , donma derinliği,  $C$ , regresyon sabiti,  $CFDD$ , kümülatif donma derecesi günleri ( $^{\circ}C$ -gün),  $P_{corr}$ , düzeltilmiş donma derinliği,  $CI$ , güven aralığı, anlamlılık düzeyi fonksiyonu,  $S_e$ ,

kare hatalarının toplamı,  $X_i$ , ölçülen donma derinliği (cm),  $X_{MEAN}$ , ölçülen ortalama donma derinliğini ifade etmektedir (Baladi ve Rajaei, 2015a; Tighe vd., 2007).

Rajaei ve Baladi (2015b) yaptıkları çalışmada, ModBerggren, Stefan, Chisholm ve Phang yöntemlerine ek olarak yeni amprik modeller geliştirmiştir. Çalışma kapsamında ilk olarak, Michigan Eyaletinde 2010 ve 2011 yıllarında ölçülen don derinlikleri verileri ve hesaplanan kümülatif donma endeksi değerleri, kumlu ve killi zeminler için bir istatistiksel tahmin modeli geliştirmek için kullanılmıştır (Eş. 19). Ayrıca önerilen denklemin Amerika Bileşik Devletleri (ABD) Mühendisler Birliği tarafından geliştirilen denklemle paralellik gösterdiği belirlenmiştir (Eş.20) (Yoder ve Witczak, 1975).

$$P = 1,369(CFDD)^{0,5339} \quad (4.19)$$

$$P = 1,6575(CFDD)^{0,478} \quad (4.20)$$

Eş.4.20 kullanılarak tahmin edilen derinlik değerlerini geliştirmek ve zemin tipinin ölçülen don derinliği verileri üzerindeki etkisini değerlendirmek için, Michigan verileri zemin tipi (kil ve kum) başına iki gruba ayrılmıştır. Her veri grubu daha sonra güç denklemi formları kullanılarak modellenmiştir. Sonuçlar sırasıyla killi ve kumlu zeminler için Eş. 4.21, Eş.4.22'de verilmiştir.

$$\text{Killi topraklar için } P = 1,5901(CFDD)^{0,4896} \quad (4.21)$$

$$\text{Kumlu topraklar için } P = 1,3302(CFDD)^{0,5423} \quad (4.22)$$

Killi ve kumlu zemin tipleri için verilen formülleri tek denklem altında toplayabilmek amacıyla Michigan eyaletindeki zemin tiplerinin termal iletkenlik değerleri göz önünde bulundurularak Eş. 4.23 elde edilmiştir.

$$P = (-0,45k + 1,9614) * CFDD^{(0,913k+0,4143)} \quad (4.23)$$

Burada;  $k$ , zemin termal iletkenliği (Btu/ft.hr.°F) ifade etmektedir.

### 4.3. Nümerik Modeller

Kaplama tabakaları arasındaki ısı akışını modellemek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu modellemelerin bazıları sonlu elemanlar bazıları ise sonlu farklar yöntemiyle oluşturulmuştur. Thompson ve diğerleri (1987) Illinois eyaletinde iklim veri tabanı oluşturarak kaplamaların sıcaklık profilini tahmin etmek amacıyla geçici bir tek boyutlu sonlu fark modeli geliştirmiştir. Bu model için gerekli olan diğer veriler malzemelerin termal özellikleri, hava sıcaklığı, güneş radyasyonu verileri ve rüzgâr hızıdır. Hsieh ve Ryder (1989) beton kaplamalar ve yağış sızabilecek katmanlı sistemlerin sıcaklık profilini tahmin edebilmek için üç boyutlu bir sonlu fark bilgisayar programı geliştirmiştir. Model oluşturulurken programda yıllık hava verileri, fiziksel zemin özellikleri ve beton özellikleri kullanılmıştır. Yavuztürk ve diğerleri (2005) asfalttaki termal davranışı ve sıcaklık dağılımını değerlendirmek için geçici bir iki boyutlu sonlu fark modeli önermiştir. Yıllık hava sıcaklığı verileri kullanılmış ve malzemelerin farklı termal özelliklerinin öngörülen asfalt sıcaklığına etkisini belirlemek için duyarlılık analizleri yapılmıştır. Asfalt sıcaklık değerlerinin en çok malzemelerin geçirgenliği, hacimsel ısı kapasitesi ve ısıl iletkenliklerinin değişmesinden etkilendiğini bildirmişlerdir. Chapin ve diğerleri (2012), kaplama tabakasındaki donma ve çözünmeyi simüle etmek için sonlu elemanlar programı TEMP / W (GEO-SLOPE 2007) kullanmıştır. Yaygın olarak kullanılan sonlu fark modellerinden biride UNSAT-H modelidir (Baladi ve Rajaei, 2015a; Baca ve Magnuson, 1990; Fayer ve Jones, 1990; Magnuson, 1993)

#### 4.3.1. UNSAT-H Modeli

UNSAT-H Kuzeybatı Pasifik Laboratuvarı tarafından geliştirilen tek boyutlu sonlu farklı bir bilgisayar programıdır. UNSAT-H programı katmanlı bir yapıda su ve ısı dengesini görüntüleyebilen bir modellemeye sahiptir. Bunun için gerekli hidrolik ve termal özelliklere ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

#### Hidrolik Özellikler

Su dengesi denklemleri çözmek için, emme yükünün bir fonksiyonu olarak su içeriği ve hidrolik iletkenlik ilişkileri kullanılarak, Van Genuchten fonksiyonu kullanılmıştır (Eş.4.24) (Baladi ve Rajaei, 2015a).

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (\beta h)^n]^{-m} \quad (4.24)$$

Burada  $\theta_r$ , artan su içeriği ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\theta_s$ , doymuş su içeriği ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $h$  emme yüksekliği (cm) ve  $\beta$ ,  $n$ ,  $m$  uyarlama parametreleridir.

### Termal Özellikler

Su içeriğinin bir fonksiyonu olarak ısı iletkenliğini ifade edebilmek amacıyla UNSAT-H modelini kullanarak Eş.4.25'yi oluşturmuştur (Baladi ve Rajaei, 2015a):

$$k_h = A + B \frac{\theta}{\theta_s} - (A - D) \exp^{-\left[\frac{\theta}{\theta_s}\right]^E} \quad (4.25)$$

Burada,  $k_h$ , termal iletkenlik ( $\text{J}/(\text{s.cm.}^\circ\text{K})$ ),  $\theta$ , ölçülen termal iletkenliğe karşılık gelen su içeriği ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  fit edilen parametreler ve diğer parametreler Eş.4.25 ile aynıdır.

### 4.3.2. PCASE Yazılımı

Aldrich ve Paynter tarafından geliştirilen ModBerggren yönteminde donmuş veya donmamış zeminlerdeki özgül ısı ve termal özelliklere bağlı parametrelerle don derinliklerini hesaplanmıştır. Elde edilen verileri geliştirmek üzere oluşturulan bilgisayar yazılımı PCASE de gerçek değerler kullanıldığından manuel çözümden daha doğru sonuçlar elde edilmektedir.

UFC 3-130-06' da yayımlana prosedüre bağlı kalınarak PCASE yazılımı don penetrasyon derinliğinin hesaplanması için uygulanan iki yöntemden yararlanılmıştır (Bianchini ve Gonzalez, 2012; UFC, 2004). Yazılımda kullanılan giriş verileri her iki yöntem için aynı olmasına rağmen iki yöntemin doğruluk derecesi ve yaklaşımı farklıdır.

Zarling vd. 1989 yılında ilk kez PCASE' de yazılım rutinini uygulamaya başlamıştır (Zarling vd., 1989). Daha sonra Alaska Ulaştırma Bakanlığı aynı prosedürü kabul ederek uygulamaya başlamıştır (Braley ve Connor, 1989).

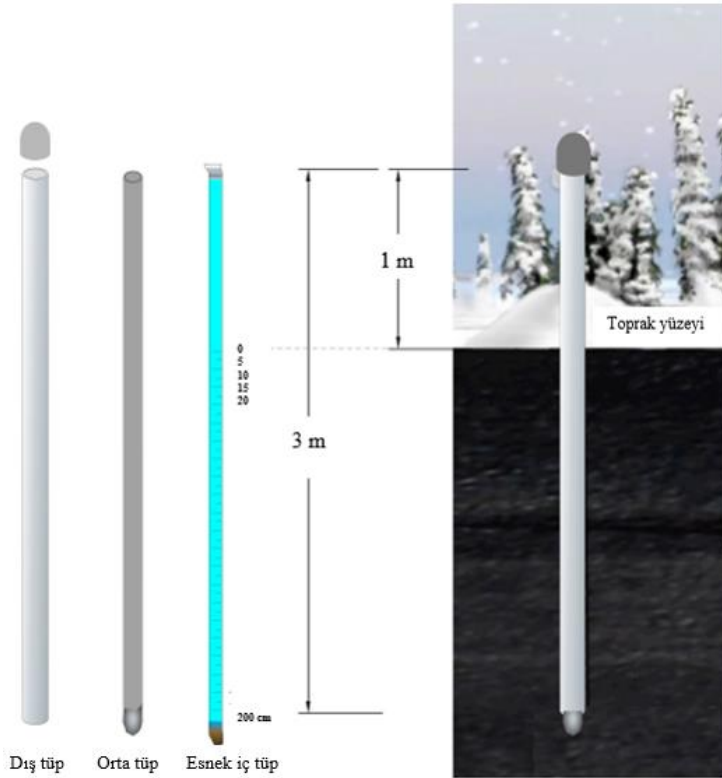
PCASE yazılımında her bir katmanın nem içeriği ve kuru birim hacim ağırlığı gibi özellikleri donmuş ve donmamış zeminlerin termal özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Don

penetrasyon derinliğinin hesaplanması için gerekli olan diğer parametreler coğrafi konumla alakalıdır. Bu veriler don derinliğini hesaplayan programın bir parçası olarak iklim veri tabanına dahil edilmektedir (Bianchini ve Gonzalez, 2012). Belirtilen iklim veri tabanı, ülke çapında ve dünya genelinde çok sayıda yer için ortalama yıllık hava sıcaklığı, don mevsimi uzunluğu, hava dondurma endeksi ve n faktörü gibi parametreler içermektedir. Geliştirilen program don olayının her bir katmana nüfuz etmesi için gereken donma indeksini hesaplamaktadır. Don olayının bir katmana etki etmesi için gereken donma endeksi, söz konusu alanın yüzey indeksinden büyükse, donma cephesi katmanın içinde olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle, o katmanın içindeki don olayının gerçekleştiği derinliği araştırmak için tekrarlanan bir prosedür uygulanmaktadır (Bianchini ve Gonzalez, 2012).

#### **4.4. Deneysel Yöntem**

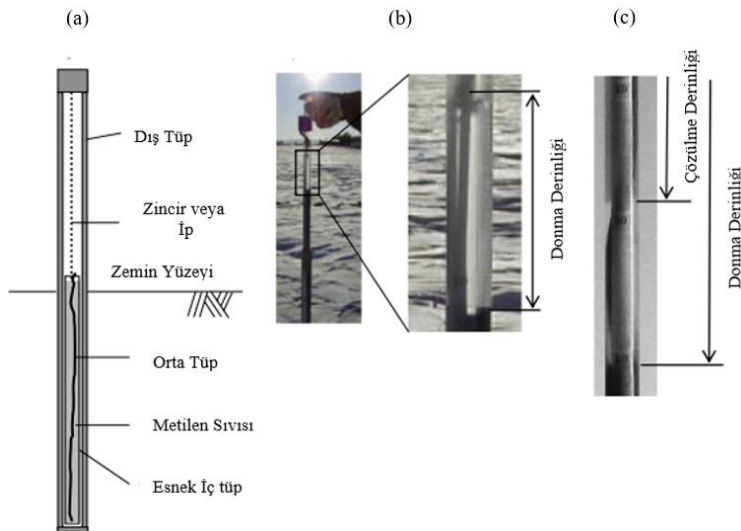
Don derinliğinin belirlenmesinde kullanılan analitik yöntemlerin yanında deneysel ölçüm yöntemi geliştirilerek çeşitli kuruluşlar tarafından “Donma Tüpü Protokolü” hazırlanmıştır. Hazırlanan protokol içeriğinde don derinliği ölçümünün ne şekilde yapılması gerektiği açıklanmıştır. Protokolün amacı bir alan veya belirlenmiş bir küresel çalışma bölgesinde toprağın donma zamanı ve derinliğinin belirlenmesidir.

Deney düzeneğinde kullanılan donma tüpü; dış tüp, orta tüp ve esnek iç tüp olmak üzere üç tüpten oluşmaktadır (Şekil 4.2). Esnek iç tüp 6-8 mm çaplı ve 5 cm’lik artışlarla işaretlenmiş içinde renkli sıvı bulunan şeffaf plastik bir tüptür ve 10 mm çaplı alttan eritilerek kapatılmış orta tüpün içine yerleştirilir. Son olarak orta tüp 12 mm çapa sahip ve her iki ucuda açık olan CPVC (klorlu polivinil klorür) tüpüne yerleştirilerek deneye hazır hale getirilir.



Şekil 4.2. Donma tüpünün bileşenleri

Hazırlanan deney tüpü zemine yerleştirildikten sonra kış ayları boyunca haftada bir kez ve her gün aynı saatte ölçüm yapılması gerekmektedir. Ölçüm sonuçları, esnek tüpün başına bağlanmış zincir veya ip yardımıyla çıkarılarak, içindeki sıvının donma seviyesine göre belirlenmektedir (Şekil 4.3).



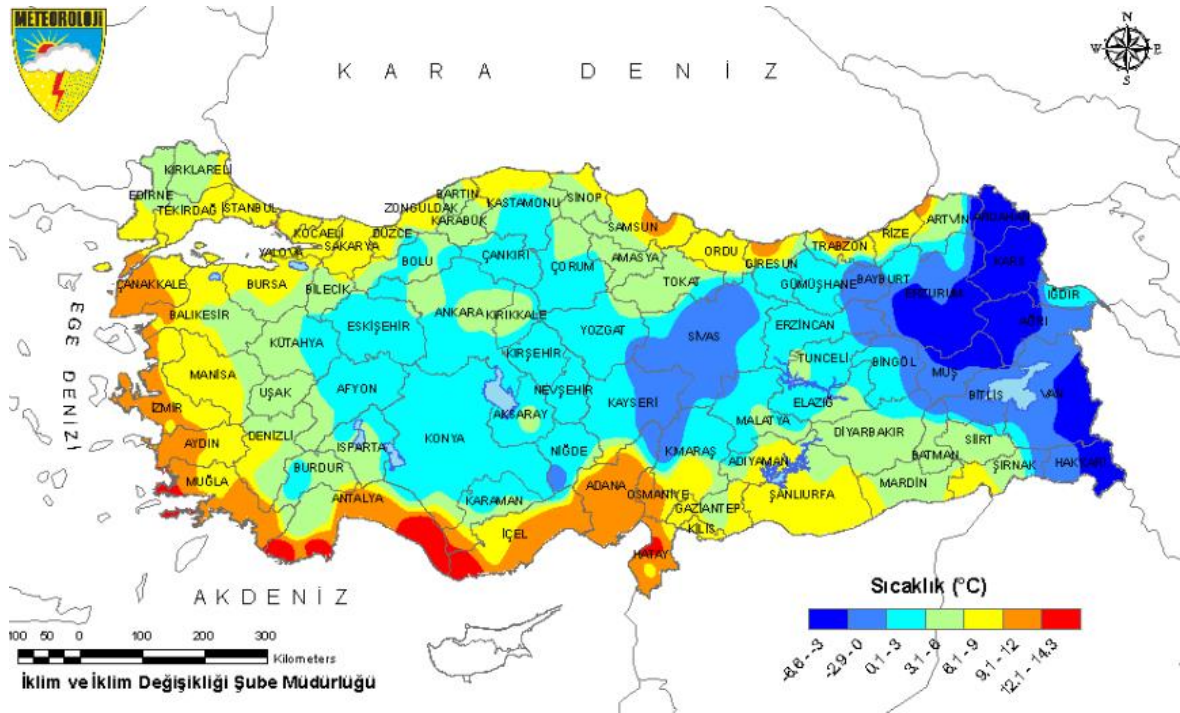
Şekil 4.3. a) Bir donma tüpünün şematik diyagramı, b) Zemin donma döneminde donma tüpü ve c) Zemin çözülme döneminde donma tüpü (Iwata vd., 2012)

### **Don Derinliğinin Deneysel Ölçümünde Uygulanan Aktif Prosedür**

1. Ölçüm yapılacak bölgede gevşek bir zemin içeren yer bulunmalıdır. Seçilen alanda kazı yapılmasının güvenli olduğu yetkililer tarafından kontrol edilmelidir. Mümkün olduğu takdirde ileride kullanılmak üzere konumun GPS okumaları elde edilmelidir.
2. Olanaklar dâhilinde, yaz sonunda toprağı araştırmak üzere bir çelik bir çubuk kullanılarak aktif tabaka derinliğini ölçülmelidir. Dış borunun (tüpün) ve esnek iç borunun uzunluğu yüzey üzerinde 1 metre kalacak şekilde olmalıdır.
3. Yapıştırıcı kullanılarak borunun alt ucuna kapak takılmalıdır.
4. Esnek iç borunun bir ucu eritilerek kapatılmalıdır.
5. Bir huni yardımı ile su ve boya (ya da kullanılacak olan metilen sıvısı) üstten 15 cm' ye kadar doldurulmalıdır.
6. Borunun üst ucu eritilerek kapatılmalıdır.
7. Esnek boru, CPCV boruya yerleştirilmelidir.
8. Don borusunun yerleştirileceği deliği kazmak amacıyla bir burgu veya kazıcı kullanılmalıdır.
9. Don borusu kazılan deliğe yerleştirilmelidir.
10. Sekizinci adımda çıkarılan zemin borunun etrafından yerine yerleştirilmelidir.
11. Esnek borunun dış borunun tepe noktasına ne kadar uzakta olduğu belirlenerek dış boruya işaretlemesi yapılmalıdır. Esnek boru dışarı çıkarılarak ölçüm borusu görevini görmesi amacıyla üzerine 10 cm de bir işaret konulmalı (10 cm, 20 cm, 30 cm) ve kaç cm olduğu yazılarak dış borunun içine yerleştirilmelidir.
12. Soğuk hava veya su girmesini önlemek amacıyla dış borunun (CPCV) üzeri kapatılmalıdır.

## 5. DOĞU ANADOLU BÖLGESİNİN DON DERİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Türkiye, 36° - 42° Kuzey paralelleri ve 26° - 45° Doğu meridyenleri arasında yer almaktadır. Bulunduğu konum itibariyle ve karasal ikliminde etkisiyle ülkemizin önemli bir kısmında kışlar oldukça sert geçmektedir. Yıllık hava sıcaklıklar da göz önüne alındığında bazı bölgelerimizde don etkisi görülmektedir (Harita 5.1).



Harita 5.1. 2019-2020 kış mevsimi ortalama sıcaklık haritası (MGM, 2020)

Zeminde meydana gelen don etkisinin özellikle inşaat yapılarına olan etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve araştırılmıştır. Bu etkiler göz önünde bulundurularak tasarım yapılabilmesi amacıyla don derinliğini gösteren bir haritaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Karayolları tarafından hazırlanan Harita 2.1 incelendiğinde yalnızca hava sıcaklık değerlerinin dikkate alındığı ve zemine ait parametrelerin göz önünde bulundurulmadığı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca zeminde meydana gelen don olayları yalnızca ulaşım yapılarını değil yapı temelleri ve istinat duvarları üzerindeki olumsuz etkisi göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu sebeple güncel ve yeni bir haritanın oluşturulması gereklidir.



Literatür araştırmaları incelendiğinde Şentürk ve Kóksal (1968), karayollarında kullanılmak üzere oluşturulan don penetrasyon cihazını açıklamış ve bu cihazın Türkiye’deki don olabilecek bólgelerdeki yollarda uygulanmış ve sonuçları rapor edilmiştir. Ayrıca yollar için don penetrasyonu ile donma indeksi arasında amprik bir yóntem geliştirmiş ve grafik olarak verilmiştir. Geliştirilen don penetrasyon cihazları Türkiye’de birinci ve ikinci dereceden don bólgesi olan yerlerde bulunan karayollarında bulunan kritik alanlara 1965-1966 kışında 30 adet, 1966-1967 kışında 350 adet ve 1967-1968 kışında ise 180 adet olmak üzere toplamda 560 adet cihaz yerleştirilmiştir. Don penetrasyon cihazları ile elde edilen ólümler değerlendirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında aynı yol için tek bir don derinliğinin verilemeyeceği sonucuna varılmıştır (izelge 5.1).

Çizelge 5.1. Kars-Hasankale yolu üzerinde yapılan ólümler sonucu don derinlikleri

Yol	Ólü Tarihi	Km.	Don Penetrasyonu (cm)
Kars-Hasankale	06/03/1967	6+000	112
Kars-Hasankale	06/03/1967	57+100	120
Kars-Hasankale	06/03/1967	75+100	140
Kars-Hasankale	06/03/1967	117+700	83
Kars-Hasankale	06/03/1967	152+500	132

Cihazların yerleştirildiği bólgeler ve ólüm sonucu elde edilen değerler donma indeksleriyle karşılaştırılmıştır (izelge 5.2). Yapılan deneysel çalışma incelendiğinde, yıllara göre mevsimsel sıcaklık değerimleri ve zemin tipine göre don penetrasyon derinliklerinde değerimler olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.2. Cihazların kullanıldığı yerler ve elde edilen don derinlikleri

Yol	Km.	Don Penetrasyonu (cm)	Donma İndisi °C - Gün
Tekirdağ-Keşhan	168-179	10	27,3
Ankara-İstanbul	101-118	75	
Ankara-Eskişehir	132-198	45	115
Ankara-Kırıkkale	114	51	151
Ankara-Konya	11-83	45	
Ulukışla-Yeşilhisar	7-15	46	214

Nevşehir-Kayseri	10-63	45	
Kayseri-Kırşehir	33-61	60	202
Boğazlıyan-Yozgat	14-87	80	276
Yozgat-Sivas	2-131	75	
Ekrek-Darende	7-157	92	
Pınarbaşı-Sarıhisar	30	105	514
Gülmez geçidi (Elazığ)		52	142
Vaskirt Yolayırımı		72	
Rabat bakım evi		66	
Pülümür Cankurtaran İstasyonu		95	
Periyol ayırımı (Elazığ)		41	
Gazik Bakım Evi		85	
Şeref Bakım Evi		85	
Buğlan geçidi		98	
Tunceli Köprüsü		69	220
Timar (Van)		100	523
Erciş		115	
Dedeli		100	
Patnos		100	
Ahlat		70	
Çukur		85	
Muş		115	629
Reşadiye (van)		105	
Hoşap		110	
Hakkari		95	494
Erzurum Ilıca		105	
Aşkale-Mercan		87	
Erzurum-Hasankale		91	
Ağrı-Tutak		95	
Ağrı-Doğubeyazıt		108	
Kars-Ardahan		120	862
Sivas		100	522
Sivas-Kayseri	13	100	523
Sivas-Malatya	58	94	
Sivas-Erzincan	19	96	
Sivas-Erzincan	117	112	
Erzincan-Erzurum	60	90	380

Bu çalışmada, belirtilen parametre farklılıkları göz önünde bulundurularak, ModBerggren yöntemi ile Türkiye don penetrasyon derinlikleri belirlenmiştir (Ek A).

Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesi bulunmaktadır. Bu bölgeler arasında kışların en sert geçtiği bölge Doğu Anadolu Bölgesidir (DAB). Bu nedenle çalışma kapsamında tüm Türkiye'ye ait don derinliği değerlerine ulaşılmış fakat ayrıntılı olarak yapılan işlem adımları DAB üzerinden anlatılmıştır. Karın yılın yaklaşık 120 günü yerde kaldığı DAB, 39° 25' 35" Kuzey enlemleri ile 41° 14' 4" Doğu boylamları arasında yer almakta ve yaklaşık olarak 171061 km<sup>2</sup> alan kapsamaktadır (Orakoglu vd., 2016). Dört mevsim yağış görülen DAB yıllık 2200 mm yağış almaktadır (Orakoglu vd., 2016). Belirtilen yağış durum ile özellikle son yıllarda ülkemizde ortalama hava sıcaklıklarının düşmesi ve karasal ikliminde etkisiyle bölgenin büyük bir kısmının don etkisine maruz kaldığı gözlenmektedir. Donma-çözülme döngüsü zeminin fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada belirtilen değerler, 2018 TBDY'de yer alan her bir zemin sınıfı için literatür araştırmasından zemin özellikleri elde edilmiş ve Çizelge 5.3'de gösterilmiştir (Hamdhan ve Clarke, 2010; Karaman, 2008; TBDY, 2018).

Çizelge 5.3. 2018 TBDY de belirtilen zemin sınıfları ve literatürde belirtilen özellikleri

Zemin Tipi	İçeriği	Termal İletkenlik (W/m.K)	Su İçeriği (%)	Özgül Ağırlık (g/m <sup>3</sup> )
<b>ZA</b>	Sağlam, sert kayalar	4,5	1	2,67
<b>ZB</b>	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	4,2	2	2,55
<b>ZC</b>	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	3,28	9,6	2,16
<b>ZD</b>	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	3,34	20,2	1,73
<b>ZE</b>	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları	3,57	28,5	1,48

Tahmini don derinliğinin belirlenmesindeki bir diğer etken ise hava sıcaklığı ve bunlara bağlı oluşturulmuş endeks değerleridir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden ölçüm periyodu 1927-2019 yılları arasındaki ortalama hava sıcaklık değerleri, her il için ayrı ayrı alınarak Çizelge 5.4'de ve hava sıcaklığına bağlı oluşturulmuş endeks değerleri Çizelge 5.5'de gösterilmiştir (MGM, 2020).

Çizelge 5.4. 1927-2018 ölçüm periyodunda aylara göre ortalama hava sıcaklıkları (°C)

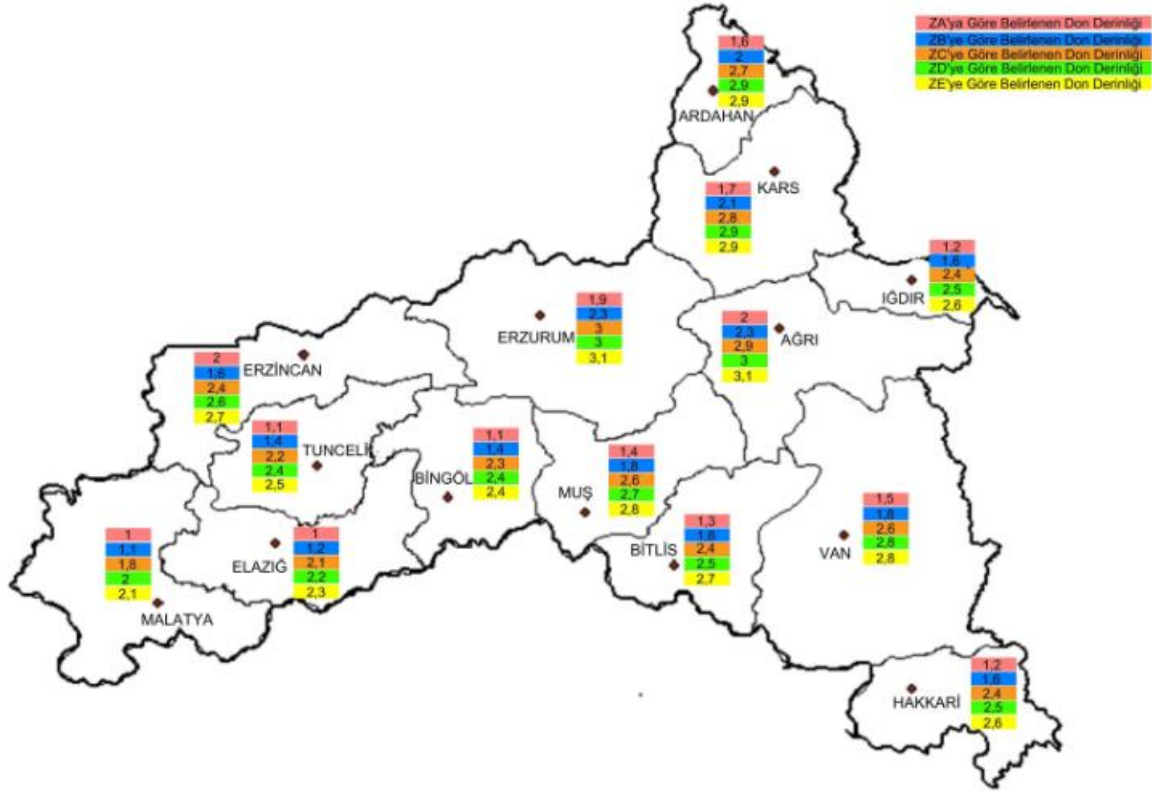
İller	Aylara Göre Hava Sıcaklıkları (°C)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Ağrı</b>	-15,6	-14,5	-8	0,6	5,3	8,2	12,1	11,8	6,8	1,9	-3,5	-10,8
<b>Ardahan</b>	-16,8	-15,9	-8,9	-1,2	3,2	5,8	8,8	8,5	4,3	-0,1	-5,5	-12,7
<b>Bingöl</b>	-6,0	-5	-0,2	5,7	10,1	14,7	19	18,6	13,6	8,2	2,2	-2,9
<b>Bitlis</b>	-6,6	-5,8	-2	3,2	7,4	11,5	15,6	15,1	15,1	10,7	0,9	-4,3
<b>Elazığ</b>	-4,0	-3,1	0,9	6,4	10,9	15,3	19,4	19,2	14,6	8,9	3,1	-1,3
<b>Erzincan</b>	-7,0	-5,5	-0,8	4,7	8,8	12,1	15,5	15,3	10,8	5,8	0,7	-4,1
<b>Erzurum</b>	-14,0	-12,6	-7,1	0	4,4	7,3	11,2	11,2	6,5	1,8	-3,7	-10,3
<b>Hakkâri</b>	-8,0	-6,8	-1,8	4	9,2	14	18,3	18,1	13,9	7,8	1,2	-4,8
<b>Iğdır</b>	-8,1	-5,6	0,1	6,1	10,6	14,3	18	17,2	12,2	6	0,3	-4,7
<b>Kars</b>	-16,4	-15	-8,4	-0,7	3,9	6,6	9,9	9,7	5,3	-0,5	-4,8	-12
<b>Malatya</b>	-3,4	-2,1	2,2	7,5	11,9	16,2	19,9	19,9	15,5	9,9	3,9	-0,8
<b>Muş</b>	-10,8	-9,6	-2,9	4,2	8,8	12,6	17	16,9	12,2	6,8	0,5	-6
<b>Tunceli</b>	-5,6	-4,2	1	6,2	10,2	14,5	18,9	18,5	13,3	8,2	2	-2,4
<b>Van</b>	-7,6	-7,2	-2,9	2,6	7	10,8	14,6	14,6	10,7	5,6	0,3	-4,7

Çizelge 5.5. Don derinliği parametreleri

İller	$v_0$	$v_s$	$I_{af}$ (°C,gün)	$I_{sf}$ (°C,gün)
<b>Ağrı</b>	-0,48	8,62	1446	1301
<b>Ardahan</b>	-2,54	7,81	1840	1656
<b>Bingöl</b>	6,5	3,14	422	380
<b>Bitlis</b>	5,07	4,18	562	506
<b>Elazığ</b>	7,53	2,51	251	226
<b>Erzincan</b>	4,69	3,89	523	471
<b>Erzurum</b>	-0,44	8,57	1437	1293
<b>Hakkâri</b>	5,43	4,78	643	579
<b>Iğdır</b>	5,53	5,54	554	498
<b>Kars</b>	-1,87	7,39	1741	1567
<b>Malatya</b>	8,38	1,89	189	170
<b>Muş</b>	4,14	6,54	880	792
<b>Tunceli</b>	6,72	3,66	366	329
<b>Van</b>	3,65	5	673	606

Verilen parametrik değerler ve 4.1.2’de belirtilen ModBerggren denklemi ile bölgeye ait don derinlikleri belirlenmiştir. Bu değerler, yeni yapıların inşasında belirlenen zemin tipine uygun olarak temel derinliğinin belirlenmesine yardımcı olmak amacıyla hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmada zemin tek katmanlı olduğu varsayılmış ve DAB için hava sıcaklıklarındaki değişiklikler de dikkate alınarak TBDY’de yer alan beş farklı zemin tipi için ayrı ayrı tahmini don penetrasyon derinlikleri hesaplanmış ve hesaplanan değerler bölgeye ait harita üzerinde gösterilmiştir (Şekil 5.1). Hesaplanan değerlere ait örnek oluşturabilecek veriler Erzurum ili üzerinden Çizelge 5.6’da verilmiştir.

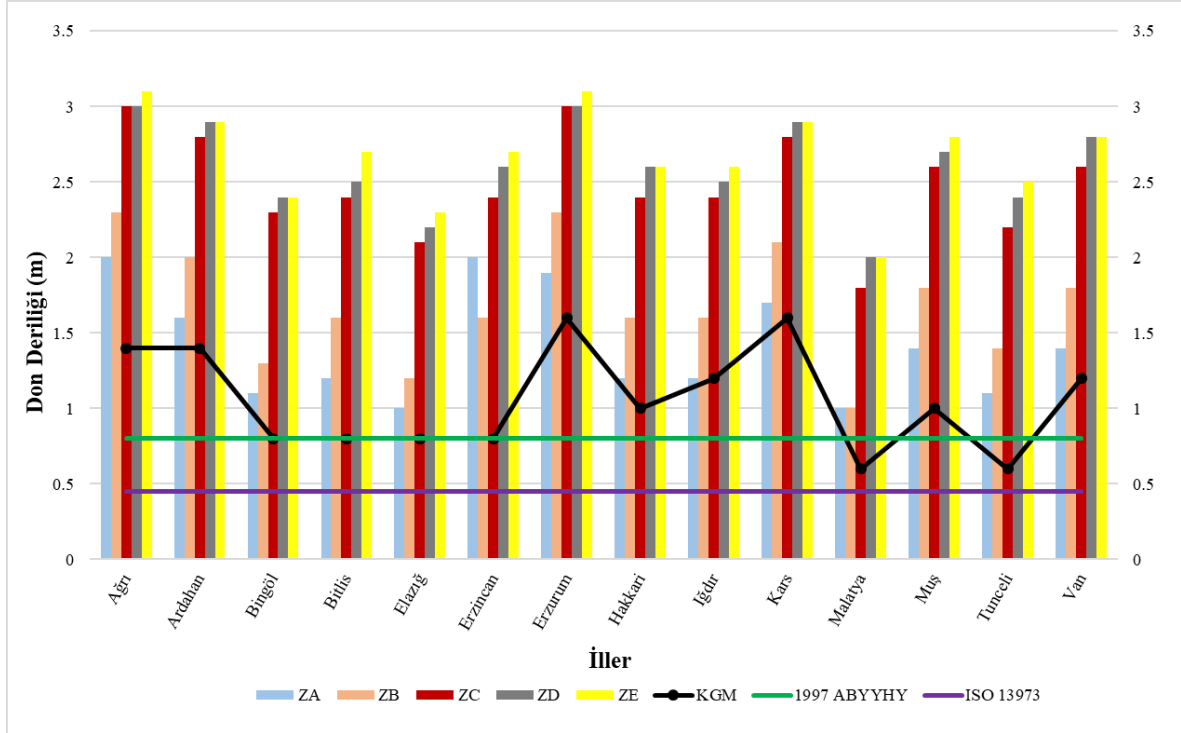


Şekil 5.1. DAB Zemin Sınıflarına Göre Don Penetrasyon Derinlikleri

Çizelge 5.6. Erzurum ili için don derinliğinin belirlenmesinde kullanılan değerler

	Zemin Sınıfı	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	d (m)	C (MJ/m <sup>3</sup> °C)	k (W/m,K)	L (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$	$\alpha$	$\lambda$	R	CFDD	P
Erzurum	ZA	2,67	1	2	2,06	2,5	3,84	4,59	0,1	0,59	0,80	0,38	1,9
	ZB	2,55	2	2	1,9	2	7,34	2,22	0,1	0,70	1,00	0,92	2,3
	ZC	2,16	9,6	2	1,53	3,28	29,87	0,44	0,1	0,9	0,61	2,28	3,0
	ZD	1,73	20,2	2	1,81	3,34	50,32	0,31	0,1	0,92	0,60	3,77	3,0
	ZE	1,488	28,5	2	1,81	3,57	61,07	0,25	0,1	0,93	0,56	4,28	3,1

Verilen yöntemler sonucu elde edilen ve KGM tarafından belirlenen don derinlikleri ile 1997 TDY ve ISO 13793’te belirtilen temel derinliği sınır değerleri Şekil 5.2’de karşılaştırılmıştır.



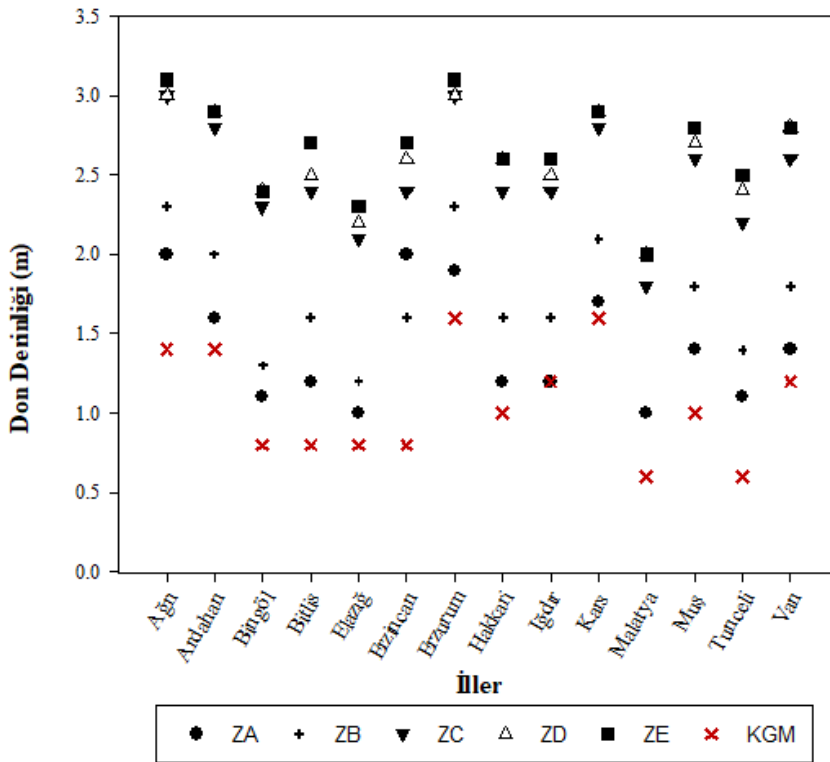
Şekil 5.2. Zemin sınıflarına göre hesaplanan don derinlikleri ve KGM tarafından verilen derinlik değerlerinin 1997 ABYYHY ve ISO 13793'te verilen temel değerlerine göre kıyaslanması

Türk standartları dikkate alındığında (ABYYHY, 1975; ABYYHY, 1997) temel derinliği, yerel don derinliği dikkate alınarak oluşturulması ve temel derinliği don derinliğinin altında olmalı ve en az 0,8 m olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, uluslararası standarda (ISO 13793) göre, donma endeksine ve zeminin izolasyonuna bağlı olarak temel derinlikleri verilmiştir. Verilen bu temel derinlik değerlerine ek olarak, bozulmamış zeminlerin donma indeksi 2000 Kh'dan az ise, temel derinliğinin en az 0,45 m olması gerektiği belirtilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışmadaki don derinlikleri standartlardaki temel derinlik sınırının referans değerleri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan don derinlikleri, bina temel derinlikleri hakkında önceden bilgi sağlayarak bölgede güvenli bir şekilde yapı inşa edilmesini sağlamaktadır.

## 6. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında TBDY 2018’de yer alan beş zemin sınıfı ele alınmıştır. Ancak bu zemin sınıflarına ait parametrik değerler farklı bölgelerde yapılan önceki çalışmalar göz önünde bulundurularak hesaplamalara dâhil edilmiştir. Bu nedenle elde edilen don derinliği sonuçlarının, daha sağlıklı hale getirilmesi amacıyla zemin tiplerinin parametrik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

KGM tarafından yalnızca hava sıcaklık değerleri göz önünde bulundurularak oluşturulan don penetrasyon derinliği haritası incelendiğinde, bu çalışmada bütün zemin sınıfları için belirlenen don derinliği değerlerinin altında kaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.1). Özellikle kışın hava sıcaklığının 0°C’nin altına düştüğü illerde don derinliğinin yanlış bilinmesi, temel derinliğinin belirlenmesinde ve inşa edilen temellerde hasarların ortaya çıkması olası bir durumdur.



Şekil 6.1. Hesaplanan don derinliği değerleri ile KGM tarafından tahmin edilen don derinliklerinin karşılaştırılması

Şentürk ve Köksal (1968) yaptıkları deneysel çalışmada aynı yol üzerinde tek bir don penetrasyon değerinin verilmesinin uygun olmadığı ve yapılan ölçümlerde aynı yol üstünde farklı sonuçlara varılabileceğini belirlemişlerdi (Çizelge 5.1). Yapılan deneysel çalışmada

mevsimsel sıcaklık değişimleri ve zemin tipine göre don penetrasyon derinliklerinde değişimler olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca Şentürk ve Köksal'ın (1968) yaptığı deneysel çalışma verileri incelendiğinde aynı ilde ve aynı yol üzerinde alınan iki noktada yapılan ölçüm sonuçlarının birbirinden farklı olduğu belirlenmiştir. Bu durum don derinliğinin yalnızca hava sıcaklığına bağlı olmadığını kanıtlamaktadır. Bu sebeple yeni ve güncel bir don penetrasyon derinliği haritasının oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada zemin sınıflarına göre yeni bir harita oluşturulmuştur. Ancak çalışma yalnızca analitik olarak ele alınmıştır. Çalışmanın doğruluğunun araştırılması ve geliştirilmesi amacıyla deneysel ölçüm yapılarak gerekli görüldüğü takdirde yeni bir denklem oluşturulabilir veya korelasyon katsayısı geliştirilebilir.





## 7. SONUÇ ve ÖNERİLER

### 7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada donma-çözülme işleminin bölgedeki yapı temelleri üzerindeki zararlı etkileri açıklanmıştır. Türkiye don derinlikleri ModBergg yöntemleri ile hesaplanmış ve 1997 TEC ve ISO 13793'te belirtilen bina temel derinlik limitleri ile karşılaştırılmıştır. Bu analiz yöntemleri sonucunda don derinliğinin zemin içeriği ve hava sıcaklığına bağlı olarak suya doygunluğun fazla olduğu zemin sınıflarında daha derin olduğu çıkarımı yapılmıştır. Yapılan her bina temeli tasarımında belirlenen zemin sınıfına göre ayrı ayrı çıkarılan don derinlikleri, tasarımcılara hem ekonomik açıdan hem de yapı güvenliği açısından kolaylık sağlanması amaçlanarak belirlenmiştir. Çalışmada örnek olarak Doğu Anadolu Bölgesi ele alınmış ve araştırmanın aşamaları ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Don derinliklerinin belirlenmesi için tahmin yöntemlerine dayanılarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Türkiye'de Doğu Anadolu Bölgesi'nde en yüksek don derinlikleri Erzurum, en düşük don derinlikleri ise Malatya ilinde elde edilmiştir.
- Yüzey dondurma indeksi ve hava dondurma indeksi ModBergg denkleminin öngörülen don derinliklerinden doğrudan etkilenmektedir.
- ModBerggren denklemi ile belirlenen derinlik değeri ile KGM tarafından her il için yaklaşık olarak belirlenen don derinliği değerleri bölgenin en soğuk ili ele alınarak kıyaslandığında, ZA için 1,9 m iken, ZE için bu değer 3,1 olduğu belirlenmiştir.
- Dona karşı en hassas zemin sınıfının ZE olduğu belirlenmiştir.
- Bu bölgede, donma ile ilgili problemlerden kaçınmak için temel derinlikleri bu minimum don derinliği değerleri aralığında inşa edilmelidir.

### 7.2. Öneriler

Yapılan bu çalışmada minimum temel derinliğinin belirlenmesi amacıyla don derinliği değerleri amprik yöntemler sayesinde belirlenmiştir. Ancak, don derinliğinin zemin özelliklerine, hava sıcaklığına ve suya doygunluğa bağlı olarak değiştiği göz önünde bulundurulmalıdır. Kesin bir don derinliğinin elde edilebilmesi için inşa bölgesinde deneysel ölçüm yöntemleri uygulanabilir. Bölgede korelasyon katsayısı belirlenerek yeni bir denklem oluşturulabilir.

Ayrıca, mevsimsel donma ve çözülmenin yapı üzerindeki olumsuz etkilerini önlemek veya en aza indirmek, toprağın yapı özelliklerini iyileştirmek, daha rasyonel temel türleri ve yöntemleri hakkında aşağıdaki öneriler sunulabilir;

- Temel derinliği, donma derinliğinin altında ve yeterince derin olarak inşa edilebilir,
- Temel altına gelen toprağın donmaya duyarlı olmayan bir malzeme ile değiştirilebilir veya yalıtım malzemelerinin temel altına donmayı önleyecek şekilde yerleştirilebilir,
- Bodrum katta sıcak su boruları ile yerel ısınma sağlanabilir,
- Yeraltı suyu seviyesi olası donma ihtimaline karşı tahliye edilebilir,
- Donma karşı etkili temel tasarımlarının uygulanabilir (kazık temeller, eğimli kenarlı prefabrik ve monolitik beton temel ve destekleyici ankraj üniteleri vs.).
- 4. Hidrofobik zemin tabakasının temel yüzeyine uygulanabilir,
- Temelin donmaya karşı dayanıklı olmayan zeminlerle doldurulması.

## KAYNAKLAR

- Agnieszka, G., (2003). Comparison of calculated and observed depth of frost penetration in west Poland. *Fac. Civ. Environ. Eng. Instute Struct. Engin.* ASCE, New York, NY.
- Aldrich Jr, H.P., Paynter, H.M., (1953). Analytical studies of freezing and thawing of soils. *Arctic Construction And Frost Effects Lab Boston Ma.*
- Andersons, G., Ozola, L., (2013). Efficiency of thermal design of shallow foundations. *4th Int. Conf. Civ. Eng. 13 Proceeding Part 1 Struct. Eng. 21–30.*
- Argue, G.H., Denyes, B.B., (1974). Estimating the depth of pavement frost and thaw penetrations. *Transp. Res. Rec.*
- American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 32-01), (2001). Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundations
- Baca, R.G. and Magnuson, S.O., (1990). Independent verification and benchmark testing of the UNSAT-H computer code, Version 2.0, EGG-BEG-8811, *EG&G Idaho, Idaho Falls, Idaho.*
- Baladi, G., Rajaei, P., (2015a). Predictive modeling of freezing and thawing of frost-susceptible soils. *Michigan. Dept. of Transportation. Office of Research Administration.*
- Baladi, G.Y., Rajaei, P.,(2015b). Frost Depth: General Prediction Model. *Transp. Res. Rec.* 2510, 74–80. <https://doi.org/10.3141/2510-09>
- Berg, R.L., (1997). Calculating maximum frost depths at Mn/ROAD: winters 1993-94, 1994-95 and 1995-96. *Minnesota. Dept. of Transportation.*
- Bianchini, A., Gonzalez, C.R., (2012). Pavement-transportation computer assisted structural engineering (PCASE) implementation of the modified Berggren (ModBerg) equation for computing the frost penetration depth within pavement structures. *Engineer Research And Development Center Vicksburg Ms Geotechnical And Structures Lab.*
- Boyd, D. W., (1976). Normal freezing and thawing degree-days from normal monthly temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(2), 176–180.
- Braley, W. A. and Connor, B. (1989). Berg2–Micro-computer estimation of freeze and thaw depths and thaw consolidation. *Fairbanks, AK: State of Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Statewide Research*
- Callendar, H.L., McLeod, C.H., (1897). Observations of soil temperatures with electrical resistance thermometers.
- Chisholm, R.A., Phang, W.A., (1983). Measurement and Prediction of Frost Penetration in Highways. *Transp. Res. Rec.* 1–10.
- Dai, H. M., Wang, X. L., (1995). On the minimum depth of bridge and culvert foundations in seasonal frost regions. *Cold regions science and technology*, 23(2), 183-190

- Dalai, D., (2013). Theoretical analysis on distribution of tangential forces of frost heaving over foundation surface. *In Ifost*. Vol. 1, 598-601.
- Dalai, D., (2010). Research on geotechnical properties of frost heaving soil hazards on foundations in Ulanbator area of Mongolia. *In International Forum on Strategic Technology* 414-422.
- DeGaetano, A.T., Cameron, M.D., Wilks, D.S., (2001). Physical Simulation of Maximum Seasonal Soil Freezing Depth in the United States Using Routine Weather Observations. *J. Appl. Meteorol.* 40, 546–555. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<0546:PSOMSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0546:PSOMSS>2.0.CO;2)
- EN ISO 13793 (2003). Thermal Performance of Buildings - Thermal Design of Foundations to avoid Frost Heave.
- Farrington, S. P. and Gildea M.L., (2002). Frost penetration prediction using simulation with gis. In The 22nd Annual Esri International User Conference.
- Fayer, M.J. and Jones, T.L., (1990). UNSAT-H Version 2.0: Unsaturated soil water and heat flow model. *PNL-6779, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.*
- Flerchinger, G.N., (2013). Heat and water relations during freezing and thawing, freeze–thaw impacts on infiltration, freeze–thaw impacts on aggregate stability and factors affecting the impact. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, in: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier. North Holland Publishing Co. Amsterdam.
- Fox, J.D., (1992). Incorporating freeze-thaw calculations into a water balance model. *Water Resour. Res.* 28, 2229–2244. <https://doi.org/10.1029/92WR00983>
- Güngör, A.G., Sağlık, A., (2008). Karayolları esnek üstyapılar proje planlama kılavuzu. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi*. Ulaştırma Bakanlığı, Teknik Araştırma Daire Başkanlığı, Ankara.
- Soliman, H., Kass, S. and Fleury, N., (2008). A simplified model to predict frost penetration for manitoba soils. *In Annual Conference of the Transportation Association of Canada, (Toronto).*
- Haas, W.M., Winters, L.H., (1984). Freezing Degree-days and Frost Penetration under Roads. *In proceedings, in: 3rd International Specialty Conference on Cold Regions Engineering*. Edmonton, Alberta. 1151–1165.
- Hamdhan, I.N., Clarke, B.G., (2010). Determination of thermal conductivity of coarse and fine sand soils, in: *Proceedings of World Geothermal Congress*. 1–7.
- Huen, K., Tighe, S., Mills, B., Perchanok, M., (2006). Development of tools for improved spring load restriction policies in Ontario, in: *The Annual Conference of the Transportation Association of Canada (TAC)*, Charlottetown, Prince Edward Island.
- ISO, 13793, (2001). Therm. Perform. Build. Therm. Des. Found. to Avoid Frost Heave.

- Iwata, Y., Hirota, T., Suzuki, T. and Kuwao, K., (2012). Comparison of soil frost and thaw depths measured using frost tubes and other methods. *Cold regions science and technology*, 71, 111-117.
- Jumikis, A.R., (1977). *Thermal Geotechnics*, Rutgers Uni. Press. New Brunswick 277-303.
- Karaman, E., (2008). Sert Kayalarda Penetrasyon Tayini. Dokuz Eylül Üniversitesi. Bilim. Enstitü, Yüksek Lisans Tezi.
- Khalili, A., Rahimi, H., Shariatmadari, Z.A., (2007). Validation of air freezing index (AFI), for determination of frost penetration depth in typical arid and semi-arid zones of Iran. *Desert (Biaban)* 12, 23–31. <https://doi.org/10.22059/JDESERT.2008.31062>
- Khoshkhoo, Y., Jansson, P. E., Irannejad, P., Khalili, A., and Rahimi, H., (2015). Calibration of an energy balance model to simulate wintertime soil temperature, soil frost depth, and snow depth for a 14 year period in a highland area of Iran. *Cold Regions Science and Technology*, 119, 47-60
- Ladanyi, B., Andersland, O.B., (2004). *Frozen ground engineering*. Wiley.
- Lee, H., Kim, S. and Kim, Y. S., (2013). Estimation of frost depth in south korea, *American Society of Civil Engineers*,
- Luo, M., (2014). Frost Depth Prediction. Doctoral dissertation, North Dakota State University.
- Magnuson S.O., (1993). A simulation study of moisture movement in proposed barriers for the Subsurface Disposal Area, INEL. EGG-WM-10974, EG&G Idaho, Idaho Falls, Idaho.
- McCormick, G., (1993). Frost penetration beneath cleared pavements, in: *International Symposium on Frost Geotechnical Engineering*. 117–126.
- McKeown, S., Clark, J.I., Matheson, D., (1988). Frost penetration and thermal regime in dry gravel. *Journal Cold Region Engineering*. 2, 111–123. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(1988\)2:3\(111\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(1988)2:3(111))
- MGM, (2020). 1950-2017 İlleri Genel İstatistik Verileri. T. C. Orman ve Su Yönetimi Bakanlığı. Meteoroloji Araştırmaları Genel Müdürlüğü. URL [www.mgm.gov.tr](http://www.mgm.gov.tr)
- Mohammadi, H., Moghbel, M., and Ranjbar, F., (2016). Prediction of soil frost penetration depth in northwest of Iran using air freezing indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 126(3-4), 533-541
- Nixon, J.F., McRoberts, E.C., (1973). A study of some factors affecting the thawing of frozen soils. *Can. Geotech. J.* 10, 439–452. <https://doi.org/10.1139/t73-037>
- Orakoglu, M.E., Liu, J., Tutumluer, E., (2016). Frost depth prediction for seasonal freezing area in Eastern Turkey. *Cold Reg. Sci. Technol.* 124, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.12.012>

- Sharratt, B.S., McCool, D.K., (2005). Frost Depth. *Micrometeorology Agric. Syst. Agron. Monogr.* 47, 155–177. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr47.c8>
- Sharratt, B.S., Radke, J.K., Hinzman, L.D., Iskandar, I.K., Groenevelt, P.H., (1997). Physics, chemistry, and ecology of frozen soils in managed ecosystems: An introduction, in: *Proceedings of International Symposium on Physics, Chemistry, and Ecology of Seasonally Frozen Soils*, Fairbanks, Alaska, June 10.
- Stefan, J., (1890). On the Theory of Ice Formation, Especially Ice Formation in the Arctic Ocean: Session Reports Vienna. *Akad. Wiss. A* 18, 965.
- Steurer, P.M., (1996). Probability distributions used in 100-year return period of air-freezing index. *J. cold Reg. Eng.* 10, 25–35. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(1996\)10:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(1996)10:1(25))
- Taber, S., (1930). The mechanics of frost heaving. *J. Geol.* 38, 303–317. <https://doi.org/10.1086/623720>
- TDY, 2007. Deprem bölgelerinde inşa edilecek binaların kodları. TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara. Afet ve Acil Durum Yönetimi.
- Thomas, H.P., Trat, R.G., (1984). Two Dimensional Simulations of Freezing and Thawing in soils. In: *Proceedings of the 13 International Specialty Conference of Cold Regions Engineering*, Edmonton, Alberta. 265–274.
- Thordarson, S., Jonasson, N., Sveinbjomsson, E., Thorolfsson, A.H. and Bjomsson, G.O., (2010). Real-time frost depth forecast model for thaw-induced axle load limitation management. In *Proceeding of XIIIth PIARC Winter Road Congress*.
- Tighe, S.L., Mills, B., Haas, C.T., Baiz, S., (2007). Using Road Weather Information Systems (RWIS) to control load restrictions on gravel and surface-treated highways.
- TS500, 2000. TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Ankara Türkiye.
- USACE, (1998). US Army Corps of Engineers. National inventory of dams.
- UFC 3-130-06, (2004). Calculation methods for determination of depth of freeze and thaw in soil: Arctic and subarctic construction.
- Zarling, J. P., Braley, W. A. and Pelz, C., (1989). The modified Berggren method – A review. *In Proceedings of the Fifth International Conference, Cold Regions Engineering.* 267-273. New York, NY: ASCE

**EK A**

Tablo Ek-A.1. Türkiye'deki tüm illerin zemin sınıflarına göre ModBerggren yöntemiyle belirlenen don derinlikleri (m)

<b>İller</b>	<b>ZA</b>	<b>ZB</b>	<b>ZC</b>	<b>ZD</b>	<b>ZE</b>
<b>Ağrı</b>	1,97	2,30	2,96	3,02	3,06
<b>Ardahan</b>	1,61	2,00	2,76	2,86	2,89
<b>Bingöl</b>	1,12	1,35	2,33	2,37	2,43
<b>Bitlis</b>	1,25	1,58	2,43	2,50	2,69
<b>Elazığ</b>	0,99	1,18	2,07	2,17	2,30
<b>Erzincan</b>	1,97	1,61	2,43	2,56	2,69
<b>Erzurum</b>	1,94	2,30	2,96	3,02	3,06
<b>Hakkari</b>	1,18	1,61	2,43	2,56	2,63
<b>Iğdır</b>	1,22	1,61	2,40	2,50	2,60
<b>Kars</b>	1,68	2,10	2,79	2,89	2,92
<b>Malatya</b>	0,99	1,02	1,81	2,00	2,04
<b>Muş</b>	1,41	1,84	2,60	2,69	2,79
<b>Tunceli</b>	1,05	1,38	2,20	2,43	2,46
<b>Van</b>	1,45	1,81	2,63	2,83	2,83
<b>Edirne*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Kırklareli*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Tekirdağ*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>İstanbul*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Kocaeli*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Bursa*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Balıkesir*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Çanakkale*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>İzmir*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Aydın*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Muğla*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Antalya*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Manisa*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Uşak</b>	1,15	1,30	1,80	1,87	1,90
<b>Denizli*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Burdur*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Kütahya</b>	2,20	1,31	2,10	2,33	2,33
<b>Afyonkarahisar</b>	1,28	1,35	2,40	2,43	2,50
<b>Isparta</b>	1,84	1,25	1,87	3,15	2,10

<b>Bilecik*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Sakarya*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Yalova*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Düzce*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Bolu</b>	1,25	1,25	2,46	2,73	2,50
<b>Aksaray</b>	1,02	1,28	2,07	2,63	2,76
<b>Ankara</b>	0,99	1,15	2,04	2,73	2,23
<b>Çankırı</b>	1,15	1,41	2,30	2,66	2,50
<b>Eskişehir</b>	1,22	1,38	2,23	2,66	2,46
<b>Karaman</b>	1,02	1,28	2,30	2,60	2,79
<b>Kayseri</b>	1,51	1,87	2,66	2,00	2,10
<b>Kırıkkale</b>	1,02	1,02	1,94	2,99	2,14
<b>Kırşehir</b>	1,08	1,25	2,17	2,60	2,69
<b>Konya</b>	1,25	1,25	2,27	2,56	2,83
<b>Nevşehir</b>	1,12	1,28	2,27	2,60	2,79
<b>Niğde</b>	1,12	1,31	2,27	2,60	2,79
<b>Sivas</b>	1,68	1,94	2,66	1,81	1,97
<b>Yozgat</b>	1,35	1,77	2,53	2,89	2,73
<b>Mersin*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Adana*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Osmaniye*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Hatay*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Kahramanmaraş*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Gaziantep*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Kilis*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Şanlıurfa*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Mardin*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Şırnak*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Batman</b>	1,02	0,99	1,58	1,74	1,91
<b>Artvin*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Rize*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Trabzon*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Giresun*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Ordu*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Samsun*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Sinop*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Kastamonu</b>	1,35	1,64	2,56	2,56	2,63



<b>Bartın*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Zonguldak*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Karabük*</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Gümüşhane</b>	1,31	1,68	2,43	2,63	2,69
<b>Bayburt</b>	1,97	2,30	3,00	3,02	3,06
<b>Siirt</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Diyarbakır</b>	1,15	0,99	1,51	1,71	1,84
<b>Adıyaman</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Tokat</b>	0,99	1,02	1,74	1,84	2,04
<b>Amasya</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Çorum</b>	2,40	1,61	2,46	2,53	2,66

\*Yıl içerisinde hava sıcaklığının 0°C'nin altına inmediği illerde don derinliğinin dikkate alınması söz konusu değildir. Bu sebeple bu illere ait veriler KGM tarafından yapılan çalışma sonucu elde edilen harita göz önünde bulundurularak 40 cm olarak kabul edilmiştir. Değerler, harita üzerinde özellikle küçük yüzey alana sahip olan illerde net olarak görünmemesi sebebiyle tablo halinde verilmiştir.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YEDEK, Seda  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1994, Elazığ  
 Medeni hali : Bekar  
 e-mail : seda\_yedek@hotmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği/İnşaat Mühendisliği ABD	Devam ediyor
Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2017
Lise	Necip Fazıl Kısakürek Anadolu Lisesi	2012

### İş Deneyimi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Yedek, S. & Bikçe, M. (2018). Sismik İzolatörün BA Yapıların Performansına Etkisinin İncelenmesi. 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress, Adana.
2. Yedek, S., Bayrak, O. F., Bikçe, M. The Investigation of the Triangular Structure in the 2011 Van Earthquake, Tam Metin Bildiri. 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 08 - 11 October 2019.
3. Yedek, S. & Bikçe, M. (2019). Doğu Anadolu Bölgesi Don Derinliğinin Tahmini. International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering, İskenderun.
4. Bayrak, O. F., Yedek, S., Erdem, M. M., Bikçe, M. (2018) Investigating the Effect of Infill Walls on Steel Frame Structures. Challenge Journal Of Structural Mechanics, 4(1), 27-32.
5. Bayrak, O. F., Yedek, S., Bikçe, M. Komşu Yapılarda Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi, Sözlü Sunum. International Mediterranean Science and Engineering Congress, 24 - 26 October 2018.
6. Bayrak, O. F., Yedek, S., Bikçe, M. Litaretürde Önerilen Eşdeğer Basınç Çubuğu Kalınlıklarının Karşılaştırılması. Sözlü Sunum, International Mediterranean Science

- and Engineering Congress, 24 - 26 October 2018.
7. Bayrak, O. F., Yedek, S., Erdem, M. M., Bikçe, M. Çelik Çerçevele Yapılar Özelinde Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi, Sözlü Sunum, Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu, 26 - 28 October 2017.

## **Hobiler**

Kitap okuma, Yüzme



**DİZİN****A**

Abstract · vi

**Ç**

Çizelge · X,24, 25, 40, 42, 43, 44

**E**

Ekler · 54

**G**

Giriş · 1, 35

**H**

Harita · v, xiv, 10, 15, 16, 21, 22,  
33, 39, 44, 46, 47,56

**K**

Kabul ve Onay · 25  
Kaynak · 11  
KeyWords · 25, 65, 66  
Kılavuz · 1

**L**

Literatür · x, 5, 7, 13, 27, 31, 40,  
42

**Ö**

Özet · v, 7  
Özgeçmiş · 57

**R**

Referans · 50

Resim· xii,3, 8, 10, 11, 12, 13,  
15, 16, 17, 19, 20, 21

**S**

Simgeler ve Açıklamalar · xv  
Sonuç ve öneriler · 48

**Ş**

Şekil · v, 1, 2, 8, 11, 12, 14, 16,  
20, 24, 28, 30, 36, 37, 44, 45,  
46

**T**

Teşekkür · vii



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

