ŞEV STABİLİTESİ VE STABİLİZASYON YÖNTEMLERİNİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE DEĞERLENDİRİLMESİ: AFYONKARAHİSAR ÇAY BÖLGESİ BARAJ VADİSİ VE KARAYOLU ŞEVLERİNE İLİŞKİN VAKA ANALİZLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif ÇAKIR

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2026

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEV STABİLİTESİ VE STABİLİZASYON YÖNTEMLERİNİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE DEĞERLENDİRİLMESİ: AFYONKARAHİSAR ÇAY BÖLGESİ BARAJI VADİSİ VE KARAYOLU ŞEVLERİNE İLİŞKİN VAKA ANALİZLERİ

Elif ÇAKIR

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Elif ÇAKIR tarafından hazırlanan **"Şev Stabilitesi ve Stabilizasyon Yöntemlerinin Sonlu Elemanlar Metodu ile Değerlendirilmesi: Afyonkarahisar Çay Bölgesi Baraj Vadisi ve Karayolu Şevlerine İlişkin Vaka Analizleri"** adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 23/07/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği / Geoteknik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman **:** Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK

Başkan **:** Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi ..... İmza .....

Üye **:** Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi ..... İmza .....

Üye **:** Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi ..... İmza .....

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... /..... /..... tarih ve
……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

…….
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

23 / 07 / 2026

Elif ÇAKIR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ŞEV STABİLİTESİ VE STABİLİZASYON YÖNTEMLERİNİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE DEĞERLENDİRİLMESİ: AFYONKARAHİSAR ÇAY BÖLGESİ BARAJ VADİSİ VE KARAYOLU ŞEVLERİNE İLİŞKİN VAKA ANALİZLERİ

Elif Çakır

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK

Bu çalışma kapsamında, iki farklı şev yapısı için statik ve dinamik koşullar altında kapsamlı stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın ilk aşamasında, ankraj elemanları ile iyileştirilmiş bir baraj vadi şevi ele alınmış; aşırı yağışlar sonucunda oluşabilecek beş farklı yeraltı su seviyesi senaryosu ile bu olumsuz etkilerin azaltılmasına yönelik 5 m, 10 m ve 20 m uzunluğundaki drenaj sistemlerinin performansı PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak statik ve dinamik analizlerle değerlendirilmiştir. Araştırmanın ikinci aşamasında ise karayolu güzergâhında yer alan problemli doğal bir yol şevinin stabilitesini artırmak amacıyla drenaj sistemi, topuk istinat duvarı, yapay destek dolgusu ve ankraj uygulamaları ayrı ayrı ve birlikte modellenmiş; bu iyileştirme önlemlerinin performansları statik ve dinamik koşullar altında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Elde edilen bulgular, aşırı yağışlara bağlı yeraltı su seviyesi yükselmelerinin şev stabilitesi ve ankraj performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yeraltı su seviyesinin yükselmesiyle birlikte güvenlik katsayısında (Fs) belirgin azalmalar meydana gelmiş, potansiyel göçme yüzeyleri derinleşmiş ve deformasyonlar önemli ölçüde artmıştır. Bunun yanı sıra, ankraj bölgelerinde gerilme yığılmalarının oluştuğu belirlenmiş; ankraj sistemlerinin şev stabilitesini önemli ölçüde artırmasına rağmen, yağış kaynaklı hidrostatik etkileri tek başına tamamen ortadan

kaldırmaya yeterli olmadığı görülmüştür. Baraj vadi şevi üzerinde gerçekleştirilen drenaj analizleri ise yeraltı su seviyesinin etkin biçimde kontrol altına alınmasını sağlayarak güvenlik katsayılarının kritik sınırların üzerinde kalmasına katkı sağlamış ve ankraj sistemi ile birlikte kullanıldığında aşırı gerilme birikimlerini önemli ölçüde azaltmıştır.

Karayolu şevi analizleri ise drenaj uygulamasının tek başına yeterli olmadığı durumlarda topuk istinat duvarı, yapay destek dolgusu ve ankraj sistemlerinin birlikte kullanılmasının şev stabilitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Özellikle birleşik iyileştirme çözümleri, hem statik hem de dinamik yüklemeler altında deformasyonları azaltmış ve güvenlik katsayılarını kabul edilebilir seviyelere yükseltmiştir.

Sonuç olarak, çalışma statik ve dinamik analizlerin birlikte değerlendirilmesinin şev davranışının daha gerçekçi biçimde ortaya konulması açısından büyük önem taşıdığını göstermektedir. Özellikle aşırı yağış koşullarında meydana gelen yeraltı su seviyesi artışları şev stabilitesini kritik düzeyde olumsuz etkilemekte; bu nedenle yalnızca ankraj uygulamalarının yeterli olmadığı, drenaj sistemleri ile desteklenen ve gerektiğinde istinat yapıları ile güçlendirilen bütünleşik şev iyileştirme yaklaşımlarının uygulanmasının güvenli ve sürdürülebilir tasarımlar için zorunlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

2026, xi + 105 sayfa

Anahtar Kelimeler: Şev stabilitesi, Statik analiz, Dinamik analiz, Sonlu elemanlar.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EVALUATION OF SLOPE STABILITY AND STABILIZATION METHODS USING THE FINITE ELEMENT METHOD: CASE STUDIES OF DAM VALLEY AND HIGHWAY SLOPES IN THE ÇAY REGION OF AFYONKARAHİSAR

Elif ÇAKIR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Süleyman GÜCEK

In this study, comprehensive stability analyses were performed under static and dynamic conditions for two different slope structures. In the first phase of the research, a dam valley slope improved with anchor elements was considered; the performance of drainage systems of 5 m, 10 m, and 20 m lengths, aimed at mitigating the negative effects of five different groundwater level scenarios resulting from excessive rainfall, was evaluated using static and dynamic analyses with PLAXIS 2D software. In the second phase of the research, drainage systems, toe retaining walls, artificial support fill, and anchor applications were modeled separately and together to improve the stability of a problematic natural road slope located along a highway route; the performance of these improvement measures was examined comparatively under static and dynamic conditions.

The findings show that groundwater level increases due to excessive rainfall have a decisive effect on slope stability and anchor performance. With the rise in groundwater level, significant reductions in the safety factor (Fs) occurred, potential failure surfaces deepened, and deformations increased significantly. In addition, it was determined that stress concentrations occurred in the anchorage areas; although anchorage systems significantly increased slope stability, they were not sufficient to completely eliminate the hydrostatic effects caused by rainfall alone. Drainage analyses performed on the

dam valley slope ensured that the groundwater level was effectively controlled, contributing to keeping the safety factors above critical limits and significantly reducing excessive stress concentrations when used in conjunction with the anchorage system.

Highway slope analyses revealed that when drainage alone was insufficient, the combined use of toe retaining walls, artificial support fills, and anchorage systems significantly improved slope stability. In particular, combined improvement solutions reduced deformations under both static and dynamic loadings and raised safety factors to acceptable levels.

In conclusion, the study demonstrates that the combined evaluation of static and dynamic analyses is of great importance in more realistically portraying slope behavior. Especially under conditions of excessive rainfall, increases in groundwater levels critically and negatively affect slope stability; Therefore, it has been concluded that anchoring alone is insufficient, and that integrated slope improvement approaches, supported by drainage systems and reinforced with retaining structures when necessary, are essential for safe and sustainable designs.

2026, xi + 105 pages

Keywords: Slope stability, Static analysis, Dynamic analysis, Finite elements.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK'e, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma, her şeyden önce ise en çok da kendime teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Elif ÇAKIR

Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ 3
2.1 Şev ve Şev Stabilitesi 6
2.2 Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması 8
2.2.1 Düşme 10
2.2.2 Devrilme 11
2.2.3 Akma 11
2.2.4 Kayma 12
2.2.5 Yanal Yayılma 13
2.2.6 Karmaşık 14
2.3 Şev Hareketine Neden Olan Etkenler 15
2.4 Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri 20
2.4.1 Limit Gerilme Yöntemi 22
2.4.2 Limit Denge Yöntemi 22
2.4.2.1 Fellenıus Yöntemi (İsveç Dilim Metodu) 23
2.4.2.2 Bishop ve Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi 25
2.4.2.3 Janbu Yöntemi 26
2.4.2.4 Spencer Yöntemi 28
2.4.2.5 Morgenstern - Price Yöntemi 29
2.4.2.6 Lowe-Karafiaht Yöntemi 31
2.4.2.7 Culmann Yöntemi 32
2.4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi 33
2.4.4 Dinamik Analiz Yöntemi 34
2.4.4.1 Psödostatik Yöntem 35
2.4.4.2 Ampirik formüller 35

3. MATERYAL ve METOT 37
3.1 Plaxis 2D Programı 37
3.2 Çalışma Sahası Verileri 39
3.2.1 Baraj Vadi Şevi Verileri 40
3.2.2 Yol Şevi Verileri 47
3.2.3 Kullanılan Deprem Verileri 56
4. BULGULAR 60
4.1 Baraj Vadi Şevi Bulguları 60
4.2 Yol Şevi Bulguları 70
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 80
6. KAYNAKLAR 84
ÖZGEÇMİŞ 88

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

τ_f	Kayma dayanımı
G_s	Güvenlik katsayısı
τ	Kayma gerilmesi
Mo	Moment
X	Dilimler arası kayma kuvveti
E	Dilimler arası normal kuvvet
Fs	Güvenlik katsayısı
N	Taban normal kuvveti
C	Kohezyon
W	Dilim ağırlığı
a	Dilim tabanının eğimi
ϑ	İçsel sürtünme açısı
ß	Dilim taban uzunluğu
N_a	Normal kuvvet
T_a	Kesme kuvveti

Kısaltmalar

Fs	Güvenlik katsayısı
SR	Şev oranı
SRM	Dayanım azaltma yöntemi
TS	Türk standartları
YASS	Yeraltı su seviyesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Literatürde kabul görmüş şev terminolojisi (Coduto 2006). 7

Şekil 2.2 Şev örneğinde kayma yüzeyi. 8

Şekil 2.3 Şev kesiti (Kara 1980). 8

Şekil 2.4 Düşme hareketi (Das 2018). 10

Şekil 2.5 Devrilme hareketi (Das 2018). 11

Şekil 2.6 Akma problemi (Das 2018). 11

Şekil 2.7 Akma türleri (Ulusay 2001). 12

Şekil 2.8 Kayma hareketi (Das 2018). 13

Şekil 2.9 Kayma hareket türünün sınıflandırılması (Anaçali ve Şirin 2015). 13

Şekil 2.10 Yanal yayılma (Das 2018). 14

Şekil 2.11 Akma özellikleri de içeren karmaşık kayma (Bromhead 1986). 14

Şekil 2.12 İzmir-İstanbul otoyolundaki heyelan 16

Şekil 2.13 Antalya – Konya karayolu 17

Şekil 2.14 Bir dilim kuvvet üzerine gelen etkiler. 24

Şekil 2.15 Dilim üzerinde etkili olan kuvvetler Bishop (1955). 25

Şekil 2.16 Janbu düzeltme katsayısı. 28

Şekil 2.17 Morgenstern-Price yöntemindeki kuvvet fonksiyon türleri (Tekin 2011). ... 30

Şekil 2.18 Bishop ve Morgenstern-Price yöntemlerinin karşılaştırılması (Krahn 2004). 31

Şekil 2.19 Culmann metodu (Das 2011). 32

Şekil 2.20 Sonlu elemanlara ayrılmış şev kesiti örneği. 34

Şekil 3.1 Gerilme ve düğüm noktaları. 38

Şekil 3.2 Baraj vadi şevinin doğal hali. 41

Şekil 3.3 Çalışma alanı koordinatları. 42

Şekil 3.4 Baraj vadi şevinin modeli. 43

Şekil 3.5 Yeraltı su seviyesi senaryoları. 44

Şekil 3.6 Dinamik analiz calculation adımları. 47

Şekil 3.7 Yol şevinin mevcut hali. 48

Şekil 3.8 Arazi numuneleri. 49

Şekil 3.9 Yol şevi modeli. 52

Şekil 3.10 Yol şevinin yeraltı su seviyesi. 53

Şekil 3.11 İstinat duvarı ölçüleri. 55

Şekil 3.12 Dinamik yükleme adımı. 58

Şekil 3.13 Ölçeklendirilmiş deprem kaydı. 59

Şekil 4.1 Mevcut baraj vadi şevi statik analiz çıktısı. 61

Şekil 4.2 Drenajlı YASS- güvenlik katsayısı arasındaki ilişki. 63

Şekil 4.3 Drenajlı ve drenajsız YASS-Fs arasındaki dinamik analiz ilişkisi. 64

Şekil 4.4 YASS-3'e ait statik analiz güvenlik katsayıları. 65

Şekil 4.5 Drenajsız YASS-3 statik analiz sonucu. 65

Şekil 4.6 5m drenajlı YASS-3 statik analiz sonucu. 66

Şekil 4.7 10m drenajlı YASS-3 statik analiz sonucu. 66

Şekil 4.8 20m drenajlı YASS-3 statik analiz sonucu. 66

Şekil 4.9 Drenajsız YASS-3 dinamik analiz sonucu. 67

Şekil 4.10 5m drenajlı YASS-3 dinamik analiz sonucu. 68

Şekil 4.11 10m drenajlı YASS-3 dinamik analiz sonucu. 68

Şekil 4.12 20m drenajlı YASS-3 dinamik analiz sonucu. 69

Şekil 4.13 Yol şevine ait mevcut durum statik analiz sonucu. 71

Şekil 4.14 Yol şevinin statik ve dinamik analiz sonuçları. 72

Şekil 4.15 Yol şevinin topuk istinat duvarlı statik analiz sonuçları. 73

Şekil 4.16 Yol şevinin topuk istinat duvarlı statik ve dinamik analiz sonuçları. 74

Şekil 4.17 Yol şevinin 20m drenajlı topuk istinat duvarı statik analiz sonucu. 75

Şekil 4.18 Yol şevinin 20m drenajlı yapay destek dolgulu statik analiz sonucu. 76

Şekil 4.19 Yol şevinin drenajsız dinamik analiz sonucu. 78

Şekil 4.20 Yol şevi statik analiz sonuçları. 79

Şekil 4.21 Yol şevi dinamik analiz sonuçları. 79

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Şev göçmeleri için yapılan sınıflandırma (Varnes 1978)..... 9

Çizelge 2.2 Şev üzerindeki etkenler (Türkmen 2009)..... 18

Çizelge 2.3 Şev hareketine neden olan etkenler (Popescu 2002)..... 19

Çizelge 2.4 Yamaç ve şevlerde güvenlik sayıları (TS 8853 1991). 21

Çizelge 2.5 Analiz metotlarının karşılaştırılması (Avşar 2004)..... 23

Çizelge 3.1 Baraj vadi şevinin zemin parametreleri..... 45

Çizelge 3.2 Ankraj parametreleri. 46

Çizelge 3.3 Yol Şevinin zemin parametreleri. 51

Çizelge 3.4 Yol Şevinin topuk istinat duvarı için dolgu malzemesi parametreleri..... 54

Çizelge 3.5 Yol Şevinin topuk istinat duvar parametreleri. 54

Çizelge 3.6 Yol Şevinin yapay destek dolgusu malzeme parametreleri. 55

Çizelge 3.7 Yol Şevinin ankraj malzemesi parametreleri. 56

Çizelge 3.8 Deprem yer hareket düzeyine göre ivme değerleri. 57

Çizelge 4.1 Baraj vadi şevi -YASS arasındaki statik analiz sonuçları..... 62

Çizelge 4.2 YASS-drenaj arasındaki statik analiz sonuçları..... 63

Çizelge 4.3 Baraj vadi şevinin dinamik analiz sonuçları. 64

Çizelge 4.4 YASS-3'e ait statik analiz güvenlik katsayıları. 65

Çizelge 4.5 YASS-3'e ait dinamik analiz güvenlik katsayıları..... 67

Çizelge 4.6 Baraj vadi şevine ait dinamik ve statik analiz sonuçları. 69

Çizelge 4.7 Mevcut yol şevinin drenajlı statik analiz sonuçları..... 71

Çizelge 4.8 Mevcut yol şevinin drenajlı dinamik analiz sonuçları. 72

Çizelge 4.9 Topuk İstinat duvarlı yol şevinin statik analiz sonuçları. 73

Çizelge 4.10 Topuk istinat duvarlı yol şevinin dinamik analiz sonuçları. 73

Çizelge 4.11 Yapay destek dolgulu yol şevinin statik analiz sonuçları. 76

Çizelge 4.12 Yapay destek dolgulu yol şevinin dinamik analiz sonuçları. 76

Çizelge 4.13 10m ankrajlı yol şevinin statik analiz sonuçları. 77

Çizelge 4.14 10m ankrajlı yol şevinin dinamik analiz sonuçları. 77

1. GİRİŞ

Zaman içerisinde değişim gösteren yerleşik hayata geçme süreçlerinde barınma ihtiyacı, insanların yerleşim biçimlerini ve yerleşim düzenlerini belirleyen bir unsur olmuştur. Bu bağlamda insanlar, yaşam alanlarını seçme ve düzenleme konusunda emniyet, estetik, ekonomik gibi birçok yönlü kriteri göz önüne almak zorunda kalmıştır. Artan nüfus yoğunluğu ve hızlı kentleşme süreçleri, güvenli ve kontrollü alanların giderek daralmasına yol açmış ve daha önce kullanılmayan ya da riskli görülen bölgelerin de yapılaşmaya açılmasını dolaylı yoldan kullanılabilir hale getirmiştir. Bu durum sonucunda farklı zemin türlerinde güvenli yapı inşası, mühendislik açısından çözülmesi gereken kritik bir mesele haline gelmiştir. Özellikle eğimli topoğrafyaya sahip bölgeler ve alanlar da sıkça tercih edilmekte olup, söz konusu alanlarda da şev stabilitesi analizinin sağlanması vazgeçilmez bir gereklilik haline gelmiştir (Keleşoğlu 2016).

Geoteknik zemin mekaniği literatüründe zemin veya kaya kütlelerinin oluşturduğu eğimli yüzeyler "şev" olarak tanımlanmaktadır. Şevler doğal jeolojik süreçler sonucunda oluşabileceği gibi kazı veya dolgu gibi benzeri mühendislik yapıları sonucunda meydana gelebilmektedir. Eğimli yüzeylerin ortak yapısal özelliği, yerçekiminin etkisi altında kütlenin yüzey aşağı yönlü hareket etme potansiyeline sahip olmasıdır. Bu potansiyele karşı koyan dayanım kuvvetleri yeterli olduğu sürece şev dengeli yani duyarlı kabul edilir; ancak taşıma gücünün azalması veya dış etkilerin artması durumlarında kayma, akma ve göçme gibi çeşitli stabilite problemleri ile karşımıza çıkabilmektedir (Das 2018).

Şev dengesini bozan ve etkileyen unsurlar hem doğal koşullardan hem de insan kaynaklı etkiler sonucunda da kaynaklanabilmektedir. Doğal etkenler arasında şev geometrisi, zemin tipi, yeraltı su seviyesi, zeminin tabakalaşma yapısı, topoğrafik koşullar, iklim faktörleri ve afet olayları yer alırken; kazı ve dolgu işlemleri, aşırı yüklemeler, titreşimler, patlamalar, drenaj problemleri ve kontrolsüz inşaat faaliyetleri mühendislik kaynaklı dengesizliklere sebep olabilmektedir. Ayrıca deprem, yoğun yağış ile birlikte oluşan heyelanlar gibi dış etkiler şevlerde ani ve ciddi deformasyonlara neden olabilecek ciddi kritik faktörler arasında yer almaktadır. Bu tür olaylar, şev

dengesini kısa sürede bozarak büyük ölçekli kütle hareketlerine neden olabilmektedir. Dolayısıyla şev güvenliğinin sağlanması için hem doğal hem de mühendislik kaynaklı etkenlerin bütüncül bir şekilde ele alınarak analiz yapılması gerekmektedir (Başar 2024).

Deprem ve heyelan, özellikle aktif sismik tektonik hareketliliği bulunan ülkelerde çok sayıda can ve mal kaybına yol açabilen doğal afet türleri arasında yer almaktadır. Türkiye gibi deprem üretme potansiyeli yüksek bölgelerde, şevlerin hem statik hem de dinamik yükler altında davranışının doğru değerlendirilmesi mühendislik bakımından büyük önem taşımaktadır. Deprem sırasında zemin özelliklerinde meydana gelen değişimler, boşluk suyu basıncının artması ve kayma direncinin azalması, şevlerde beklenmeyen stabilite kayıplarına neden olabilmektedir. Dolayısıyla söz konusu etkilerin mühendislik analizlerinde dikkate alınması gerekmektedir. Şev stabilitesinin doğru bir şekilde modellenmesi, mevcut risklerin belirlenmesi ve olası potansiyel risklerin belirlenmesi ile birlikte uygun iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi, geoteknik mühendisliğinin temel araştırma ve çalışma alanlarından birisini oluşturmuştur (AFAD 2025).

Bu tez çalışması sürecinde, şev stabilitesine dair temel teoriler ve analiz yöntemleri detaylı biçimde ele alınmakta olup, hem teorik hem uygulamaya yönelik yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Çalışmanın ilk bölümünde şevlerin yapısal özellikleri ve stabiliteyi değiştiren faktörler açıklanmış, literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemler değerlendirilmiştir.

İlerleyen bölümlerde ise analiz yöntemlerinden bahsedilerek, modern hesaplama yöntemlerinden olan yazılım programları kullanılarak bir şev kesitinin analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular üzerinden mühendislik açısından katkıları tartışılıp öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Şev güvenliği, inşaat mühendisliği ve özellikle geoteknik alanının çeşitli uygulamaları arasında karşılaşılan önemli problemlerden birisidir. Doğal ve yapay şevler, gerek statik yükler gerekse deprem gibi sismik ve dinamik yükler altında stabilite kaybına uğrayabilmektedir. Bu nedenle şevlerin güvenliğini sağlamak, mühendislik projelerinde hem ekonomik hem de can güvenliği açısından büyük önem taşır.

Şevlerin stabilitesinin değerlendirilmesinde zemin özellikleri (kohezyon, içsel sürtünme açısı, birim hacim ağırlığı vb.) ile birlikte dış yüklerin (yağış, yeraltı suyu seviyesi, deprem vb.) dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle deprem etkisi altında şevlerin davranışı, klasik statik analizlerden farklı olarak dinamik parametrelerin de hesaba katılmasını zorunlu kılar. Bu bağlamda, literatürde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir:

Olgun ve Acar (2009), deprem etkisi altında şev geometrisi ile zemin özelliklerinin stabilite üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. İki farklı şev kesiti ve iki farklı zemin türü üzerinde örnek analizler gerçekleştirmiştir. Araştırmada, basitleştirilmiş bishop dilim yöntemini esas alarak "Fortan" dilinde bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, özellikle şevin fay hattına yakın konumlandığı ve yüksek magnitüdlü depremlere maruz kaldığı durumlarda güvenlik katsayılarının belirgin şekilde düştüğünü ortaya koymuştur. Bu durum, deprem kaynaklı ivmelerin şev geometrisi üzerindeki etkisinin kritik düzeyde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, aynı dinamik koşullar altında kohezyonlu zeminlerde boşluk suyu basıncı artışlarının diğer zemin türlerine kıyasla çok daha fazla olduğu ve bunun da kayma direncini azaltarak daha düşük güvenlik katsayılarına yol açtığı gözlemlenmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular yalnızca deprem etkilerinin değil, aynı zamanda şev yüksekliğinin artması ve zemin içerisinde yeraltı suyunun bulunması durumunun da şev stabilitesini önemli ölçüde azaltan faktörler olarak vurgulanmıştır. Bu faktörlerin birlikte değerlendirilmesi, mühendislik uygulamalarında şev tasarımının güvenilirliğini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, deprem bölgelerinde gerçekleştirilecek şev tasarımlarında hem geometrik hem de hidrojeolojik koşulların dikkate alınması gerektiği, Olgun ve Acar açıkça ortaya koymuştur.

Tekin (2011), tarafından yürütülen çalışmasında şev stabilitesi problemi kazıklı ve kazıksız koşullar altında hem limit denge hem de sonlu elemanlar yöntemlerini kullanılarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile dayanım azaltma yöntemini (SRM) bir arada kullanmıştır ve güvenlik katsayısındaki değişimlere bağlı olarak potansiyel kayma yüzeylerinin oluşumu değerlendirilmiştir. Şev stabilite problemini limit denge analizleri Slope/W yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilirken, sonlu elemanlar analizleri PLAXIS programı kullanılarak parametrik biçimde yürütülmüştür. Çalışmada incelediği model, tek tabaka zemin profilinden oluşan ve yeraltı su seviyesinin derin konumda olduğu bir şevdir. Bu şevin kazıklı ve kazıksız durumlardaki güvenlik katsayılarını elde etmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kazıksız durumda limit denge ve sonlu elemanlar yöntemlerinden benzer güvenlik katsayısı değerleri elde etmiştir. Kazıklı durumda ise kullandığı yazılımlarda kazık için birtakım düzenlemeler yapıldığı için elde edilen sonuçların kıyaslanmasını zorlaştırmakla beraber şevin güvenlik katsayısı hakkında fikir vermesi amaçlı faydalı sonuçlar tespit etmiştir.

Mısır (2017), yaptığı çalışma kapsamında, iki farklı bilgisayar yazılım programı kullanarak şev stabilitesi problemini karşılaştırılmalı olarak değerlendirmiştir. Seçilen şev probleminde kazı işi, üniform yayılı yükü ve ankraj elemanlarının bulunduğu aşamalı inşaat içermektedir. Karşılaştırılmalı değerlendirmeleri şev stabilite tahkikinde literatürde yaygın bir şekilde kullanılan GEO5 ve plaxis yazılımını kullanarak yapmıştır. Yapısal elemanların tanımlandığı ve aşamalı inşaat adımlarının dikkate alınmadığı modellerde, ağ güncellemesi seçeneğinin kullanılması güvenlik katsayısı üzerinde yaklaşık %2 oranda bir fark yarattığını gözlemlemiştir. Ancak inşaat sürecinin aşamalı olarak dikkate alındığı ve yapısal destek elemanlarının da tanımlandığı modelde ağ güncellemesi yapılmadığı durumda elde edilen güvenlik katsayısı limit denge yöntemleri ile kıyaslandığında oldukça düşük kaldığını ortaya koymuştur. Çalışmasında yalnızca güvenlik katsayısı değil şevin kayma yüzeyleri de ağ güncellemesi seçeneğinden etkilendiğini tespit etmiştir.

Güler (2017), çalışması kapsamında deprem ivmesi altında bulunan şevlerde stabilite durumlarını incelemiştir. Seçilen bir şev kesitini statik ve dinamik koşullar altında slide ve plaxis paket programlarını kullanarak analiz etmiştir. Statik analiz sonuçlarına göre,

güvenlik katsayılarının yeterli olduğunu ancak deprem ivmesinin etkin olduğu dinamik analizlerinde göçme mekanizmasının ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Dinamik analizler için Türkiye ve Dünya da kaydedilmiş toplam yirmi adet deprem ivme kaydı kullanarak şevde oluşan deplasmanlar hesaplanmıştır. Daha sonra literatür formülleri ile hesaplamalar yapıp elde edilen sonuçları yazılım programı ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, şev stabilitesinin değerlendirilmesinde farklı hesap yöntemlerinin birlikte kullanılmasının daha güvenilir sonuçlar sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, analizlerde farklı formüllerin kullanılması önerilmiştir.

Karadağ (2019), tarafından yürütülen çalışma kapsamında, şev stabilitesi hakkında temel bilgiler verilmiştir. Şevler ile ilgili farklı yer ve zamanlarda meydana gelmiş problemlerden bahsetmiştir. Stabilite sorunlarını, şev hareket tiplerini ve şevlerin stabilite yöntemlerini açıklamıştır. Yalova ilinde gerçekleşen bir karayolu kayması sonucu oluşan örnek vakayı slide ve plaxis programlarında statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucu ortaya çıkan problemin çözümünde kazıklı iksa sisteminin uygulanmasının uygun bir iyileştirme yöntemi olabileceğini göstermiştir. Bu doğrultuda, şev stabilitesinin artırılmasına yönelik öneriler geliştirilmiştir.

Rotaru vd. (2022), tarafından yapılan çalışma kapsamında üç farklı eğim, iki farklı şev yüksekliği ve dört farklı zemin özelliğine sahip homojen şevler ele alınmıştır. Araştırmada, şev stabilite analizinde kullanılan farklı yöntemler karşılaştırılarak, tahmin edilen güvenlik katsayısı faktörü, kritik kayma yüzeyi ve göçme yüzeyinin şekli üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üst sınır analizine dayalı bir yaklaşım kullanarak mafsallı denge sonuçlarını, kayma dayanımı azaltma yöntemi tarafından belirlenen sonuçlarla karşılaştırarak, bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi analizi ile kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar, şev geometrisinin yanı sıra ağ boyutu ve yoğunluğunun güvenlik katsayısı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca göçme yüzeyinin şekli, hem şevin geometrisine hem de kullanılan malzemenin özelliklerine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Bu durum, şev stabilitesi analizlerinde tek bir yöntem veya parametreye bağlı kalınmayacağını, farklı yöntemlerin birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Açıkgöz ve Işık (2024), çalışması kapsamında Ankara, Afyonkarahisar, Uşak, Manisa ve İzmir gibi deprem tehlikesi yüksek bölgelerden geçen Ankara-İzmir yüksek hızlı tren hattı projesinde bulunan bir yarma kesitini ele almışlardır. Eğimli arazinin stabilite analizi için statik yükler altında, limit denge yöntemlerinin çözümleri kullanılmış ve güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra deprem etkisi durumunda yarma şevlerde oluşması beklenen deformasyonlar Newmark yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Analiz sonuçları, incelenen yarma kesitinde şev açısının düşürülmesiyle yeterli güvenliğin sağlanabileceğini göstermiştir. Bu bulgu, yüksek hızlı tren hattı gibi kritik altyapı projelerinde şev stabilitesinin sağlanması için uygun geometrik düzenlemelerin önemini ortaya koymaktadır.

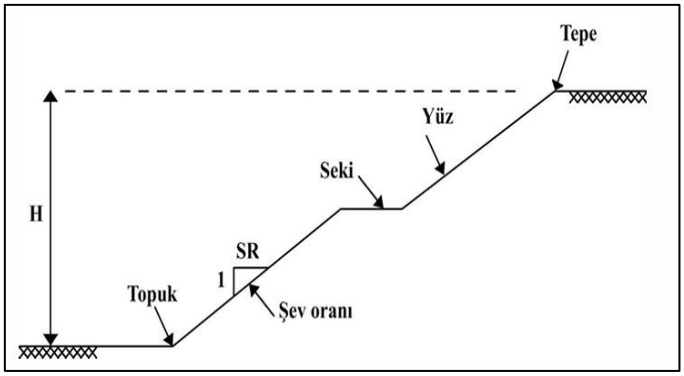
2.1 Şev ve Şev Stabilitesi

Zemin ve kaya yüzeylerinin oluşturdukları eğimli geometrik şekillere şev denilmektedir. Herhangi bir mühendislik uygulaması sonucunda oluşan şeve "kazı veya dolgu şevi" adı verilir. Doğa olayları sonucu oluşan şevlere ise "doğal şev" olarak tanımlanmaktadır. Doğal şevler için "yamaç" terimi kullanılıp, yamaç hareketlerine "heyelan" denilmektedir. Mühendislik uygulamaları sonucunda oluşan şev hareketleri için ise "kayma", "gelme" veya "göçme" terimleri kullanılmaktadır (Önalp ve Arel 2004).

Coduto (2006)'ya göre ise şev tanımı aşağıda verilmiş olup şevleri tanımlamada kullanılan terminoloji şekil 2.1'de gösterilmektedir.

- Şev oranı, yüzeyin dikliğini ifade eden temel ölçüttür ve her daim yatay/düşey olarak ifade edilirler. Örnek olarak, 3:1 orana sahip bir şev için 3 yatay mesafeyi, 1 düşey mesafeyi belirtmektedir. Bu durumda 1:3 oranında ki bir şev daha diktir.
- Şevin tepe noktası ile şevin topuğu, şevin düz yüzeyinin kesiştiği noktalardır.
- Şevin yüzeyi, tepe ve topuk arasında kalan eğimli mesafedir.
- Şevin yüksekliği, tepe ile topuk arasındaki kot farkıdır.

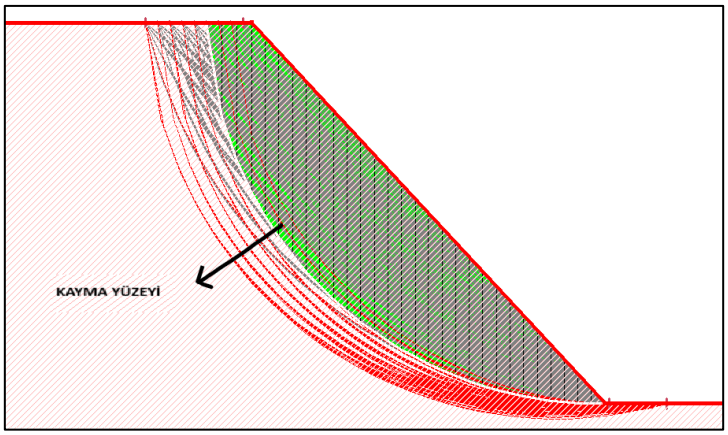
- Palye (seki) yüzey drenajını sağlamak için yarma ve dolgu şevlerinde oluşturulan, şev yüzeyinin orta kısmında yer alan yatay düzlemlerdir.



Şekil 2.1 Literatürde kabul görmüş şev terminolojisi (Coduto 2006).

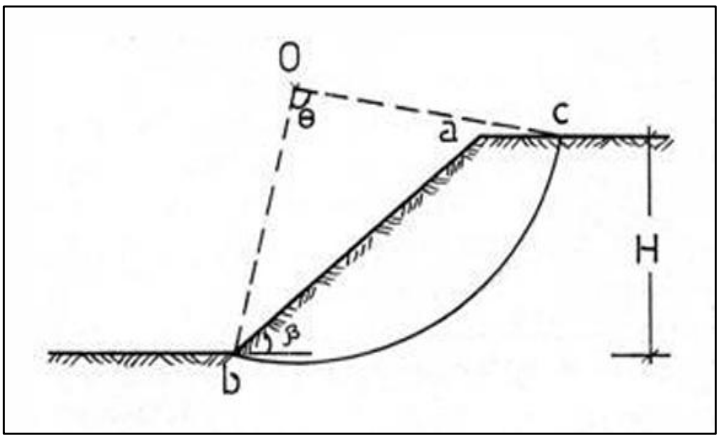
Şev stabilitesi kapsamında duraylılık kavramı iki temel unsur üzerinden değerlendirilmektedir: Yamaç ve şev. Yamaç, yeryüzünde doğal süreçler sonucunda meydana gelen eğimli yüzey şekillerini ifade ederken; şev, insanoğlu tarafından mühendislik faaliyetleri sonucunda oluşturulan ve belirli geometrilere sahip yapay eğimli yüzeyleri tanımlamaktadır. Bu ayrım, doğal ve yapay eğimli yüzeylerin davranışlarının incelenmesinde kritik bir öneme sahiptir. Duraylılık, bir kütlenin mevcut konumunu ve dengesini koruyabilme yeteneği olarak tanımlanır. Başka bir ifadeyle, dış etkenlere rağmen kütlenin hareket etmeden bulunduğu konumda kalabilmesi duraylılık göstergesidir. Buna karşılık, kütlenin konumunu koruyamaması ve dış etkenler sonucunda hareket etmesi duraysızlık olarak adlandırılmaktadır (Akbulut 2012). Duraysızlık, özellikle aşırı yağış, yeraltı su seviyesindeki değişimler, deprem yükleri veya mühendislik hataları gibi faktörlerin etkisiyle ortaya çıkabilmektedir.

Şev stabilitesi analizlerinde bu kavramların görsel ve sayısal olarak modellenmesi büyük önem taşır. Nitekim Şekil 2.2'de GeoStudio yazılımı kullanılarak modellenmiş örnek bir şev kesitinde kayma yüzeyinin görüntüsü sunulmuştur. Bu tür modeller, şevin geometrisini, zemin özelliklerini ve dış yükleri dikkate alarak duraylılık veya duraysızlık durumlarını öngörmeye yardımcı olmaktadır. Böylece mühendislik uygulamalarında hem doğal yamaçların hem de yapay şevlerin güvenliğinin sağlanması için gerekli önlemler alınabilmektedir.



Şekil 2.2 Şev örneğinde kayma yüzeyi.

Şev stabilite analizlerinde kullanılacak olan bir diğer parametreler ise şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Şev kesiti (Kara 1980).

H: Şev yüksekliği, a-b: Şev yüzeyini,

θ: Şev merkez açısı, a-c: şev tepesini,

β: Şev eğim açısı, b-c: kayma yüzeyini göstermektedir (Yiğit 2013).

2.2 Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması

Şev hareketleri ile ilgili literatürde farklı sınıflandırmalar bulunmakla birlikte, yapılan çalışmalar sonucunda kütle hareketlerinin değişik faktörlere bağlı olarak farklı şekillerde sınıflandırıldığı görülmektedir. Bu sınıflandırmaların temel amacı, şevlerde

meydana gelen duraysızlıkların nedenlerini ve oluşum mekanizmalarını sistematik bir şekilde ortaya koymaktır. En sık kullanılan yöntemlerden biri olan Varnes sınıflandırması kütle hareketlerinin malzemenin türü, hareketin nedeni ve gerçekleşme biçimi dikkate alınarak yapılmış kapsamlı bir ayrımdır. Bu ayırım ayrıntılı biçimde çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Şev göçmeleri için yapılan sınıflandırma (Varnes 1978).

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">HAREKET TÜRÜ</td><td colspan="3">MALZEMENİN TÜRÜ</td></tr>
<tr><td rowspan="2">KAYAÇLAR</td><td colspan="2">ZEMİNLER</td></tr>
<tr><td>İRİ DANELİ</td><td>İNCE DANELİ</td></tr>
<tr><td colspan="2">DÜŞME</td><td>Kaya Düşmesi</td><td>Moloz Düşmesi</td><td>Zemin Düşmesi</td></tr>
<tr><td colspan="2">DEVRİLME</td><td>Kaya Devrilmesi</td><td>Molozda Devrilme</td><td>Zeminde Devrilme</td></tr>
<tr><td rowspan="2">AKMA</td><td>Yavaş</td><td>Kaya Kripi</td><td>Moloz Kripi</td><td>Zemin Kripi</td></tr>
<tr><td>Hızlı</td><td>Çok Parçalı Kayaç Akması</td><td>Moloz Akması</td><td>Zemin Akması</td></tr>
<tr><td rowspan="2">KAYMA</td><td>Ötelenmeli</td><td>Kayada Blok Türü Ötelenme</td><td colspan="2">Zeminde ve Molozda Blok Türü Ötelenme</td></tr>
<tr><td>Dönel (Dairesel)</td><td>Sıkı Çatlaklı Kayada Dönel Kayma</td><td colspan="2">Zeminde ve Molozda Dönel Kayma</td></tr>
<tr><td colspan="2">YANAL YAYILMA</td><td>Kaya Yayılması</td><td colspan="2">Zemin veya Moloz Yayılması</td></tr>
<tr><td colspan="2">KARMAŞIK</td><td colspan="3">Hareket Türü ve Malzeme Karışık</td></tr>
</table>

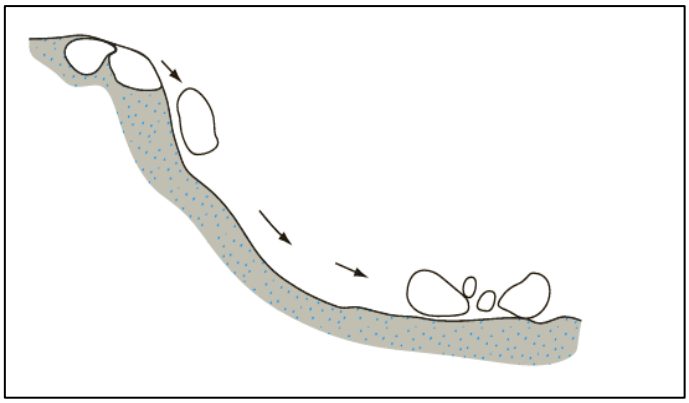
Geoteknik mühendisliğinde şev hareketlerini sınıflandırmada birçok yöntem tanımlanmıştır. Şev stabilitesinin bozulmasına neden olan şev hareketlerinde, hareketin nedeni, biçimi, malzeme türü, hareket halinde olan kütlenin boyutu, hareketin gelişme aşaması, zemin tabakalarındaki su muhtevası, kayma mukavemeti, içsel sürtünme açısı, kohezyon gibi etkilerin de olduğu sınıflandırmalar mevcuttur (Yalçınkaya 2019). Şev hareketinin sınıflandırılması ile ilgili Sharpe (1938), terzaghi (1950), Skempton (1969) ve Varnes (1978) gibi araştırmacılar bu konuyla ilgili çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Şevler doğal oluşumlu olabileceği gibi insan faaliyetleri sonucu yapay olarak da meydana gelebilir. Bu tür şevler farklı göçme (yenilme) mekanizmalarıyla stabilitesini kaybedebilmektedir. Cruden ve Varnes (1996), şev yenilmelerini beş ana kategori altında sınıflandırmıştır. Beş ana kategori şu şekildedir;

2.2.1 Düşme

Düşmeler ani hareketlerdir. Düşme, doğal veya yapay olaylar sonucunda toprağın, kaya parçasının ya da her ikisinin de çok az deplasman yaptığı veya bir yüzey boyunca dik bir eğimden ayrılması ile başlayan hareket olarak tanımlanmaktadır (Myers 2008).

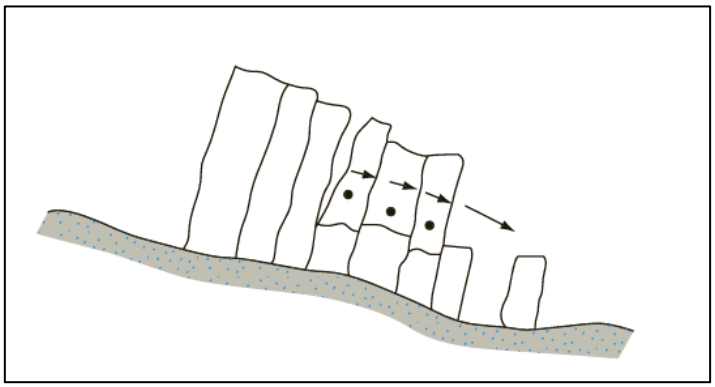
Düşme hareketi malzemenin türüne göre toprak, blok veya kaya düşmesi olarak görülmektedir. Kısaca yamaçlardan aşağı kayan toprak veya kaya parçalarının birbirinden ayrılması sonucudur. Şekil 2.4'de düşme hareketi görsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Düşme hareketi (Das 2018).

2.2.2 Devrilme

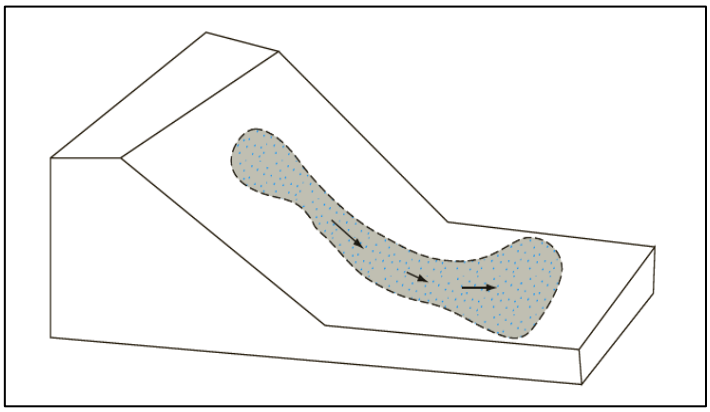
Dik yamaçlarda görülen, sertleşmiş kil veya kaya türü zeminlerde çatlayarak bütün zeminden ayrılmış parçaların, bir eklem yerinden veya çatlaklarından kopması sonucu devrilerek düşmesi olayına devrilme denir (Coduto 2006). Bu yenilme türü, yer değiştiren zemin ve/veya kaya kütlesinin ağırlık merkezinin altında yer alan bir eksen etrafında öne doğru dönmesiyle gerçekleşmektedir. Şekil 2.5'de devrilmeye ait yenilme türü gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Devrilme hareketi (Das 2018).

2.2.3 Akma

Bu yenilme türü, zemin kütlesinin viskoz bir akışkan davranışına benzer şekilde aşağı yönde hareket etmesiyle meydana gelmektedir. Şekil 2.6'da akmaya yönelik stabilite problemine örnek gösterilmiştir.

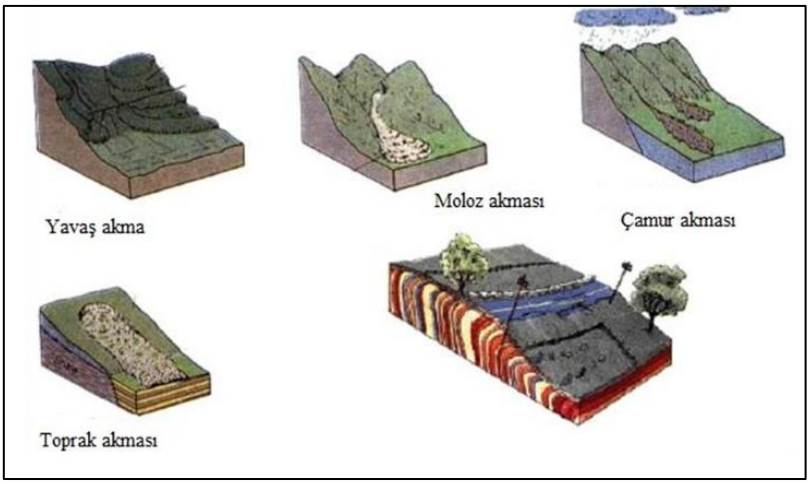


Şekil 2.6 Akma problemi (Das 2018).

Şevlerde görülen duraysızlık türlerinden biri akma hareketidir. Konsolide olmamış malzemelerin doygun veya kuru halde, yavaş ya da hızlı bir şekilde yamaç boyunca kıvamlı bir sıvı gibi hareket etmeleri "akma" olarak tanımlanmaktadır. Bu tür hareketler, özellikle kuru kumlar, kil boyutundaki ince taneli zeminler ve moloz boyutuna kadar değişen iri parçalı malzemelerde gelişebilmektedir. Akma hareketleri, malzemenin türüne bağlı olarak kum akması, çamur akması ve moloz akması şeklinde sınıflandırılmaktadır (Ulusay 2001).

Akma hareketlerinin gelişiminde en önemli faktörlerden biri zemin su içeriği ve buna bağlı olarak gözenek su basıncıdır. Özellikle suya doygun granüler zeminlerde, ani yağışlar veya yeraltı su seviyesindeki yükselmeler sonucunda kayma direnci hızla azalmakta ve zemin kütlesi akışkan bir davranış sergilemektedir. Bu süreç, literatürde "akma tipi heyelan" veya "akma duraysızlığı" olarak adlandırılmaktadır.

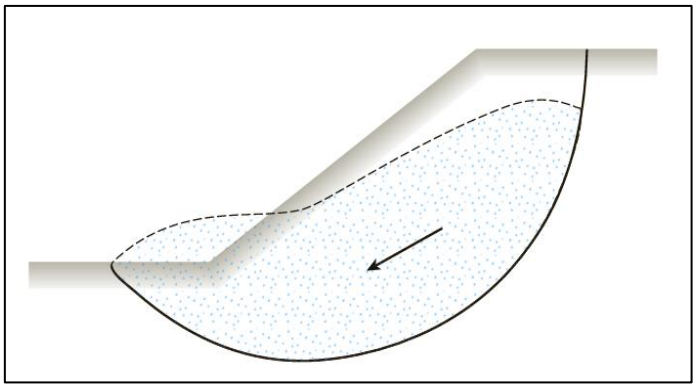
Bazı akma türleri şekil 2.7'da gösterildiği gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 2.7 Akma türleri (Ulusay 2001).

2.2.4 Kayma

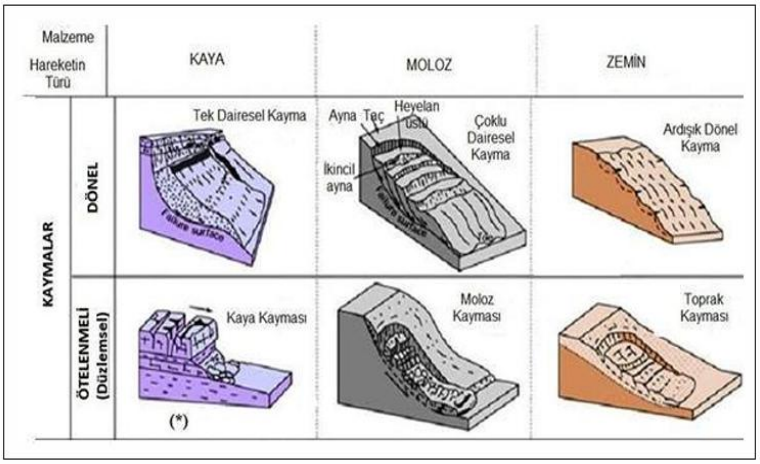
Bu yenilme türü, zemin kütlesinin bir kopma (kayma) yüzeyi boyunca aşağı yönde yer değiştirmesi sonucu meydana gelmesi ile açıklanmaktadır. Şekil 2.8'de kaymaya ait bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Kayma hareketi (Das 2018).

Şev zemin tabakalarının, belirli bir yüzey boyunca makaslama yenilmesine bağlı olarak, kazı çukuru istikametinde ötelenmeli veya doğru dönel bir hareket ile oluşan stabilite bozulmasına kayma olarak tanımlanmaktadır. Şevler de en çok rastlanan türdür. Kaymalar ötelenmeli ve dönel olarak iki türde meydana gelmektedir (Ulusay 2001).

Kayma hareket türünün sınıflandırılması şekil 2.9'da gösterilmiştir.

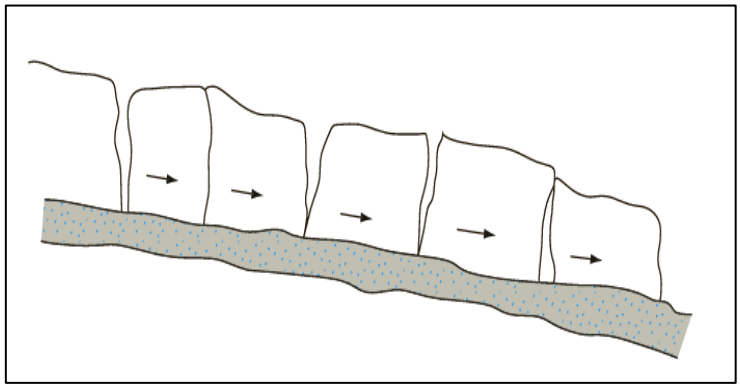


Şekil 2.9 Kayma hareket türünün sınıflandırılması (Anaçali ve Şirin 2015).

2.2.5 Yanal Yayılma

Zayıf zemin tabakaları boyunca meydana gelen göçmeleri takip eden üstteki daha mukavemetli zemin tabakalarda meydana gelen ayrılmaların oluşması durumuna yanal yayılma denir. Deprem esnasında suya doygun ve zayıf kum tabakalarında bu tür

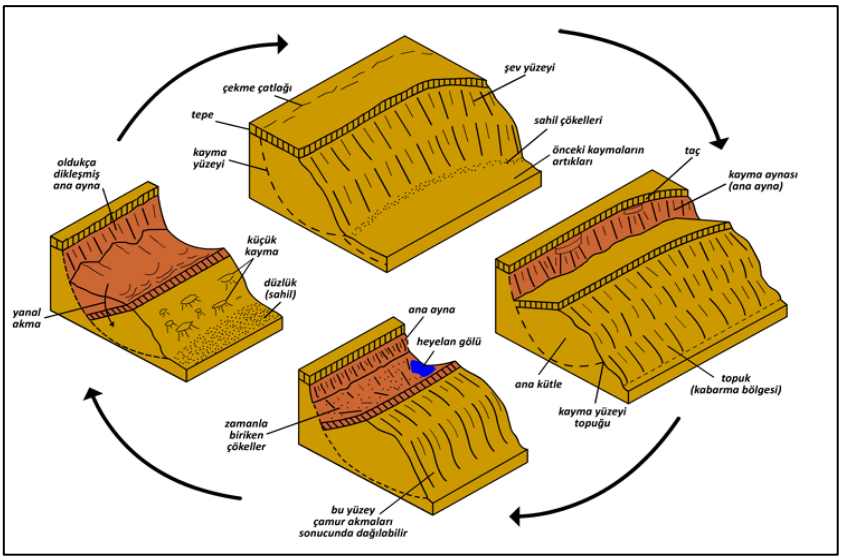
hareket şekli oluşabilmektedir. Genel olarak orta eğimli zeminlerde görülür ve akarsu yakınlarına kadar ulaşabilmektedir (Coduto 2006).



Şekil 2.10 Yanal yayılma (Das 2018).

2.2.6 Karmaşık

Göçme durumlarının beraber veya peş peşe gerçekleştiği göçme durumuna karmaşık hareketler denilmektedir. Devrilme şeklinde bir göçme, kaya düşmesine, ardından kaya akmasına yol açabilmektedir. Örnek olarak killi-siltli bir zemin tabakasının bulunduğu ortamlarda oluşabilecek hareket türü ilerledikçe çamur akmasına sebep olabilmektedir (Tekin 2011).



Şekil 2.11 Akma özellikleri de içeren karmaşık kayma (Bromhead 1986).

Kısaca özetlemek gerekirse şevler, hareket türlerine göre;

- Düşme
- Devrilme
- Akma
- Kayma (dönel, ötelemeli)
- Yanal yayılma
- Karmaşık olarak sınıflandırılmıştır.

2.3 Şev Hareketine Neden Olan Etkenler

Geoteknik mühendisliği açısından şev stabilitesi problemleri değerlendirildiğinde stabiliteyi bozan etkenlerin belirlenmesi, hareketin engellenmesi veya boyutunun azaltılması ile gerekli stabilite önlemlerini sağlamak açısından önemlidir. Şev hareketini önleme çalışmaları kimi zaman oluşacak göçmeyi engelleyemediği için harekete neden olan ana etkenleri iyileştirerek etkisini azaltmak daha kolay, uygulanabilir ve ekonomik çözümler sunabilmektedir. Ana etkenlerin yanı sıra topoğrafik, jeolojik ve iklim faktörlerine de bağlı olarak meydana gelen şev hareketleri de mevcuttur. Bunlar dışında önemsiz gözüken bir etken bile stabil haldeki şevi harekete geçirebilir. Dolayısıyla şev hareketlerinin etkenleri tek başına değil olaylar zinciri halkası gibi değerlendirilmelidir (Demir 2004).

Şev hareketlerinin gözle görülebilen en önemli tetikleyicilerinden biri, aşırı yağışlarla birlikte yeraltı su seviyesindeki değişimlerdir. Türkiye'de 2026 yılı yağış verileri bu duruma somut bir örnek teşkil etmektedir. 1 Ekim 2024 – 31 Ağustos 2025 dönemini kapsayan 2025 su yılı yağışları, uzun yıllar ortalamasının ve bir önceki yılın altında gerçekleşmiştir. Bu dönemde ülke genelinde ortalama 401.1 mm yağış kaydedilmiş; oysa su yılı normali (1991–2020) 548.5 mm, geçen yıl aynı dönem yağışı ise 563.2 mm'dir. Dolayısıyla yağışlar, uzun dönem ortalamasının %27, geçen yılın değerlerinin ise %29 altında seyretmiştir. Türkiye geneli 11 aylık su yılı yağışları, son 52 yılın en düşük seviyesine inmiştir. Buna karşılık, 1 Ekim 2025 – 31 Ocak 2026 dönemini kapsayan 2026 su yılı yağışları 250.9 mm olarak ölçülmüştür. Bu değer, su yılı normali olan 253.2 mm'ye oldukça yakın olup, geçen yıl aynı dönemde kaydedilen 181.4

mm’ye göre %38 oranında artış göstermektedir. Yer yer bu artışın %40’ın üzerinde olduğu bölgeler de gözlemlenmiştir. Kısaca, 2026 yılı yağışları bir önceki yıla kıyasla belirgin bir artış ortaya koymuştur.

Bu yağış artışının şevler üzerindeki etkileri, suyun zemin gözenek basıncını yükseltmesi ve kayma direncini azaltmasıyla doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla 2026 yılı verileri, artan yağışların şev stabilitesi üzerindeki olumsuz sonuçlarını ortaya koymaktadır. Bu durumun güncel bir görsel göstergesi olarak Şekil 2.12’de sunulmaktadır. İstanbul–İzmir Otoyolu’nun Manisa geçişinde meydana gelen heyelan, bu sürecin somut bir örneğini oluşturmaktadır. Saruhanlı ile Turgutlu ilçeleri arasındaki otoyol kesiminde, yoğun yağışların ardından yamaçtan kopan toprak ve kaya parçaları yola savrulmuş; bu durum ulaşımda ciddi aksamalar meydana getirmiştir.



Şekil 2.12 İzmir-İstanbul otoyolundaki heyelan

Yağışların aşırı artışının mühendislik yapılarında verdiği zararların bir diğer somut örneği, Antalya–Konya karayolu üzerinde karşımıza çıkmıştır. Söz konusu yol kesimi, birden fazla havzanın birleştiği çanak formundaki topoğrafyada yer almakta olup, düşük kotlardan geçirilmesi ve doğal su akışlarının yetersiz modellenmesi ciddi mühendislik riskleri doğurmaktadır. Özellikle yağışlı mevsimlerde alanın geçici göl alanına dönüşme potansiyeli, drenaj sisteminin projede en kritik bileşen olduğunu açıkça göstermektedir. Maksimum su kotu hesapları ve taşkın senaryoları dikkate alınmadan yalnızca mevcut

arazi kotlarına bağlı profil oluşturulması, yaşanan sorunların temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Günümüz altyapı anlayışı, yalnızca teknik yeterlilikle sınırlı olmayıp ekosistem bütünlüğünü koruyan, doğal su döngüsünü bozmayan ve çevresel sürdürülebilirliği gözeten bir yaklaşımla ilerlemelidir. Bu bağlamda doğru kot seçimi, yeterli sanat yapıları, etkin drenaj çözümleri ve taşkın alanlarının korunması gerekli zemin etüt faaliyetlerinin yapılması vazgeçilmez unsurlardır. Sonuç olarak, yapılacak iyileştirme çalışmalarının geçici çözümlerle sınırlı kalmaması; bilimsel esaslara dayalı ayrıntılı hidrolojik ve jeolojik etütler, güncel modellemeler ve taşkın senaryosu analizleri ile revize drenaj ve sanat yapısı projelerinin hazırlanması gerektiğini şekil 2.13'de gösterilmiş olup, bir kez daha bu örnekle kanıtlanmış olduğunu gözler önğüne sermiştir.



Şekil 2.13 Antalya – Konya karayolu

Şevlerde çeşitli dış ve iç etkenlerin birleşik etkisi sonucunda gerilme dağılımında artış, denge koşullarının bozulması ve zemin–kaya ortamının tutunma direncinde azalma gibi süreçler meydana gelebilmektedir. Bu tür değişimler, şevin mevcut duraylılık sınırını aşarak kritik güvenlik katsayısının altına düşmesine ve kütlenin yıkıcı davranış göstermesine yol açmaktadır. Sonuç olarak, şevlerde akma, kayma, düşme, devrilme, yanal yayılma ve karmaşık hareketler gibi farklı tipte stabilite kayıpları ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, şevin duraylılık sınırını aşarak yıkıcı tarafa geçmesine ve stabilite kayıplarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu tür etkiler, şevlerde

gözlenen duraysızlıkların temel mekanizmalarını açıklamakta olup örnekleri Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.2 Şev üzerindeki etkenler (Türkmen 2009).

Gerilme Artışına Neden Olan Etkenler	Direnç Azalmasına Neden Olan Etkenler
Boşluk suyu basıncında artış	Zaman ve hareket sonucu dirençte azalış
Şev üzerindeki yük artışı	Aşınma ve yıpranma
Topuğa yakın yerde meydana gelen kayıplar	Süreksizlik yüzeyinde suyun oluşturduğu basınç
Deprem ve diğer dinamik etkiler	Ani ıslanma ve yapı deformasyonu
Çekme çatlağındaki su artışı	Boşluklardaki buzların erimesi
Şev dışındaki su düzeyinin azalması	
Kırılmalar meydana gelmesi	Çimentolayıcı malzemenin yıkanması

Şevlerde görülen hareketlerin temel nedeni her ne kadar yer çekimi kuvveti olarak görünse de, bu hareketi tetikleyen veya başlatan birçok farklı etken bulunmaktadır. Yer çekimi, kütlelerin eğimli yüzeyler boyunca hareket etmesinde ana itici güç olmakla birlikte, tek başına şev duraysızlıklarını açıklamak için yeterli değildir. Zemin özellikleri, dış yükler, iklim koşulları ve insan faaliyetleri gibi faktörler, yer çekimi ile etkileşime girerek şevlerin duraylılığını doğrudan etkileyebilmektedir.

Bu bağlamda Popescu (2002), şev duraysızlıklarına neden olan etkenleri dört ana başlık altında incelemiştir: zemin koşulları, fiziksel süreçler, insan etkileri ve jeomorfolojik süreçler. Zemin koşulları; malzemenin türü, sıkılık derecesi, su içeriği ve gözenek basıncı gibi özellikleri kapsarken, fiziksel süreçler; yağış, erozyon, donma-çözülme döngüleri ve deprem gibi doğal olayları içermektedir. İnsan etkileri; mühendislik kazıları, yol ve baraj inşaatları, yetersiz drenaj sistemleri veya aşırı yüklemelerle ilişkilidir. Jeomorfolojik süreçler ise uzun vadede yamaçların şekillenmesine neden olan doğal jeolojik ve topografik değişimleri kapsamaktadır. Bu sınıflandırma, şevlerde duraysızlıkların çok boyutlu nedenlerini ortaya koymakta olup Çizelge 2.3'te

gösterilmiştir. Dolayısıyla şev hareketleri, yalnızca tek bir faktörün değil, çoğu zaman birden fazla etkenin eş zamanlı etkisiyle ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 2.3 Şev hareketine neden olan etkenler (Popescu 2002).

Zemin Koşulları	Çatlaklı kütle Göçebilen zeminler Hassas zeminler Plastik zayıf malzeme Ayrışmış-yıpranmış ortam Ezilmiş-makaslanmış bölgeler Geçirimlilikte beliren çeliksiler ve bunun YASS'ye etkisi Ortam rijitliğinde farklılıklar Olumsuz eğimde süreksizlikler (çökel dokanaklar, fay, çatlak) Olumsuz konumda kitlesel özellikler (yataklanma, sistozite)
Fiziksel Süreçler	Depremler Volkanik etkiler Uzun süreli yağışlar Kısa süreli yoğun yağış Derin kar örtüsünün erimesi Donma-çözünmeden kaynaklı yıpranma Yıllık veya mevsimlik donun çözülmesi Su seviyesinin ani düşüşü Krater göllerinin yıkımı Şişebilen zeminlerin şişme-büzülme sonucu yıpranması ve ayrışması
İnsan Etkileri	Sulama Gölet ve kanallardan sızma Baraj göllerinin ani seviye kaybı Drenaj, su ve atık su borularından kaçaklar Yapay titreşimler (trafik, kazık çakma, ağır makinalar, ocak patlatma) Topukta veya yamaç üstünde kazı Yamaç başında veya yüzey üstünde yükleme Açık maden işletmesi Ormanların ve bitki örtüsünün kaldırılması Katı atıkların önlemsiz yığılması
Jeomorfolojik Süreçler	Bitki örtüsünün kaybı (erozyon, kuraklık veya yangın sonucu) Yan sınırlarda erozyon Yeraltı erozyonu (erime) Yamaç eteğinde akarsu aşındırması Yamaç eteğinde dalga aşındırması Yamaç eteğinde buzul aşındırması Tektonik yükselme Volkanik yükselme Yamaç yüzü veya başında beliren birikimler

2.4 Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri

Gelişen teknoloji ile birlikte mühendislik çözümleri de bilgisayar ortamında yapılmaya başlanmış ve matematiksel çözümler yapan yazılımlar geliştirilmiştir. Bu yazılımlar sayesinde mühendislik çözümleri daha hızlı yapılmakla birlikte gerçeğe yakın modeller oluşturularak binlerce farklı senaryoyu aynı olay için çözmeyi sağlamıştır. Ayrıca gerçekleşmesi muhtemel olayların önceden tespit edilmesi ve uygun önlemler alınması konusunda yardımcı olmaktadır.

Şev stabilite analiz yöntemleri yaklaşık 100 yıllık bir geçmişi bulunmaktadır. İsveç demir yolları tarafından büyük ve maliyetli bir şev göçmesi incelemesi için görevlendirilen geoteknik komisyonunun geliştirdiği ve günümüzde isveç kayma dairesi yöntemi (Jarnvagers 1922) olarak bilinen yöntem şev stabilite analizinde bir ilktir.

Doğal ya da yapay yapılan şevlerde stabilitenin sağlanması hem can hem mal kaybının önüne geçmek için stabilite analizlerinin yapılması gerekmektedir. Şev stabilitesinde kaymaya neden olan kuvvetler ile kaymaya direnen kuvvetler arasındaki orandan sayı elde edilir ve bu değer şev emniyet katsayısı ile kıyaslanarak şev dengede mi değil mi bunun hakkında bilgi vermektedir.

Şev stabilitesi analizlerinde şev stabilitesi güvenlik sayısı G_s veya F_s ile tanımlanmaktadır. Sınır denge '1' güvenlik sayısı ile ifade edilmektedir ve şev duraylı kabul edilir. Güvenlik sayısı, τ_f kayma dayanımının, zemine etkiyen kuvvetlerin zeminde oluşturduğu τ kayma gerilmesine oranıdır. Güvenlik sayısı denklem (2.1)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$G_S = \frac{\tau_f}{\tau} \tag{2.1}$$

Moment kuvvetleri alınarak da güvenlik sayısı hesaplanabilmektedir. M_0 (karşı koyan) momentin, M_0(döndüren) momente oranı olarak da denklem (2.2)'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$F_S = \frac{\mathrm{M_0}\ (\text{karşı koyan})}{\mathrm{M_0}\ (\text{döndüren})} \qquad (2.2)$$

Güvenlik sayısı, Türk standartları TS 8853'e göre çizelge 2.4'de belirtilen değerleri sağlamalıdır.

Çizelge 2.4 Yamaç ve şevlerde güvenlik sayıları (TS 8853 1991).

Şart	**Güvenlik Sayısı**		
	Toplam Gerilme	**Efektif Gerilme**	**Deprem**
Dolgularda yapım sonu	1.50	-	-
Yarmalar	1.50	1.25	1.0
Barajda sızıntı	1.50	1.25	-
Barajda ani su düşmesi	1.50	1.10	-
Laboratuvar maksimum direnç parametreleri kullanımı (peak) ile	1.50	1.35	1.0
Kalıcı dirence göre	-	1.20	1.0
Uzun vadede duraylık	-	1.20	-
Yamaç üzerinde yapı bulunması	1.80	1.50	1.2
Fisürlü killer	-	1.50	-

Geoteknik mühendisliğinin birçok alanında olduğu gibi bu alanda da şev stabilitesi analiz yöntemlerinde de birçok çözüm yöntemi vardır. Bu çözümler deterministik ve olasılıksal yaklaşımlardır. Şev stabilite analizlerinde, şevin güvenliği ve ekonomik stabilizasyon en önemli husustur. Şev stabilite analizleri farklı yaklaşımlar ile çözümlenebilmektedir. Bunlar;

- Limit gerilme yöntemi
- Limit denge yöntemi
- Sonlu elemanlar yöntemi

2.4.1 Limit Gerilme Yöntemi

Limit gerilme yöntemi, zeminin kendi doğal ağırlığından dolayı oluşan yük ve şeve etkiyen dış yüklerin etkileri sonucu ile gerilmelerin yoğun olduğu noktaların belirlenmesidir. Bu gerilmeler sonucu şev stabilitesinde bozulma meydana gelip gelmeyeceğinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Zemin ortamının ve zemin malzemesinin özelliklerinin her noktada aynı olmamasından kaynaklı tam olarak belirlenemeyeceği için ve bilinmeyen doğal gerilmeler ve üniform olmayan boşluk suyu basınçları gibi nedenlerden dolayı bu yöntem şev stabilite analizlerinde kullanılmamaktadır.

2.4.2 Limit Denge Yöntemi

Şev stabilite problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan limit denge yöntemleri, hesaplama açısından pratik olmaları nedeniyle mühendislik uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntemler, şevin deformasyon davranışı hakkında doğrudan bilgi vermemekle birlikte, kaymanın belirli bir yüzey boyunca gerçekleştiği varsayımına dayanmaktadır. Analiz sürecinde kayan kütle bütünüyle veya dilimlere ayrılarak incelenir ve kayma yüzeyi boyunca oluşan gerilmeler mevcut kayma mukavemeti ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırmalar farklı olası kayma yüzeyleri için tekrarlanır ve her yüzey için güvenlik katsayısı hesaplanır. Elde edilen güvenlik katsayıları arasında en düşük değer, şevin genel güvenlik katsayısı olarak kabul edilir. Bu katsayı, mevcut kayma mukavemetinin denge halini sağlayabilmesi için gerekli olan kayma gerilmesi oranını ifade eder ve şevin kritik kayma yüzeyi boyunca kaymaya karşı ne ölçüde direnç gösterebildiğini sayısal olarak ortaya koyar. Dolayısıyla, limit denge analizlerinde en düşük güvenlik katsayısının dikkate alınması, mühendislik uygulamalarında şevin en zayıf noktasının belirlenmesine ve tasarımda güvenliğin sağlanmasında önemli noktadır. Bu yaklaşım, şev stabilite analizlerinde güvenlik katsayısının yalnızca bir hesaplama sonucu değil, aynı zamanda mühendislik kararlarının temelini oluşturan kritik bir parametre olduğunu göstergesidir.

Limit denge yöntemleri kapsamında, şev stabilitesi analizlerinde kullanılabilecek çok

sayıda farklı hesaplama yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yöntemler, mühendislik uygulamalarında hem teorik hem de pratik açıdan geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çizelge 2.5'te, yalnızca klasik analitik yöntemler değil aynı zamanda bilgisayar tabanlı yazılım programları aracılığıyla gerçekleştirilen çözümler de dikkate alınarak, şev problemlerinin çözümünde en yaygın kullanılan analiz metotları gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 Analiz metotlarının karşılaştırılması (Avşar 2004).

YÖNTEM	Kuvvet Denklemi	Moment Denklemi	Kayma Yüzeyi Şekli	Dilimler Arası Kuvvet Varsayımı	Hesaplama	
					El	Bilgisayar
Fellenius Yöntemi	X	X	V	Dairesel	Tabana Dairesellik	V	V
Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi	V	X	V	Dairesel	Yatay	V	V
Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi	V	V	X	Tümü	Yatay Düzeltme Faktörü	V	V
Spencer Yöntemi	V	V	V	Tümü	Sabit Eğim	X	V
Morgenstren-Price Yöntemi	V	V	V	Tümü	X/E= λ F(x) (F(X) Değişken)	X	V

2.4.2.1 Fellenıus Yöntemi (İsveç Dilim Metodu)

Bu yöntem, kayma yüzeyi dilimlenerek dilimlerden hepsine etki eden kuvvetlerin ele

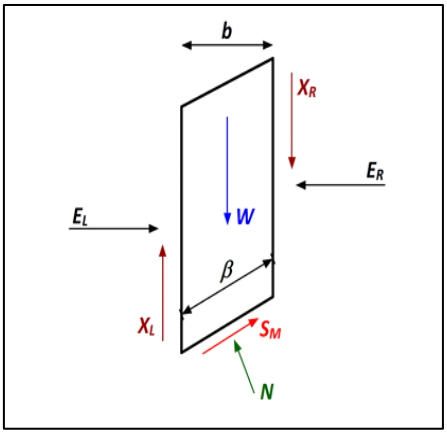
alındığı yöntemdir. Dilim tekniğinin ilk olarak kullanıldığı yöntemdir. Basit bir yöntem olduğu için el hesabı ile de güvenlik sayısı belirlenebilmektedir. Bu yöntemde dilimler arası tüm kuvvetler ihmal edilir. Dilim ağırlığı, dilim tabanına dik ve paralel yöndeki bileşkelerine ayrılır. Dilim tabanına dik olan kuvvet taban normal kuvveti olarak adlandırılır ve kayma mukavemetini hesaplamak için gereklidir. Dilim tabanına paralel olan kuvvet ise şevi iten ve dengesini bozmaya çalışan kuvvettir. Bir kayma yüzeyi boyunca oluşan kuvvetlerin momentleri toplamından kayma yüzeyinin güvenlik sayısı elde edilir. Güvenlik sayısı oranı aşağıdaki bağıntıdaki gibi elde edilebilmektedir (Krahn 2004).

$$F_S = \frac{\Sigma\,[\,c\beta + N tan\theta]}{\Sigma\, W\, sina} \tag{2.3}$$

c: kohezyon
β: dilim taban uzunluğu
N: taban normal kuvveti = Wcosα
Θ: içsel sürtünme açısı
W: dilim ağırlığı
α: dilim tabanının eğimi

Dilim tabanı boyunca etkiyen boşluk suyu basıncının etkisi ise boşluk suyu basıncı ile dilim taban uzunluğunun çarpımı ile hesaplanabilmektedir.

$$F_S = \frac{\Sigma\,[\,c\beta + (N - u\beta)tan\theta]}{\Sigma\, W\, sina} \tag{2.4}$$

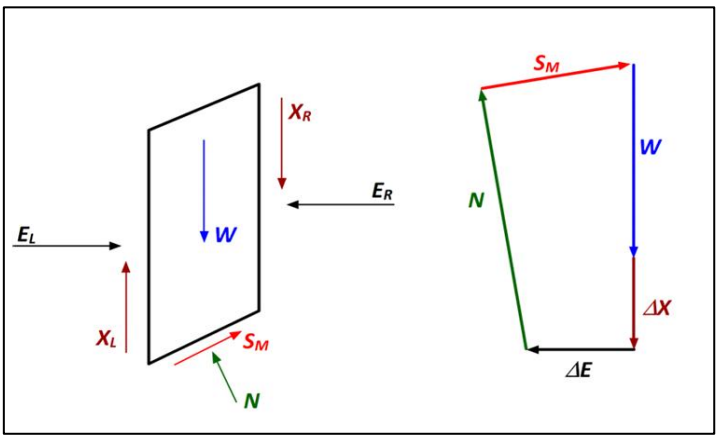


Şekil 2.14 Bir dilim kuvvet üzerine gelen etkiler.

2.4.2.2 Bishop ve Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi

Fellenius (1927, 1936) yöntemlerinin eksiklikleri ilk olarak bishop (1955) tarafından ortaya çıkarılmış ve yeni bir yöntem geliştirmiştir. Şekil 2.15'de gösterilen kuvvet poligonundaki kuvvetlerin düşey dengesi denklemi, N normal kuvvetini elde edecek biçimde aşağıdaki (2.5) denklemi ile elde edilmiştir. Bu sayede ΔE normal kuvvetin etkisi bu denklemde hesaba katılmamış olmaktadır.

$$N' = \frac{W + \Delta X - \beta[u\cos\alpha + c'\sin\alpha/F]}{\cos\alpha + (\tan\emptyset')\sin\alpha} \qquad (2.5)$$



Şekil 2.15 Dilim üzerinde etkili olan kuvvetler Bishop (1955).

Kayma dairesinin merkezi boyunca alınan moment ile bishop tarafından önerilen güvenlik sayısı (2.6) denklemi ile hesaplanabilmektedir (Bromhead 1985).

$$F = \frac{\Sigma\{c'b + (W - ub + \Delta X)\tan\emptyset'\}\dfrac{sec\alpha}{1 + \tan\alpha\dfrac{\tan\emptyset'}{F}}}{\Sigma W sin\alpha} \qquad (2.6)$$

Bishop'un denkleminin sol ve sağ tarafında güvenlik sayısı F aynı anda bulunduğundan eşitliği sağlayacak değerin iterasyon ile bulunması gerektiği açıktır. Bishop (1955), X kuvvetlerini hesaba tekrar dahil etmek için kuvvet poligonundan faydalanarak farklı çözümler denemiştir. Bu farklı çözümler; $\Sigma\Delta X = 0$ ve $\Sigma\Delta E = 0$ toplamlarının sağlanması üzerine kurulmuştur. Bishop tarafından izlenen tekniğe göre toplamların

sıfır olma şartını sağlayan farklı X ve E kuvvetleri kullanılarak güvenlik sayıları tekrar hesaplanmıştır. Moment dengesinde E kuvvetlerinin etkime noktası dilim yüksekliğinin 1/3'ü olarak alınmıştır. Bishop, yapmış olduğu bu çözümler sonucunda işlem yükünün çok arttığını ancak sonuçları ise %1 değiştirdiğini kanısına varmıştır (Bromhead 1985). Bromhead (1955), bu farkın nedenini daha sonraki çalışmalarında açıkladığını ve Bishop'un hesaplamalarını daha karmaşık hale getirmemek için ilave çözümleri rutin çalışmalarda kullanmamayı önerdiğini ifade etmektedir. Bu sonuçla bishop (1955) orijinal çalışmasındaki (2.6) denkleminin kullanılmasını tavsiye edecek ve bu yöntem de basitleştirilmiş bishop yöntemi olarak literatüre yerleşmiştir.

2.4.2.3 Janbu Yöntemi

Bishop tarafından geliştirilen yaklaşımlar, şev stabilitesi analizleri bakımından çok önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmaların ardından yapılan araştırmalar daha çok dairesel olmayan kaymaların analizi üzerine yoğunlaşmaktadır. Janbu (1956) bu konuda çalışmalar yapmıştır. Bromhead (1986), Bishop ve Janbu'nun çalışmaları hakkında kronolojik bilgiler vermektedir. Bromhead (1986)'ya göre Bishop (1955) yöntemini bir yıl önce bir konferansta yayınlamıştır. Janbu tarafından yapılan çalışma da aslında ilk olarak 1955 yılında yayınlanmış olmasına rağmen bazı hatalar içermektedir. Bromhead (1986)'ya göre Janbu hatayı düzelterek yöntemini tekrar yayınlamıştır. Bu yayın İngilizce olmayan bir dergide yayınlandığı için çok yaygın değildir. Bu sırada Bishop'un yüksek lisans öğrencisi Kenney'de çalışmasını 1956 yılında yayınlamıştır. Bishop daha sonra Price'ı ikna ederek (ilk şev stabilitesi analizi bilgisayar programı, Morgenstern ve Price) Kenney tarafından önerilen denklemi program haline getirmesi için ikna etmiştir. Yapılan ilk çalışmalar Kenney'in dairesel olmayan kayma daireleri için geliştirdiği denklemlerinin nümerik hatalar oluşturduğunu göstermiştir. Bu durum, özellikle karmaşık geometriye sahip şevlerde güvenilir sonuçlar elde edilmesini güçleştirmiştir. Daha sonra Morgenstern ve Price (1965) daha karmaşık bir yöntemi bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler sonucunda başarılı bir şekilde uygulamıştırlar. Janbu tarafından geliştirilen yöntem Bishop denklemini esas alan eşitliği kullanır. Denklem aşağıda (2.7) gösterilmiştir.

$$F = \frac{\Sigma\{c'\beta + (W - u\beta + \Delta X)\tan\emptyset'\}\dfrac{\sec^2\alpha}{1 + \tan\alpha\dfrac{\tan\emptyset'}{F}}}{\Sigma W\tan\alpha} \quad (2.7)$$

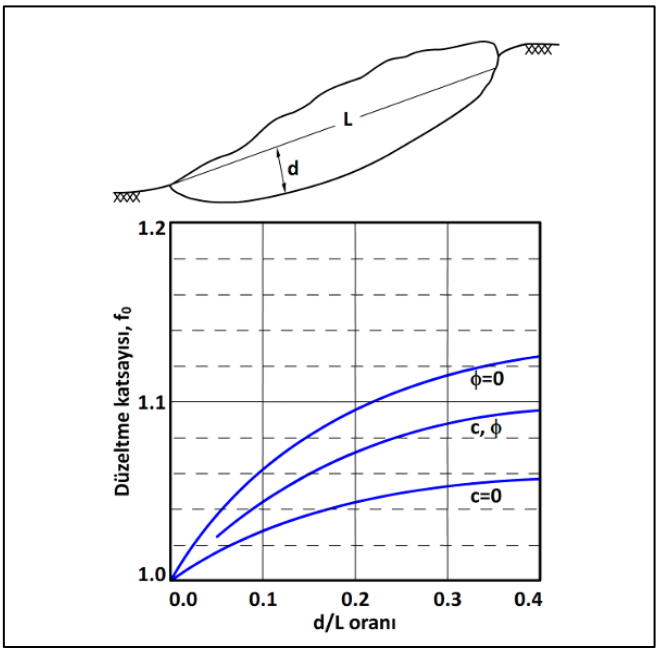
Spencer (1967) tarafından yapılan çalışmalar, Bishop yönteminin rölatif olarak daha kesin sonuçlar verdiğini ortaya koymuş ve bu bulgu, Janbu'nun orijinal çalışmasında bazı düzenlemeler yapmasına zemin hazırlamıştır. Janbu, 1973 yılında yayımladığı çalışmasında, şevin geometrik özelliklerinin güvenlik katsayısı üzerindeki etkilerini dikkate alarak yöntemini geliştirmiştir. Özellikle şevin derinliği ve genişliği gibi parametrelerin güvenlik katsayısında sapmalara yol açabileceğini belirlemiş ve bu sapmaları gidermek amacıyla bir düzeltme faktörü (f_0) önermiştir. Bu düzeltme faktörü, hesaplanan güvenlik katsayısının daha gerçekçi değerlere ulaşmasını sağlamak için katsayı ile çarpılmakta ve böylece analiz sonuçlarının doğruluğu artırılmaktadır.

Janbu'nun geliştirdiği bu yaklaşım, özellikle düşük eğimli şevlerde daha büyük önem taşımaktadır. Çünkü düşük eğimli şevlerde kayma yüzeyinin uzunluğu ve zemin kütlesinin genişliği, güvenlik katsayısının hesaplanmasında belirgin farklılıklara neden olabilmektedir. Bu durum, klasik limit denge yöntemlerinin tek başına yeterli olmayabileceğini göstermekte ve düzeltme faktörünün kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Şekil 2.16'te Janbu tarafından önerilen düzeltme katsayıları grafiksel olarak sunulmuş olup, farklı şev geometrileri için güvenlik katsayısının nasıl modifiye edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, Janbu (1973) tarafından yapılan bu düzenlemeler, limit denge yöntemlerinin daha geniş bir mühendislik problem havuzunda güvenilir şekilde kullanılabilmesine katkı sağlamış ve özellikle düşük eğimli şevlerin analizinde güvenlik katsayısının daha doğru bir şekilde belirlenmesine olanak tanımıştır.

Limit denge analizlerinde analitik formülasyonların şev stabilitesi üzerindeki etkilerini değerlendiren Krahn (2004); Bishop ve Janbu yöntemlerinin matematiksel kabullerindeki farklılıkların, nihai güvenlik katsayılarına doğrudan yansıdığını ifade etmiştir. Yazar, her iki yaklaşımla yapılan analizlerde Janbu yöntemiyle elde edilen

değerlerin, Bishop yöntemiyle hesaplanan değerlerden daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bishop yöntemi dilim sınır kuvvetlerini basitleştirerek dairesel göçmelerde kararlı sonuçlar sunarken; Janbu yöntemi dairesel olmayan arıza yüzeylerinde kuvvet dengesini ön planda tutmakta ve bu matematiksel yaklaşım farkı nedeniyle şev stabilitesini değerlendirirken Bishop'a kıyasla daha kritik (düşük) sınır değerler üretmektedir.



Şekil 2.16 Janbu düzeltme katsayısı.

2.4.2.4 Spencer Yöntemi

Spencer (1967), hem moment hem de yatay kuvvet dengesini sağlayan bir sistem önermiştir. Geliştirmiş olduğu yöntem; dilimler arası normal ve kayma kuvvetleri arasındaki ilişkiyi sabit kabul etmiştir. Bu kabul ile moment ve yatay kuvvet dengelerini aynı anda sağlayan kayma-normal kuvvet oranını elde etmiştir. Böylece her iki denge şartını da sağlamış olmaktadır. Krahn (2004), dilimler arası kayma kuvveti (X) ile dilimler arası normal kuvvet (E) arasındaki oranı (2.8)'da verilmiştir.

$$X = E\lambda f(x) \tag{2.8}$$

Bu denklemde λ her iki kuvvet arasındaki oranı göstermektedir. Spencer (1967) tarafından önerilen yöntemde λ her dilim için sabit olduğundan f(x) =1,0 alınmaktadır.

Özetle, Spencer (1967) tarafından önerilen yöntem şudur;

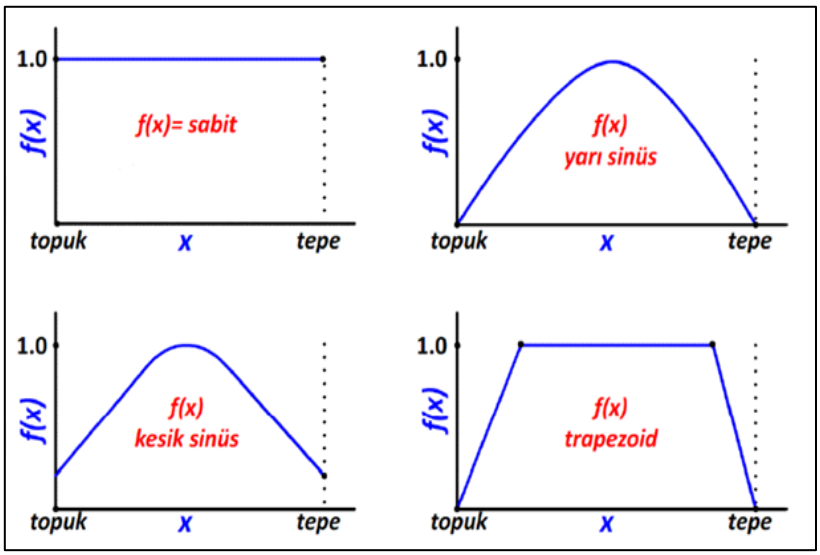
- Dilimler arası normal ve dilimler arası kayma kuvvetlerini dikkate alır.
- Hem moment hem de yatay kuvvet dengesini hesaplar.
- Dilimler arasındaki kuvvetlerin oranı (X/E) sabit kabul edilir.

2.4.2.5 Morgenstern - Price Yöntemi

Morgenstern-Price yöntemi, limit denge analizleri içerisinde en genel ve en esnek yaklaşımlardan biri olarak kabul edilmektedir. Morgenstern ve Price (1965) tarafından geliştirilen bu yöntem, dilimler arasındaki kuvvetlerin birbirine oranlarının sabit kabul edilmesi varsayımına dayanır. Bu varsayım sayesinde, dilimler arası etkileşimler yalnızca tek bir parametre ile ifade edilebilmekte ve böylece hem kuvvet hem de moment dengesi koşullarının aynı anda sağlanması mümkün hale gelmektedir. Yöntemin en önemli katkılarından biri, dilimler arasındaki normal ve kayma kuvvetlerinin farklı fonksiyonlar aracılığıyla tanımlanabilmesidir. Bu fonksiyonlar arasında trapezoid, yarım sinüs, sabit sinüs ve kesilmiş sinüs gibi çeşitli matematiksel ifadeler bulunmaktadır. Bu fonksiyonel yaklaşım sayesinde, dilimler arası kuvvet dağılımı daha gerçekçi bir şekilde modellenebilmekte ve şevin kritik kayma yüzeyine ilişkin güvenlik katsayısı daha doğru bir biçimde hesaplanabilmektedir.

Morgenstern-Price yönteminin güçlü yönü, diğer limit denge yöntemlerinde olduğu gibi yalnızca belirli denge koşullarını değil, hem kuvvet hem de moment dengesini aynı anda sağlayabilmesidir. Bu nedenle, yöntem hem dairesel hem de dairesel olmayan kayma yüzeyleri için uygulanabilir ve geniş bir mühendislik problem yelpazesinde kullanılabilmektedir. Ayrıca, dilimler arası kuvvetlerin fonksiyonel olarak tanımlanması, mühendislik uygulamalarında farklı zemin koşullarına ve şev geometrilerine uyum sağlama esnekliği sunmaktadır. Bununla birlikte, yöntemin hesaplama süreci diğer basitleştirilmiş limit denge yöntemlerine göre daha karmaşık olduğundan, genellikle bilgisayar destekli analizlerde tercih edilmektedir. Günümüzde

birçok ticari yazılım (örneğin GeoStudio, PLAXIS gibi) Morgenstern-Price yöntemini standart analiz seçenekleri arasında sunmakta ve mühendislik projelerinde güvenilir bir çözüm aracı olarak kullanılmaktadır (Tekin 2011).

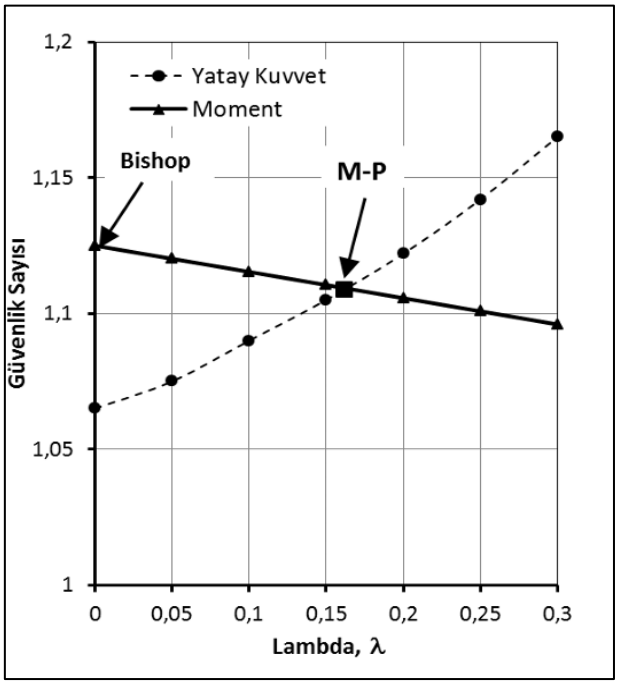


Şekil 2.17 Morgenstern-Price yöntemindeki kuvvet fonksiyon türleri (Tekin 2011).

Krahn (2004), Bishop ve Morgenstern-Price yöntemlerini karşılaştırarak bu iki limit denge yaklaşımının sonuçlar üzerindeki farklılıklarını ortaya koymuştur. Çalışmada, her iki yöntemle elde edilen güvenlik katsayılarının hassasiyetlerinin birbirinden farklı olabileceği vurgulanmaktadır. Özellikle Bishop yöntemi, dilimler arası kayma kuvvetlerini ihmal ederek yalnızca moment dengesini sağlamaya odaklanırken; Morgenstern-Price yöntemi hem kuvvet hem de moment dengesi koşullarını aynı anda karşılamaktadır. Bu nedenle, Bishop yöntemi daha basit ve pratik bir çözüm sunmasına rağmen, bazı durumlarda güvenlik katsayısının gerçekçi değerlerden sapmasına yol açabilmektedir. Buna karşılık Morgenstern-Price yöntemi, dilimler arası kuvvetlerin fonksiyonel olarak tanımlanmasına olanak tanıdığı için daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlar üretmektedir.

Şekil 2.18'de sunulan analiz sonuçları, bu iki yöntemin farklı varsayımlarından kaynaklanan güvenlik katsayısı değişimlerini açıkça göstermektedir. Krahn'ın değerlendirmesine göre, yalnızca belirli denge koşullarını sağlayan yöntemlerin

kullanılması, şev stabilitesi analizlerinde kritik yüzeyin doğru şekilde belirlenmesini her zaman garanti etmemektedir. Bu nedenle, denge denklemlerinin tümünün aynı anda sağlandığı bir analiz yaklaşımının benimsenmesi, şevin gerçek davranışını daha doğru yansıtmakta ve mühendislik tasarımlarında güvenilirliği artırmaktadır. Sonuç olarak, Krahn'ın çalışması, limit denge yöntemleri arasında seçim yapılırken yalnızca hesaplama kolaylığına değil, aynı zamanda denge koşullarının bütüncül olarak sağlanmasına da dikkat edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Krahn 2004).



Şekil 2.18 Bishop ve Morgenstern-Price yöntemlerinin karşılaştırılması (Krahn 2004).

2.4.2.6 Lowe-Karafiaht Yöntemi

Bu yöntemde Lowe-Karafiaht (1959) bazı varsayımlarda bulunmuştur ve özellikle dilimler arasındaki kuvvetlerin eğimlerinin, kayma yüzeyi ile zemin yüzeyi eğimlerinin ortalaması olduğu kabul edilmiştir. Bu eğimlerin bir dilimden başka bir dilime geçince değişmesi, dilim sınır yerlerine bağlıdır. Böylece, şevin farklı bölümlerinde kuvvet dağılımı daha gerçekçi bir şekilde modellenmeye çalışılmıştır. Bu yöntem ile hesaplamalar sonucunda güvenlik katsayıları, tam denge yöntemleri kullanılarak hesaplanan sonuçlara yakın değerlerler sağlamıştır (Duncan & Wright 2005).

2.4.2.7 Culmann Yöntemi

Culmann yöntemi eğimden kaynaklı meydana gelen kayma gerilmesinin zeminin kayma gerilmesini aştığı durumda bir düzlem boyunca kütle hareketinin meydana geldiği varsayımına dayanmaktadır. Kayma gerilmesinin en yüksek olduğu düzlem kritik düzlem olarak belirlenmektedir ve bu kritik düzlemde kayma meydana gelmektedir.

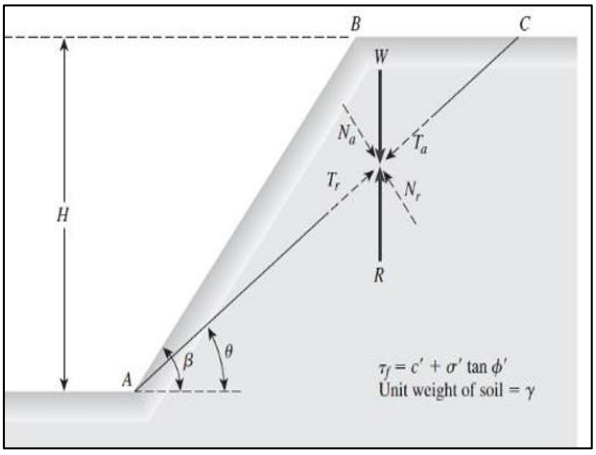
Şekil 2.19'da yüksekliği H olan ve eğimi yatayla β açısı yapan bir şev geometrisi görülmektedir. AC doğrultusunda bir kayma düzlemi meydana gelmektedir. ABC kayma kütlesi hesabı için;

$$W = \frac{1}{2}(H)(BC)(1)(\gamma) = \frac{1}{2}\mathrm{H}(H\,cot\theta - Hcot\beta)\gamma = \frac{1}{2}\gamma H^2\left[\frac{sin(\beta-\theta)}{sin\beta sin\theta}\right] \qquad (2.9)$$

W kütlesinin kayma düzlemine göre normal ve kayma kuvvetleri denklem (2.10)'daki gibidir.

$$N_a = normal\ kuvvet = Wcos\theta = \frac{1}{2}\,\gamma H^2\left[\frac{sin(\beta-\theta)}{sin\beta sin\theta}\right]cos\theta \qquad (2.10)$$

$$T_a = kesme\ kuvveti\ = Wsin\theta = \frac{1}{2}\gamma H^2\left[\frac{sin(\beta-\theta)}{sin\beta sin\theta}\right]sin\theta \qquad (2.11)$$



Şekil 2.19 Culmann metodu (Das 2011).

2.4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi

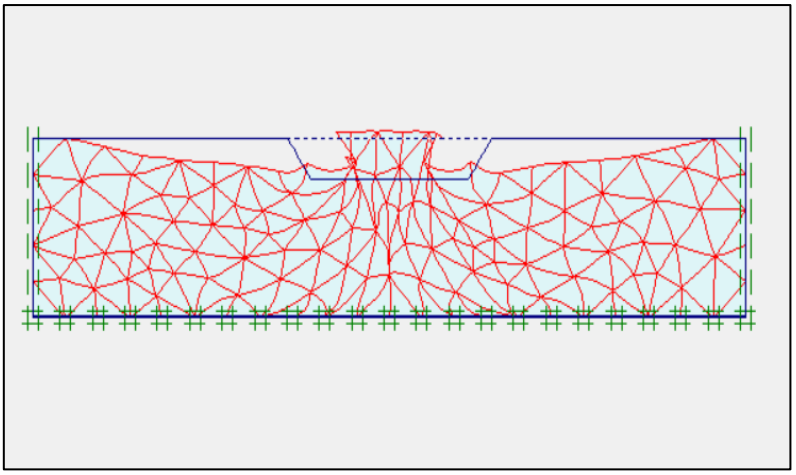
Sonlu elemanlar yöntemi sistematik ve efektif olması nedeniyle şev stabilite analizlerinde en çok tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Bu yöntemle, zemin davranışlarının farklı etkenlere bağlı olarak değişmesi ve karmaşık yapıya sahip olmasından dolayı basitleştirici kabuller ile çözümlemeler sunmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin çözüm mantığı, düğüm noktalarında birleşen elemanlara bölünen zeminin, her düğüm noktasında oluşan deplasmandan hareket edilerek şekil değiştirme ve gerilmelerin hesaplanabildiği, sınır değer problemleri ya da diferansiyel denklemlere dayanan mühendislik çözümlerinin modellenebildiği bir yöntemdir. Geleneksel çözüm yöntemlerine iyi bir alternatif olan bu yöntem, göçme mekanizmasıyla ilgili daha az kabul gerektirmesiyle birlikte analizlerin gerçeğe yakın sonuçlar verdiği yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminin kullanımında potansiyel kayma yüzeyinin şekli ve konumu ile ilgili herhangi bir öngörüde bulunulmaması limit denge yöntemlerine karşı sağladığı en belirgin üstünlüktür. Bununla beraber birçok malzeme modeli kullanarak zeminlerde oluşan deformasyonlar, gerilmeler, oturmalar, boşluk suyu basıncı dağılımları, yeraltı suyu sızıntıları bu yöntemle başarılı bir şekilde hesaplanabilmektedir (Hammouri vd. 2008). Kim vd. (2002) yapmış oldukları çalışmada düzensiz yüzeylere sahip ve homojen olmayan şevlerde gerçekleştirilen analizler ile hem limit denge hem de sonlu elemanlar yönteminde oluşan kayma yüzeyi konumlarının birbirine oldukça yakın olduğunu ve hesaplanan güvenlik katsayılarının da birbirine benzer olduğunu ortaya koymuşlardır.

Şekil 2.20'de sunulan örnekte görüldüğü üzere, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenen zemin kesiti, sürekli ortamın matematiksel olarak çözümlenebilmesi için sonlu sayıda elemanlara (ağ yapısına/mesh) ayrılmıştır. Bu dönüşüm sayesinde karmaşık zemin geometrileri ve sınır koşulları gerçeğe en yakın şekilde temsil edilebilmekte, üçgen veya dörtgen elemanlardan oluşan ağ yapısı aracılığıyla zemin davranışı ayrıntılı biçimde incelenebilmektedir. Özellikle gerilme yığılmalarının veya

ani geometrik değişimlerin beklendiği kritik bölgelerde, yapısal elemanların bulunduğu alanlarda (örneğin şev yüzeyi, ankraj kökleri veya istinat duvarı çevresi) ağ yoğunluğu artırılarak analiz hassasiyeti yükseltilmektedir. Bu yaklaşım, hem deformasyonların hem de gerilme dağılımlarının daha doğru hesaplanmasına olanak tanımakta; güvenlik katsayısı ve stabilite değerlendirmelerinin mühendislik açısından daha güvenilir sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Böylece sonlu elemanlar yöntemi, şev stabilitesi analizlerinde yalnızca sayısal değerler değil, aynı zamanda görsel çıktılarla da desteklenen kapsamlı bir çözüm sunarak mühendislik yorumlarının daha gerçekçi yapılmasına imkân tanımaktadır.



Şekil 2.20 Sonlu elemanlara ayrılmış şev kesiti örneği.

2.4.4 Dinamik Analiz Yöntemi

Depremlerden ve çeşitli dış etkenlerden kaynaklanan dinamik yükler, şevlerin stabilitesini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu yükler, zemin kütlesinde ani ivme değişimleri ve gerilme artışları yaratarak denge koşullarını bozmakta, kayma yüzeylerinde deformasyonların oluşmasına neden olmaktadır. İlerleyen süreçlerde yapılan araştırmalar, zeminlerdeki dinamik yüklerden kaynaklanan deformasyonların anlaşılması ve tespit edilmesi konusunda önemli ilerlemeler sağlamıştır (Duncan & Wright 2005). Bu gelişmeler sayesinde mühendislik uygulamalarında hem psödostatik yöntemler hem de sonlu elemanlar yöntemlerini kullanan bilgisayar programları geliştirilmiş ve şev stabilitesi analizlerinde yaygın

olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böylece, dinamik yüklerin etkisi altında şevlerin davranışını daha gerçekçi biçimde modellemek ve güvenlik katsayılarını daha doğru hesaplamak mümkün hale gelmiştir. Bu yöntemler, özellikle deprem etkisi altındaki kritik altyapı projelerinde güvenilir sonuçlar elde edilmesine ve uygun iyileştirme önlemlerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

2.4.4.1 Psödostatik Yöntem

Günümüzden itibaren yaklaşık 100 yıllık bir geçmişi olan yöntemdir. Bu yöntemin net olarak ilk uygulamasını yapan kişi Terzaghi (1950)'dir. Deprem anında oluşabilecek dinamik yüklerin statik düşey veya yatay kuvvetler ile ifade edildiği yöntemdir. F_h ve F_v şeklinde ifade edilirler ve kayan zeminin ağırlık merkezinden geçer. Psödostatik kuvvetlerin büyüklüğü şu şekildedir;

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \tag{2.12}$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \tag{2.13}$$

F_h ve F_v eşitliğindeki a_h ve a_v düşey ve yatay psödostatik ivmeleri, W kayan zeminin ağırlığını, k_v ve k_h ise düşey ve yatay psödostatik katsayıları ifade etmektedir.

2.4.4.2 Ampirik formüller

Tarihsel olarak günümüze kadar gelişim gösteren Newmark (1965) deplasman hesaplama yöntemleri, kritik ivmenin maksimum ivmeye bölünmesi ile bir fonksiyon şeklinde hesap yapılmıştır. Günümüz tarihine yakın olan çalışmalar ile daha net sonuçlar elde edilmiştir (Gündoğdu 2008). Bu çalışmasında kritik ivmenin maksimum ivmeye oranının a_c/a_{maks} formülleri seçilerek deplasman değerleri hesaplanmıştır. Newmark (1965) metodu ile hesaplama yapılabilmesi için a_c, a_{maks} ve G_s değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Hesaplamalar sonucunda deplasman oluşması için kullanılan depremin pik ivme değeri, kritik ivme değerinden büyük olmalıdır.

$$a_c = (G_S - 1)g\sin\theta \quad (2.14)$$

a_c: kritik ivme g cinsinden

G_S: statik güvenlik katsayısı

θ: kayma yüzeyinin yatay ile açısı

Deprem etkisi altındaki şevlerde meydana gelen kalıcı yer değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla Bozbey ve Gündoğdu (2011) tarafından ampirik bir deplasman modeli önerilmiştir. Bu formülasyon oluşturulurken, Türkiye'de meydana gelmiş tarihsel depremlere ait ivme kayıtlarından faydalanılmış ve ileri düzey bilgisayar programları yardımıyla yaklaşık 2500 adet veri analize dahil edilmiştir. Geliştirilen modelin geçerlilik aralığını belirleyen ivme kayıtlarının en büyük yer ivmesi değerleri 0,1g ile 0,8g arasında değişkenlik göstermektedir (Bozbey 2011). Geniş bir sismik veri spektrumuna dayanan bu çalışma, dinamik şev davranışlarının kestiriminde güvenilir bir zemin hazırlamıştır.

$$logD_n = -4{,}38\left(\frac{a_c}{a_{maks}}\right) + 1{,}937 \quad (2.15)$$

a_{maks} : Pik ivme g cinsinden

a_c : Yenilme ivmesi

D_n : Oluşan deplasman miktarı (cm)

3. MATERYAL ve METOT

Şevler, doğada doğal süreçler sonucunda oluşabildikleri gibi, mühendislik yapımları sonucu ile de oluşturulabilmektedir. Bu şevlerin hem statik koşullarda hem de dinamik yükler altında gösterecekleri davranışlar, mühendislik açısından incelenmesi gereken önemli bir konudur.

Bu çalışma kapsamında, Afyonkarahisar ili Çay ilçesinde yer alan Çay Barajı'nın çevresindeki karayolu güzergâhındaki yol şevi ile baraj bölgesinde bulunan ankraj ile iyileştirilmiş olan baraj vadi şevi üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Baraj vadi şevi ve yol şevi olarak iki farklı vaka analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde PLAXIS 2D yazılımı kullanılmıştır. Son dönemde ülkemizde ve bölgemizde gerçekleşen aşırı yağışları göz önünde bulundurarak baraj şevinde beş farklı yeraltı su seviyesi kullanılmıştır. Yol şevinde ise göçme anındaki su seviyesi modellenerek belirlenmiş olup; bu su seviyesine göre analizler yapılmıştır. Beş farklı yeraltı su seviyesi, hem statik hem de dinamik koşullar altında analiz edilmiştir. Çalışmada, şevlerin güvenlik katsayıları ve olası kayma yüzeyleri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

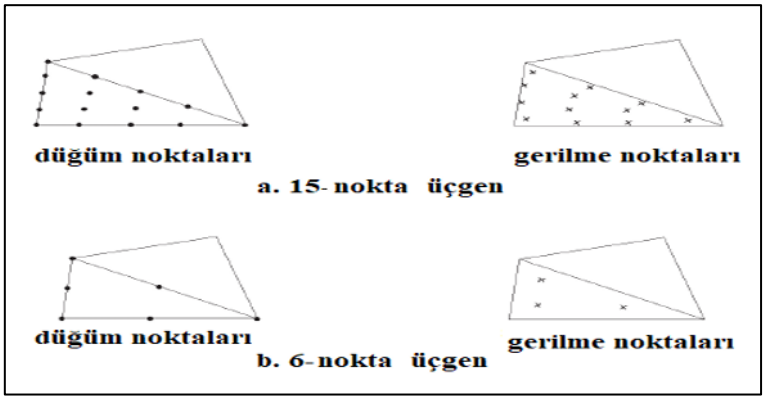
Elde edilen sonuçlar, Çay ilçesinde bulunan problemli bir yol şevi ile baraj vadisinde bulunan ankrajla iyileştirilmiş olan baraj vadi şevinin, değişen su seviyeleri ve deprem etkileri altında farklı stabilite özellikleri sergilediğini ortaya koymuştur. Bu bölümde, kullanılan yöntemler, parametreler ve analiz süreci ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

3.1 Plaxis 2D Programı

PLAXIS 2D, geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan zemin ve yapı etkileşimli problemlerin çözümünde kullanılan, sonlu elemanlar esaslı iki boyutlu bir analiz yazılımıdır. Bentley Systems tarafından geliştirilen bu program, zemin ortamının ve mühendislik yapılarının davranışını sayısal yöntemlerle değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Programda zemin kütlesi üçgen elemanlar yardımıyla modellenmekte; her eleman

içerisinde tanımlanan düğüm ve entegrasyon noktaları aracılığıyla gerilme ve şekil değiştirme büyüklükleri hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım, zemin içerisindeki karmaşık gerilme dağılımlarının ve deformasyon mekanizmalarının ayrıntılı biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır. Şekil 3.1'de gerilme ve düğüm noktalarının üçgen elemanlarla gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1 Gerilme ve düğüm noktaları.

PLAXIS 2D'nin en önemli avantajlarından biri, farklı mühendislik koşullarını yansıtan çeşitli zemin davranış modellerini bünyesinde barındırmasıdır. Mohr–Coulomb modeli ile temel elastik–plastik davranış tanımlanabilirken; Hardening Soil ve Hardening Soil with Small-Strain Stiffness gibi gelişmiş modeller, gerilme seviyesine ve şekil değiştirme büyüklüğüne bağlı rijitlik değişimlerini daha gerçekçi şekilde ortaya koymaktadır. İnce daneli ve yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminler için ise Soft Soil modeli kullanılabilmektedir.

Yazılım, aşamalı inşaat yaklaşımını esas alarak kazı, dolgu, yükleme ve ankraj gibi mühendislik uygulamalarının zaman içerisindeki etkilerini adım adım inceleme olanağı sunmaktadır. Böylece inşaat sürecinin her aşamasında zemin davranışında meydana gelen değişimler ayrı ayrı değerlendirilebilir ve olası stabilite problemleri önceden tespit edilebilir. Ayrıca drenajlı ve drenajsız koşulların tanımlanabilmesi, zamana bağlı analizlerin yapılmasına katkı sağlamaktadır.

Analiz sonuçları; deplasmanlar, gerilme dağılımları, plastikleşme bölgeleri ve güvenlik katsayıları gibi mühendislik açısından kritik çıktıları içermektedir. Bu yönüyle PLAXIS

2D, hem akademik araştırmalarda hem de uygulamaya yönelik geoteknik projelerde tasarımın doğrulanması ve alternatif çözümlerin karşılaştırılması için güvenilir bir analiz aracı olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında şev stabilitesinin statik ve dinamik koşullar altındaki davranışını incelemek amacıyla PLAXIS 2D sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Sayısal modelleme sürecinde, analizlerin doğruluğunu artırmak ve saha koşullarını gerçeğe en yakın şekilde temsil edebilmek amacıyla modelleme parametreleri literatürde önerilen uygulamalar ve yazılımın hesaplama prensipleri doğrultusunda belirlenmiştir.

Analizlerde, şevin uzun ekseni boyunca geometrik ve yükleme koşullarının değişmediği kabul edilerek Plane Strain (düzlem şekil değiştirme) analiz yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, şevler gibi uzun doğrultuda süreklilik gösteren geoteknik problemlerin iki boyutlu kesitler üzerinden güvenilir biçimde modellenmesine olanak sağlamaktadır.

Sayısal modelde sonlu eleman ağı oluşturulurken, ikinci dereceden şekil fonksiyonlarına sahip 15 düğüm noktalı üçgen (15-node triangular) elemanlar kullanılmıştır. Bu eleman tipi, gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarının daha hassas hesaplanmasına olanak sağlayarak özellikle şev yüzeyi, ankraj bağlantı bölgeleri ve potansiyel kayma yüzeylerinde oluşabilecek gerilme yığılmalarının daha doğru temsil edilmesini mümkün kılmaktadır. Sonlu eleman ağı (mesh) oluşturulurken ise Medium (Orta) ağ yoğunluğu seçilmiş olup, hesaplama doğruluğu ile analiz süresi arasında optimum denge sağlanması amaçlanmıştır.

3.2 Çalışma Sahası Verileri

Afyonkarahisar ili Çay ilçesi karayolu güzargahında bulunan problemli doğal bir yol şevi üzerinde ve çay barajının vadisinde bulunan iyileştirme çalışması yapılmış olan baraj vadi şevi üzerinde, yükselen su seviyesine bağlı olarak statik ve dinamik durumlarını ele alan stabilite çalışmaları yapılmıştır. PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, elde edilen geoteknik parametreler modele tanımlanmış ve

şevin mevcut durumu iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Modelleme sürecinde şev geometrisi, sınır koşulları ve yükleme durumları gerçek saha koşullarına uygun şekilde oluşturulmuştur. Analizlerde güvenlik katsayıları ve olası kayma yüzeyleri belirlenmiştir.

3.2.1 Baraj Vadi Şevi Verileri

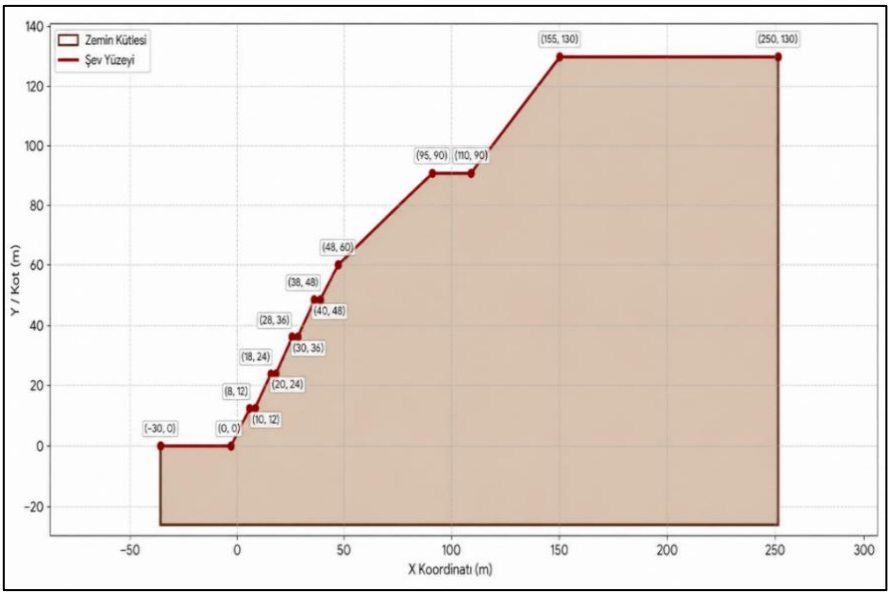
Sayısal analizlerde kullanılacak zemin parametrelerinin saha koşullarını en gerçekçi biçimde yansıtabilmesi amacıyla, öncelikle çalışma alanında kapsamlı gözlemsel ve ölçümsel faaliyetler yürütülmüş; baraj vadisi şevi ve çevresinde yapılan arazi incelemeleriyle mevcut drenaj durumu, su çıkışlarının dağılımı ve şev yüzeyindeki deformasyon izleri ayrıntılı biçimde kaydedilmiştir. Arazi çalışmalarını takiben, sahadan alınan temsili numuneler üzerinde laboratuvar ortamında kaya ve zemin mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiş, bu süreçte doğal birim hacim ağırlık (γ_n), doygun birim hacim ağırlık (γ_{sat}), özgül ağırlık (piknometre yöntemi) ve su içeriği değerleri yüksek doğrulukla belirlenmiştir. Şevlerin göçme kriterlerini tanımlayan efektif kohezyon (c') ve efektif içsel sürtünme açısı (ϕ') parametreleri ise farklı deneysel yöntemlerle elde edilmiştir; kohezyonsuz zeminler üzerinde doğrudan kesme kutusu deneyi uygulanırken, kohezyonlu ve hassas zemin numuneleri için sahayı temsil eden çevre basınçları altında konsolide-drenajsız (CU) ve konsolide-drenajlı (CD) üç eksenli hücre sıkışma deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu sayede zeminlerin hem drenajlı hem de drenajsız koşullardaki davranışları ayrıntılı biçimde ortaya konulmuştur. Çalışmada kullanılan arazi gözlemleri ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler, sayısal analizlerde daha güvenilir parametreler elde edebilmek amacıyla kalibrasyon sürecine tabi tutulmuştur. Elde edilen parametreler, şev stabilite analizlerinde kullanılmak üzere saha koşullarını yansıtan güvenilir veriler olarak değerlendirilmiştir. Arazi gözlemleri, özellikle baraj vadi şevinde ciddi bir drenaj yetersizliği ve kontrolsüz su çıkışlarının mevcut olduğunu göstermiş, bu durum şev stabilitesini olumsuz yönde etkileyen kritik bir faktör olarak bulgular arasında öne çıkmıştır. Baraj vadi şevinin mevcut doğal halinde drenajın sağlanmamış olduğunun su çıkışlarının şev üzerinde gözle görünür bir şekilde olduğunun görüntüsü olarak Şekil 3.2'de sunulmaktadır.



Şekil 3.2 Baraj vadi şevinin doğal hali.

Bu çalışmada analizlere esas alınan şev geometrisi, mevcut saha koşullarını temsil edecek şekilde belirlenen koordinat noktaları kullanılarak oluşturulmuştur. Şev kesitinin geometrik modeli, yüklenici firma tarafından sağlanan proje verileri doğrultusunda tanımlanmış ve kalibrasyonlar yapılarak PLAXIS 2D yazılımının geometri oluşturma modülüne koordinat sistemi üzerinden aktarılmıştır. Model oluşturulurken şevin topuk, taç ve ara kırık noktaları koordinatlandırılarak gerçek arazi geometrisi sayısal ortama yansıtılmıştır.

Sayısal modelin oluşturulmasında kullanılan koordinatlar, şevin başlangıç ve bitiş noktaları ile geometriyi oluşturan tüm karakteristik kırık noktalarını kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. Analiz alanı, sınır etkilerinin hesaplama sonuçlarını etkilemeyecek biçimde yatay ve düşey doğrultuda yeterli genişlik ve derinlikte tanımlanmış olup, geometri PLAXIS 2D ortamında doğrudan kullanılabilecek koordinat formatında oluşturulmuştur. Bu yaklaşım sayesinde şev geometrisinin mühendislik özellikleri korunmuş ve statik ile dinamik analizler için gerekli sayısal model altyapısı hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan şev geometrisine ait koordinat noktaları ve analiz alanının sınırları şev yüzeyi ve zemin kütlesi ayrımı yapılarak şekil 3.3'te sunulmuştur.

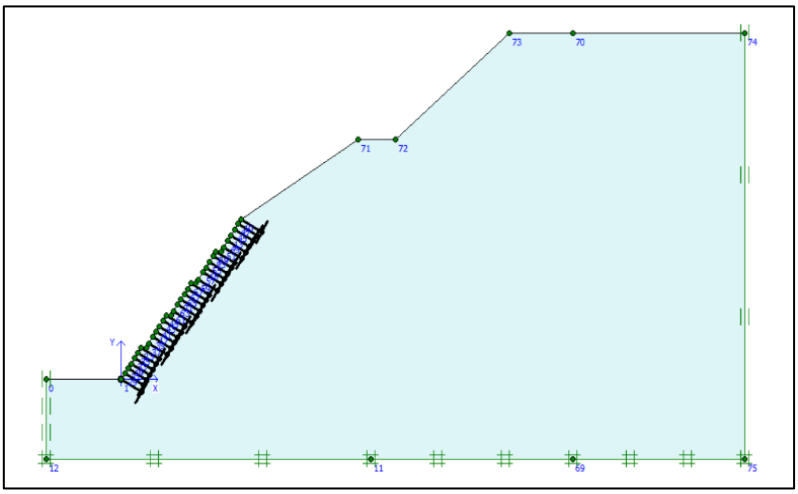


Şekil 3.3 Çalışma alanı koordinatları.

Sayısal modelleme sürecinde, baraj vadi şevine ait geometri saha ölçümleri ve uygulama projesi verileri esas alınarak PLAXIS 2D sonlu elemanlar yazılımında oluşturulmuştur. Şev geometrisi, koordinat noktaları kullanılarak gerçek arazi koşullarını temsil edecek şekilde tanımlanmış ve analizlerde kullanılacak zemin tabakaları modele ayrı malzeme bölgeleri olarak atanmıştır. Zeminlere ait birim hacim ağırlık, kohezyon, içsel sürtünme açısı, elastiste modülü ve poisson oranı gibi mühendislik parametreleri, laboratuvar deneyleri ve geoteknik etüt çalışmalarından elde edilen veriler doğrultusunda modele tanımlanmıştır.

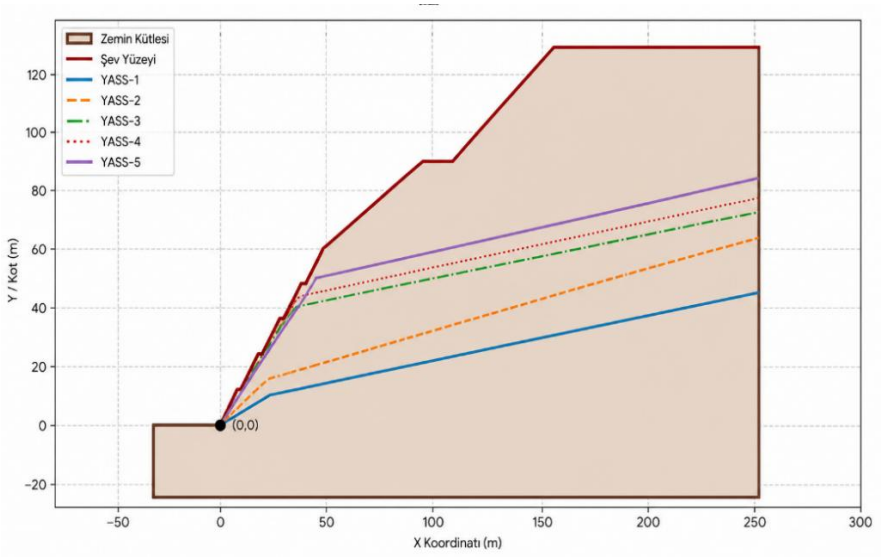
Şev stabilitesinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanan mevcut ankraj sistemi, PLAXIS 2D yazılımında Fixed-End Anchor yapısal elemanı kullanılarak modellenmiştir. Ankrajlar, saha uygulamasındaki yerleşim düzeni esas alınarak şev boyunca 1 m yatay aralıklarla**,** 5 m toplam uzunluğunda**,** yatayla 30° açı yapacak şekilde ve 150 kN tasarım çekme kapasitesine sahip olacak biçimde modele tanımlanmıştır. Ankrajların konumları, eğimleri ve mekanik özellikleri uygulama projesinde belirtilen tasarım kriterleri doğrultusunda sonlu eleman modeline aktarılmış, tüm analiz senaryolarında aynı ankraj konfigürasyonu korunmuştur.

Oluşturulan sayısal modelde şev geometrisi, zemin tabakaları, ankraj sistemi ve yeraltı suyu koşulları birlikte tanımlanarak analizlere hazır hale getirilmiştir. Model, statik ve dinamik analizlerde kullanılmak üzere oluşturulmuş olup, farklı yeraltı su seviyesi senaryolarında yalnızca yeraltı su seviyesine ilişkin sınır koşulları değiştirilmiş; şev geometrisi, zemin özellikleri ve ankraj sistemine ait parametreler tüm analizler boyunca sabit tutulmuştur. Bu yaklaşım sayesinde yeraltı su seviyesindeki değişimin şev davranışı üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlayan tutarlı bir sayısal model elde edilmiştir. PLAXIS 2D ortamında oluşturulan baraj vadi şevine ait sayısal model şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.4 Baraj vadi şevinin modeli.

Bu çalışmada, şev stabilitesi analizlerinde yeraltı su seviyesinin etkisini değerlendirmek amacıyla YASS-1, YASS-2, YASS-3, YASS-4 ve YASS-5 olmak üzere beş farklı yeraltı su seviyesi senaryosu tanımlanmıştır. Senaryolar, yeraltı su seviyesinin kademeli olarak yükseltildiği koşulları temsil edecek şekilde oluşturulmuş ve her bir senaryo için aynı şev geometrisi, zemin parametreleri ve ankraj özellikleri korunarak yalnızca yeraltı su seviyesi değiştirilmiştir. Tanımlanan yeraltı su seviyesi senaryoları, statik ve dinamik analizlerde sınır koşulu olarak kullanılmış olup, su seviyelerinin şev davranışı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. YASS-1'den YASS-5'e kadar tanımlanan yeraltı su seviyesi senaryoları şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Yeraltı su seviyesi senaryoları.

Şev stabilitesi analizlerinde kullanılan zemin mühendislik parametreleri, saha ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen jeoteknik verilere dayanılarak belirlenmiştir. Analizlerde kullanılan kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (φ) ve elastisite modülü (E) değerleri, zemin örnekleri üzerinde gerçekleştirilen standart geoteknik deneylerden elde edilen sonuçlar esas alınarak tanımlanmıştır.

Kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (φ) parametreleri, zeminlerin dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen doğrudan kesme ve üç eksenli basınç deneylerinden elde edilmiştir. Bu deneyler sonucunda belirlenen Mohr–Coulomb yenilme zarfı kullanılarak kayma dayanımı parametreleri hesaplanmıştır.

Zeminlerin deformasyon özelliklerini temsil eden elastisite modülü (E) ise laboratuvar ortamında gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiştir. Bu deneyler, zeminin gerilme–şekil değiştirme ilişkisini ortaya koyarak sayısal modellemelerde kullanılacak parametrelerin güvenilirliğini artırmıştır. Çalışmada kullanılan parametreler, sonlu eleman analizlerinde Mohr–Coulomb zemin modeli için malzeme özellikleri olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.1'de ise baraj vadi şevinin zemin parametre değerleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Baraj vadi şevinin zemin parametreleri.

Parametre	Değer
γ (kN/m³)	22-26
γ_{sat} (kN/m³)	23-27
c (kPa)	100-120
φ (°)	45-55
E (kN/m²)	1,000E+05
Kx=Ky (m/s)	1e-7
ν	0,25

Çalışmada kullanılan ankraj sistemine ait mühendislik parametreleri yüklenici firma tarafından sağlanan proje ve uygulama verilerinden temin edilmiştir. Sayısal modelleme çalışmalarında mevcut ankraj sistemi, saha uygulamasındaki geometrik ve mekanik özellikleri dikkate alınarak PLAXIS 2D sonlu elemanlar yazılımında Fixed-End Anchor elemanı kullanılarak temsil edilmiştir. Modelde ankrajlar, şev yüzeyi boyunca 1 m yatay aralıklarla yerleştirilmiş, 5 m toplam ankraj boyuna**,** 150 kN tasarım çekme kapasitesine ve yatay doğrultuya göre 30° eğim açısına sahip olacak şekilde tanımlanmıştır. Ankrajların konumları, yerleşim düzeni ve taşıma kapasitesi, uygulama projesinde belirtilen tasarım kriterleri doğrultusunda oluşturularak sonlu eleman modeline aktarılmıştır.

Sayısal analizlerde, ankraj sisteminin tüm geometrik ve mekanik özellikleri analiz süresince sabit tutulmuş ve her bir yeraltı su seviyesi senaryosunda aynı ankraj konfigürasyonu kullanılmıştır. Böylece, farklı analiz senaryoları arasında yalnızca yeraltı su seviyesindeki değişimin şev davranışı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Modelleme sürecinde ankrajlar, zemin ortamı ile birlikte çalışan yapısal elemanlar olarak tanımlanmış ve şev stabilitesi analizlerinde mevcut saha koşullarını temsil edecek şekilde modele entegre edilmiştir. Analizlerde esas alınan ankraj sistemine ait teknik ve mekanik parametreler çizelge 3.2'de sunulmuştur. Bu tablo şev mühendisliği açısından kritik verilerin sistematik biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Çizelge 3.2 Ankraj parametreleri.

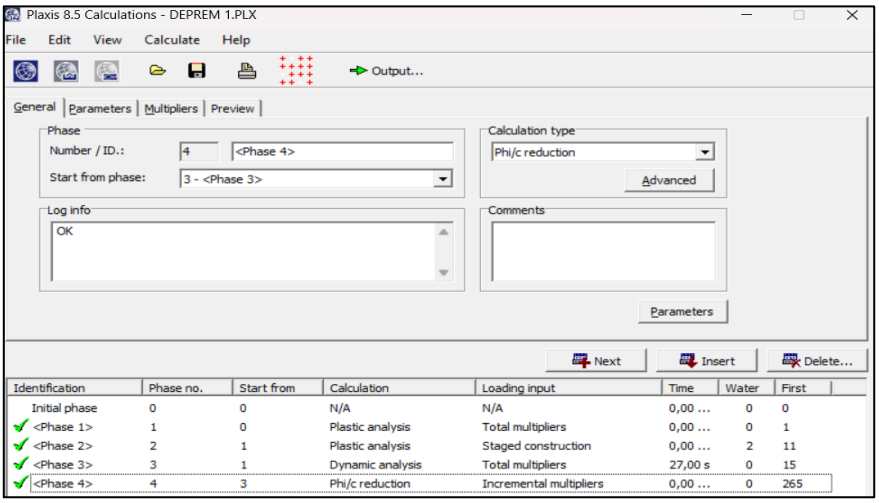
Parametre	Değer
EA (KN)	2,000E+05
$L_{spacing}$ (m)	1
$F_{\max,tens}$ (KN)	150
$F_{\max,comp}$ (KN)	150

Baraj vadi şevinin deprem etkisi altındaki davranışını incelemek amacıyla dinamik analizler, PLAXIS 2D yazılımının Dynamic Calculation modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerden önce modelin başlangıç gerilme durumu, statik analiz sonucunda elde edilen denge koşulları esas alınarak oluşturulmuş ve deprem yüklemesi bu başlangıç gerilme durumu üzerinden uygulanmıştır. Böylece dinamik analizler sırasında şev sisteminin gerçekçi gerilme dağılımı altında göstereceği davranışın belirlenmesi amaçlanmıştır.

Dinamik hesaplama aşamasında analiz tipi Dynamic olarak seçilmiş ve deprem etkisi, PLAXIS 2D yazılımında bulunan Standard Earthquake yükleme seçeneği kullanılarak modele tanımlanmıştır. Deprem hareketi, ivme-zaman (acceleration–time history) kaydı şeklinde model tabanına uygulanmış olup analiz süresi, kullanılan deprem kaydının toplam süresine bağlı olarak belirlenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan zaman adımı (time step), çözümün kararlılığını ve dinamik davranışın doğru şekilde temsil edilmesini sağlayacak biçimde seçilmiştir.

Dinamik analizlerde, deprem dalgalarının model sınırlarından geri yansıyarak çözüm sonuçlarını etkilemesini önlemek amacıyla PLAXIS 2D'nin Absorbent Boundaries özelliği kullanılmıştır. Modelin yan sınırları ile alt sınırında tanımlanan bu sınır koşulları, dinamik yükleme sırasında oluşan basınç (P) ve kayma (S) dalgalarının sınır bölgelerinde sönümlenmesini sağlayarak yapay dalga yansımalarını en aza indirmektedir. Bu yaklaşım sayesinde analiz alanı sonsuz zemin ortamını temsil edecek şekilde modellenmiş ve sonlu model sınırlarından kaynaklanabilecek sayısal hataların azaltılması hedeflenmiştir.

Dinamik analizler boyunca model geometrisi, zemin tabakalarına ait mühendislik parametreleri, ankraj sistemi ve hesaplama ayarları tüm analiz senaryolarında sabit tutulmuştur. Yalnızca yeraltı su seviyesi senaryoları ve dinamik yükleme koşulları değiştirilerek farklı hidrolik koşullar altında şev davranışı incelenmiştir. Dinamik analizlerde kullanılan calculation adımları ile hesaplama parametreleri şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Dinamik analiz calculation adımları.

3.2.2 Yol Şevi Verileri

Sayısal analizlerin ikinci aşamasını oluşturan yol şevi modellemelerinde, Afyon ili Çay ilçesi sınırlarında yer alan problemli doğal bir yol şevi esas alınmıştır. Bu bölge, sarp yamaç morfolojisi ve tektonik açıdan hassas yapısıyla geoteknik stabilite sorunlarının ve şev göçmelerinin yaşandığı kritik bir geçiş güzergahıdır.

Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalarda, öncelikle söz konusu güzergahtaki yol şevinden kapsamlı gözlemsel ve ölçümsel veriler özenle toplanmış, ardından sahadan alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde detaylı laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yol şevini oluşturan birimlerin fiziksel özelliklerini belirlemek üzere yapılan piknometre ve su içeriği deneyleri ile zeminlerin doğal ve doygun birim hacim ağırlıkları saptanmıştır. Şevin kayma mukavemetini belirleyen efektif kohezyon ve efektif içsel sürtünme açısı parametreleri ise; bölgedeki kohezyonsuz gevşek örtü

malzemeleri üzerinde doğrudan kesme kutusu deneyi, tabandaki kohezyonlu, killi ve ayrışmış birimler üzerinde ise sahayı temsil eden çevre basınçları altında konsolide-drenajsız (CU) ve konsolide-drenajlı (CD) üç eksenli hücre sıkışma deneyleri gerçekleştirilerek yüksek hassasiyetle belirlenmiştir. Çalışma sahasında yapılan teknik incelemeler sonucunda şekil 3.7'de yol şevinin mevcut durumu gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Yol şevinin mevcut hali.

Araziden alınan zemin numunelerinin yakın plan görüntülerine, saha çalışmaları sırasında elde edilen bulguların görsel olarak desteklenmesi ve zeminin fiziksel özelliklerinin daha ayrıntılı biçimde ortaya konulması amacıyla tez kapsamında yer verilmiştir. Yakın plan görüntüler sayesinde numunelerin renk, doku, tane dağılımı, tabakalanma yapısı, ayrışma derecesi ve süreksizlik özellikleri gibi temel jeolojik ve geoteknik karakteristikleri görsel olarak değerlendirilebilmektedir. Bu gözlemler, laboratuvar deneylerine başlanmadan önce zeminin genel davranışı hakkında ön bilgi edinilmesine katkı sağlamakta ve deney sonuçlarının yorumlanmasında destekleyici nitelik taşımaktadır.

Ayrıca, numunelerin arazi koşullarındaki doğal yapılarının korunarak görüntülenmesi, saha gözlemleri ile laboratuvar ortamında elde edilen verilerin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece, numunelerin taşınma ve hazırlanma süreçlerinden önceki

özgün durumlarının kayıt altına alınması mümkün olmakta ve saha koşullarının daha doğru şekilde temsil edilmesine katkıda bulunulmaktadır. Görsel kayıtlar aynı zamanda çalışmanın güvenilirliğini artırmakta, araştırmanın dokümantasyonunu güçlendirmekte ve ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilen geoteknik değerlendirmeler için önemli bir referans oluşturmaktadır. Bu kapsamda, araziden alınan zemin numunelerine ait yakın plan görüntü şekil 3.8'de sunulmuştur.



Şekil 3.8 Arazi numuneleri.

Çalışma alanından temin edilen kayaç numuneleri, geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvar ortamında değerlendirilmiştir. Arazi çalışmaları sırasında farklı noktalardan alınan blok numuneler, ilgili deney standartlarına uygun şekilde laboratuvara taşınmış ve deneylere hazırlanmıştır.

Şist, yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında metamorfizma sonucunda oluşan, belirgin şistozite (foliasyon) yapısına sahip metamorfik bir kayaçtır. Mineralojik bileşimi çoğunlukla kuvars, mika (biyotit ve muskovit), klorit ve feldispat minerallerinden oluşmakta olup, metamorfizma derecesine bağlı olarak granat, staurolit ve sillimanit gibi mineralleri de içerebilmektedir. Levhamsı minerallerin belirli doğrultularda dizilmesi sonucu gelişen foliasyon yapısı, kayaç içerisinde süreksizlik düzlemlerinin oluşmasına neden olmakta ve mekanik özelliklerin yönlenmeye bağlı olarak değişmesine yol açmaktadır. Bu nedenle şistler, mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği çalışmalarında dayanım anizotropisinin belirgin olarak gözlendiği kayaçlar

arasında yer almaktadır. Özellikle şevler, tüneller, baraj temelleri, yeraltı kazıları ve istinat yapıları gibi mühendislik uygulamalarında şistlerin yönelime bağlı mekanik davranışlarının doğru belirlenmesi güvenli tasarım açısından büyük önem taşımaktadır.

Şist kayaçlarda gözlenen dayanım anizotropisinin temel nedeni, foliasyon düzlemleri boyunca gelişen süreksizlikler ile mineral tanelerinin yönlenmiş yapısıdır. Bu yapısal özellikler nedeniyle tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü ve deformasyon karakteristikleri yükleme doğrultusuna bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda, foliasyon düzlemine göre farklı açılarda hazırlanan karot numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneylerinde maksimum dayanım değerlerinin genellikle foliasyon düzlemine dik yüklemelerde (yaklaşık 90°), minimum dayanım değerlerinin ise 30°–45° yönelimleri arasında elde edildiği belirtilmektedir. Bununla birlikte bu dayanım değerleri, kayaçların mineralojik bileşimi, metamorfizma derecesi, ayrışma durumu ve yapısal özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Ayrıca farklı sıcaklık ve kimyasal ortam koşullarının da şistlerin mekanik davranışı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Yapılan araştırmalarda özellikle düşük ve yüksek sıcaklıklar ile farklı Ph ortamlarının kayaç dayanımını değiştirebildiği, bu etkinin mika şist gibi kayaçlarda daha belirgin olduğu ifade edilmektedir. Bu durum, şist kayaçlarının yalnızca anizotropik yapılarının değil, aynı zamanda çevresel koşullara bağlı davranışlarının da mühendislik tasarımında dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Çalışma kapsamında, sayısal analizlerde kullanılacak mühendislik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çalışma sahasından kayaç numuneleri alınmış ve laboratuvar ortamında jeoteknik deneyler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle kayaç türü ve fiziksel özellikleri değerlendirilmiş, ardından mühendislik parametrelerinin belirlenmesine yönelik tek eksenli basınç dayanımı ve doğrudan kesme deneyleri uygulanmıştır. Bunun yanında birim hacim ağırlık, doğal su muhtevası ve diğer fiziksel özelliklerin belirlenmesine yönelik gerekli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilerek sayısal modellemede kullanılacak temel geoteknik veriler elde edilmiştir. Çalışma alanından alınan şist kayaç numunesinin genel görünümü şekil 3.8'de sunulmuş olup, laboratuvar deneylerinden elde edilen ve sayısal analizlerde kullanılan geoteknik parametreler ise çizelge 3.3'te verilmiştir.

Doğrudan kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar Mohr–Coulomb yenilme kriteri çerçevesinde değerlendirilerek kaya malzemesine ait kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (φ) parametreleri belirlenmiştir. Tek Eksenli Basınç Dayanımı deneyinden elde edilen gerilme–şekil değiştirme verileri kullanılarak elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) hesaplanmış, böylece kaya malzemesinin elastik ve dayanım özelliklerini temsil eden mühendislik parametreleri oluşturulmuştur. Elde edilen tüm geoteknik parametreler, PLAXIS 2D yazılımında kullanılan Mohr–Coulomb malzeme modeli kapsamında tanımlanarak statik ve dinamik analizlerde malzeme özellikleri olarak kullanılmıştır. Böylece sayısal modelin, çalışma alanındaki şist kayaçların gerçek mühendislik davranışını mümkün olduğunca doğru şekilde temsil etmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 3.3 Yol Şevinin zemin parametreleri.

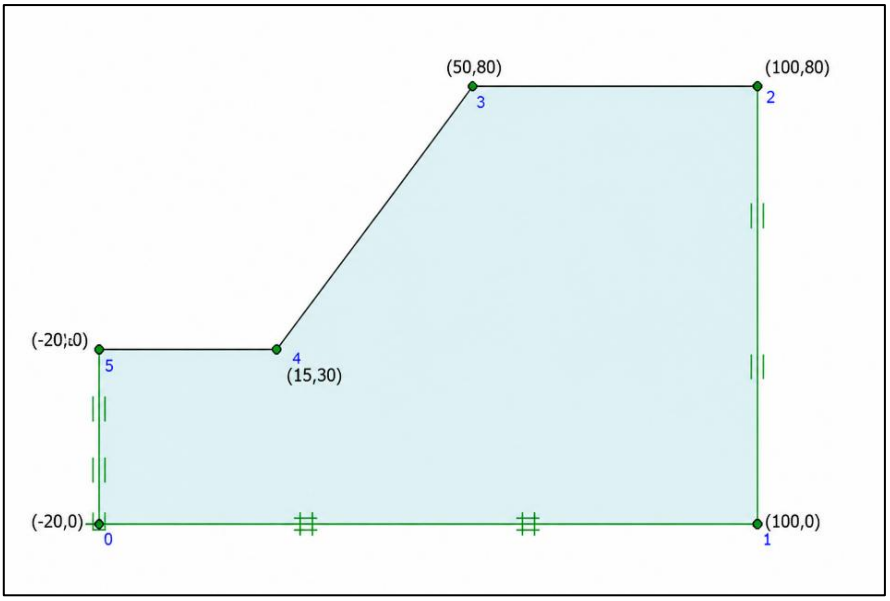
Parametre	**Değer**
γ (kN/m³)	22-26
γ_{sat} (kN/m³)	23-27
c (kPa)	70-80
φ (°)	30-40
E (kN/m²)	100000
k (m/s)	1e-7
ν	0,25

Analizlerde kullanılacak şev modeli, çalışma alanından elde edilen topoğrafik veriler ve arazi ölçümleri esas alınarak PLAXIS 2D yazılımında koordinat tanımlama yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Model geometrisinin oluşturulmasında, şevi temsil eden köşe noktaları sırasıyla (-20,30), (15,30), (50,80), (100,80), (100,0) ve (-20,0) koordinatlarında tanımlanmıştır. Oluşturulan geometri, çalışma sahasının mevcut topoğrafik yapısını mümkün olduğunca gerçeğe uygun şekilde temsil edecek biçimde düzenlenmiş ve laboratuvar deneylerinden elde edilen geoteknik parametreler ile saha gözlemleri doğrultusunda kalibre edilmiştir.

Geometrik modelin oluşturulmasının ardından, zemin katmanları ve malzeme özellikleri modele atanmış, daha sonra sonlu eleman ağı (mesh) oluşturularak statik ve dinamik

analizlere uygun hale getirilmiştir. Hazırlanan bu model, şevin mevcut durumunun değerlendirilmesi ile farklı yükleme ve yeraltı suyu koşulları altında davranışının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen tüm sayısal analizlerin temelini oluşturmuştur. Böylece analizlerde kullanılan geometri, çalışma alanının gerçek saha koşullarını temsil edecek şekilde oluşturularak elde edilen sonuçların güvenilirliğinin artırılması hedeflenmiştir.

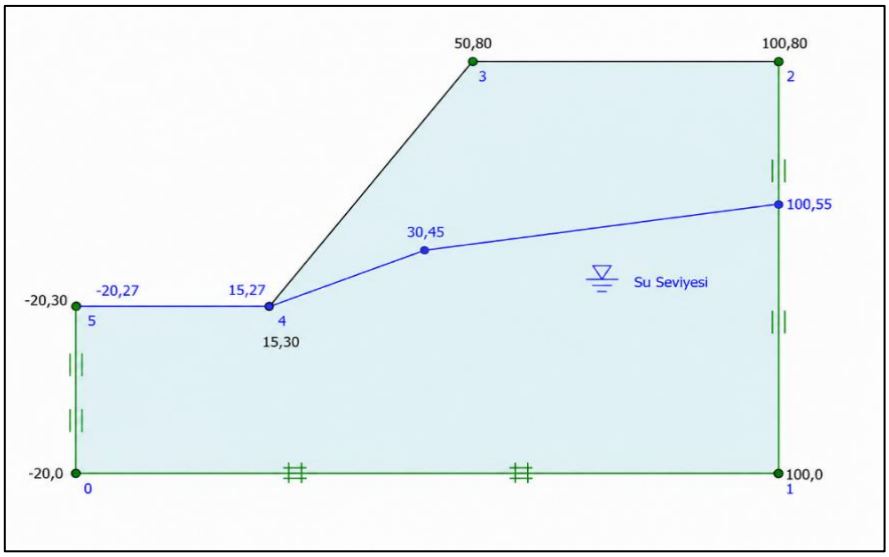
Şekil 3.9'da PLAXIS 2D ortamında oluşturulan şev modelinin geometrisi ve koordinatları ayrıntılı biçimde gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Yol şevi modeli.

Yol şevinin mevcut hali saha gözlemlerinde kopma ve parçalanmaların yaşandığı problemli bir yapı sergilemektedir. Bu mevcut durum üzerine yapılan analizlerde, şevin göçme anına karşılık gelen kritik yeraltı su seviyesi tespit edilmiştir. Belirlenen bu tek su seviyesi koşulu altında ayrıntılı stabilite incelemeleri gerçekleştirilmiş; güvenlik katsayısı ve deformasyon davranışları mühendislik kriterleri doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Şekil 3.10'da kritik su seviyesinin koordinatları mavi çizgilerle sunularak, şevin en kritik hidrostatik yükleme durumunun görsel olarak ortaya konması sağlanmıştır.



Şekil 3.10 Yol şevinin yeraltı su seviyesi.

Yol şevinde mevcut duraysızlıkların giderilmesi amacıyla farklı mühendislik iyileştirme yöntemleri senaryo bazlı olarak uygulanmıştır. Bu kapsamda:

- Drenaj sistemi ile yeraltı su seviyesinin düşürülmesi ve boşluk suyu basıncının azaltılması.
- Topuk istinat duvarı ve yapay destek dolgusu ile şevin alt bölgesinde ek stabilite sağlanması.
- Ankraj yöntemi ile derin kayma yüzeylerinin kontrol altına alınması.

Topuk istinat duvarı arkası için dolgu malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan bu dolgu malzemesinin mekanik ve hidrolik davranışını tanımlamaya yönelik gerçekleştirilen sayısal analiz parametreleri çizelge 3.4'de sunulmuştur. Modelleme yapılırken topuk istinat duvarı, zemin ve dolgu malzemesi olmak üzere ayrı ayrı malzeme tanımlamaları yapılarak her birinin değerleri yazılıma girilmiştir. Modelleme aşamasında dolgu malzemesine ait doğal birim hacim ağırlığı (γ), doygun birim hacim ağırlığı (γsat) efektif kohezyon (c'), efektif içsel sürtünme açısı (ϕ'), elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν) ve hidrolik iletkenlik katsayısı (k) dikkate alınmıştır. Söz konusu parametreler, dolgu malzemesinin gerilme-deformasyon, kayma dayanımı ve drenaj karakteristiğini temsil etmekte olup, istinat duvarı-dolgu etkileşiminin birlikte çalışmasını ve şev stabilitesinin gerçekçi bir şekilde analiz edilmesi amacıyla sayısal modele malzeme parametresi olarak tek tek tanımlanmıştır.

Çizelge 3.4 Yol Şevinin topuk istinat duvarı için dolgu malzemesi parametreleri.

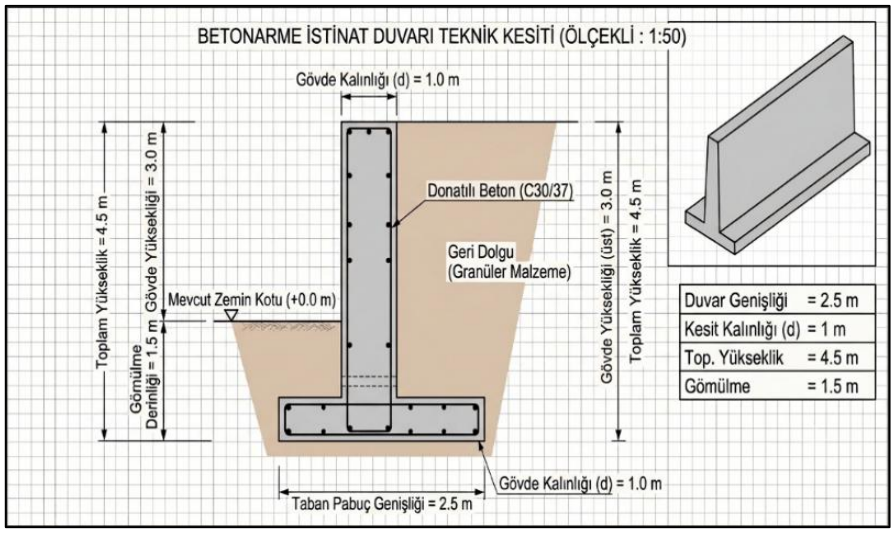
Parametre	Değer
γ (kN/m³)	15-17
γ_{sat} (kN/m³)	19-21
c (kPa)	3-8
φ (°)	45-55
E (kN/m²)	2900-3100
k (m/s)	1000
ν	0,3

Sayısal analizlerde şev stabilitesini artırmak amacıyla kullanılan topuklu istinat duvarı, PLAXIS 2D ortamında yapısal bir eleman olarak modellenmiştir. Duvarın geometrik özellikleri ile betonarme malzemeye ait mekanik parametreler modele tanımlanmış ve analizlerde dikkate alınmıştır.

Topuklu istinat duvarına ait malzeme özellikleri ve modelleme parametreleri çizelge 3.5'te, istinat duvarına ait yapısal ölçüler ise şekil 3.11'de sunulmuştur. Söz konusu parametreler, istinat duvarının zemin yükleri ve dış yüklemeler altında göstereceği deformasyon davranışını ve yapısal performansını gerçeğe en yakın şekilde temsil edecek biçimde belirlenmiştir. Böylece duvar–zemin etkileşimi sonlu elemanlar yöntemi kapsamında güvenilir bir şekilde analiz edilmiştir.

Çizelge 3.5 Yol Şevinin topuk istinat duvar parametreleri.

Parametre	Değer
EA (kN/m)	1,000E+09
EI (kNm²/m)	1,000E+08
d (m)	1
W (kN/m/m)	25
M_p(kNm/m)	1,000E+15
N_p (kN/m)	1,000E+15
ν	0



Şekil 3.11 İstinat duvarı ölçüleri.

Şev stabilitesini artırmak ve topuk bölgesinde bir karşı ağırlık oluşturarak kayma direncini desteklemek amacıyla uygulanan yapay destek dolgusuna ait malzeme parametreleri çizelge 3.6'da sunulmuştur. Bu parametreler, yapay destek dolgusunun mekanik dayanımını, sızma davranışını ve şev topuğundaki dengeleyici etkisini temsil etmek üzere modele girdi olarak tanımlanarak statik ve dinamik analizleri bu değerlere göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.6 Yol Şevinin yapay destek dolgusu malzeme parametreleri.

Parametre	**Değer**
γ (kN/m³)	15-17
γ_{sat} (kN/m³)	19-21
c (kPa)	3-8
φ (°)	45-55
E (kN/m²)	2900-3100
k (m/s)	1000
ν	0,3

Sayısal analizlerde şev stabilitesini artırmak amacıyla kullanılan ön germeli ankraj sistemine ait malzeme parametreleri Çizelge 3.7'de özetlenmiştir. Modelleme aşamasında; ankrajların eksenel rijitliği (EA), ön germe kuvveti, serbest ve kök boyu ile

ankraj aralıkları esas alınmıştır. Bu parametreler, ankraj elemanlarının gerilme-deformasyon davranışını ve şev gövdesine aktardığı destek kuvvetini temsil etmek üzere sayısal modele tanımlanmıştır.

Çizelge 3.7 Yol Şevinin ankraj malzemesi parametreleri.

Parametre	Değer
EA (KN)	2,000E+05
$L_{spacing}$ (m)	2,5
$F_{\max,tens}$ (KN)	1,000E+15
$F_{\max,comp}$ (KN)	1,000E+15

3.2.3 Kullanılan Deprem Verileri

Şev modellerinin (baraj vadi şevi ve yol şevi) dinamik sismik yükler altındaki sergilediği zamana bağlı davranışı, ivme tepkilerini ve şev gövdesinde meydana gelebilecek kalıcı (plastik) deformasyon karakteristiklerini belirlemek amacıyla zaman ortamında dinamik analizler yürütülmüştür. Statik stabilite analizlerinden farklı olarak sismik yüklemeler; zemin ve kaya kütlesi içerisinde zamana bağlı kayma gerilmeleri, boşluk suyu basıncı değişimleri ve dinamik ivme büyütmeleri meydana getirmektedir. Bu doğrultuda, şevlerin dinamik kararlılık sınırlarını ve en elverişsiz koşullardaki sismik performanslarını gerçekçi bir şekilde ortaya koyabilmek amacıyla ivme-zaman kaydı bazlı sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Analizlerde dinamik sismik girdi olarak, Afyonkarahisar ili Dinar ilçesinde 1 Ekim 1995 tarihinde meydana gelen ve sismolojik kayıtlarda yüzey dalgası büyüklüğü Ms = 6,1 (moment büyüklüğü Mw = 6,4) olarak tespit edilen Dinar depremine ait ivme-zaman kaydı tercih edilmiştir. Afyonkarahisar ve yakın çevresinin sismolojik yapısı incelendiğinde, havza kenar faylarının ve yerel zemin büyütmesi etkilerinin sismik dalga yayılımı üzerindeki belirleyici rolü göze çarpmaktadır. Bu bağlamda, 1995 Dinar Depremi'nin tarihsel süreçte bölgede en yüksek ivme değerlerine ve en yıkıcı yapısal hasarlara yol açan depremlerden biri olması, şev modellerinin rezonans ve dinamik yenilme mekanizmalarını test etmek adına bu kaydın seçilmesindeki temel gerekçeyi oluşturmuştur.

Sayısal modellemedeki sismik tasarım kriterlerinin ve spektral ivme parametrelerinin belirlenmesinde, 2018 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) hükümleri esas alınmıştır. Yönetmelik kapsamında, yapının veya mühendislik yapısının önem derecesi ve hedeflenen performans düzeyine bağlı olarak dört farklı deprem yer hareketi düzeyi (DD-1: Tekrarlanma periyodu 2475 yıl, DD-2: Tekrarlanma periyodu 475 yıl, DD-3: Tekrarlanma periyodu 72 yıl ve DD-4: Tekrarlanma periyodu 43 yıl) tanımlanmıştır. Çalışmaya konu olan Afyonkarahisar ili Çay ilçesindeki şev sahasının coğrafi konumuna özel sismik tehlike parametreleri, AFAD bünyesinde hizmet veren Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması üzerinden sahanın enlem ve boylam koordinatları girilerek sorgulanmış ve bölgenin sismik karakteristiği elde edilmiştir. Yapılan coğrafi sorgulamalar ve spektral hesaplamalar neticesinde, şev modellerinin sismik yükleme aşamasında referans alınan yer hareketi düzeylerine (özellikle standart tasarım depremi olan DD-2 düzeyine) ait tasarım parametreleri Çizelge 3.8'de detaylandırılmıştır. Sismik açıdan yüksek hassasiyete sahip bir hat üzerinde yer alan şevlerin analizlerinde, saha deprem tehlikesini en doğru şekilde temsil edebilmek amacıyla hedeflenen en büyük yer ivmesi (PGA) değeri 0,347g olarak saptanmıştır. PLAXIS 2D yazılımına aktarılan 1995 Dinar depremi ivme kaydı, hedeflenen 0,347g pik ivme değerine ulaşacak şekilde genlik ölçeklemesine tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.8 Deprem yer hareket düzeyine göre ivme değerleri.

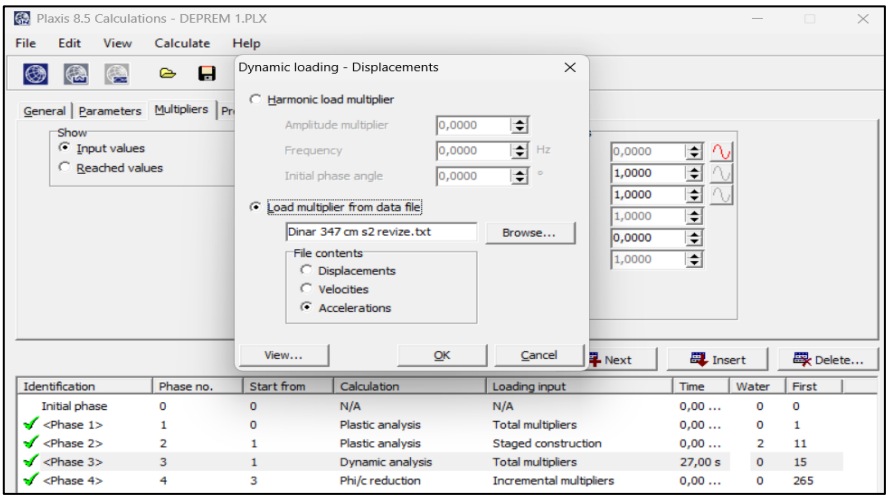
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	**PGA(g)**
DD-1 (Tekrarlanma periyodu 2475 yıl)	0,69
DD-2 (Tekrarlanma periyodu 475 yıl)	0,35
DD-3 (Tekrarlanma periyodu 72 yıl)	0,11
DD-4 (Tekrarlanma periyodu 43 yıl)	0,07

Sayısal modelleme aşamasında, sismik dalgaların modelin alt ve yan sınırlarından yapay olarak yansıyarak analiz sonuçlarını etkilemesini ve yalancı rezonans oluşumunu önlemek amacıyla, model tabanında ve yan sınırlarında sönümleyici viskoz sınır koşulları (absorbing boundaries) tanımlanmıştır. Bu sınır koşulları sayesinde, deprem

sırasında oluşan dalgaların model sınırlarında sönümlenmesi sağlanarak sonsuz ortam davranışı daha gerçekçi şekilde temsil edilmiştir.

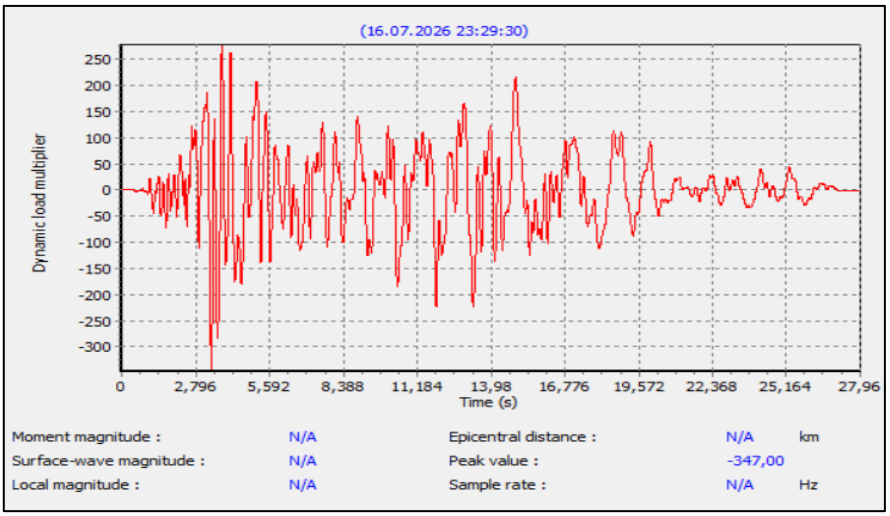
Çalışmada kullanılan deprem ivme kayıtları, öncelikle hedeflenen tasarım ivme spektrumuna uyum sağlayacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Bu işlem, kayıtların spektral ivme değerlerinin tasarım spektrumu ile uyumlu hale getirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçeklendirme sonucunda elde edilen ivme-zaman serileri, PLAXIS 2D yazılımına aktarılmış ve dinamik analizlerde yükleme girdisi olarak kullanılmıştır.

Dinamik analizlerde, ölçeklendirilmiş ivme-zaman kayıtları ana kaya veya yarı sonsuz ortam kabulüyle oluşturulan şev modellerinin taban sınırına uygulanmıştır. Böylece sismik dalgaların tabandan başlayarak şev kütlesi boyunca yayılımı ile şev yüzeyinde meydana gelen ivme, yer değiştirme ve deformasyon tepkileri zaman tanım alanında adım adım analiz edilmiştir. Deprem ivme kaydının PLAXIS 2D ortamında dinamik yükleme olarak tanımlandığı giriş sekmesi ise şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12 Dinamik yükleme adımı.

Deprem yer hareket düzeyi DD-2 ye göre dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Buna bağlı olarak DD-2 ye ait 0,347 PGA(g) değerine göre Dinar deprem kaydı analiz programı kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Ölçekli deprem kaydı hazırlanan modellerin zemin profilleri tabanlarına tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ölçekli deprem kaydına ilişkin ivme-zaman grafiği şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.13 Ölçeklendirilmiş deprem kaydı.

4. BULGULAR

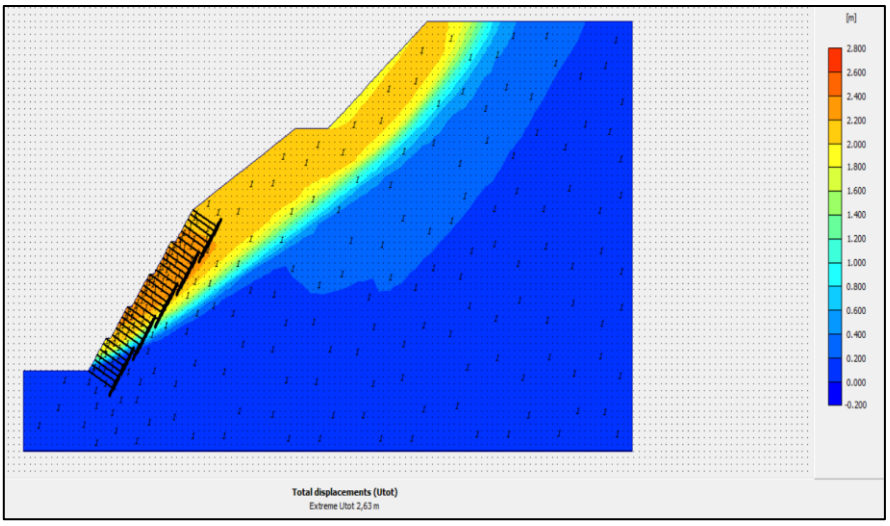
Bu bölümde, Afyonkarahisar ili Çay ilçesinde bulunan iki farklı şev yapısı için vaka analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında baraj vadi şevi ve yol şevi, mevcut durumları ile farklı iyileştirme senaryoları dikkate alınarak incelenmiştir. Her iki şev için drenaj uygulamaları ve gerekli görülen iyileştirme önlemleri statik ve dinamik yükler altında PLAXIS 2D sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, şev stabilitesi, deformasyon davranışı ve iyileştirme yöntemlerinin etkinliği açısından geoteknik mühendisliği perspektifinde değerlendirilmiştir.

4.1 Baraj Vadi Şevi Bulguları

Baraj şevinin farklı işletme ve çevre koşulları altındaki davranışını incelemek amacıyla; mevcut (drenajsız) durum ile gövde içerisine yerleştirilen 5 m, 10 m ve 20 m uzunluğundaki drenaj sistemleri olmak üzere dört ana senaryo modellenmiş ve bu senaryolar yeraltı su seviyesinin (YASS) beş farklı yükselim aşaması (YASS-1'den YASS-5'e) altında statik ve dinamik yükleme koşullarına tabi tutulmuştur. Yeraltı suyunun bulunmadığı başlangıç kuru koşullarında yapılan statik analizlerde, mevcut şevin güvenlik katsayısı Fs = 2,020 olarak hesaplanarak şevin yüksek bir stabilite rezervine sahip olduğu ve güvenli bölgede kaldığı görülmüştür. Ancak YASS-1'den YASS-5'e doğru yeraltı su seviyesinin yükseldiği aşamalı senaryolarda, hidrolik yüklerin artışına bağlı olarak statik güvenlik katsayılarında düzenli bir düşüş kaydedilmiş; mevcut şev yapısında ankraj sistemi bulunmasına rağmen su seviyesinin yükseldiği dinamik analizlerde şevin güvenlik kriterlerini karşılayamadığı ve dinamik olarak yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, şev içerisindeki boşluk suyu basıncı artışının yapısal destek elemanlarının sağladığı tutucu kuvvetleri sönümlediğini ve tek başına ankraj uygulamasının hidrodinamik etkiler altında stabiliteyi korumada yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır.

Yeraltı su seviyesindeki bu artışa karşı gövde içerisine tasarlanan drenaj sistemlerinin entegre edilmesiyle birlikte şev davranışında ve güvenlik katsayılarında belirgin

iyileşmeler elde edilmiştir. Modellemede 5 m uzunluğundaki kısa hatlı drenaj uygulaması şev yüzeyine yakın bölgelerdeki boşluk suyu basıncını kısmen sönümlese de, özellikle yüksek su tablolarında ve dinamik yükler altında şevi güvenli sınıra ulaştırmaya yetmiştir ama riskli kalmıştır. Buna karşın drenaj boyunun 10 m ve 20 m'ye çıkarılması, şev gövdesi içerisindeki sızma çizgisini efektif bir şekilde aşağı çekmiş ve hem statik yükselim aşamalarında hem de dinamik analizlerde güvenlik katsayısı değerlerini kritik eşiklerin üzerine çıkararak şevin tamamen güvenli kabul edilebilecek seviyelere ulaşmasını sağlamıştır. Dinamik analizlerden elde edilen en kritik bulgu, mevcut durumda tek başına stabilizasyon sağlayan ankraj sistemlerinin su seviyesinin yükselmesi ve dinamik etki alması ile güvenlik katsayısının düşmesine karşın 10 m ve 20 m drenaj sistemlerinin modele dahil edilmesiyle birlikte tamamen işlevsel hale gelmesidir. Drenaj sistemleri, dinamik yükleme sırasında efektif gerilme kayıplarını sınırlandırarak ankrajların zemin içerisindeki köklenme bölgelerinin kesme dayanımını korumasını sağlamış olup, bu durum baraj şevleri gibi yüksek su yüküne maruz kalan yapılarda hidrolik kontrolün dinamik stabilite için en az yapısal kontrol kadar birincil ve tamamlayıcı bir mühendislik önlemi olduğunu doğrulamaktadır. Baraj şevinin mevcut hali analiz sonucu şekil 4.1'de gösterilmiştir. Ayrıca sistemin güvenlik katsayısı Fs=2,020 olarak analizlerde hesaplanmıştır.



Şekil 4.1 Mevcut baraj vadi şevi statik analiz çıktısı.

Baraj şevi için mevcut hal ve 5 farklı yeraltı su seviyesi senaryosunda statik durumda güvenlik katsayısı sonuçları çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Su seviyesi YASS-1'den

YASS-5'e kadar kademeli olarak arttırılmıştır. Su seviyesi arttıkça güvenlik katsayısındaki düşüşler gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1 Baraj vadi şevi -YASS arasındaki statik analiz sonuçları.

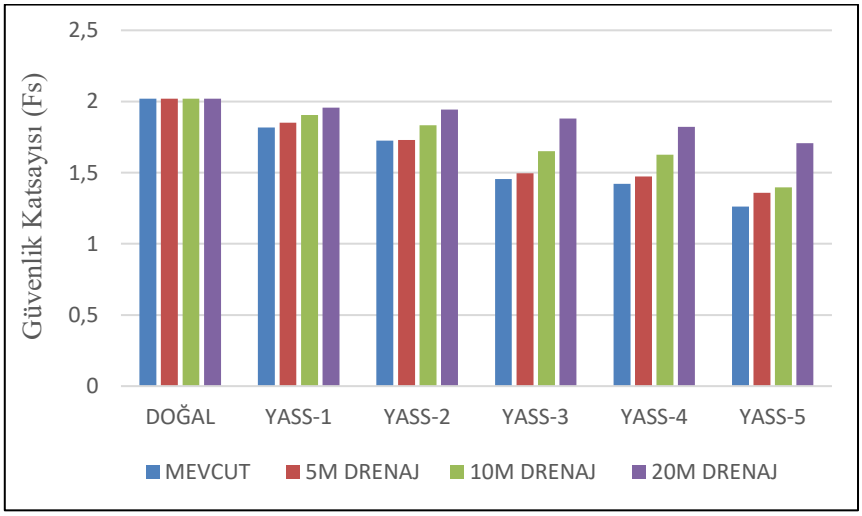
Durum	Güvenlik Katsayısı (Fs)
Doğal	2,02
YASS-1	1,817
YASS-2	1,726
YASS-3	1,454
YASS-4	1,421
YASS-5	1,261

Baraj şevinde yeraltı suyunun şev stabilitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek ve drenaj sisteminin performansını ortaya koymak amacıyla, çalışma kapsamında beş farklı yeraltı su seviyesi senaryosu oluşturulmuştur. Her bir su seviyesi için şev içerisine 5 m, 10 m ve 20 m uzunluklarında drenaj elemanları tanımlanarak yeraltı suyunun kontrollü bir şekilde uzaklaştırılması hedeflenmiştir. Böylece drenaj uzunluğunun şevin duraylılığı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Oluşturulan modeller üzerinde öncelikle statik analizler, ardından deprem etkisini temsil eden dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve farklı drenaj uzunluklarının güvenlik katsayısı ile deformasyon davranışına olan etkileri değerlendirilmiştir.

Statik analiz sonuçları incelendiğinde, drenaj uygulamasının yeraltı suyu basınçlarını azaltarak efektif gerilmelerin artmasına ve buna bağlı olarak şev stabilitesinin iyileşmesine katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca drenaj uzunluğunun artmasıyla birlikte suyun daha etkin şekilde uzaklaştırıldığı ve güvenlik katsayısında belirgin iyileşmeler meydana geldiği belirlenmiştir. Beş farklı su seviyesi için gerçekleştirilen drenajlı statik analizlerden elde edilen güvenlik katsayıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş olup, güvenlik katsayısı değerlerinin sonuçları çizelge 4.2'de sunulmuştur. Su seviyesi arttıkça güvenlik katsayısındaki düşüşler ve drenaj boyu uzadıkça güvenlik katsayısındaki artışlar da rakamsal olarak sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 YASS-drenaj arasındaki statik analiz sonuçları.

Durum	Drenajsız Mevcut (Fs)	5m Drenajlı (Fs)	10m Drenajlı (Fs)	20m Drenajlı (Fs)
Doğal	2,02	2,02	2,02	2,02
YASS-1	1,817	1,851	1,905	1,956
YASS-2	1,726	1,73	1,833	1,944
YASS-3	1,454	1,495	1,65	1,88
YASS-4	1,451	1,473	1,626	1,822
YASS-5	1,261	1,359	1,397	1,708



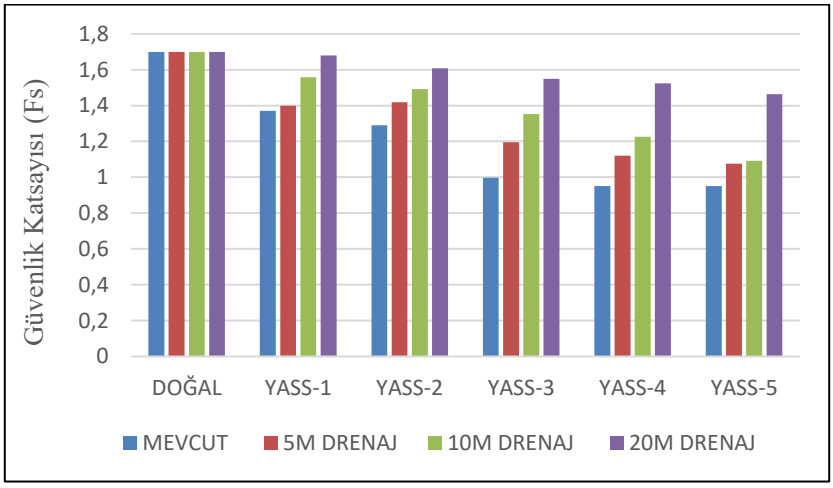
Şekil 4.2 Drenajlı YASS- güvenlik katsayısı arasındaki ilişki.

Baraj gövdesi içerisine yerleştirilen üç farklı drenaj sistemi (5 m, 10 m ve 20 m) için modellenen beş farklı yeraltı su seviyesi yükselim durumunun (YASS-1'den YASS-5'e) her biri için dinamik analizler ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Dinamik yükler altında şev kararlılığında meydana gelen değişimleri ve drenaj uzunluğunun stabilizasyon üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılan bu analizlerden elde edilen güvenlik katsayısı sonuçları genel olarak incelendiğinde çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Şekil 4.3'de ise drenajsız ve drenajlı hallerin YASS-güvenlik katsayısı arasındaki ilişkinin dağılımı gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Baraj vadi şevinin dinamik analiz sonuçları.

Durum	Drenajsız (Fs)	5m Drenajlı (Fs)	10m Drenajlı (Fs)	20m Drenajlı (Fs)
Doğal	1,70	1,70	1,70	1,70
YASS-1	1,37	1,4	1,558	1,679
YASS-2	1,29	1,418	1,492	1,608
YASS-3	0,998	1,196	1,352	1,55
YASS-4	0,95	1,12	1,226	1,524
YASS-5	0,9	1,076	1,092	1,464



Şekil 4.3 Drenajlı ve drenajsız YASS-Fs arasındaki dinamik analiz ilişkisi.

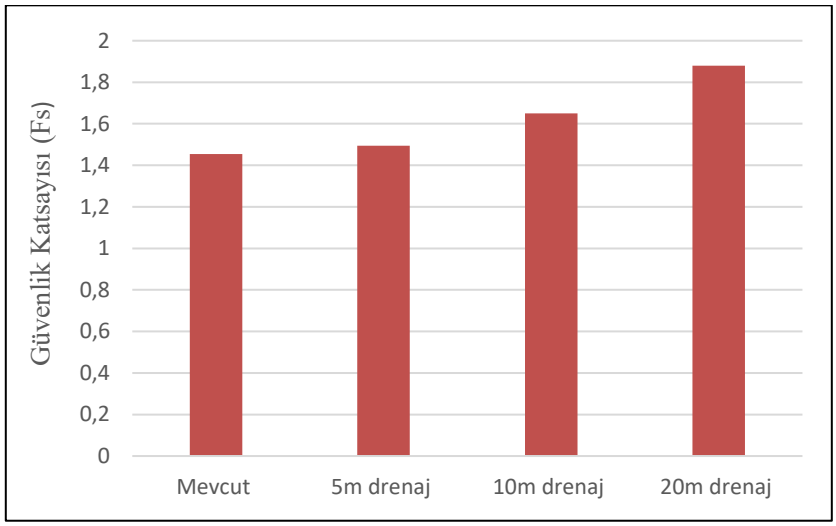
Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm statik ve dinamik analizlerin sonuçları, şev davranışındaki değişimlerin farklı yeraltı su seviyesi senaryoları ve drenaj koşulları altında sistematik olarak değerlendirilebilmesi amacıyla karşılaştırmalı tablolar halinde sunulmuştur. Böylece analizlerden elde edilen güvenlik katsayıları, deplasman değerleri ve stabilite değişimleri karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmiş, farklı analiz koşullarının şev davranışı üzerindeki etkileri sayısal olarak ortaya konulmuştur.

Bununla birlikte, tez metnindeki görsel yoğunluğun azaltılması, tekrarların önlenmesi ve değerlendirmelerin daha anlaşılır bir şekilde sunulabilmesi amacıyla, yalnızca kritik davranışı temsil eden YASS-3 seviyesine ait statik ve dinamik analiz sonuçları görsel

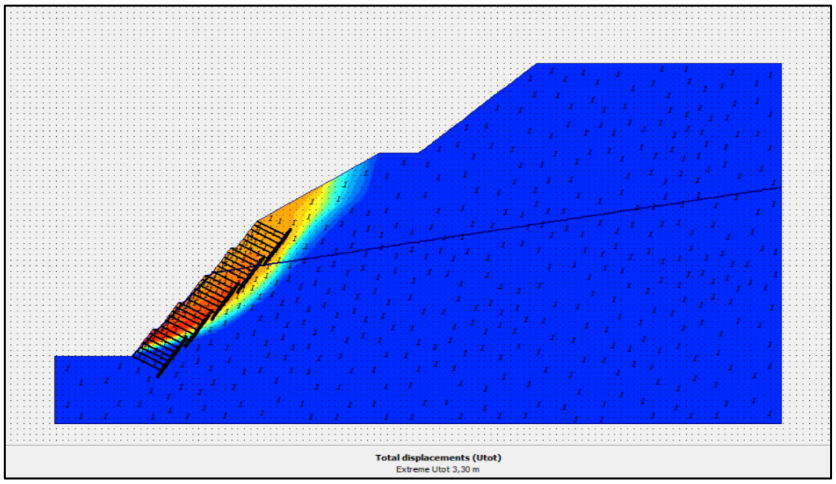
figürlerle desteklenmiştir. YASS-3 seviyesi, analizler sonucunda şev stabilitesinin en kritik düzeyde etkilendiği durumu temsil ettiğinden, şev davranışına ait analiz görselleri eklenmiştir. Çizelge 4.4'te ise YASS-3 seviyesine ait statik analizlerden elde edilen güvenlik katsayısı sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.4 YASS-3'e ait statik analiz güvenlik katsayıları.

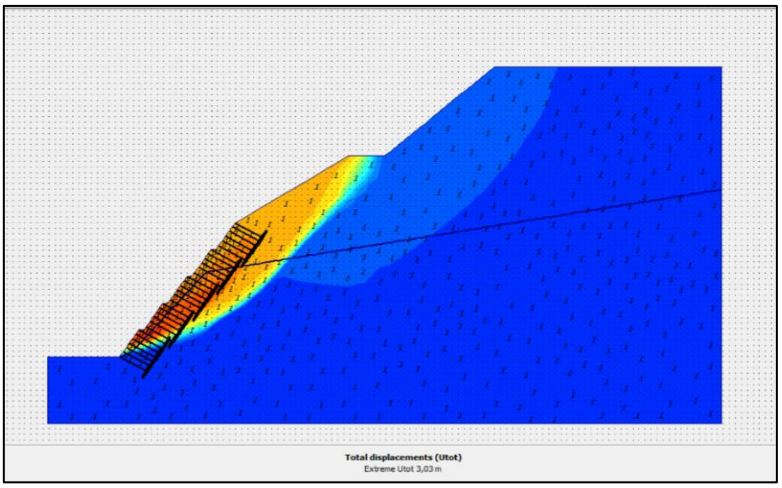
Doğal (Fs)	5m Drenajlı (Fs)	10m Drenajlı (Fs)	20m Drenajlı (Fs)
1,454	1,495	1,650	1,880



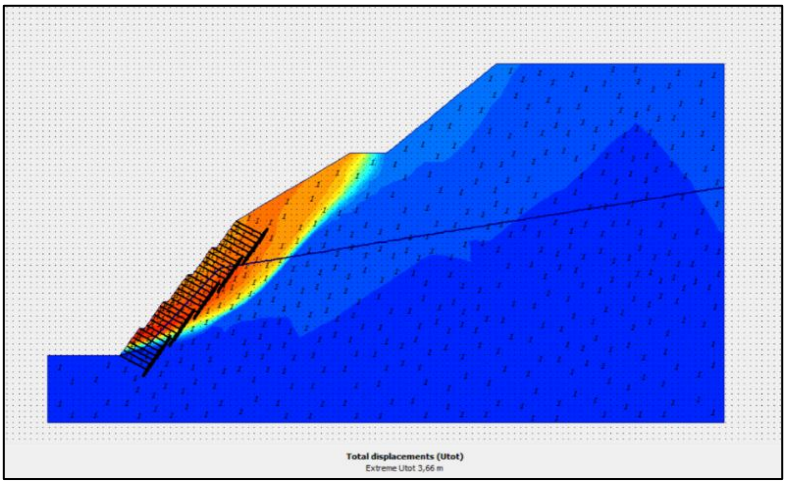
Şekil 4.4 YASS-3'e ait statik analiz güvenlik katsayıları.



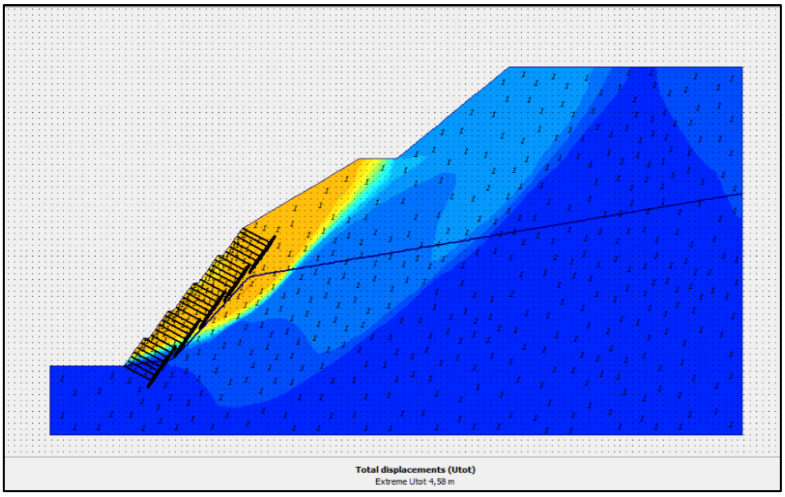
Şekil 4.5 Drenajsız YASS-3 statik analiz sonucu.



Şekil 4.6 5m drenajlı YASS-3 statik analiz sonucu.



Şekil 4.7 10m drenajlı YASS-3 statik analiz sonucu.

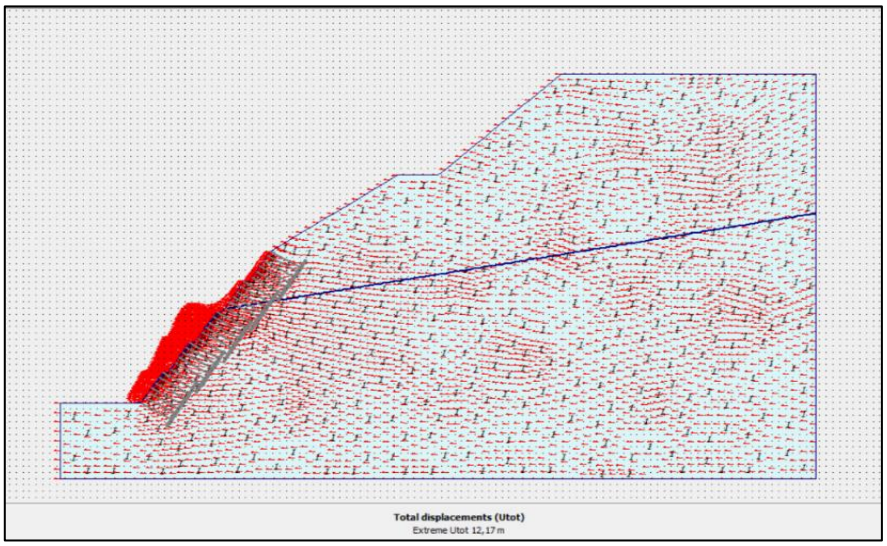


Şekil 4.8 20m drenajlı YASS-3 statik analiz sonucu.

YASS-3'e ait drenajlı ve drenajsız dinamik analiz sonuçları çizelge 4.5'de gösterilmiştir. Çizelgede, drenajlı ve drenajsız koşullar altında elde edilen dinamik güvenlik katsayıları karşılaştırmalı olarak sunulmuş, böylece drenaj sisteminin şev davranışına etkisi sayısal verilerle ortaya konmuştur.

Çizelge 4.5 YASS-3'e ait dinamik analiz güvenlik katsayıları.

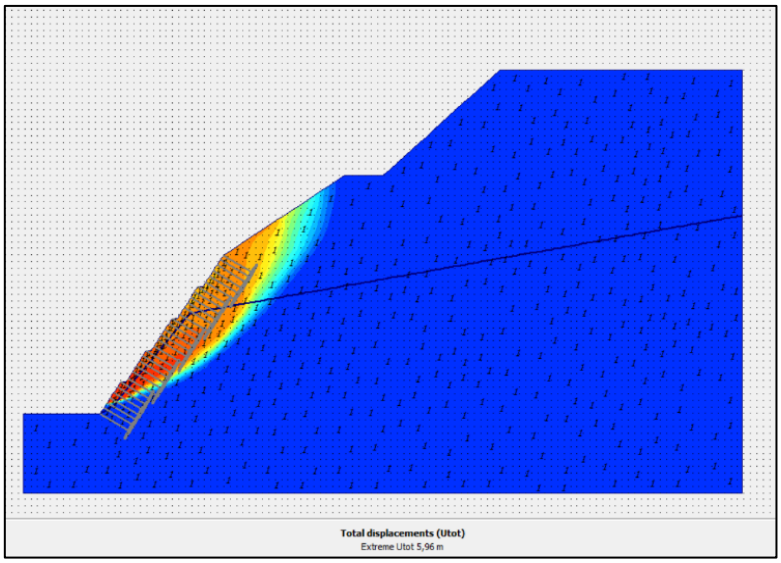
Doğal (Fs)	5m Drenaj (Fs)	10m Drenaj (Fs)	20m Drenaj (Fs)
0,998	1,196	1,352	1,55



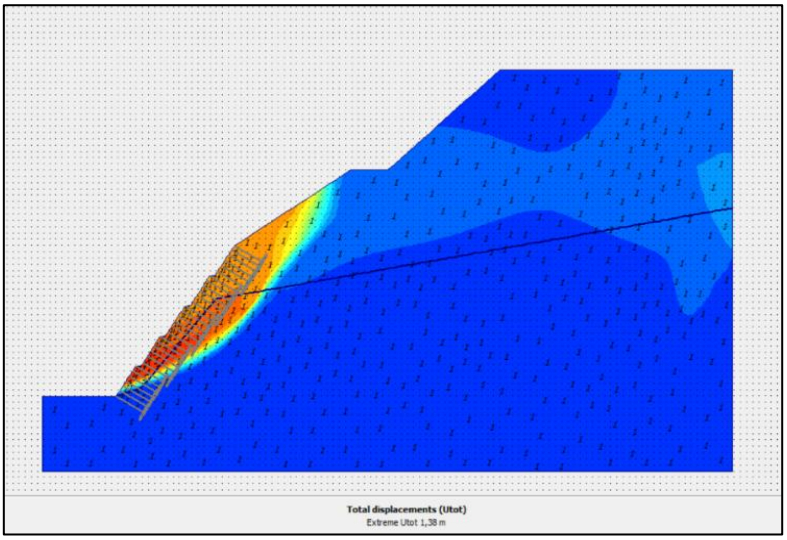
Şekil 4.9 Drenajsız YASS-3 dinamik analiz sonucu.

PLAXIS 2D yazılımı tarafından elde edilen analiz çıktıları, model davranışının hem sayısal hem de görsel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Analiz sonuçları; güvenlik katsayısı, deplasmanlar, gerilme dağılımları ve boşluk suyu basıncı gibi mühendislik parametrelerini sayısal veriler halinde sunarken, renk skalaları, deformasyon şekilleri ve sonlu eleman ağı (mesh) ile görsel olarak da göstermektedir.

Bu görsel çıktılar sayesinde kritik gerilme bölgeleri, maksimum deformasyon alanları ve potansiyel kayma yüzeyleri kolaylıkla belirlenebilmekte, şevin statik ve dinamik yükler altındaki davranışı daha sağlıklı değerlendirilebilmektedir.

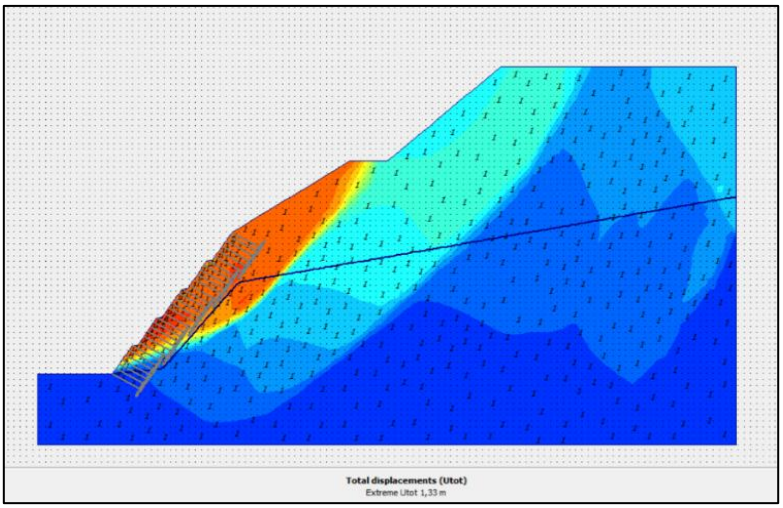


Şekil 4.10 5m drenajlı YASS-3 dinamik analiz sonucu.



Şekil 4.11 10m drenajlı YASS-3 dinamik analiz sonucu.

Baraj vadi şevine ait gerçekleştirilen bütün dinamik ve statik analizlerin sonuçları, beş farklı yeraltı su seviyesi senaryolarında ve 5m, 10m ve 20m drenaj sistemi ile iyileştirilmesinin hepsinin bir arada bulunduğu güvenlik katsayılarının analiz sonuçları ise çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Bu kapsamlı değerlendirme, baraj vadi şevinin hem statik hem de dinamik koşullar altında davranışını bütüncül olarak ortaya koymakta ve mühendislik açısından kritik parametrelerin etkisini sayısal verilerle değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.



Şekil 4.12 20m drenajlı YASS-3 dinamik analiz sonucu.

Baraj vadi şevine ait gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında toplamda 48 adet analiz yapılmış olup, bu analizler hem statik hem de dinamik koşullar altında şevin güvenlik katsayılarının ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini sağlamıştır.

Çizelge 4.6 Baraj vadi şevine ait dinamik ve statik analiz sonuçları.

Durum	**Drenajsız (Fs)**	**5m Drenajlı (Fs)**	**10m Drenajlı (Fs)**	**20m Drenajlı (Fs)**
Doğal Statik	2,02	2,02	2,02	2,02
Doğal Dinamik	1,7	1,7	1,7	1,7
YASS-1 Statik	1,817	1,851	1,905	1,956
YASS-1 Dinamik	1,37	1,4	1,558	1,679
YASS-2 Statik	1,726	1,73	1,833	1,944
YASS-2 Dinamik	1,29	1,418	1,492	1,608
YASS-3 Statik	1,454	1,495	1,65	1,88
YASS-3 Dinamik	0,998	1,196	1,352	1,55
YASS-4 Statik	1,421	1,473	1,626	1,822
YASS-4 Dinamik	0,95	1,12	1,226	1,524
YASS-5 Statik	1,261	1,359	1,397	1,708
YASS-5 Dinamik	0,9	1,076	1,092	1,464

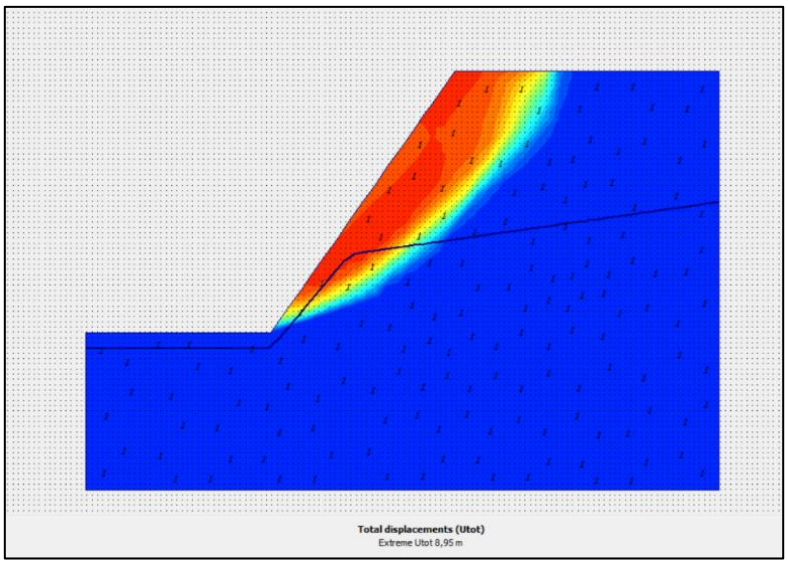
4.2 Yol Şevi Bulguları

Çay ilçesi karayolu güzergâhında yer alan doğal yol şevi, mevcut durumda kararlı (stabil) bir görünüm sergilemekle birlikte, yüzeyde yer yer lokal kopmalar ve parça düşmeleri şeklinde duraysızlık emareleri barındırmaktadır. Üzerinde herhangi bir mühendislik yapısı veya iyileştirme uygulaması bulunmayan söz konusu şevin stabilitesini belirlemek amacıyla, saha koşullarındaki mevcut yeraltı su seviyesi ve hidrolik yükler dikkate alınarak statik limit denge analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler kapsamında öncelikle şevin doğal durumu modellenmiş; ardından hidrodinamik basınçların hafifletilmesi amacıyla 5 m, 10 m ve 20 m olmak üzere üç farklı yatay drenaj kombinasyonu sisteme entegre edilmiştir. Yapılan sayısal değerlendirmeler, drenaj sistemlerinin tek başına yeraltı suyu rejimini kontrol etmede ve hidrolik kararsızlıkları gidermede yetersiz kaldığını, dolayısıyla şevin güvenlik katsayısında anlamlı bir artış sağlamadığını ortaya koymuştur.

Drenaj önlemlerinin tek başına yetersiz kalması üzerine, şev geometrisi ve çevresel koşullar dikkate alınarak üç farklı geoteknik iyileştirme senaryosu (topuk istinat yapısı, yapay destek dolgusu ve ankraj sistemi) senaryosu ele alınmıştır. Çay ilçesi yol şevinde yürütülen karşılaştırmalı analizler, hidrolik ve mekanik kararsızlıkların sadece drenaj önlemleriyle optimize edilemeyeceğini; güvenlik katsayısını hedef limitlerin üzerine çıkarmayı hedefleyen analizler hem dinamik hem de statik olarak hesaplanmıştır.

Yol şevinin mevcut göçme durumunu temsil eden yeraltı suyu seviyesi belirlenmiş ve tüm statik analizler bu su seviyesi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut koşullara ait statik analiz sonuçları şekil 4.13'te sunulmaktadır. Analiz sonuçlarında, potansiyel kayma yüzeyinin geliştiği ve gerilmelerin yoğunlaştığı bölgenin şevin tepe kesiminde yer aldığı belirlenmiş olup, bu kritik bölge şekil üzerinde ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Ayrıca toplam deplasman dağılımları incelendiğinde, en büyük yer değiştirmelerin de aynı bölgede meydana geldiği görülmüş ve bu durum potansiyel göçme mekanizması ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Gerçekleştirilen statik analiz sonucunda şevin güvenlik katsayısı (Fs) 1,052 olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen bu değer, şevin sınır denge durumuna oldukça yakın olduğunu ve mevcut yeraltı suyu seviyesi altında stabilitenin kritik düzeyde bulunduğunu göstermektedir. Güvenlik katsayısının 1,0 değerine yakın olması, şevin dış yükler veya yeraltı suyu seviyesinde meydana gelebilecek olası artışlar karşısında göçmeye eğilimli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle mevcut şev koşullarının uzun dönemli güvenlik açısından yeterli olmadığı değerlendirilmiş ve şev stabilitesinin artırılmasına yönelik drenaj ve diğer iyileştirme yöntemlerinin uygulanmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.13 Yol şevine ait mevcut durum statik analiz sonucu.

Yol şevinde mevcut durumda karşımıza çıkan su seviyesinin yüksekliğinden kaynaklı suyu drene etmek için şevimize 3 farklı 5m, 10m ve 20m uzunluğunda drenaj sistemi uygulanmıştır. Drenajlı yol şevimizin güvenlik katsayısı değerleri çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

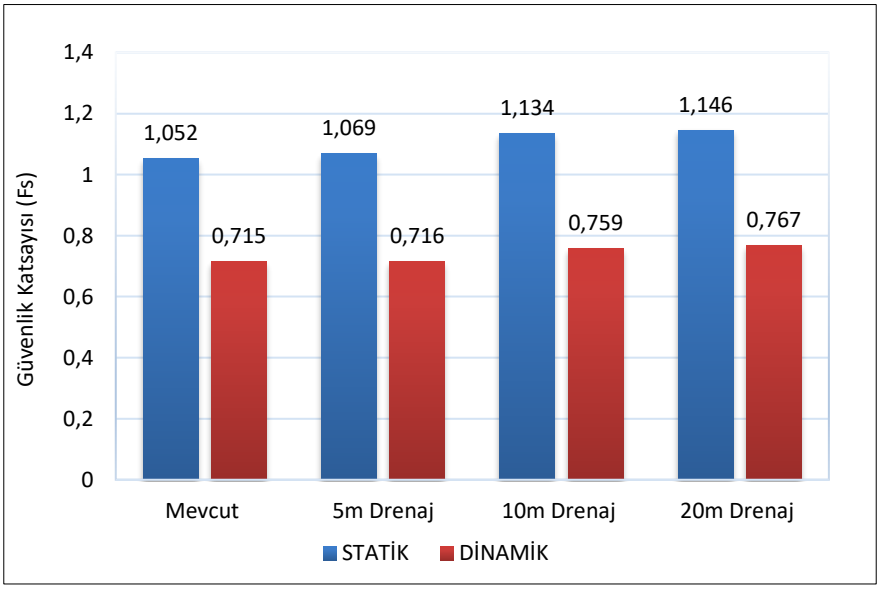
Çizelge 4.7 Mevcut yol şevinin drenajlı statik analiz sonuçları.

Doğal (Fs)	**5m Drenaj (Fs)**	**10m Drenaj (Fs)**	**20m Drenaj (Fs)**
1,052	1,069	1,134	1,146

Mevcut halde riskli bir düzeyde su seviyesi olan yol şevimizde drenaj sistemlerinin yeterli gelmediği ve sistemle entegre bir şekilde çalışmadığı analiz sonuçlarında karşımıza çıkmıştır. Mühendislik açısından statik halde yeterli bir güvenlik katsayısına ulaştığımız sonuçlarda görülmektedir. Yol şevinin dinamik analiz sonuçları ise çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

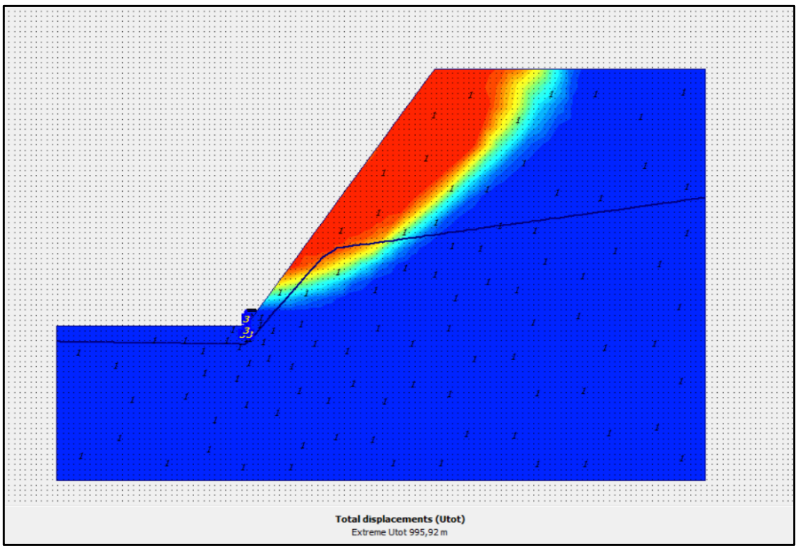
Çizelge 4.8 Mevcut yol şevinin drenajlı dinamik analiz sonuçları.

Doğal (Fs)	**5m Drenaj (Fs)**	**10m Drenaj (Fs)**	**20m Drenaj (Fs)**
0,715	0,716	0,759	0,767



Şekil 4.14 Yol şevinin statik ve dinamik analiz sonuçları.

Dinamik analiz sonuçları ele alındığında mühendislik açısından yol şevimizin güvenli olmadığı karşımıza çıkan güvenlik katsayısı değerleri ile bize bunu göstermiştir. Mühendislik açısından dinamik halde de sistemin güvenli tarafta kalmasını sağlamamız gerekmektedir. Bunun için sistemin drenajlar ile duyarlı hale gelmediğini analiz sonuçlarımız göstermiştir. Diğer bir mühendislik hizmeti senaryomuz olan topuk istinat duvarı ile yapıyı destekleyip analizlerimiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.15 Yol şevinin topuk istinat duvarlı statik analiz sonuçları.

Mevcut durumu istinat duvarı ile güçlendirilerek aynı zamanda drenaj sisteminin de uygulandığı yapısal analiz sonuçlarımız ise çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

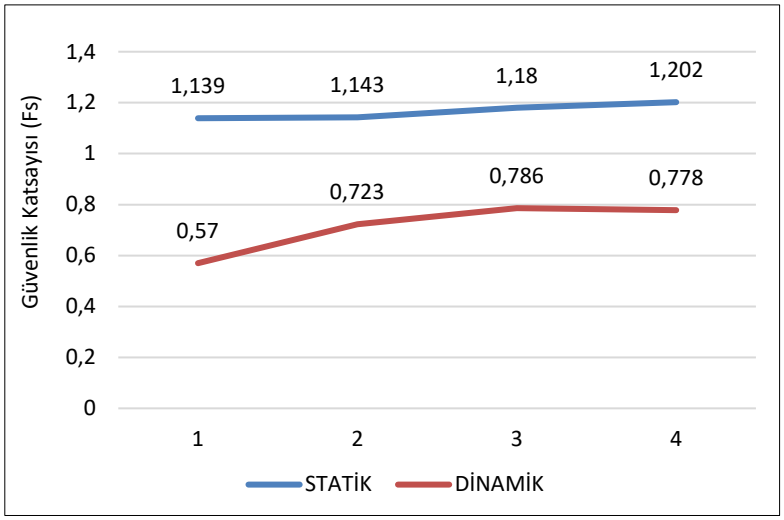
Çizelge 4.9 Topuk İstinat duvarlı yol şevinin statik analiz sonuçları.

Doğal (Fs)	**İstinat Duvarı (Fs)**	**Duvarlı 5m Drenaj (Fs)**	**Duvarlı 10m Drenaj (Fs)**	**Duvarlı 20m Drenaj (Fs)**
1,052	1,139	1,143	1,18	1,202

İstinat yapısının da statik analiz sonuçları mühendislik açısından güvenli tarafta olduğu sonuçlarda gösterilmiştir; ancak dinamik analiz sonuçlarının da güvenli alanda olması gerektiği için her biri için dinamik analizler yapılmıştır. Dinamik analiz sonuçları ise çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 Topuk istinat duvarlı yol şevinin dinamik analiz sonuçları.

İstinat Duvarı (Fs)	**Duvarlı 5m Drenaj (Fs)**	**Duvarlı 10m Drenaj (Fs)**	**Duvarlı 20m Drenaj (Fs)**
0,57	0,723	0,786	0,778



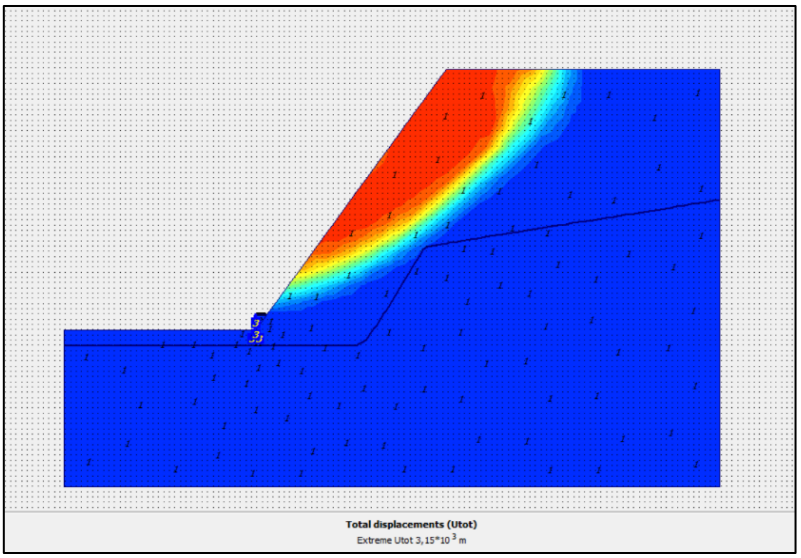
Şekil 4.16 Yol şevinin topuk istinat duvarlı statik ve dinamik analiz sonuçları.

İstinat duvarı analizlerinde en iyi sonucu, 20 m drenajlı durumda gerçekleştirilen statik analiz vermiştir. Bu senaryoda elde edilen güvenlik katsayısı Fs = 1,202 olup, mühendislik açısından yeterli ve güvenli kabul edilmektedir. Ancak yapılan analizlerde açıkça görüldüğü üzere, baraj vadi şevinde etkili olan drenaj sistemi burada aynı ölçüde çalışmamış; belirli bir iyileştirme sağlamasına rağmen güvenlik katsayısı üzerindeki etkisi sınırlı kalmıştır. Bu durum, drenaj sisteminin istinat duvarı özelinde baraj şevine kıyasla daha düşük etkinlik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.17'de sunulan analiz sonuçları, kayma yüzeyinin oluştuğu kritik bölgeyi açıkça göstermektedir. Kayma gerilmesinin yoğunlaştığı riskli bölge, tüm analizlerde benzer şekilde tepe noktasında ortaya çıkmış; bu bölgede gerilmelerin diğer kesimlere kıyasla daha fazla olduğu belirlenmiştir. Topuk bölgesinden gerilmelerin artacağı öngörülerek tasarlanan istinat duvarı, beklenenin aksine tepe noktasındaki yoğun gerilme ve kayma yüzeyi oluşumlarını azaltmada yeterli olmamıştır. Dolayısıyla, sistemin güçlendirilmesi yönünde yapılan müdahale, analiz sonuçlarının da gösterdiği gibi, şevin kritik davranışını değiştirmemiştir.

Ayrıca, yol şevine ait detaylı kayma yüzeyi yine şekil 4.17'de sunulmuş olup, bu görsel analiz bulgularını destekleyici niteliktedir. Görselde, kayma yüzeyinin gelişim biçimi ve gerilme dağılımı net bir şekilde ortaya konmuş; özellikle tepe noktasındaki kritik

davranışın mühendislik açısından riskli bir bölge oluşturduğu vurgulanmıştır. Bu bulgular, istinat duvarı tasarımında yalnızca drenaj sistemine güvenmenin yeterli olmadığını, tepe bölgesindeki gerilme yoğunluğunu azaltacak ek mühendislik çözümlerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.



Şekil 4.17 Yol şevinin 20m drenajlı topuk istinat duvarı statik analiz sonucu.

Dinamik analiz sonuçları değerlendirildiğinde, elde edilen güvenlik katsayıları yol şevinin deprem etkisi altında mühendislik açısından yeterli güvenliği sağlayamadığını ortaya koymuştur. Dinamik yüklemeler altında güvenlik katsayısının kabul edilebilir sınır değerlerin altında kalması, mevcut şev geometrisinin ve zemin koşullarının deprem etkileri karşısında yetersiz olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, şev stabilitesinin artırılması ve sistemin dinamik koşullar altında güvenli tarafta kalmasının sağlanması amacıyla ilave bir iyileştirme yöntemi olarak yapay destek dolgusu uygulanmıştır. Bu kapsamda, farklı geometriye sahip yapay destek dolguları modele tanımlanarak hem statik hem de dinamik analizler yeniden gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, destek dolgusunun şevin dayanımını artırdığı, potansiyel kayma yüzeyini geriye çektiği ve güvenlik katsayısında iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Yapay destek dolgusu uygulanan modellere ait statik ve dinamik analizlerden elde edilen güvenlik katsayısı sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş olup, sonuçlar sırasıyla çizelge 4.11 ve çizelge 4.12'de sunulmuştur. Yapay destek dolgu uygulamamızda ise yine en iyi çalışan senaryo 20m drenajlı statik analizdir. İstinat duvarına göre daha iyi çalıştığı analiz

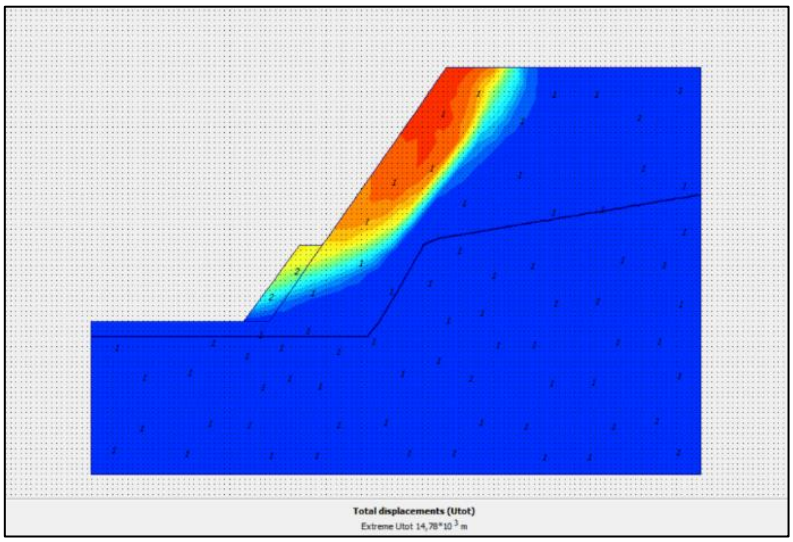
sonuçlarında gösterilmektedir. Aynı zamanda gerilmelerin bir kısmını da sönümlediği şekil 4.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Yapay destek dolgulu yol şevinin statik analiz sonuçları.

Doğal (Fs)	Yapay Dolgu (Fs)	Dolgulu 5m Drenaj (Fs)	Dolgulu 10m Drenaj (Fs)	Dolgulu 20m Drenaj (Fs)
1,052	1,149	1,157	1,193	1,202

Çizelge 4.12 Yapay destek dolgulu yol şevinin dinamik analiz sonuçları.

Yapay Dolgu (Fs)	Dolgulu 5m Drenaj (Fs)	Dolgulu 10m Drenaj (Fs)	Dolgulu 20m Drenaj (Fs)
0,746	0,75	0,775	0,781



Şekil 4.18 Yol şevinin 20m drenajlı yapay destek dolgulu statik analiz sonucu.

Yol şevi için yapılan drenaj sistemleri, topuk istinat duvarı ve yapay destek dolgusu üç yapısal elemanda sistemle entegre bir biçimde çalışmadığı yapılan analizlerle ortaya koyulmuştur. Yol şevinin tepe noktasında gerilme artışları olduğu için diğer bir mühendislik yapısı olan ankraj ile sistemi iyileştirerek analizler yapılmıştır. Çizelge

4.13’de 10m uzunlukta ankrajlarla iyileştirmiş yol şevinin statik analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.13 10m ankrajlı yol şevinin statik analiz sonuçları.

Doğal (Fs)	10m Ankraj (Fs)	Ankrajlı 5m Drenaj (Fs)	Ankrajlı 10m Drenaj (Fs)	Ankrajlı 20m Drenaj (Fs)
1,052	1,688	1,697	1,725	1,756

Ankrajla iyileştirdiğimiz yol şevimizin statik sonuçları mühendislik açısından güvenli tarafta kaldığımız ve yeterli olduğunu göstermektedir. Önemli olan dinamik analizler sonuçlarında da güvenli tarafta kalabilmektir. Yapılan dinamik analiz sonuçları ise çizelge 4.14’de gösterilmiştir.

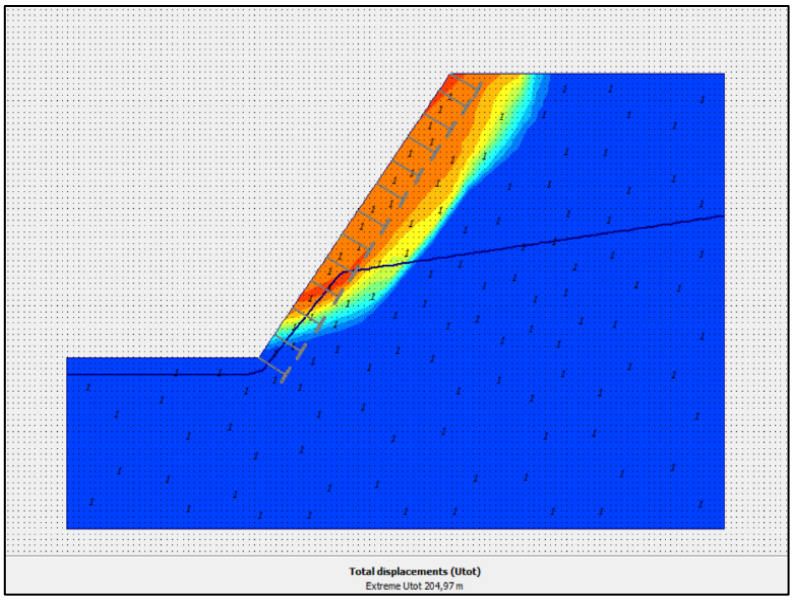
Çizelge 4.14 10m ankrajlı yol şevinin dinamik analiz sonuçları.

10m Ankraj (Fs)	Ankrajlı 5m Drenaj (Fs)	Ankrajlı 10m Drenaj (Fs)	Ankrajlı 20m Drenaj (Fs)
1,071	1,098	1,126	1,155

Yol şevi için gerçekleştirilen iyileştirme alternatiflerinin değerlendirilmesi sonucunda, hem statik hem de dinamik yükleme koşulları altında yeterli güvenlik düzeyini sağlayan yöntemin ankraj sistemi olduğu belirlenmiştir. Ankraj uygulaması ile güçlendirilen şevin dinamik davranışı, yapılan sayısal analizler sonucunda ayrıntılı olarak incelenmiş ve elde edilen görsel çıktılar şekil 4.19’da sunulmuştur. Bu görsellerde, dinamik yükler altında oluşan deformasyon dağılımları ve potansiyel kayma mekanizmaları gösterilerek ankraj sisteminin şeve sağladığı iyileştirici etki ortaya konulmuştur.

Analiz bulguları, ankraj sisteminin şevin güvenlik katsayısını artırdığı, deformasyonları azalttığı ve kritik bölgelerdeki kayma potansiyelini sınırladığı yönünde güçlü kanıtlar sunmaktadır. Özellikle dinamik yükleme koşullarında ankraj uygulamasının şev

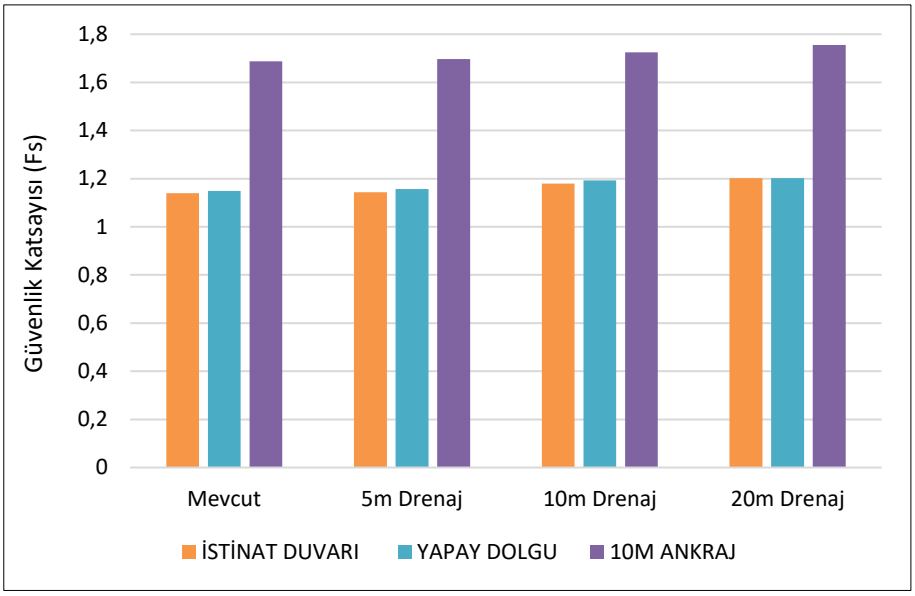
davranışını olumlu yönde değiştirdiği, gerilme dağılımlarını daha dengeli hale getirdiği ve olası kayma yüzeylerini kontrol altına aldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, ankraj sisteminin yol şevi için en etkin ve mühendislik açısından güvenilir iyileştirme yöntemi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.19 Yol şevinin drenajsız dinamik analiz sonucu.

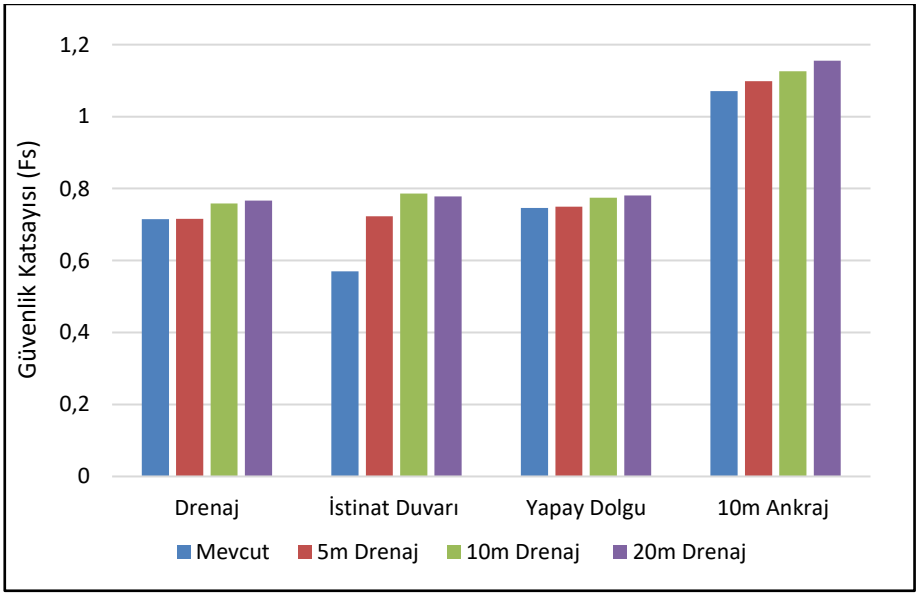
Yol şevimizin mevcut drenajsız halinde yapılan analizlerde, statik durumda güvenlik katsayısı Fs = 1,052, dinamik durumda ise Fs = 0,715 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, ankraj ile iyileştirilmiş yol şevinde statik olarak Fs = 1,688, dinamik olarak ise Fs = 1,071 değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, hem statik hem de dinamik analizlerde güvenli kabul edilen sistemi duyarlı (stabil) hale getiren ve güvenlik katsayısını artıran yapısal elemanın ankraj olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.20'de sunulan analiz çıktılarında da görüldüğü üzere, dinamik yükleme koşullarında dahi ankraj elemanları gerilmeleri azaltıcı etki sağlamış ve şevin davranışını olumlu yönde değiştirmiştir. Böylece, ankraj uygulaması yol şevinde güvenlik katsayısını yükselten, deformasyonları sınırlayan ve kritik bölgelerdeki kayma potansiyelini azaltan en etkin iyileştirme yöntemi olarak öne çıkmıştır.



Şekil 4.20 Yol şevi statik analiz sonuçları.

Yol şevinde yapılan uygulamalar karşılaştırmalı değerlendirildiğinde şekil 4.21'de görüldüğü üzere en iyi yöntem ankraj sistemi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.21 Yol şevi dinamik analiz sonuçları.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, Afyonkarahisar ili Çay ilçesi sınırlarında yer alan ve sahada duraysızlık belirtileri gösteren iki farklı şev yapısının (baraj vadi şevi ile doğal karayolu şevi) stabilite davranışları, PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle hem statik hem de dinamik koşullar altında ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Arazi gözlemleri, laboratuvar deneyleri ve sayısal analizlerden elde edilen bulgular doğrultusunda ulaşılan sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

Özellikle baraj vadi şevinde gözlemlenen drenaj yetersizliği ve kontrolsüz su çıkışlarının stabiliteyi kritik düzeyde olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur. Mevcut durumda ankrajlı iyileştirme bulunmasına rağmen, simüle edilen beş farklı yeraltı su seviyesi senaryosu; su seviyesi yükseldikçe artan hidrostatik basıncın ankraj elemanlarında aşırı gerilme yığılmalarına yol açtığını ve dinamik analizlerde ankrajların su etkisini tek başına karşılayamadığını göstermiştir.

Bu olumsuz etkilerin giderilmesi amacıyla modele eklenen üç farklı drenaj uygulaması (5 m, 10 m ve 20 m) şev içi mevcut su hattını belirli seviyeye çekerek son derece etkili bir performans sergilemiş, özellikle 20 m uzunluğundaki drenaj sisteminin aşırı yağış koşullarında dahi su basıncını kontrol altında tutabildiği belirlenmiştir. TBDY-2018 yönetmeliği kapsamında DD-2 deprem düzeyi (0,347g) altında gerçekleştirilen dinamik analizler, 20 m'lik drenaj sisteminin yükselen su seviyelerine karşı şevi hem statik hem de sismik açıdan güvenli bölgede tutabilen en uygun çözüm olduğunu kanıtlamıştır.

Sonuç olarak artabilecek su seviyelerine karşın, baraj şevinde yalnızca ankraj sistemlerinin uygulanmasının yeterli olmadığı, drenaj sistemleri ile birlikte değerlendirildiğinde ise şev stabilitesinin hem statik hem de dinamik koşullar altında güvenli düzeylere ulaştığı ortaya konmuştur. Bu bulgu, baraj şevlerinde güvenliğin sağlanması için drenaj ve ankraj sistemlerinin birlikte tasarlanmasının mühendislik açısından kritik bir gereklilik olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, drenaj ve ankraj sistemlerinin birlikte uygulanmasının hem statik hem de dinamik koşullarda şev stabilitesini artıran en etkin yöntem olduğunu kanıtlamaktadır.

Karayolu şevinde ise drenaj sistemine ek olarak şev topuk bölgesine inşa edilen istinat duvarı ve benzer şekilde uygulanan yapay destek dolgu alternatifleri birbirine yakın sonuçlar üretmiş, ancak her iki yöntem de dinamik yükler altında hedeflenen güvenlik katsayılarını sağlayamamıştır. Bu durumun temel nedeni, yenilme mekanizmasının şev topuğunda değil, şev tepe noktasında ve derin kayma yüzeylerinde yoğunlaşmasıdır. Dolayısıyla yalnızca topuk bölgesine yapılan müdahaleler, şev tepesindeki dinamik gerilmeleri sönümleyememiştir. Topuk bölgesine yapılan mühendislik elemanlarının yetersiz kalması aslında şev mühendisliğinde kritik noktalardan birisi olması nedeni ile her yapının kendine özgü göçme mekanizması ve gerilme dağılımı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, mühendislikte uygulanacak çözümün başarısı doğrudan doğruya analizlerin sahaya özel yapılmasına bağlı olduğunu göstermektedir.

Şevlerde duraysızlık çoğu zaman yüzeysel değil, derin kayma yüzeyleri ve tepe noktalarında yoğunlaşan gerilme birikimleriyle ortaya çıkar. Eğer bu mekanizma doğru tespit edilmezse, yapılan müdahaleler (örneğin topuğa istinat duvarı veya dolgu) yalnızca yüzeysel bir çözüm sunar ve dinamik yükler altında güvenliği sağlayamayabilir.

Bu çalışmada da görüldüğü üzere, topuk bölgesine yapılan müdahaleler şev tepesindeki gerilmeleri sönümleyememiştir.

Dolayısıyla, mühendislik için en uygun yöntemin belirlenmesinde detaylı saha gözlemleri, laboratuvar deneyleri ve sayısal analizlerin birlikte değerlendirilmesi önemli bir noktadır. Analizler sayesinde:

- Gerilme ve plastikleşme bölgeleri doğru şekilde haritalanır.
- Kayma yüzeyinin konumu (tepe veya topuk) belirgin bir biçimde ortaya konulabilir.
- Müdahale yönteminin etkinliği önceden öngörülebilir.

Sonuç olarak, şev iyileştirme projelerinde analizlerin önemi, yalnızca hangi yöntemin uygulanacağını değil, aynı zamanda bu yöntemin uzun vadede güvenliği sağlayıp

sağlamayacağını belirleyen en kritik faktördür. Bu nedenle, her şev yapısı için mühendislik çözümleri tek tip değil, analizlerle doğrulanmış, mekanizmaya uygun tasarlanmış olmalıdır.

Son aşamada uygulanan ön germeli ankraj sistemi, şev tepesinden derine doğru uzanan gerilme yığılmalarını etkin biçimde karşılamış, zayıflık ve şistleşme düzlemlerini kontrol altına alarak şevin bütünlüğünü sağlamıştır. Bu müdahale sayesinde hem statik hem de dinamik koşullar altında güvenlik katsayısı yükselmiş ve şev güvenliği sağlanmıştır. Yapılan analizler, ankraj uygulamasının yol şevinde etkin bir çözüm olduğunu göstermiş; böylece yüzeysel müdahalelerin yetersiz kaldığı derin kayma kökenli şevlerde, ankraj sistemlerinin nihai ve mühendislik açısından uygun çözümü sunmuştur

Bu bulgular mevcut yol şevinde yalnızca drenaj veya topuk müdahalelerinin yeterli olmadığını; derin kayma yüzeylerini kontrol altına alabilen ankraj sistemlerinin ise hem statik hem de dinamik koşullar altında güvenliği sağlayan bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır.

Baraj şevi gibi kritik altyapı yapılarında ve yüksek sismik tehlike potansiyeline sahip bölgelerde, gelecekte meydana gelebilecek aşırı yağış ve deprem etkilerinin birlikte değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler, özellikle 20 m uzunluğundaki derin drenaj sistemlerinin yeraltı su seviyesini etkin biçimde kontrol altına alarak hem statik hem de dinamik yüklemeler altında şev stabilitesini önemli ölçüde artırdığını ve güvenlik katsayılarını kabul edilebilir seviyelerde tuttuğunu göstermiştir. Buna karşılık, yalnızca ankraj veya diğer yapısal iyileştirme yöntemlerinin, yüksek yeraltı su seviyesi koşullarında tek başına yeterli olmadığı belirlenmiştir.

Yol şevi analizleri ise, problemli şevlerde uygulanacak iyileştirme yönteminin saha koşullarına bağlı olarak belirlenmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler, drenaj uygulamasının tek başına yeterli olmadığı durumlarda topuk istinat duvarı, yapay destek dolgusu ve ankraj sistemlerinin

kullanılması, hem güvenlik katsayısını artırmış hem de deformasyonları önemli ölçüde azaltmıştır. Bu durum, şev iyileştirme projelerinde tek bir mühendislik çözümü yerine farklı geoteknik tasarım yaklaşımının benimsenmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma statik ve dinamik analizlerin birlikte değerlendirilmesinin, şevlerin gerçek davranışının ortaya konulması açısından vazgeçilmez olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, iklim değişikliğine bağlı olarak artan aşırı yağış olayları ile deprem etkilerinin birlikte dikkate alındığı performans esaslı şev tasarımlarının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle çalışma, kritik şevlerin tasarımı ve iyileştirilmesine yönelik mühendislik uygulamalarına bilimsel bir altyapı sunmakta; su kontrol sistemleri ile yapısal destek elemanlarının bütünleşik olarak planlandığı sürdürülebilir ve güvenilir şev tasarım yaklaşımlarının gelecekteki geoteknik uygulamalar için temel bir gereklilik olduğunu vurgulamaktadır.

6. KAYNAKLAR

AFAD, 2025, Türkiye Deprem Tehlike Haritası, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi, 2025, 1 Ekim 1995 Dinar Depremi Raporu, Afyonkarahisar, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Açıkgöz B, Işık N S, 2024, Demiryolu Projeleri Yarmalarında Şev Stabilitesi Değerlendirmeleri: Örnek Bir Uygulama, Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, 3(2), 72–80.

Akbulut S, 2012, Şev Stabilitesi ve Zeminlerin İyileştirilmesi Üzerine Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Akçakal Ö, 2009, Şev Stabilitesi Analizinde Geri Hesap Yöntemi ve Bir Vaka Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.

Akçalı M H H, 2026, Farklı zemin koşulları altında şev stabilitesi probleminin sayısal olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.

Başar E E, 2024, Şev Stabilitesinin Analitik Yöntem ve Sonlu Elemanlar Yöntemleriyle İncelenmesi, Teknik Bilimler Dergisi, 14(1), 9–17.

Bračko T, Žlender B, Jelušič P, 2023, Implementation of climate change effects on slope stability analysis, Applied Sciences, 13(4), 1234, MDPI, DOI: 10.3390/app13041234.

Bulut K, 2021, Şev stabilitesinin sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile karşılaştırmalı analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, Türkiye.

Canik B, 2006, Şev Stabilitesinde Kullanılan Kazıkların Deprem Etkisi Altındaki Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, Türkiye.

Cevher F S M, 2021, Şev stabilitesi ve şevlerin güvenli hale getirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, Türkiye.

Coduto D P, 2006, Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamaları, Gazi Kitabevi, Ankara, Türkiye.

Cruden D M, Varnes D J, 1996, Landslide types and processes, National Research Council, National Academy Press, Washington D C, 36–75.

Çağdaş B, 2021, Şevlerde topuğa yük koyma ve topuk hasarının değişik yeraltı su düzeylerinde şev stabilitesine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018, TBDY – Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar.

Das B M, 2018, Principles of geotechnical engineering (9th ed.), Cengage Learning, Boston MA.

GEOgrup, 2021, Şev Stabilitesi Analizi – GEO5 Mühendislik Uygulamaları, Teknik Manuel.

Güler E, 2017, Şevlerin Dinamik Yükler Altındaki Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.

Hausmann M R, 1992, Slope Remediation, Proc. ASCE Specialty Conference Stability of Slopes and Embankments II, 1274.

Karadağ M B, 2019, Çiftlikköy İlçesi Gençlik Caddesindeki Heyelanın Vaka Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik, Türkiye.

Kara H B, 1980, Heyelanlar ve Devebağırtan Heyelanları Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.

Karabulut B, Kılıç H, 2019, Yağış ile sızmanın dolgu şevlerinin stabilitesine etkisi, 8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 13–15 Kasım 2019, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul.

Keleşoğlu M K, 2016, Şevlerin stabilitesi, Geoteknik Kurs Notları, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye.

Krahn J, 2004, Stability Modelling with SLOPE/W, Printed in Canada.

Kramer S L, 2003, Geoteknik Deprem Mühendisliği, Çev: Kamil Kayabalı, Gazi Kitabevi, ISBN: 975-8640-63-1.

Mısır G, 2017, Şev stabilitesi problemlerinin sayısal analizler ile karşılaştırılmalı çözümü, DÜMF Mühendislik Dergisi, 8(2), 45–56.

Myers M D, 2008, The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides, U S Geological Survey, Reston, Virginia.

Olgun M, Acar M H, 2009, Deprem kuvvetleri etkisi altındaki şevlerin stabilitesini etkileyen faktörlerin incelenmesi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 24(2), 9–20.

Önalp A, Arel E, 2004, Geoteknik Bilgisi: Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Özdemir M, Beyhan S, Erarslan K, 2023, Şistlerin dayanım anizotropisinde sıcaklık ve pH'ın etkisi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2), 145–158.

Öztürk K, 2008, Heyelanlar ve Türkiye'ye etkileri, Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 28(2), 123–138.

Rotaru A, Bejan F, Almohamad D, 2022, Sustainable slope stability analysis: A critical study on methods, Sustainability, 14(14), 8847.

Sarıçam M, 2021, Gönen yöresinin (Balıkesir) jeolojisi ve yöredeki yeraltı suyunun şev stabilitesine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

Tekin A, 2011, Sonlu Elemanlar ve Limit Denge Yöntemleri ile Şev Stabilitesi Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Terzaghi K, Peck R B, 1967, Soil Mechanics in Engineering Practice (2nd ed.), John Wiley & Sons.

Ülkü B, 2021, Şevlerin dinamik yükler altındaki analizi ve bir örnek uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı, Eskişehir.

Xu Y, Li S, Zhang X, Yan B, Zhu C, 2011, Dynamic consolidation test study on silt and silt soil, Applied Mechanics and Materials, 90-93, 537-541.

Xue R, Hu J, 2011, Study on the influencing factors under dynamic drainage consolidation, Applied Mechanics and Materials, 99-100, 243-249.

Yiğit G, 2013, Karayollarında şev stabilitesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.

Zhang L, Li Z, 2011, Application of dynamic-static drainage consolidation method on a silty ground of guangzhou, Advanced Materials Research, 403-408, 1405-1408.

İnternet Kaynakları

1. https://istatistik.tarimorman.gov.tr/Sayfa/Detay/2114#:~:text=1%20Ekim%202024%2D31%20A%C4%9Fustos,ya%C4%9F%C4%B1%C5%9F%C4%B1%20ise%20563.2%20mm'dir, 02.03.2026
2. https://www.gzt.com/video/gundem/manisada-toprak-kaymasi-otoyolu-kapatti-ulasim-tek-seritten-4018541, 03.05.2026
3. https://obs.imo.org.tr/bulten/news/3812/imo-antalya-subesinin-antalya-konya-karayolundaki-gelismeler-ile-karayolu-projelerinin-projelendirme-ve-kontrol-surecine-iliskin-degerlendirmelerini-iceren-basin-aciklamasi/144308, 08.06.2026