

İnşaat Mühendisliği: Teori, Metodoloji ve Uygulama

Editör
Doç. Dr. Emrah Yılmaz

**İnşaat Mühendisliği:
Teori, Metodoloji ve Uygulama**

Editör
Doç. Dr. Emrah Yılmaz

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Doç. Dr. Emrah Yılmaz

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Ekim, 2025

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-6517-45-5

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1.....	5
Windows Üzerinde Openfoam 11'in Yüklenmesi ve ARF Sisteminde Analiz Adımları	
Abdulkadir Demirçelik & Eyyüp Ensar Yalçın & Erdiñ İkinçioğulları	
BÖLÜM 2.....	31
Katı Atık Depolama Sahalarında Stabilite Sorunları: Filipinler Payatas Depolama Sahası Örneğı	
Gökçe Buse Güner Karaca & Ertuğrul Ordu	
BÖLÜM 3.....	55
Geri Dönüşümün İnşaat Sektöründeki Yeri	
Aylin Özodabaş & Nazım Çağatay Demiral	



BÖLÜM 1

Windows Üzerinde Openfoam 11'in Yüklenmesi ve ARF Sisteminde Analiz Adımları

Abdulkadir Demirçelik¹ & Eyyüp Ensar Yalçın² & Erdinç İkinciogulları³

1. GİRİŞ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Navier–Stokes ve süreklilik denklemleri gibi temel denklemleri kullanarak akışkanlar mekaniği problemlerini analiz eden bir bilim dalıdır. Son yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki ileri gelişmeler, HAD alanında çeşitli yazılımların geliştirilmesini ve bunun hidrolik mühendisliği de dâhil olmak üzere pek çok bilim dalında yaygın olarak kullanılmasını olanaklı kılmıştır (İkinciogulları, 2019).

Günümüzde, HAD yöntemiyle geliştirilen yazılımlar, akım alanını ve sınır koşullarını tanımlamayı kolaylaştıran gelişmiş kullanıcı arayüzlerine sahiptir. Bu yazılımlar, bir problemi çözme sürecinde üç temel aşamayı takip eder: 1) ön hazırlık süreci (pre-processing), 2) analiz süreci (processing), ve 3) çıktıların üretildiği son süreç (post-processing) (Uzol, 2021) (Şekil 1.1). Bu yapı, model kurulumundan sonuç çıkarımına kadar olan akışı sistematik bir çerçevede sağlar ve hidrolik mühendisliği dahil pek çok alan için tasarım ve analiz süreçlerini destekler.

HAD yazılımlarında iş akışı, öncelikle analizde kullanılacak akışkanın hidrolik özelliklerinin modele tanıtılmasıyla başlar; bunu hidrolik modelin ve çözüm ağının (*mesh*) oluşturulması izler. Çözüm ağı boyutu, sonuçların doğruluğu ve nümerik kararlılık üzerinde belirleyici olup daha ince ağlar genellikle daha yüksek hassasiyet sağlarken analiz süresini artırmaktadır ve çözüm ağı boyutları belirli bir aşamadan sonra küçültülse bile sonuçlar üzerinde etkisi kalmamaktadır. Bu sebeple optimum çözüm ağı boyutunun belirlenmesi, sayısal modellemelerde önemli bir aşamadır. Optimum çözüm ağı belirlendikten sonra akım bölgesine ilişkin sınır koşulları, akım koşulları ve akışkan özellikleri

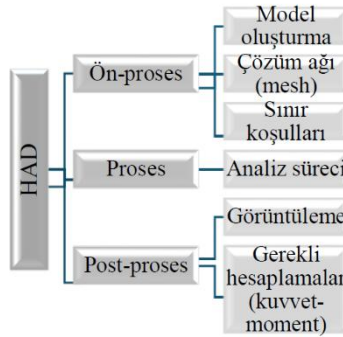
¹ İnşaat Yük. Müh., Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl, Türkiye, ORCID: 0009-0001-6746-8308

² Arş. Gör., Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl, Türkiye, ORCID: 0000-0001-9446-2991

³ Doç. Dr., Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl, Türkiye, ORCID: 0000-0003-2518-980X

tanımlanır. Bunu takiben, kullanılacak türbülans modeli, nümerik çözüm yöntemi ve yakınsama kriterlerinin belirlenmesiyle ön süreç (pre-processing) tamamlanır. Analiz aşamasında, her bir sonlu elemanda akışkan akımını yöneten denklemler aracılığıyla, akım parametreleri hesaplanır. Analiz aşamasının tamamlanmasını takiben, son süreçte (post-processing) analiz çıktıları derlenir, değerlendirilir ve uygun görselleştirme teknikleriyle sunulur (İkinciogulları, 2019; Kılıç, 2020; Usta, 2014; Yalçın, 2022).

HAD tabanlı sayısal modellemeler, fiziksel modellere kıyasla hem zaman hem de maliyet açısından önemli tasarruflar sunar; ayrıca laboratuvar koşullarında oluşturulması güç ya da pratikte olanaksız senaryoların incelenmesine imkân tanır. Bununla birlikte, sayısal modelin ele alınan problem için uygun biçimde yapılandırılmaması durumunda (örneğin çözüm ağı boyutu, sınır koşulları ve türbülans modeli seçimlerindeki hatalar) elde edilen sonuçlar yanıltıcı olabilir. Bu nedenle, sayısal bulguların deneysel verilerle doğrulanması ve model güvenilirliğinin sınanması gerekmektedir (İkinciogulları, 2019; Usta, 2014).



Şekil 1.1. HAD yazılımlarında iş akışı (Uzol, 2021)

1.1. OPENFOAM

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Navier–Stokes ve süreklilik denklemleri gibi temel denklemleri kullanarak akışkanlar mekaniği problemlerini analiz eden bir bilim dalıdır. Son yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki ileri gelişmeler, HAD alanında çeşitli yazılımların geliştirilmesini ve bunun hidrolik mühendisliği de dâhil olmak üzere pek çok bilim dalında yaygın olarak kullanılmasını olanaklı kılmıştır (İkinciogulları, 2019).

Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM), C++ ile geliştirilen, Linux tabanında çalışan, kullanımı ücretsiz ve açık kaynak kodlu bir HAD yazılımıdır. Bu yazılımın temel amacı, akışkanların veya diğer sürekli ortamların davranışlarını bilgisayar ortamında simüle etmektir. OpenFOAM,

içerisinde 150'den fazla farklı C++ kütüphanesi barındırmaktadır. Yazılım, akışkan dinamiği hesaplamalarının yanı sıra, simülasyonları yapılandıran ve başlatan, model geometrisini düzenleyen, çözüm ağları oluşturan, sonuçları işleyen ve görselleştiren uygulamalara da sahiptir. OpenFOAM uygulamaları temel olarak iki kategoriye ayrılır:

➤ Çözücüler (Solvers): Akışkanlar (veya diğer süreklilik) mekaniğindeki hesaplamaları gerçekleştirir.

➤ Yardımcı Programlar (Utilities): Simülasyon yapılandırma, model geometrisi düzenleme, çözüm ağı oluşturma, sonuç işleme vb. gerçekleştirir (Greenshields, 2023).

OpenFOAM 11 sürümünden önce OpenFOAM çok fazla çözücüye sahipti. *simpleFoam* ve *pimpleFoam* gibi çözücüler, 1990'ların başından beri OpenFOAM'ın temelini oluşturan önemli çözücülerdir (Greenshields, 2023).

OpenFOAM 11 ile modüler çözücüler önemli bir yenilik olarak sunulmuştur. Klasik uygulama çözücülerinin yerini, akışkan dinamiği hesaplamaları için genel bir algoritmanın adımlarını tanımlayan *foamRun* çözücüsü almıştır. *foamRun*, belirli bir akış tipini karakterize etmek için her adımı tanımlayan bir çözücü modülü yükler. Modüler çözücüler, uygulama çözücülerine göre şu avantajlara sahiptir:

➤ Kullanımı daha kolaydır.

➤ Kaynak kodlarında gezinmek daha kolaydır, bu da daha iyi anlamayı sağlar.

➤ Daha esnekler; özellikle, yazılım içerisinde bulunun *foamMultiRun* çözücüsü ile iki veya daha fazla etki alanı bölgesini alınabilir ve her bir bölgeye farklı bir çözücü modülü uygulanabilir. Böylece, bir veya birden çok akışkan ile katı bölgelerin modülleri eşleştirilerek, çok fazlı akışlar dahil, eşlenik ısı transferi (Conjugate Heat Transfer-CHT) problemleri birlikte çözülebilir (Greenshields, 2023).

Windows işletim sistemi üzerine Ubuntu ve ardından OpenFOAM yazılımını yüklemek birçok avantaj sağlamaktadır. Bu entegrasyon, Windows'un yaygın kullanıcı arayüzü ve uygulama desteği ile Linux'un güçlü komut satırı araçlarını ve açık kaynaklı yazılım ekosistemini bir araya getirir. Temel olarak bu entegrasyon, Windows *Subsystem for Linux* (WSL) teknolojisi sayesinde mümkün olmakta ve kullanıcılara çift önyükleme (*dual-boot*) veya sanal makine gibi daha hantal çözümlere gerek kalmadan her iki işletim sisteminin de en iyi yönlerini sunmaktadır. WSL, kullanıcıların doğrudan Windows içerisinden tam

bir Linux dağıtımını (örneğin Ubuntu) çalıştırmasına olanak tanıyan bir uyumluluk katmanıdır. Microsoft tarafından geliştirilen bu teknoloji, özellikle geliştiriciler ve araştırmacılar için önemli faydalar sağlamaktadır (Microsoft, 2025).

Ubuntu üzerinde OpenFOAM yazılımını çalıştırmanın avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. **Doğal Çalışma Ortamı ve Topluluk Desteği:** OpenFOAM, temel olarak bir Linux uygulamasıdır ve geliştirilmesi bu platform üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu nedenle, Ubuntu üzerinde çalıştırıldığında en kararlı, performanslı ve uyumlu deneyimi sunar. OpenFOAM ile ilgili belgeler, eğitim materyalleri ve topluluk forumlarındaki tartışmaların büyük çoğunluğu Linux komutları ve dosya yapıları üzerine kuruludur. WSL aracılığıyla Ubuntu kullanarak, kullanıcılar bu zengin bilgi birikiminden ve topluluk desteğinden doğrudan faydalanabilirler (Greenshields, 2023).

2. **Kolay Kurulum ve Yönetim:** OpenFOAM'ın resmi geliştiricileri ve dağıtıcıları Ubuntu için önceden derlenmiş paketler sunmaktadır. Bu, kullanıcıların *apt* paket yöneticisi aracılığıyla basit bir komutla yazılımı kolayca kurmalarına ve güncellemelerine olanak tanır. Bu yöntem, kaynak koddan derleme gibi daha karmaşık ve zaman alıcı süreçlere göre önemli bir avantaj sağlar (Greenshields, 2023).

3. **Paralel Hesaplama Yetenekleri:** OpenFOAM, büyük ve karmaşık simülasyonları birden çok işlemci çekirdeğine dağıtarak çözme yeteneğine sahip olan MPI (*Message Passing Interface*) kütüphanesini etkin bir şekilde kullanır. Linux ortamı, paralel hesaplama ve betik (*scripting*) otomasyonu için güçlü ve esnek araçlar sunar. WSL 2'nin tam Linux çekirdeği desteği sayesinde, kullanıcılar çok çekirdekli Windows makinelerinin tüm işlem gücünden OpenFOAM'ın paralel çözümleri aracılığıyla tam olarak yararlanabilirler. Bu, simülasyon sürelerini önemli ölçüde kısaltır (Greenshields, 2023).

Sonuç olarak, Windows üzerine WSL aracılığıyla Ubuntu ve ardından OpenFOAM yüklemek; performans, verimlilik ve uyumluluk açısından önemli avantajlar sunan modern bir yaklaşımdır. Bu entegrasyon, Windows'un kullanım kolaylığını, Linux'un teknik gücü ve OpenFOAM'ın güçlü simülasyon yetenekleriyle birleştirerek, kullanıcılar için güçlü ve esnek bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışma ortamı oluşturur.

1.2. TRUBA (Türk Ulusal Bilim e-Altyapısı)-ARF

TÜBİTAK tarafından kurulan TRUBA, ülkemizde akademisyenlerin uluslararası alandaki meslektaşları ile rekabet edebilmesine olanak sağlayan yüksek başarımlı hesaplama ve veri toplama merkezidir (TÜBİTAK ULAKBİM, 2025). ARF, TÜBİTAK tarafından 2023 yılı sonunda MODSİMMER Veri Merkezi'nde kurulumu gerçekleştirilip ARF ismi verilerek kullanıma açılan bir hesaplama kümesidir. ARF ismiyle kullanıma açılan bu hesaplama kümesi, toplam 504 adet orfoz [1-504] isimli sunucudan oluşmaktadır. Her sunucuda 2 adet Intel(R) Xeon(R) Platinum 8480+ işlemci bulunmakta olup toplam 112 çekirdek işlem gücü ve 256 GB bellek kapasitesi sunulmaktadır (TÜBİTAK ULAKBİM, 2025). Yazılım uygulamaları, derleyiciler ve kütüphaneler /arf/sw/ altında organize edilmiştir. Kümenin işletim sistemi olarak *Rocky Linux 9.2* tercih edilmiştir ve uygulamaların, analizlerin yürütülmesi için sisteme eklenen dosyalar ile birlikte gerekli kodların bulunduğu bir iş dosyasına ihtiyaç duymaktadır. ARF, içerisinde bulunan hazır modüller veya kullanıcının kendi dizinine yüklediği uygulamalar aracılığıyla bilimsel çalışmaların yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan örnek sayısal modelin analizi ARF hesaplama kümesi tarafından gerçekleştirilmiştir.

2. WINDOWS İŞLETİM SİSTEMİNE UBUNTU KURULUMU

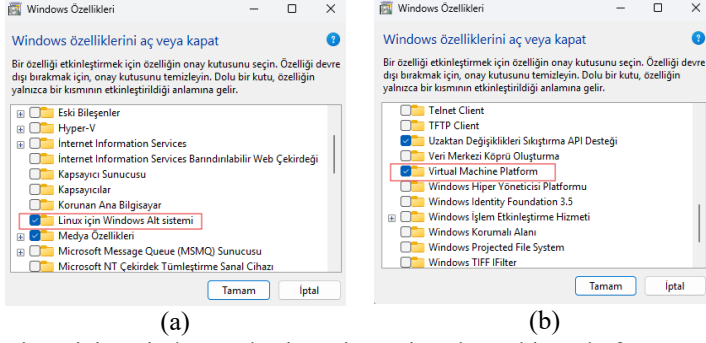
Bu bölümde Windows işletim sistemine Ubuntu işletim sisteminin kurulması adım adım anlatılacaktır.

1) *Ayarlar > Sistem > İsteğe Bağlı Özellikler* bölümüne gidilerek burada Diğer Windows özellikleri kısmı açılır.



Şekil 2.1. Diğer Windows özellikleri penceresinin açılması

2) Açılan pencerede *Linux için Windows Alt Sistemi* ve *Virtual Machine Platform* seçeneği aktifleştirilerek tamama tıklanır. Gerekli işlemler yapılır ve ardından bilgisayarın yeniden başlatılması istenir.

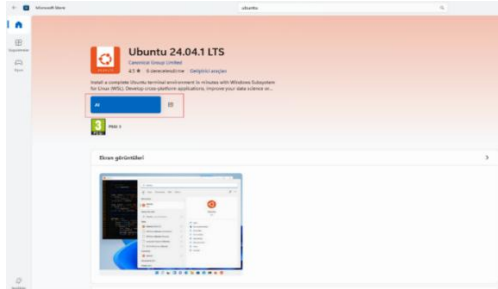


Şekil 2.2. Linux için Windows Alt Sistemi ve Virtual Machine Platform seçeneklerinin aktifleştirilmesi a) Linux için Windows Alt Sistemi seçeneğinin aktif hale getirilmesi; b) Virtual Machine Platform (Sanal Makine Platformu) seçeneğinin aktif hale getirilmesi



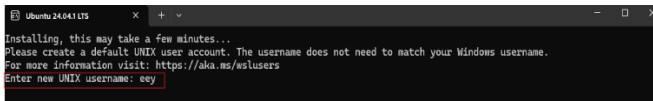
Şekil 2.3. Bilgisayarın yeniden başlatılması

3) Bilgisayar yeniden başlatıldıktan sonra *Microsoft Store*'a gidilir ve Ubuntu'nun istenen sürümü seçilip yüklenir. Biz Ubuntu'nun 24.04.1 LTS sürümünü yükleyeceğiz.



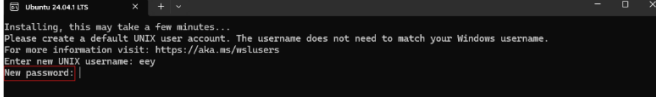
Şekil 2.4. Microsoft Store'dan Ubuntu 24.04.1 LTS'nin yüklenmesi

4) Yükleme tamamlandıktan sonra Ubuntu açılır ve biraz beklenir. Gelen pencerede bir kullanıcı adı istenir. Buraya Ubuntu'da kullanacağımız kullanıcı adı girilir.



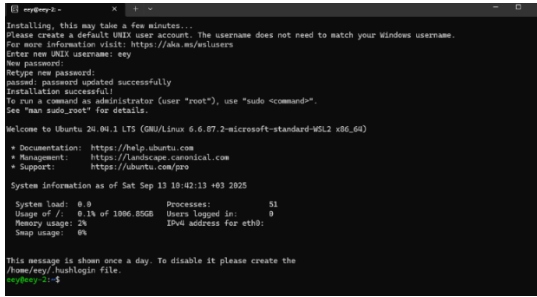
Şekil 2.5. Ubuntu kullanıcı adının belirlenmesi

5) Kullanıcı adı girildikten sonra *password* istenir, burada password belirlenir. Bu password Ubuntu'ya uygulama kuracağımız ve Ubuntu'dan uygulama kaldıracağımız zaman sorulur, bu sebeple unutulmayacak şekilde oluşturulmalıdır. Dikkat edilmesi gereken bir nokta da şifre girilirken şifre kısmında şifrenin girildiğinin görülmemesidir. Şifre tamamen girilip enter tuşuna basıldığında sisteme giriş sağlanacaktır.

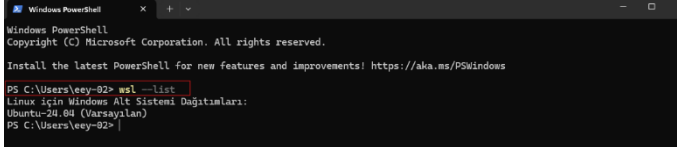


Şekil 2.6. Password belirlenmesi

6) Username ve password oluşturulduktan sonra Windowsa Ubuntu kurulumu tamamlanmış ve aşağıdaki şekildeki gibi bir mesaj alınmış olur. Ayrıca terminal açılarak *wsl --list* kodu yazılarak yüklü Ubuntu sürümleri görülebilir.



Şekil 2.7. Ubuntu kurulumunun tamamlandığına dair mesaj

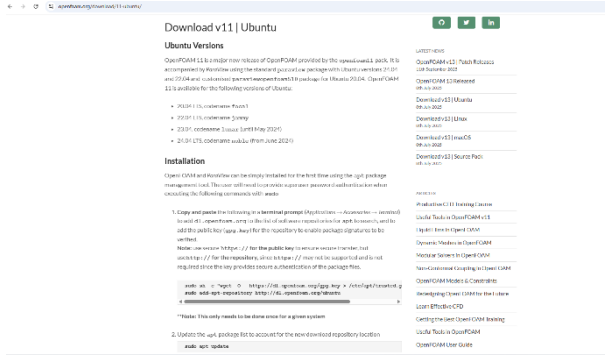


Şekil 2.8. Sistemde kurulu olan Ubuntu versiyonu veya versiyonlarının görülmesi

3. WINDOWS İŞLETİM SİSTEMİNE KURULAN UBUNTU'YA OPENFOAM 11 KURULUMU

Bu bölümde Windows işletim sistemine kurulan Ubuntu işletim sistemine OpenFOAM_11 yazılımının kurulumu adım adım anlatılacaktır.

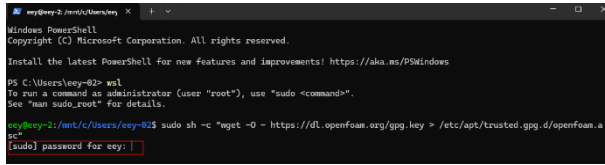
1) <https://openfoam.org/download/11-ubuntu/> sayfası açılır. Bu sayfada *Installation* bölümünde OpenFOAM 11 ve beraberinde gelen *paraView* kurulumu için gerekli kodlar bulunmaktadır.



Şekil 3.1. OpenFOAM 11 yazılımının yükleme kodlarının olduğu web sayfası
(<https://openfoam.org/download/11-ubuntu/>)

2) Terminal açılır, `ws/` yazılarak Ubuntu açılır ve İlk olarak aşağıdaki kod girilir.

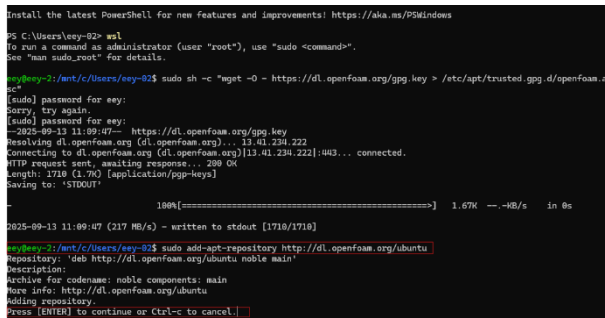
➤ `sudo sh -c "wget -O - https://dl.openfoam.org/gpg.key>/etc/apt/trusted.gpg.d/openfoam.asc"`
bu kod girildikten sonra ilk bölümde belirlediğimiz password istenir.



Şekil 3.2. Password girilmesi

Ardından aşağıdaki kod girilir ve *Enter* tuşuna basılır.

➤ `sudo add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu`



Şekil 3.3. Yükleme adımı-1

3) Ardından aşağıdaki kod girilir.

➤ `sudo apt update`

```
rey@rey-2:~/mf/foamrun$ sudo apt update
Get:50 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/main amd64 c-n-f Metadata [272 B]
Get:51 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/universe amd64 Packages [30.2 kB]
Get:52 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/universe Translation-en [17.4 kB]
Get:53 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/universe amd64 Components [19.2 kB]
Get:54 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/universe amd64 c-n-f Metadata [1390 B]
Get:55 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/restricted amd64 Components [216 B]
Get:56 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/restricted amd64 c-n-f Metadata [116 B]
Get:57 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/multiverse amd64 Components [212 B]
Get:58 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/multiverse amd64 c-n-f Metadata [116 B]
Fetched 37.1 MB in 8s (7111 kB/s)
Reading package lists... Done
rey@rey-2:~/mf/foamrun$ sudo apt update
```

Şekil 3.4. Yükleme adımı-2

4) Ardından aşağıdaki kod girilir.

➤ sudo apt -y install openfoam11

```
rey@rey-2:~/mf/foamrun$ sudo apt update
Get:50 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/main amd64 c-n-f Metadata [272 B]
Get:51 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/universe amd64 Packages [30.2 kB]
Get:52 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/universe Translation-en [17.4 kB]
Get:53 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/universe amd64 Components [19.2 kB]
Get:54 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/universe amd64 c-n-f Metadata [1390 B]
Get:55 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/restricted amd64 Components [216 B]
Get:56 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/restricted amd64 c-n-f Metadata [116 B]
Get:57 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/multiverse amd64 Components [212 B]
Get:58 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports/multiverse amd64 c-n-f Metadata [116 B]
Fetched 37.1 MB in 8s (7111 kB/s)
Reading package lists... Done
rey@rey-2:~/mf/foamrun$ sudo apt update
Hit:1 http://security.ubuntu.com/ubuntu noble-security InRelease
Hit:2 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble InRelease
Hit:3 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-updates InRelease
Hit:4 http://dl.openfoam.org/ubuntu noble InRelease
Hit:5 http://archive.ubuntu.com/ubuntu noble-backports InRelease
Reading package lists... Done
Building dependency tree... Done
Reading state information... Done
167 packages can be upgraded. Run 'apt list --upgradable' to see them.
rey@rey-2:~/mf/foamrun$ sudo apt -y install openfoam11
```

Şekil 3.5. Yükleme adımı-3

5) Ardından ubuntu'da `nano ~/.bashrc` kodu yazılır ve açılan sayfada en alta gidilip aşağıdaki kod yapıştırılır (Bu kod OpenFOAM 11 içindir, örneğin OpenFOAM 9 yüklenecekse kodda `openfoam9` yazılır). Sırasıyla `CTRL+O`, `ENTER` ve `CTRL+X` tuşları kullanılarak sayfa kaydedilip çıkarılır.

➤ source /opt/openfoam11/etc/bashrc

```
GNU nano 7.2 /home/rey/.bashrc
# Add an "alias" alias for long running commands. Use like so:
# sleep 10; alert
alias alert='notify-send --urgency=low -i "${1}" 55 echo terminal || echo error' "${history/tail -n1}sed -e '1'

# Alias definitions
# You may want to put all your additions into a separate file like
# ~/.bash_aliases, instead of adding them here directly.
# See /usr/share/doc/bash-doc/examples in the bash-doc package.

if [ -f ~/.bash_aliases ]; then
    . ~/.bash_aliases
fi

# enable programmable completion features (you don't need to enable
# this, if it's already enabled in /etc/bash.bashrc and /etc/profile
# sources /etc/bash.bashrc).
if ! shopt -so posix; then
    if [ -f /usr/share/bash-completion/bash_completion ]; then
        . /usr/share/bash-completion/bash_completion
    elif [ -f /etc/bash-completion/bash_completion ]; then
        . /etc/bash-completion
    fi
fi

source /opt/openfoam11/etc/bashrc
```

Şekil 3.6. Yükleme adımı-4

6) Yeni terminal açılır ve `ws/` yazılarak Ubuntu'ya bağlanılır. Aşağıdaki kod girilir. Bu kodla yazılımın yüklenip yüklenmediği kontrol edilir.

➤ foamRun -help

```
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

Install the latest PowerShell for new features and improvements! https://aka.ms/PSWindows

PS C:\Users\sey-02\Desktop> nsl
sey@sey-2: /mnt/c/Users/sey-02/Desktop$ foamRun -help
Usage: foamRun [OPTIONS]
Options:
  -case <dir>      specify alternate case directory, default is the cwd
  -fileHandler <handler>  override the fileHandler
  -hostRoots <((host dir) : (host dir))>  slave root directories (per host) for distributed running
  -libs '(*lib.so' ... '*lib.so*)'  pre-load libraries
  -noFunctionObjects  do not execute functionObjects
  -parallel  run in parallel
  -roots <(dir1 .. dirN)>  slave root directories for distributed running
  -solver <name>  Solver name
  -srcDoc  display source code in browser
  -doc  display application documentation in browser
  -help  print the usage

Using: OpenFOAM-11 (see https://openfoam.org)
Build: 11-e1f6c882a8
```

Şekil 3.7. Yazılımın yüklenip yüklenmediğinin kontrol edilmesi

7) Yükleme web sayfasında (<https://openfoam.org/download/11-ubuntu/>) *Getting Started* kısmında bulunan kodla deneme analizi çalıştırılır. Analiz tamamlanır ve paraView açılarak sonuçlar görülebilir.

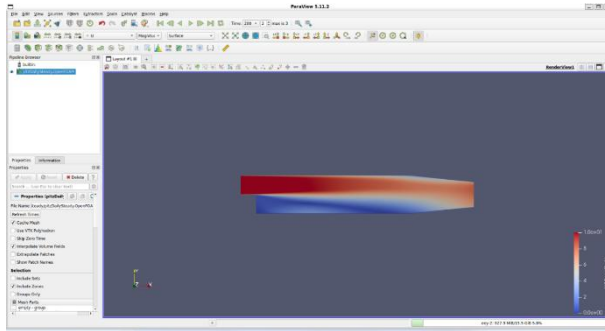
```
“cd $FOAM_RUN
cp -r $FOAM_TUTORIALS/incompressibleFluid/pitzDailySteady .
cd pitzDailySteady
blockMesh
foamRun
paraFoam”
```

```
Windows PowerShell
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

Install the latest PowerShell for new features and improvements! https://aka.ms/PSWindows

PS C:\Users\sey-02> nsl
sey@sey-2: /mnt/c/Users/sey-02$ cd $FOAM_RUN
cp -r $FOAM_TUTORIALS/incompressibleFluid/pitzDailySteady .
cd pitzDailySteady
blockMesh
foamRun
paraFoam
```

Şekil 3.8. Deneme analizinin çalıştırılması

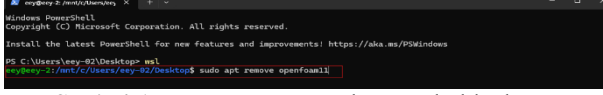


Şekil 3.9. paraView yazılımında analiz sonuçlarının görselleştirilmesi

4. OPENFOAM YAZILIMI VE UBUNTU İŞLETİM SİSTEMİNİN WINDOWS İŞLETİM SİSTEMİNDEN KALDIRILMASI

Windows terminal açılır, terminalde `wsl` kodu girilir. Açılan sayfada aşağıdaki kod girilir, yükleme aşamasında belirlediğimiz *password* istenir. Böylelikle OpenFOAM 11 ve beraberinde yüklenen paraView kaldırılmış olur.

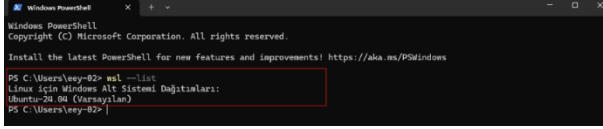
- `sudo apt remove openfoam11`



Şekil 4.1. OpenFOAM yazılımının kaldırılması

Terminalde aşağıdaki kod yazılarak Linux için Windows Alt Sisteminde yüklü uygulamalar görülebilir.

- `wsl --list`

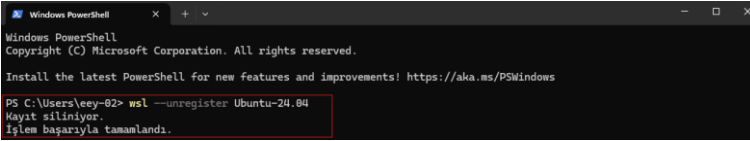


Şekil 4.2. Linux için Windows Alt Sisteminde yüklü uygulamaların görülmesi

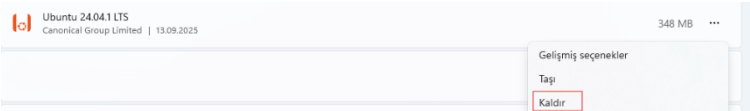
Yukarıdaki şekilde de (Şekil 4.2) görüldüğü üzere sistemde Ubuntu 24.04 yüklüdür, Ubuntu'yu bilgisayardan kaldırmak için, Windows terminal açılır ve aşağıdaki kod girilir.

- `wsl --unregister Ubuntu-24.04`

Bu kod girildikten sonra Ubuntu kaldırılır. Bazen bilgisayardan tamamen kaldırmak için *ayarlar-uygulamalar-yüklü uygulamalar*'da Ubuntu varsa bulunup kaldırmakta gerekebilir.



Şekil 4.3. Ubuntu işletim sisteminin kaldırılması (1.aşama)

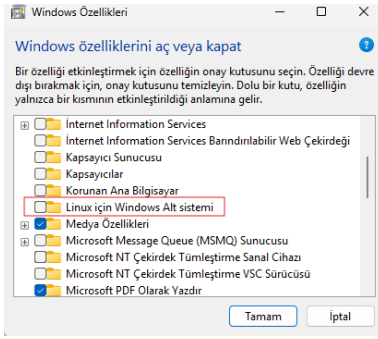


Şekil 4.4. Ubuntu işletim sisteminin kaldırılması (2.aşama)

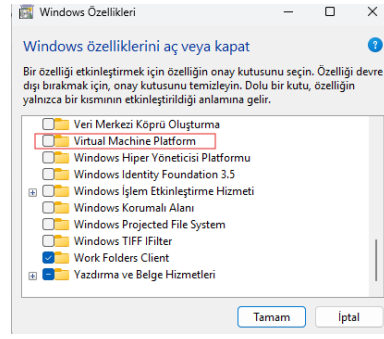
Sürecin son kısmı, Windows İsteğe Bağlı Özellikler panelindeki seçenekleri devre dışı bırakmaktır.

1. *Ayarlar > Sistem > İsteğe Bağlı Özellikler* bölümüne gidilerek burada Diğer Windows özellikleri kısmı açılır.

Açılan pencerede *Linux için Windows Alt Sistemi* seçeneği bulunur ve seçimi kaldırılır. Başka bir sanal ortamı çalıştırmanız gerekmiyorsa *Virtual Machine Platform* (Sanal Makine Platformu) seçeneğinin seçimini de kaldırabilirsiniz. Son olarak *tamama* tıklarız ve gerekli işlemler yapılır ardından bilgisayarın yeniden başlatılması istenir.



(a)



(b)

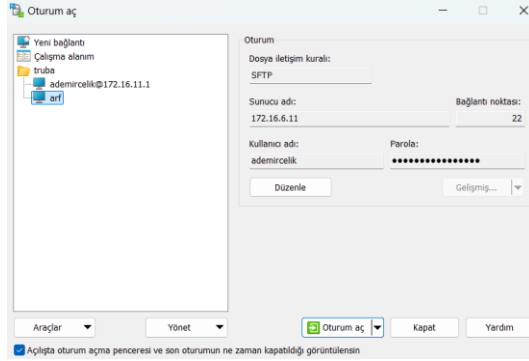
Şekil 4.5. Ubuntu işletim sisteminin kaldırılması (Son aşama): a) Linux için Windows Alt Sistemi seçeneğinin pasif hale getirilmesi; b) Virtual Machine Platform (Sanal Makine Platformu) seçeneğinin pasif hale getirilmesi

5. TRUBA – ARF SİSTEMİNE KAYIT, GİRİŞ VE OPENFOAM 11'İN ÇALIŞTIRILMASI

TRUBA – ARF sistemini kullanmak için öncelikle kayıt işlemlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir ve bunun için grid-teknik@ulakbim.gov.tr mail adresinden hesaplama kümelerine erişim için talepte bulunulabilir. Sisteme kayıt tamamlandıktan sonra alınan kullanıcı adı ve şifre ile hesaplama kümesine erişim sağlanabilir.

ARF sistemine bağlanmak, hesaplamaları gerçekleştirmek ve kullanıcı arayüzüne erişmek için öncelikle *OpenVPN*, *PUTTY* ve *WinSCP* gibi programlar kurulmalıdır. OpenVPN ile internet ağı üzerinden ARF sistemine erişim sağlanır. Bunun için ihtiyaç duyulan dosya 'Truba Kullanıcı El Kitabından' temin edilebilir. PUTTY, ARF sisteminde kullanıcı için gerekli komutların verildiği bir terminal işlevi görmektedir. WinSCP ile kullanıcı TRUBA – ARF sistemindeki arayüzüne erişim sağlanabilir. Dosya yükleme, analiz dosyalarını alma, iş dosyalarını ekleme vb. gibi işlemler gerçekleştirilebilir. WinSCP ile ARF sistemine bağlanmak için sunucu adı, kayıt esnasında verilen kullanıcı adı ve

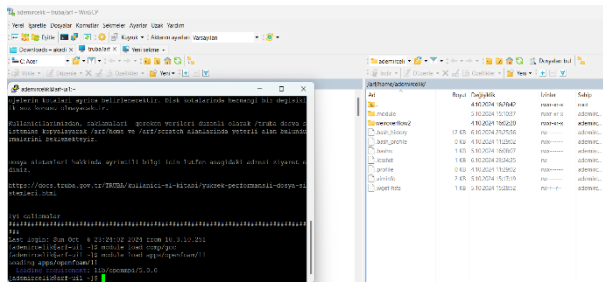
parola bilgileri girilmelidir. Sunucu adı bölümüne ise 172.16.6.11 veya 172.16.6.12 yazılmalıdır (Şekil 5.1.).



Şekil 5.1. WinSCP ile ARF sistemine giriş

WinSCP açıldıktan sonra kullanıcı sunulan üç bölüm mevcuttur ve tüm işlemler bu alanda yürütülüp diğer kullanıcıların dosyalarına kesinlikle müdahale veya erişim sağlanmamalıdır. Her kullanıcı için dosyalarını kullanabileceği bir ev dizini (*/arf/home/kullanıcıadı*), işlerin başlatılması için Scratch dizini (*/arf/scratch/kullanıcıadı*) ve verilerini depolayabileceği bir TRUBA dizini (*/truba/home/kullanıcıadı*) tahsis edilmiştir ve gerekli tüm işlemler bu dosyalar arasında geçişlerle sağlanmaktadır.

ARF sisteminde terminalde kodların yazımı için PUTTY'e erişilmelidir. WinSCP ile kullanıcı arayüzüne bağlandıktan sonra PUTTY'e üst sekmelerden erişim sağlanılabilir. Gerekli tüm kodlar, komutlar bu terminal üzerinden kullanılabilir (Şekil 5.2.).



Şekil 5.2. PUTTY ile terminale erişim

ARF sisteminde OpenFOAM için kendi kütüphanesinde, üç farklı versiyonda, modüller bulunmaktadır. Kullanıcının kendi bilgisayarında oluşturduğu sayısal modellerin analizleri bu modüller aracılığıyla yürütülmektedir ancak OpenFOAM'ın bazı versiyonları arasında farklılıklar bulunduğundan sayısal analizler için hazırlanan modellerin uyumlu sürümler olmasına dikkat edilmelidir. Mevcut olan bu üç modülden (*module avail* komutuyla yüklü tüm

modüllere bakılabilir) herhangi birisini kullanmak için kodlardan uygun olanı seçilip komut satırına *module load* ifadesiyle birlikte yazılmalıdır. Bu bölümde örnek olması açısından analizi yürütülen Felder vd.(2012)’e ait klasik basamaklı dolusavak modelinde OpenFOAM 11 versiyonu kullanılmıştır ve bu modül *module load apps/openfoam/11* komutuyla çalıştırılmıştır. Analizler kesinlikle iş dosyaları ile başlatılmalıdır ve istenilen modüllerin kullanımı için de kodlar bu iş dosyasına eklenip analizler yürütülmelidir.

6. ARF SİSTEMİNDE ANALİZLERİN ÇALIŞTIRILMASI

OpenFOAM’da bir analizi başlatmak için öncelikle kişisel bilgisayarda oluşturulan modelleme dosyaları *arf/home/kullanıcıadı* (size ait olan kullanıcı adı) dizinine eklenmelidir. Daha sonra iş başlatmak için *arf/scratch/kullanıcıadı* dizinine bir *slurm* dosyası eklenmelidir ve işler bu dizinde başlatılmalıdır. Bu dosya içerisine kullanıcı OpenFOAM için modül yükleme komutunu ekledikten sonra sonra OpenFOAM kodlarını kendi sayısal modeline göre özelleştirerek kullanabilir. İşleri başlatmak için PUTTY üzerinden *cd* komutuyla *scratch* dizinine (*cd /arf/scratch/kullanıcıadı*) gidilmelidir ve bu dizinde terminal üzerinde *sbatch openfoam11.slurm* komutuyla iş başlatılabilir. Dikkat edilmesi gereken husus, iş dosyasının ilk komutunun analiz yapılan dosyayı tarif etmesidir. Örnek bir iş dosyası aşağıdaki gibidir:

```
#!/bin/bash
#SBATCH -p orfoz
#SBATCH -A kullanıcıadı
#SBATCH -J ofoam-par
#SBATCH -C weka
#SBATCH --nodes=1
#SBATCH --ntasks=110
#SBATCH --cpus-per-task=1
#SBATCH --time=3-00:00:00
#SBATCH --mail-user=xxx@gmail.com

cd /arf/home/kullanıcıadı/model
module load apps/openfoam/11
blockMesh
```

```
snappyHexMesh -overwrite
```

```
setFields
```

```
decomposePar
```

```
mpirun --bind-to core --map-by core --mca btl ^openib -np 100 interFoam -  
parallel > log
```

```
reconstructPar -latestTime
```

```
rm -rf processor*
```

```
rm -rf log
```

Buradaki kodlar, analiz süresi, çekirdek sayısı gibi parametreler kullanıcı ihtiyacına göre değiştirilebilir. Analizlerin yürütülmesi için kullanılan çekirdek sayısı, *decomposePar* dosyasındaki çekirdek sayısı ile aynı olmalıdır. Analizlerin anlık durumunu takip etmek için *squeue* komutu kullanılabilir. Eğer bir analiz iptal edilmek isteniliyorsa *scancel -işnumarası* komutu kullanılabilir.

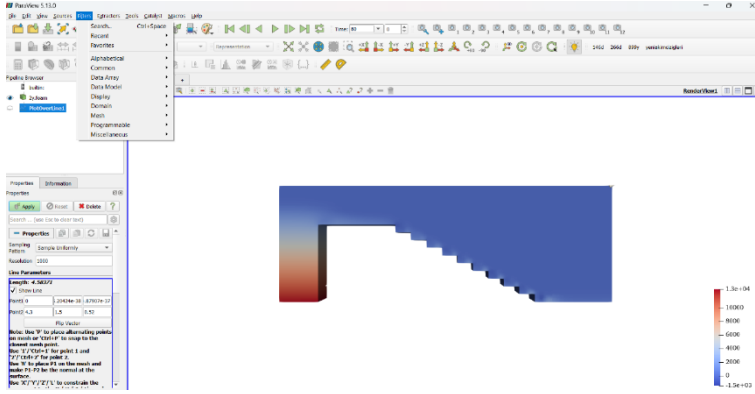
7. ARF SİSTEMİNDEN SONUÇLARIN ALINMASI VE WINDOWS ÜZERİNDEN PARAVIEW KURULUMU

Analizler tamamlandıktan sonra WinSCP üzerinden sürükle-bırak yapılarak dosyalar kullanıcının kendi kişisel bilgisayarına aktarılabilir. Sonuçların alınmasında ve görselleştirilmesinde ParaView kullanılmaktadır. Bazı bilgisayarlarda Windows üzerinden terminalde Ubuntu'ya bağlanılıp paraFoam komutuyla erişim sağlanabilir ancak OpenFOAM'ın 11 versiyonunda bu kod çalışmayabilir. Bunun önüne geçmek için Windowsa ParaView kurulabilir. ParaView'i kullanmak için <https://www.paraview.org/download/> internet sitesinden istenilen versiyon indirilir ve bilgisayara kurulur. Paraview'i kurduktan sonra dosya konumuna gidip masaüstüne kısayol alınabilir.

Paraview'i çalıştırmak için *.foam* uzantılı bir dosya gereklidir. İstenilen analiz klasörüne gidilip burada terminal açılır ve *wsl* komutuyla Ubuntu'ya bağlanılır ve *nano dosyaadı.foam* ile foam uzantılı bir dosya oluşturulur. Kod yazıldıktan ve enter denildikten sonra çıkan pencerede sırasıyla *Ctrl+O* , *Enter* , *Ctrl+X* yapılır ve *.foam* uzantılı dosya oluşturulur. Bu işlemlerin ardında Windows'a kurulan Paraview açılır ve *Open File (Ctrl+O)* sekmesi ile analiz dosyası konumunda bulunan *.foam* uzantılı dosya seçilip *apply* denilir ve sonuçların alınması için ParaView artık kullanıma hazır hâle gelir.

8. PARAVIEW ile SAYISAL SONUÇLARIN ALINMASI, GÖRSELLEŞTİRİLMESİ VE MAKRO KULLANIMI

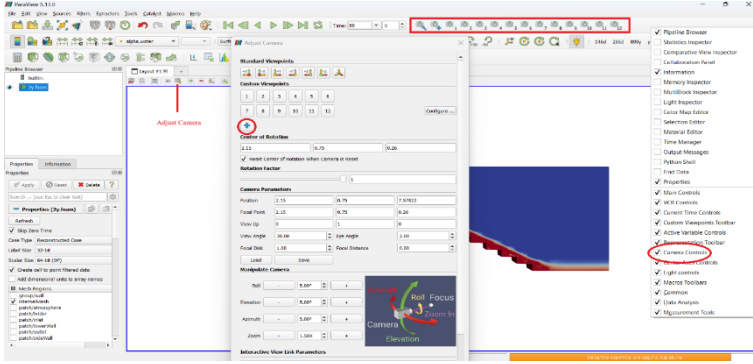
Paraview açıldıktan sonra işlem yapılacak zaman adımına gidilerek istenilen bir noktada .csv dosyası alınabilir. Bunun için *Plot Over Line* seçeneği kullanılabilir. *Plot Over Line*'a erişmek için üst sekmeden *Filters – Alphabetical – Plot Over Line* yolu izlenebilir (Şekil 8.1). Excelde ihtiyaca binaen işlemler yapılabilir, grafikler çizilebilir.



Şekil 8.1. ParaView arayüzü

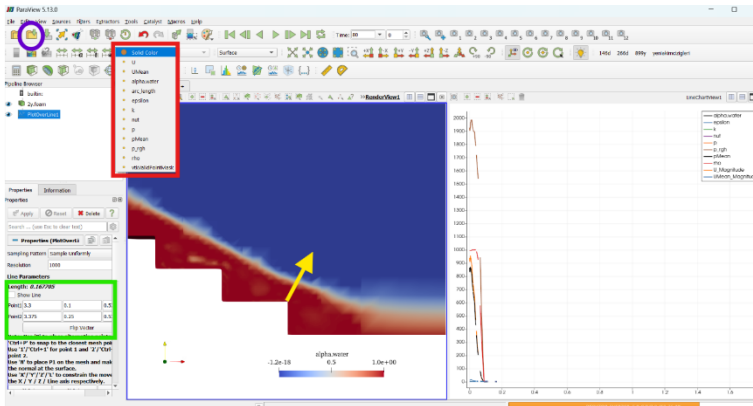
Sonuçların görselleştirmek için genel olarak su yüzü profili, akım çizgileri gibi görüntüler hız lejantı üzerinden verilmiştir. Bu bölümlerdeki detaylar OpenFOAM kullanıcıları için farklı çözücülerde de işe yarayacaktır.

Öncelikle görsellerin ölçeklendirilmesi için bazı kamera açıları belirlenmiştir. Bu kamera açıları birbirleriyle benzer veya farklı birçok analiz için ölçeklendirme sağlayabilmektedir. Kamera açısı kaydetmek için öncelikle ParaView ekranında istenilen açı ayarlanmalıdır ve daha sonra *Adjust Camera* seçeneğine tıklanılıp *Custom Viewpoints* sekmesinde artı işaretine tıklanmalıdır. İstenilen kamera açısına gelmek için ise üst barlarda *Camera Controls* barı açık olmalıdır ve burada eklenen kamera numarasına tıklanılıp istenilen açığa gidilebilir (Şekil 8.2).



Şekil 8.2. Kamera ayarlarına erişim

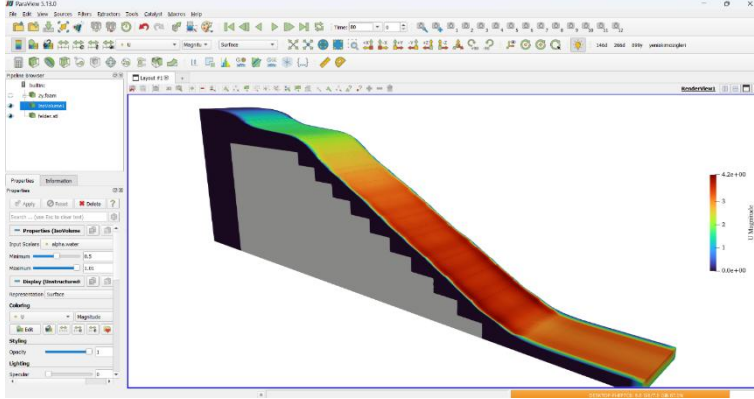
ParaView ile sayısal verileri almak için yaygın olarak kullanılan araçlardan birisi *Plot Over Line*'dir. *Plot Over Line*, iki nokta arasında hayali bir çizgi oluşturarak bu çizgi üzerindeki sayısal parametreleri Microsoft Excel'e .csv dosyası olarak aktarabilen ve grafiklerini anlık olarak sunabilen bir işleve sahiptir. Bu yöntemle; hız, basınç, türbülans, α .water, sıcaklık gibi parametrelerin sayısal değerleri elde edilip bunlar Microsoft Excel'e ya da herhangi bir grafik çizim programına aktarılıp istenilen işlemler yapılabilir (bknz. İkinciogullari 2023, 2024). *Plot Over Line*'a *Filters – Alphabetical* bölümünden erişilebilir. Hayali çizgi için iki nokta belirlenmelidir ve bunlar *Line Parameters* sekmesi altında yapılabilir. Point1, birinci noktasının sırasıyla x , y ve z koordinatlarını ifade ederken; Point2, ikinci noktasının x , y ve z koordinatları verir bu iki çizgi arasında hayali çizgi üzerinden veriler *apply* denilerek elde edilebilir. Apply denildikten sonra *File – Save Data* ile sayısal veriler bilgisayara kaydedilebilir (Şekil 8.3).



Şekil 8.3. Plot Over Line

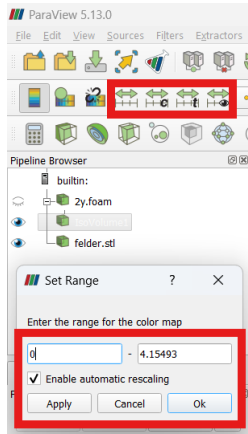
Su yüzü profilini almak için ise *Contour* ve *ISO Volume* adında iki seçenek mevcuttur ve bunlara yine *Filters – Alphabetical* bölümünden erişilebilir (Şekil

8.4). *Contour* seçeneği görsellerde daha sınırlı katmanlar sunarken *ISO Volume* daha dolgun katmanlar sunmaktadır. Her iki seçenek de seçilirken *alpha.water* sınır aralığı, ihtiyaca göre belirlenebilir. Ek olarak *snappyHexMesh* ile oluşturulan modellerde *stl* dosyaları *Pipeline Browser* bölümüne sürüklenerek daha iyi görseller elde edilebilir.



Şekil 8.4. ISO Volume ile su yüzü profilinin görselleştirilmesi

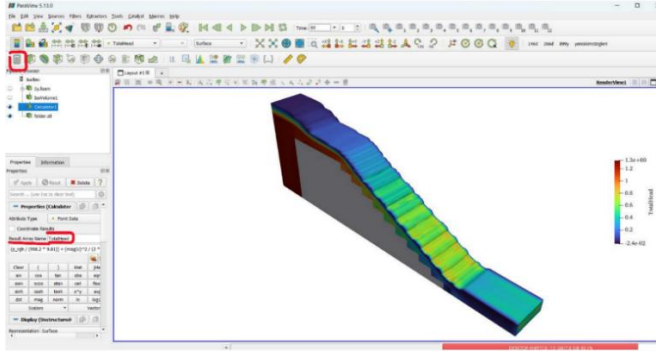
Görseller; hız, basınç, *alpha.water* gibi lejantlarda yine isteğe göre sunulabilmektedir. Lejantlardaki renkler de *Coloring* bölümünde *Edit Color Map* seçeneği ile değiştirilebilir. Değer aralıkları da *Rescale* seçenekleri ile yeniden belirlenebilir (Şekil 8.5). Ekran görüntülerini kaydetmek için ise yapılan işlemlerin ardından üst sekmeden *File – Save Screenshot* seçeneği takip edilmelidir ve ekran görüntüsü ayarları, arka plan durumu, çözünürlük gibi seçenekler yine özelleştirilebilir.



Şekil 8.5. Renk skalası ayarları

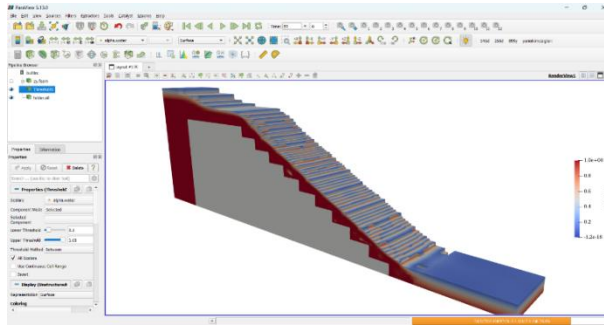
ParaView, bünyesinde bulundurduğu *Calculator* seçeneği ile 0 dosyasında mevcut veriler üzerinden hesaplama imkânı sunmaktadır ve yapılan bu hesapların

görselleştirilmesi mümkündür. *Result Array Name* ile girilen formüle, hesaba, isim verilebilir ve hemen altındaki boşluğa istenilen formül yazılabilir (Şekil 8.6).



Şekil 8.6. Hesap makinesi kullanımı

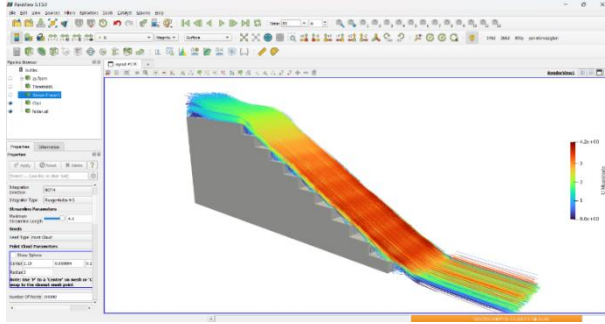
Akım çizgileri açılırken öncelikle *alpha.water*'dan kaynaklı bazı gereksiz ve hatalı çizgilerin önüne geçmek için filtreleme yapılması gerekmektedir ve bunun için ParaView'de *Threshold* seçeneği kullanılır. Bu seçeneğe erişmek için *Filters – Alphabetical – Threshold* yolu izlenebilir veya üst sekmelerdeki kısayol seçeneklerinden erişilebilir (Şekil 8.7). *Threshold* seçeneği *alpha.water*, basınç, hız değerleri gibi parametrelerde filtreleme yapılması için kullanılır. Filtreleme yapmak için *Threshold*'u seçtikten sonra açılan sol sekmeden filtreleme yapılacak parametre ve değer aralığı girilip *apply* butonuna tıklanmalıdır. Ek olarak, çizimlerde kesmeler için *Threshold* ile aynı bar üzerinde bulunan *Clip* ve *Slice* seçenekleri de dilimlemeler için kullanılabilir.



Şekil 8.7. Threshold ile filtreleme

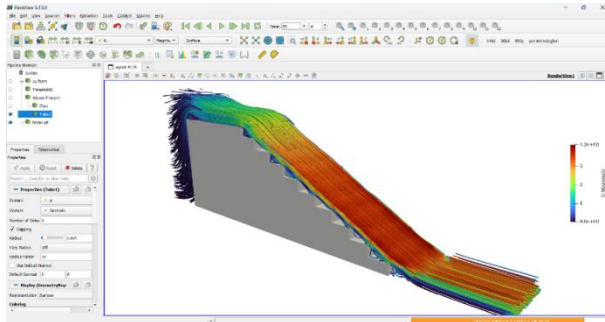
Threshold yapıldıktan sonra akım çizgilerinin çizilmesine geçilebilir. Akım çizgilerini çizmek için *Stream Tracer* metodu kullanılır. *Stream Tracer*'a yine barlar üzerinden veya *Filters – Alphabetical – Stream Tracer* yolundan erişim sağlanabilir. Akım çizgilerini çizmek için *Stream Tracer* seçildikten sonra *Streamline Parameters* bölümünde akım çizgilerinin uzunluğu belirlenebilir. İki farklı şekilde akım çizgilerinin çizmek mümkündür ve bu *Seeds* bölümünde *Seed Type* sekmesiyle belirlenebilir. Burada mevcut seçenekler *line* ve *point cloud*

metotlarıdır ve *point cloud* daha efektif sonuçlar vermektedir. İstenilen metot seçildikten sonra *Sphere Parameters* bölümünde, 1 ine için ikişer adet x , y , z koordinat değerleri girilmeli; *point cloud* için ise bir merkez noktası koordinatı ve çap değeri girilmelidir. Görüntülerde bu referans noktalarının, çizgilerinin görünmemesi için *Show Sphere – Line* kutusu inaktif hâle getirilmelidir. Akım çizgilerinin sayısı ise *Number of Points* seçeneğiyle belirlenebilir. Akım çizgileri arttıkça işlemcilere binen yük de artacaktır (Şekil 8.8).



Şekil 8.8. Akım çizgilerinin görselleştirilmesi

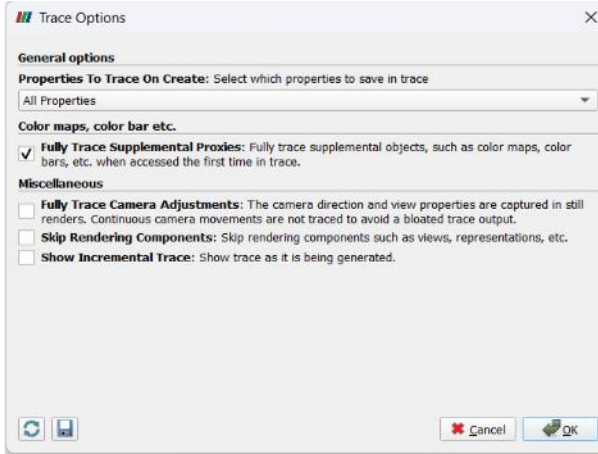
Çizilen bu akım çizgilerini görsel olarak daha da etkili hâle getirmek için *Filters* menüsü altından *Tube* seçeneği kullanılabilir. Tube, her bir akım çizgisinin yarıçapı değerini ve dolgunluğunu iyileştirerek görsellerin daha kaliteli olmasına olanak sağlamaktadır. Tube seçeneğini kullanmak için öncelikle bir çap değeri belirlenmelidir. Şekilleri daha da özelleştirmek için *Radius Factor*, *Number of Sides* gibi değerler üzerinde de değişimler yapılabilir (Şekil 8.9).



Şekil 8.9. Tube komutunun kullanılması

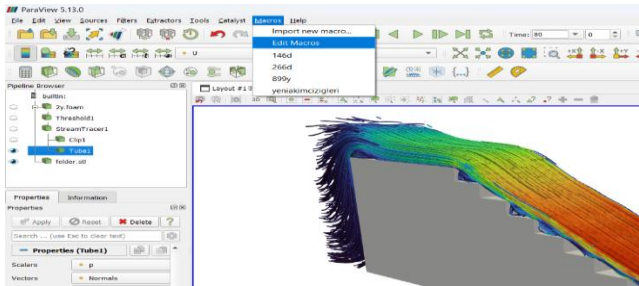
Yapılan tüm bu işlemler eğer birçok model üzerinden yapılacaksa bu işlemleri otomatik hâle getirmek için ParaView'in sunduğu makro seçeneği kullanılabilir. Makrolar yapılan her adımı kendi hafızasına Python dilinde kaydederek aynı işlemlerin başka modeller için tek bir tuşla tekrarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bir makro oluşturmaya başlamak için model dosyasını açtıktan hemen sonra kayıt işlemine başlanması sağlıklı olacaktır. Modelinizi ParaView ile açtıktan hemen sonra makro kaydetmeye başlamak için üst sekmelerden *Tools* bölümü altından

Start Trace seçilmelidir. Açılan *Trace Options* penceresinde makro kaydedilmesi için gerekli ayarlamalar yapılmalıdır. Tüm adımların kaydedilmesi için *All Properties* seçilmelidir (Şekil 8.10).



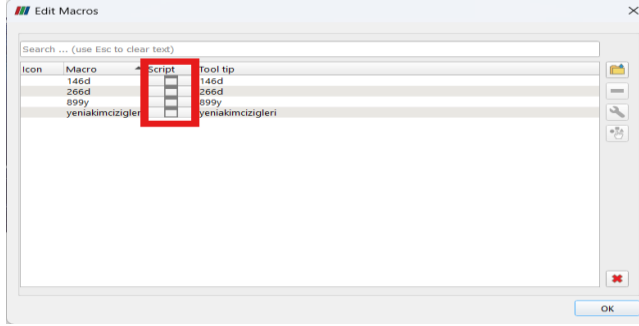
Şekil 8.10. Makro başlangıç ayarları

Makronun kaydetmeye başlayıp başlamadığı yine *Tools* sekmesi altından *Start Trace* yerine *Stop Trace* butonunun olup olmadığını kontrol edilerek sağlanılabilir. Makro kaydı açıkken artık tekrarlı uygulamaları tek bir butonla çalıştırmak için yapılacak işlemler sırasıyla en ince detayına kadar uygulanmalı ve iş bitiminde *Tools* menüsü altından *Stop Trace* butonuna tıklanıp bitirilmelidir. Makro kaydı bittikten sonra açılan *script editör* dosyasında *File* sekmesi altından makro olarak kayıt almak için *Save As Macro* seçilmelidir ve makroya isim vererek kayıt işlemi tamamlanabilir. Kaydedilen makroyu çalıştırmak için üst sekmelerde *Macros* bölümüne gidilerek isim verilen makroya tıklayarak çalıştırma işlemi gerçekleştirilebilir. Makrolarda düzenleme, *script* dosyasına erişim, makro silme vb. işlemler için *edit macros* seçeneğine gidilebilir (Şekil 8.11).



Şekil 8.11. Makrolara erişim

Edit Macros menüsü altından *Script* dosyasına erişmek için *Script* sütunundan düzenleme yapılması istenilen makro seçilmeli ve pencere şeklindeki butona tıklanmalıdır. Kaydedilen bir makroyu silmek için ise ilgili makroyu seçip sağ tarafta sil butonuna tıklanılabilir (Şekil 8.12).



Şekil 8.12. Makro düzenleme menüsü

Makrolar oluşturulduktan sonra kayıt esnasında yapılan her bir adımı harfiyen tekrarlar ve makro hangi andan itibaren kaydedilmeye başlandıysa makroyu çalıştırmadan evvel aynı noktada bulunulmalıdır. Makro kaydı esnasında dosyalar, görüntüler vb. alınırken gidilen dizin ve dosyalara, görüntülere vs. verilen isim aynı şekilde makro her çalıştığında tekrarlanacaktır. Burada makrodan alınan veriler kayıt yolundan kişisel bilgisayarda istenilen konuma taşınmalıdır zira bu işlem yapılmazsa makro sonraki her çalışma durumunda önceki dosyaların üzerine yazacağından dosya kayıpları söz konusu olacaktır. Şekil 8.13'te ParaView üzerinden alınan bir görüntünün makro script dosyası içerisinde kayıt yolu gözükmemektedir. Bu makro çalıştırıldığında kişisel bilgisayarda aynı dosya yolu izlenecek ve aynı dosya ismi verilip aynı formatta veriler kaydedilecektir.



Şekil 8.13. Script dosyası üzerinde örnek bir kayıt yolu, dosya adı ve dosya formatı bilgileri

Script dosyasındaki veriler Python dilinde yazılmıştır. Eğer makroyu çalıştırıldığında eksik veri girişi vb. bir durum ile karşılaşırsa ilgili veri bölümü Python diliyle düzenlenebilir. Makroların çalışmasında bir önemli husus ise makronun kaydedildiği *.foam* uzantılı dosya ismi ile makronun çalıştırılacağı uygulamadaki oluşturulan *.foam* uzantılı dosya isimlerinin aynı olmasıdır. Script

dosyasında yapılan düzenlemelerin kalıcı olması için kayıt işlemi yapılmalıdır (Ctrl+S).

9. SONUÇ

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), deneysel çalışmaların sanal ortamda analiz edilmesine olanak sağlayan, çok kısa sürede büyük işler başarabilen bir yöntemdir. Artan deneysel maliyetler neticesinde araştırmacılar için büyük kolaylık sunan bu yöntem için birçok ticari yazılım olmakla birlikte açık kaynak kodlu OpenFOAM yazılımı da son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmeyi başarmıştır. HAD üzerine çalışan araştırmacılar için olmazsa olmaz bir diğer konu ise yüksek çekirdek sayılı iş istasyonlarıdır. Simülasyonun paralel olarak çözülmesi sayesinde analiz süresi önemli ölçüde azalmaktadır. TÜBİTAK'ın yüksek başarımlı hesaplama ihtiyaçları için sağladığı modern hesaplama kümeleri ile araştırmacılar bu olanaktan ücretsiz faydalanabilmektedir. Bu çalışmada; HAD yöntemine ilgi duyanlar için açık kaynak kodlu OpenFOAM 11 yazılımının Windows işletim sistemine kurulumu adım adım anlatılmıştır. İş istasyonu olmayan kullanıcılar için de TÜBİTAK'ın ARF sisteminin kurulum ve kullanım aşamaları resimlerle desteklenmiştir. Ayrıca, örnek bir çalışmaya ait sonuç çıktılarının görselleştirilmesi için paraView yazılımında izlenecek adımlar vurgulanmıştır. Faydalı olması duasıyla...

TEŞEKKÜR

Bu araştırmada yer alan tüm nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir. Katkı ve desteklerinden dolayı TÜBİTAK ULAKBİM'e ve uzmanlarına teşekkür ederiz.

Sorumluluk Reddi

OpenFOAM® ve OpenCFD®, üretici OpenFOAM yazılımı olan OpenCFD Limited'in tescilli ticari markalarıdır. Bu kitap bölümü, OpenFOAM yazılımının www.openfoam.com üzerinden üreticisi, dağıtıcısı ve OPENFOAM® ve OpenCFD® ticari markalarının sahibi olan OpenCFD Limited tarafından doğrulanmamıştır veya onaylanmamıştır. Yazarların OpenCFD ile herhangi bir ilişkisi yoktur. Burada adı geçen tüm ürün adları, ilgili sahiplerinin ticari markaları veya tescilli ticari markalarıdır.

KAYNAKÇA

- Felder, S., Guenther, P. ve Chanson, H. (2012). Air-water flow properties and energy dissipation on stepped spillways: a physical study of several pooled stepped configurations.
- Greenshields, C. (2023). *OpenFOAM v11 User Guide*. London, UK: The OpenFOAM Foundation. <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v11> adresinden erişildi.
- İkinciogullari, E. (2023). A novel design for stepped spillway using staggered labyrinth trapezoidal steps. *Flow Measurement and Instrumentation*, 93, 102439. doi:10.1016/J.FLOWMEASINST.2023.102439
- İkinciogullari, E. (2024). Energy dissipation performance of labyrinth and harmonic stepped spillways, 26(10), 2668–2682. doi:10.2166/hydro.2024.221
- İkinciogullari, E. (2019). *Serbest Düşülü Savakların Mansabında Oluşan Yerel Oyulmanın Analizi*,. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kılıç, Z. (2020). *Piyano Tuşu Yan Savakların Hidrolik Karakteristiklerinin Sayısal ve Deneyisel Analizi*,. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Microsoft. (2025). Linux için Windows Alt Sistemi nedir? <https://docs.microsoft.com/tr-tr/windows/wsl/about> adresinden erişildi.
- TÜBİTAK ULAKBİM. (2025). *Türk Ulusal Bilim e-Altyapısı (TRUBA)*. <https://docs.truba.gov.tr/> adresinden erişildi.
- Usta, E. (2014). *Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Laleli Dam Spillway and Comparison with Physical Model Study*,. M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Civil Engineering Department.
- Uzol, N. S. (2021). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'ne Giriş ve Aerodinamik Simülasyonlar (Ders Notları)*.
- Yalçın, E. E. (2022). *Basamaklı Dolusavakların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi ile İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.



BÖLÜM 2

Katı Atık Depolama Sahalarında Stabilit  Sorunları: Filipinler Payatas Depolama Sahası  rneği

Gökçe Buse Güner Karaca¹ & Ertuğrul Ordu²

Giriş

Günümüz dünyasında hızlı nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme ile katı atık miktarında önemli artışlar yaşanmaktadır. Bu durum, atık yönetimini  evre mühendisliği ve geoteknik mühendisliği açısından kritik bir sorun haline getirmiştir (Kamer, 2018). Katı atıkların bertarafında kullanılan yöntemler arasında düzenli depolama, kontrollü yakma, kompostlama, geri dönüşüm ve geri kazanım yer almaktadır. Ancak tüm bu yöntemler arasında, düzenli depolama sahası uygulaması hem ekonomik olması hem de teknik açıdan uygulanabilirliği nedeniyle dünya genelinde en yaygın kullanılan yöntemdir (Pulat, 2014).

Katı atıkların en yaygın bertaraf yöntemi düzenli depolama sahaları olsa da, mühendislik standartlarına uygun olmayan sahalarda çevresel risklerin yanı sıra şev stabilitesi açısından da büyük tehlikeler yaratmaktadır. Tarihsel olarak incelendiğinde, birçok büyük ölçekli felaketin (Hekimbaşı-İstanbul 1993; Dona Juana-Kolombiya 1997; Payatas-Filipinler 2000; Leuwigajah-Endonezya 2005; Shenzhen- in 2015) mühendislik yetersizliklerinden kaynaklandığı görülmektedir.

Bu çalışmada, öncelikle katı atık depolama sahalarının stabilite sorunları genel olarak tartışılmaktadır. Ardından Filipinler Payatas Depolama Sahası vaka çalışması üzerinden bu sorunların mühendislik analizleri sunulmaktadır. Böylelikle Payatas sahası, yalnızca bölgesel bir örnek değil, dünya genelindeki benzer sorunlara ışık tutan bir vaka olarak ele alınmaktadır.

Bu çalışmanın amacı ise Filipinler Payatas depolama sahasında meydana gelen şev göçmesini örnek olay olarak incelemek ve modern geoteknik analiz yöntemleriyle sahanın stabilite durumunu değerlendirmektir. Çalışmada, şev göçmesinin nedenlerini anlamak ve benzer felaketlerin önlenmesi için gerekli tasarım ve işletme kriterlerini belirlemek amacıyla geri analiz yöntemi kullanılmıştır. Payatas depolama sahasının seçilme nedenleri arasında; sahanın vahşi (kontROLSüz) depolama sahası özelliği göstermesi, büyük bir felakete yol a ması, detaylı saha bilgilerinin literatürde mevcut olması ve farklı analiz programlarının karşılaştırılmasına olanak tanınması yer almaktadır.

¹ Namık Kemal Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-5182-6123

² Dr., Namık Kemal Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-8877-5617

Stabilite analizlerinde kayma mukavemetini tahmin edebilmek için geri analiz yöntemi tercih edilmiştir. Analizler, sonlu elemanlar yöntemi kullanan Plaxis 2D ve Plaxis 3D (CE V20) programları ile limit denge yöntemini kullanan Slide (version 6.0) programında gerçekleştirilmiştir (Güner, 2022). Bu farklı yaklaşımların kullanılması, sonuçların güvenilirliğini artırmakta ve farklı analiz yöntemlerinin karşılaştırılmasına imkan vermektedir.

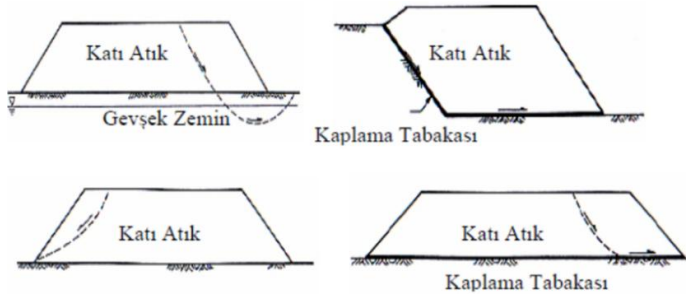
Elde edilen bulgular, depolama sahalarının tasarımında ve işletilmesinde dikkate alınması gereken kritik faktörleri ortaya koymakta ve gelecekte benzer felaketlerin önlenmesine yönelik önemli öneriler sunmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Katı Atık Sahalarında Stabilite Sorunları

Katı atık depolama sahalarındaki şev stabilite analizleri, gerek depolama esnasında oluşan şevlerin stabiliteleri gerekse de eski veya kullanılmayan katı atık depolama sahalarının yeniden kullanımı durumunda, tasarımı açısından önemlidir. Katı atık sahalarındaki şevlerde görülen stabilite problemleri, normal şevlerde gözlenen problemlerle genel olarak benzerlik göstermektedir. Katı atık içeriğindeki homojen olmayan maddeler ve üniform olmayan dağılım nedeniyle, şevlerde yüzeysel kopmalardan geniş heyelanlara kadar uzanan bir hareket gözlemlenmektedir (Kezer, 2019).

Şekil 1- Katı atık gövdesinde oluşması muhtemel kayma düzlemleri



Depolama sahalarında oluşan şev stabilite sorunlarının başlıca nedenleri şunlardır (Güner, 2022),

- Uygunsuz depolama sahası tasarımı: Depolama sahalarının geoteknik açıdan uygun olmayan alanlarda kurulması, yetersiz zemin araştırmaları, yanlış şev açısı ve yükseklik seçimi kritik tasarım hatalardır. Şevlerin tavsiye edilenden daha dik olması (Örneğin; Payatas' da 1.5H:1V), göçme riskini önemli ölçüde artırmaktadır.

- Depolama sahalarında günlük örtü seriminin yapılmaması: Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi ve İşletme Kılavuzu (2014)' na göre gün sonunda 30 cm kalınlığında toprak tabakasıyla örtülmelidir. Günlük örtü serilerek; uçuşabilecek maddelerin rüzgârla sürüklenmesinden, kemirgenlerden, taşıyıcı hayvanlardan, haşerelerden ve kokudan kaynaklanan sorunların önüne geçilmektedir. Atıklar planlanan hücre yüksekliğine ulaştığında bir ara örtü oluşturmak için ek bir toprak örtüsü serilmelidir. Ara örtü 50 cm kalınlığında olacak ve bir ay ile altı ay üzerine atık boşaltılamayacak alanlara serilecektir. Örtü yapılmaması, yağmur sularının doğrudan atık kütlesi içine sızmasına neden olur.
- Atık sıkıştırmasının yetersizliği veya yokluğu: Atıkların düzenli olarak sıkıştırılmaması, düşük yoğunluklu ve düşük mukavemetli bir atık kütlesinin oluşmasına yol açar. Payatas depolama sahasında atığın çok az sıkıştırılması ya da hiç sıkıştırma yapılmaması, düşük yoğunluklu bir atığın oluşmasına yol açmış ve bu durum göçmeyi tetikleyen önemli faktörlerden biri olmuştur.
- Sızıntı suyu ve gaz basıncı oluşumu: Depolama sahalarında organik maddelerin anaerobik parçalanması sonucu metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) gazları oluşur. Bu gazların uygun şekilde tahliye edilmemesi, atık kütlesi içinde basınç artışına neden olarak şev stabilitesini olumsuz etkiler. Benzer şekilde, sızıntı suyunun drenajının yetersiz oluşu, atık kütlesi içinde boşluk suyu basıncının artmasına ve efektif gerilmelerin azalmasına yol açar.
- Aşırı Yağışlar ve Yeraltı Suyu Etkisi: Şiddetli yağışlar, atık kütlesinin doygunluğuna neden olarak kayma mukavemetini önemli ölçüde azaltır. Payatas depolama sahasında göçmeden iki hafta önce iki tayfundan kaynaklanan 68 cm yağış, tüm atık kütlesinin muhtemel doygunluğuna neden olmuştur. Bazı durumlarda, yeraltı suyu koşulları aşırı hava koşulları nedeniyle daha da kötüleşerek şev göçmelerine neden olmaktadır.
- Şev açısı ve yüksekliğinin fazla oluşu: Depolama kapasitesini artırmak amacıyla şevlerin gerekenden daha dik yapılması ve atık yığını yüksekliğinin fazla olması, şev stabilitesi açısından kritik risk faktörleridir. Şev yüksekliğinin artması, kayma kuvvetlerinin artmasına ve güvenlik sayısının azalmasına neden olur. Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi ve İşletme Kılavuzu (2014)' na göre atık lotlarının taban şev eğimleri 1(dikey) /3(yatay)' ü geçmemelidir. Payatas depolama sahasında şevlerin tavsiye edilenden

daha dik olmasına neden olan atıkların birikmesiyle kayma anında şev eğimi $1(V) / 1.5(H)$ şeklindedir.

- Drenaj sistemlerinin yetersizliği: Yüzey suyu drenajı ve sızıntı suyu drenajının yetersiz olması, atık kütlesi içinde su birikmesine ve boşluk suyu basıncının artmasına neden olur.
- Sismik etkiler: Deprem bölgelerinde yer alan sahalar, sismik yükler nedeniyle ani göçmelere karşı daha hassastır.

Yöntem

Stabilite Analiz Yöntemleri

Geoteknik mühendisliğinde şevin stabilitesi önemlidir. Deprem, sel, heyelan gibi doğal afetlerde şevin göçme durumunda ciddi can ve mal kaybı oluşmuştur. Şev analizleri bu nedenle stabilitenin sağlanması için önemli mühendislik problemi haline gelmiştir (Kezer, 2019).

Tablo 1- Şev duraysızlıklarının nedenleri

1. Stabilitayı azaltan uzun dönem etkileri	2. Dengenin kaybolmasına neden olan kısa dönem etkileri
• Doğal ya da yapay şevin kullanımında ya da şeklinde değişiklik, • Zeminin jeolojisi (kil ya da marn türü zeminlerin varlığı), • Zeminin gerilme geçmişi, • Zeminde daha önce heyelanlanmış eski bir kaymaların oluşması ve günümüzde fark edilememiş olması, • Çok eski tektonik hareketler nedeniyle zemin içinde oluşan kayma yüzeyleri, • Ayrışma nedeniyle ana malzemeden farklı minerallerin ve daha yumuşak zeminlerin oluşmasına neden olan mekanizma, • Erozyon nedeniyle şev geometrisinin değişmesi ya da zemin içine su sızması ve malzeme yıkanması nedeniyle iç yapının değişmesi, • Yüzey ve yeraltı suları nedeniyle zemin mukavemetinin düşmesi, • Şişen zeminlerin varlığı.	• Aşırı yağış nedeniyle zeminin suya doymun hale gelmesi kar erimesi, yüzeysel drenlerin çalışamaz hale gelmesi, • Sızıntı suyu basıncı, yeraltı suyunun mevsimsel dalgalanması, • Deprem yükleri ya da dışarıdan uygulanan titreşimler, • Yükleme durumunda geometri ya da yeni bir yapı nedeniyle değişiklik, • Şev geometrisinde değişiklik.

Ülkemizde ise en tehlikeli afet türleri için deprem ve heyelandır (Tekin, 2011). Heyelanlar ya da şev duraysızlıklarının nedeni, zemin kütlesi içindeki denge

durumunun bozulmasıdır. Bu şekilde kuvvet dengesi kaybolarak heyelanlar oluşur. Stabilitayı azaltan uzun dönem etkileri ve dengenin kaybolmasına neden olan kısa dönem etkileri olmak üzere Tablo 1’ de bahsedilmektedir (Tekin, 2011).

Katı atık sahalarının stabilitesi, geoteknik mühendisliğinde kullanılan klasik yöntemlerle incelenebilir. Ancak atıkların heterojen yapısı, bu analizlerin dikkatli yapılmasını gerektirir.

Stabilite hesap yöntemleri 3’ e ayrılır. Bunlar; Limit denge yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve sismik analiz.

Limit Denge Yöntemi

Şevin kaymaya karşı güvenlik katsayısı FS; ifadesiyle hesaplanır. Bu formüldeki M_r veya F_r harekete karşı koyan momentler veya kuvvetlerdir. M_d veya F_d hareketi tetikleyici momentler veya kuvvetlerdir (Akyol, 2008).

$$FS = \frac{\sum M_r, (F_r)}{\sum M_d, (F_d)} \quad (1)$$

Geoteknik mühendisliği problemleri çözümlenirken, limit denge analizleri yıllardır kullanılmaktadır. Limit denge analizlerinde kaymanın belli bir yüzey boyunca olduğu kabulü yapılır ve kayan kütle bir bütün olarak veya dilimlere ayrılarak, kayma yüzeyi boyunca oluşan gerilmeler ile kayma mukavemeti karşılaştırılır (Kezer, 2019). Bu analiz yöntemlerinde, Mohr-Coulomb gerilme kriterleri ile şevin üç ana statik denge eşitliği aranır (Akçakal, 2009).

Üç ana limit denge analizi mevcuttur. Bunlar; dilim, kama ve sonsuz eğim yöntemi şeklinde sıralanabilir (Kezer, 2019).

Dilim yöntemi; şev stabilite analizleri için en çok kullanılan limit denge yöntemlerindedir. Bu yüzden dilim yöntemiyle güvenilir sonuçlar veren çok sayıda bilgisayar programı bulunmaktadır. Şev stabilite analiz programlarıyla; kayma yüzeyi, zemin parametreleri ve boşluk suyu gibi değişkenler programda değiştirilerek gerekli analizler gerçekleştirilmektedir (Kezer, 2019).

Dilim yöntemlerinde farklı kabullerle çözüm yapılmaktadır. Bunlar;

- İsveç Dilim,
- Bishop,
- Janbu
- Spencer,

- Morgenstern ve Price, vb.

Bishop yöntemine göre geliştirilen Janbu yöntemi daha hassas çözümleme sağlayabilmektedir. Ancak daha sonra yöntemin el ile çözümlemesi uzun süre aldığı için basitleştirilmiş Janbu yöntemi adını almıştır (Başar, 2024).

Payatas depolama sahasında; Slide (version 6.0) programı ile analiz yapılırken limit denge yöntemlerinden “Basitleştirilmiş Janbu yöntemi” tercih edilerek güvenlik sayısı elde edilmiştir.

Slide, kaya veya zemin şevlerindeki dairesel veya dairesel olmayan kırılma yüzeylerinin güvenlik sayısını veya göçme olasılığını değerlendirmek için 2 boyutlu bir limit denge şev stabilite programıdır (Coşkun, 2021). Slide programında Spencer, Morgenstern-Price gibi titiz yöntemlerin yanında, basitleştirilmiş Bishop, düzeltilmiş/basitleştirilmiş Janbu, Fellenius, Lowe-Karafiath gibi metotlarla da analizler gerçekleştirilir. Kaya kütlelerinde; deformasyon ve dayanım özelliklerinin belirlenmesinde çoğunlukla Hoek-Brown yenilme kriteriyle şevlerde güvenlik sayısı analizleri yapılır. Slide’ da en kritik göçme daireleri, kullanıcı tarafından noktasal olarak tanımlanabilir. Tercih edilen bir bölgedeki veya tanımlanan aralık için tüm sistemdeki kritik göçme daireleri ve güvenlik sayıları görülebilir (Natur, 2018).

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminin ilkesinde; kütle eşit parçacıklara ayrılır ve bütün parçacıklar birbiriyle ilişkilidir. Her bir parçacık bir diğerine belli kuvvetler uygular ve onu hareket etmeye zorlar (Akyol, 2008).

Sonlu elemanlar yöntemindeki varsayım; sadece düğüm noktalarından bağlanmış olmasıdır. Bu şekilde, çözüm daha basitleşmiş olur. Diğer bir varsayımda; deplasmanların sadece bu noktalar tarafından aktarılmış olmasıdır. Bu şekilde, bilgisayar programlarında karmaşık problemler kolaylıkla çözüme kavuşmuştur.

Bilgisayar yazılımları sayesinde günümüzde sonlu elemanlar analizleri yapılmaktadır. Örneğin; “PLAXIS” programı bir sonlu analizlerin yapıldığı paket programdır. Ayrıca Payatas depolama sahasında Plaxis 2D ve 3D programları tercih edilmiştir ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar yazılımlarıyla yapılan çözümlerde zemin elemanlara ayrılır ve sonrasında sonlu elemanlar arasındaki ilişki hesaplanır (Polat, 2019).

Sismik Analizler

Statik analiz denildiğinde; şev hareketine neden olan temel kuvvet olan yerçekimi kuvveti anlaşılmalıdır. Depremde oluşan düşey ve yatay ivmeler ise içsel kuvvetlerin oluşmasına sebep olur. Şev stabilitesinde sismik analiz

yapılırken hesaplarda yatay deprem ivmesinin, düşey deprem ivmesi göre daha kritik durumlar oluşturduğu görülür. Bu yüzden; analizler yatay deprem ivmesine göre yapılır. Yerçekimi kuvveleri ise genellikle düşey deprem ivmesini sönümler (Akyol, 2008). Katı atık depolama sahalarında; dinamik yüklerle birlikte katı atık kendi içinde harekete geçer. Bu durumun dışında da endişe verici diğer durumlar ise; temeldeki kaplama tabakasına ve katı atığın üzerindeki kaplama tabakasına zarar verebilecek olmasıdır. Bu sebeple üst kaplama tabakasında, kopmalar, çatlaklar ve yarıklar meydana gelebilir. Ayrıca; sızıntı suyu ve gaz toplama sistemleri de dinamik yüklerin etkisi ile zarar görmüş olabilir (Akyol, 2008).

Teknik şartnameye göre (USEPA) şev stabilitesi güvenlik katsayısı 1,2 ila 1,7 arasında seçilmelidir. Tablo 2' de şev stabilitesi için güvenlik katsayıları verilmiştir. Parantezin dışındakiler statik analizlerde, parantezin içindikiler ise deprem yükleri altında yani sismik analizlerde kullanılması içindir. Şev analizlerinde; eğer depremin oluşturduğu ivme, hesaplanan şevin akma ivmesini geçiyorsa bir düzlem boyunca şev hareketi oluşur (Akyol, 2008).

Tablo 2- Şev stabilitesi için F_s , güvenlik katsayıları

	Mukavemet Parametrelerinde Belirsizlik Durumları	
Şev göçmesindeki tehlikelerin boyutları	Az	Çok
İnsan hayatı veya çevresel tehlikelerin yaşanmaması	1,25 (1,20)	1,50 (1,30)
İnsan hayatının tehlikeye girmesi veya çevresel tehlikelerin yaşanması	1,50(1,30)	>2.0(1,70)

Geri Analiz

Şev göçmesi yaşandığında, göçme anındaki şev koşulları hakkında geriye dönük bilgi edinebilmek için geri analiz yapılır. Şev duraylılığını kaybettiğinde, şevde güvenlik sayısı bir 1,0 olarak kabul edilir. Buna göre; uygun analiz yöntemi seçilerek göçme anındaki şev modeli gerçeğe en yakın şekilde modellenir (Ün B. ve Yıldız A., 2021). Başarılı bir geri analiz için şu hususlar önemli olmaktadır (Arioğlu ve Tokgöz, 2022):

- Yenilen şevin kayma öncesi ve sonrasına ilişkin şev geometrisi eksiksiz şekilde bilinmelidir.
- Yeraltı su seviyesinin değişimine ilişkin bilgiler bilinmelidir. Şev kütlesi kendi ağırlığının dışında ek yüklemeye maruz kalmış ise bu yüklemeye ait bilgiler (dağılımı, büyüklüğü) mevcut olmalıdır.

- Şevin yenilme mekanizmasına ilişkin arazi değerlendirmeleri bilinmelidir.
- $GS = 1$ koşulunu gerçekleştirecek stabilite analiz yöntemi, şevde gözlenen yenilme mekanizmasına uygun olmalıdır.

Geri analizde; şev göçmesinin olduğu anda güvenlik sayısının yaklaşık olarak 1,0 alınır. Analiz sonucunda elde edilen zemin parametreleri, şev yüzeyinde oluşan kaymanın ağırlıklı ortalama kayma dayanımı parametreleridir. Şev modelinde kaymanın gerçekleştiği bölgede, güvenlik sayısı 1,0 koşulunu sağlayan “ $c-\phi$ ” yani kohezyon ve içsel sürtünme açısı deneme yanılmayla belirlenir. Şevin birçok yüzeyinde yenilmeler oluştuysa, farklı kesitler için birçok Mohr-Coulomb kırılma zarfı oluşturulur. “ c ve ϕ ” grafik üzerinde bir araya getirilir ve kesiştiği noktadan kırılma yüzeyine ait kayma dayanımı parametreleri belirlenir (Ün ve Yıldız, 2021).

Uygulama Örneği: Payatas Depolama Sahası (Filipinler)

Payatas depolama sahası, Filipinler’deki Luzon adasında bulunan Quezon City’nin kuzeydoğu köşesinde yer almaktadır (Merry, Kavazanjian ve Fritz, 2005). Depolama alanı, kontrolsüz küçük bir atık depolama sahasına dönüşmüştür (Blight, 2008). 1973’den beri faaliyette olup 1996’dan beri yaklaşık 1500 ton evsel katı atık yerleştirilmiştir. Yerleştirmenin ardından atık, üst eğime bağlı sıkıştırılmıştır, böylece üst kısımda daha fazla atık için daha fazla alan oluşturulmuştur. Depolama alanının yüksekliği, göçmeden önce yaklaşık 30 m olmuştur (Sarihan, 2008).

Şekil 2- 2000 yılında Payatas depolama sahasında şev göçmesi

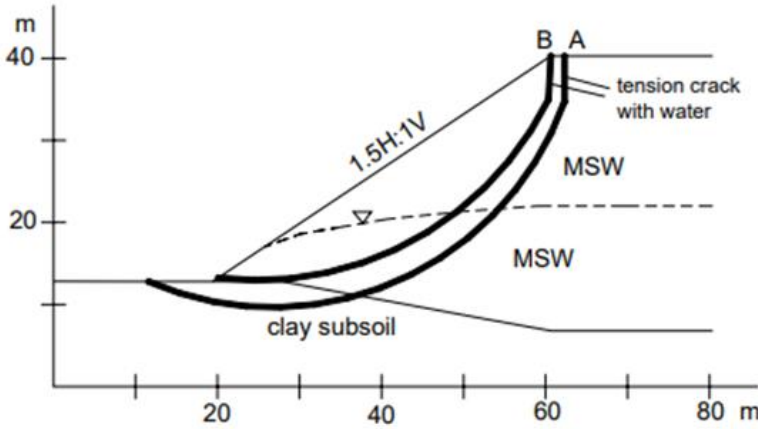


Şev göçmesi 10 Temmuz 2000’de meydana gelmiştir, (Şekil 2). Yaklaşık 1.2 milyon m³ kentsel atık kaymıştır ve 250’den fazla kişi ölmüştür. Atıklar ve enkazlar yamaç önünde 30.000 m²’lik bir alanı kaplamıştı. Atıklar, leş yiyen

hayvanların geri dönüşümü nedeniyle yüksek oranda plastik ve organik madde ve daha az metal, kağıt ve cam içermekteydi. Atığın çok az sıkıştırılması ya da hiç sıkıştırma yapılmaması, düşük yoğunluklu bir atığın oluşmasına yol açmıştı (Sarihan, 2008).

Şev göçmesinin nedeni net değildir, ancak kaymaya muhtemel birkaç faktör üzerinde durulmuştur (Sarihan, 2008). Bunlar, tüm atık kütlenin muhtemel doygunluğuna neden olan şiddetli yağmurlar (bölgede iki hafta içinde meydana gelen iki tayfundan kaynaklanan 68 cm yağış); şevlerin tavsiye edilenden daha dik olmasına neden olan atıkların birikmesi (1.5H:1V kayma anında); şevin üstünde su birikintisi; bu suyu boşaltmak için şevin üst kısmındaki drenaj hendeğinin inşası; şevin ucunda 2 ila 3 m derinliğinde drenaj hendeğinin inşası; ve düzenli depolama sahası gazının birikmesi.

Şekil 3- Payatas depolama alanının kesiti



Tablo 3- Payatas depolama sahasının özellikleri

Uygulama Örneği	Depolama Sahasının Özellikleri						
	Katı Atık Bertaraf Yöntemi	Depolama Başlangıç Tarihi	Facia Tarihi	Göçme Sonrası Sonuçlar	Şev Yüksekliği ve Açısı	Akan Atık Hacmi	Birim Hacim Ağırlığı ¹
Manila, Filipinler/ Payatas	Vahşi Depolama	1973	10 Temmuz 2000	Atıklar ve enkazlar 30.000 m ² 'lik bir alanı	33 m 40°	1.2 milyon m ³	10 – 14 kN m ⁻³

Depolama Sahası				kaplamıştı			
-----------------	--	--	--	------------	--	--	--

Tablo 3’ deki bilgiler de göz önüne alınarak Plaxis 2D, 3D ve Slide programlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Katı atıkların altındaki zemine ait mühendislik özelliklerine Tablo 4’ de yer verilmiştir.

Tablo 4- Zeminin mühendislik özellikleri

Katı Atığın Altındaki Zeminin Mühendislik Özellikleri	
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN m ⁻³)	20
Kohezyon, c (kN m ⁻²)	25
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	30
Elastisite Modülü, (kN m ⁻²)	30.000
Poisson Oranı, ν	0,35

Bulgular ve Tartışma

Payatas Depolama Sahası’ nda Analiz

Payatas depolama sahasında 3 ayrı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde farklı programlarda yapılan analizler ve güvenlik sayıları karşılaştırılmıştır. Analizlerde; Plaxis (2D CE V20), Plaxis (3D CE V20) ve Slide (version 6.0) programları kullanılmıştır.

Plaxis (2D) ile Analiz

Payatas depolama sahasına ait katı atığın mühendislik özellikleri Tablo 5’ de verilmiştir.

Depolama alanı, kontrolsüz yani vahşi depolama sahasıdır. 1973’ den beri faaliyette olup 1996’ dan beri yaklaşık 1500 ton katı atık yerleştirilmiştir. Yerleştirmenin ardından atık, üst eğim sıkıştırılarak, üst bölümde daha fazla atık için daha çok alan oluşturulmuştur. Bu da depolama sahasının göçmesinin nedenlerinden biridir.

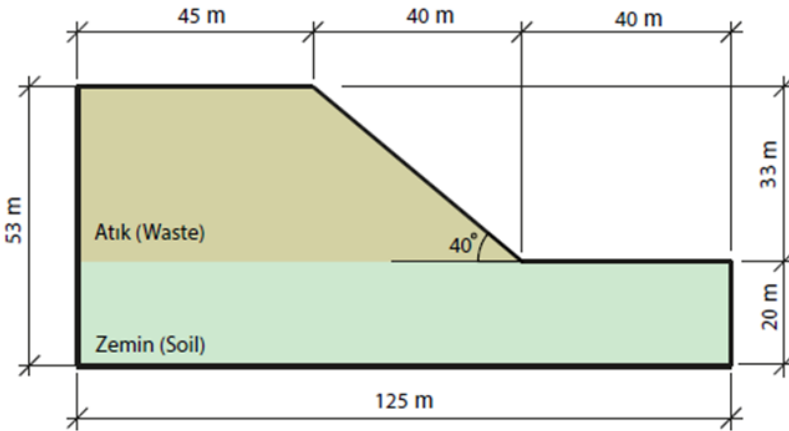
Tablo 5- Zeminin mühendislik özellikleri

Katı Atığın Mühendislik Özellikleri				
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN m ⁻³)	12			
Young (Elastisite) Modülü, E (kN m ⁻²)	10.000			
Poisson Oranı, ν	0,29			
Kohezyon, c (kN m ⁻²)	10	5	0	0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	30	30	30	28

Şev göçmesi 10 Temmuz 2000’ de meydana gelmiştir. Yaklaşık 1,2 milyon m³ atık kayarak 250’ den fazla ölüme neden olmuştur. Şev yüksekliği 33 m, şev açısı ise 40°’ dir.

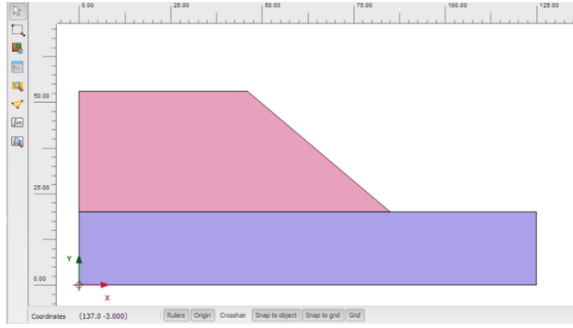
Plaxis 2D programı yardımıyla şev geometrisi modellendikten sonra depolama sahasında analiz gerçekleştirilmiştir. Şev geometrisi ise Şekil 4’ de verilmiştir.

Şekil 4- Payatas depolama sahasının şev geometrisi



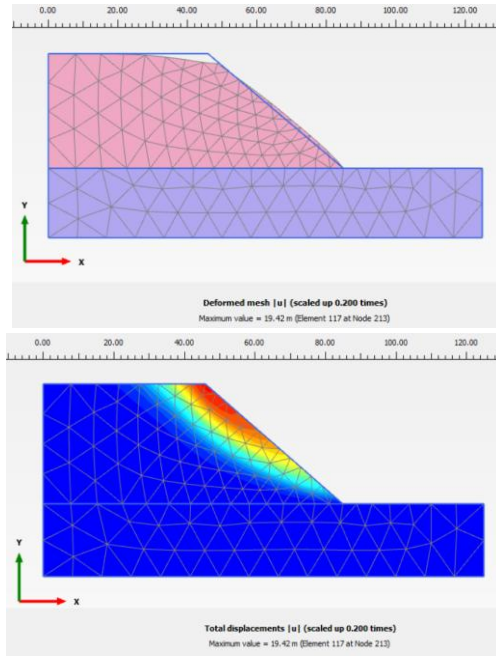
Plaxis 2D programı ile modellenen Payatas depolama sahası Şekil 5’ de verilmiştir. Modellenen depolama sahasında ağ oluştururken “Mesh- Orta” seçilmiştir. 225 element, 1903 düğüm elde edilmiştir. Plaxis 2D’ de analizi gerçekleştirilen Payatas depolama sahasında deformasyonlar incelenmiştir.

Şekil 5- Plaxis 2D' de modellenen Payatas depolama sahası



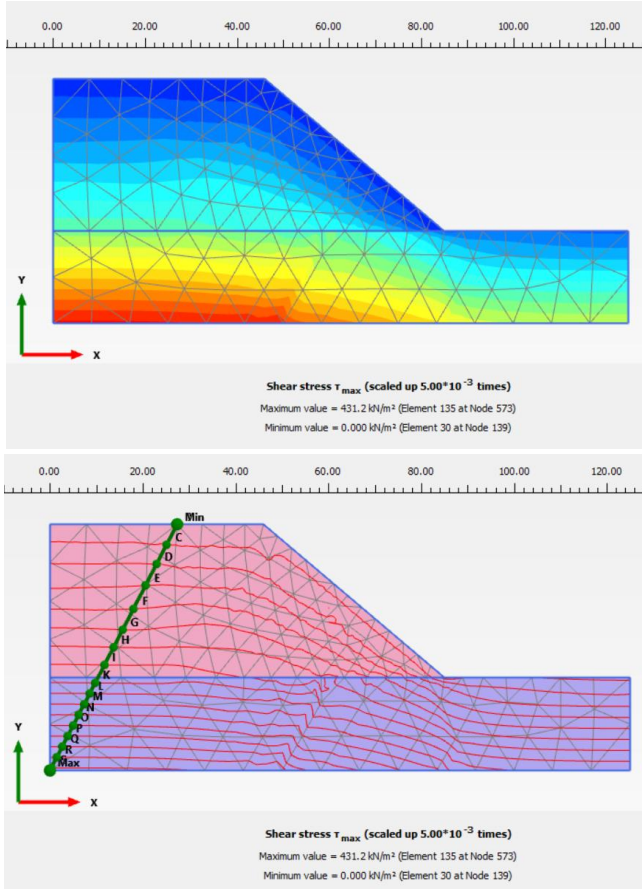
Analizi yapılan depolama sahasına ait toplam yer değiştirmeler ve deforme olmuş görünümü Şekil 6' da görülmektedir. Atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı 28° ($c=0$, $\phi=28^\circ$) olduğu durumda toplam yer değiştirme 19.42 m elde edilmiştir.

Şekil 6- Payatas depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli



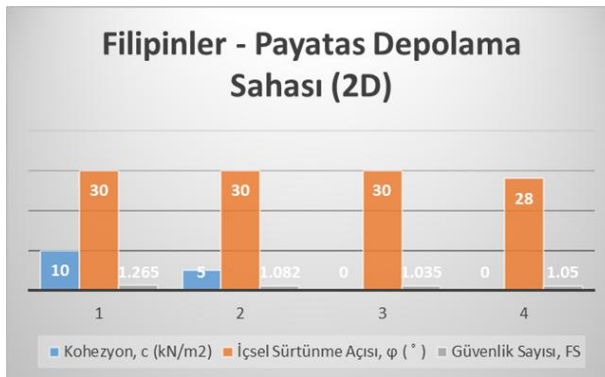
Toplam yer değiştirmelere bakıldıktan sonra analizlerde kayma gerilmesi incelenmiştir. Payatas depolama sahasında; maksimum kayma gerilmesi 573 düğüm noktasında 431,2 kN m⁻² elde edilmiştir (Şekil 7).

Şekil 7- Payatas depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi



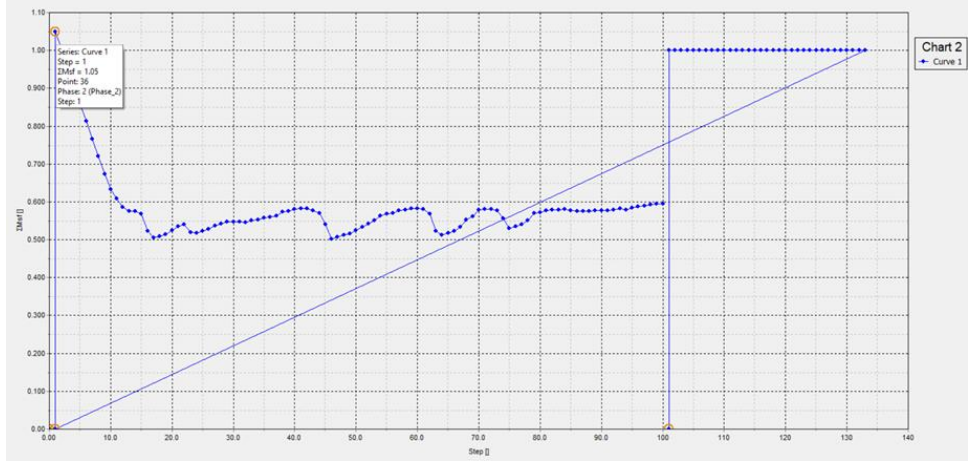
Güvenlik sayısı 1,0 olduğu durumda geriye dönük şev koşulları hakkında bilgi elde edilir. Payatas depolama sahasında yapılan analizlerin güvenlik sayıları ise Şekil 8' de grafik halinde verilmiştir.

Şekil 8- Payatas depolama sahasına ait güvenlik sayıları



Plaxis 2D’ de modellenen depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,05 elde edilmiştir (Şekil 9).

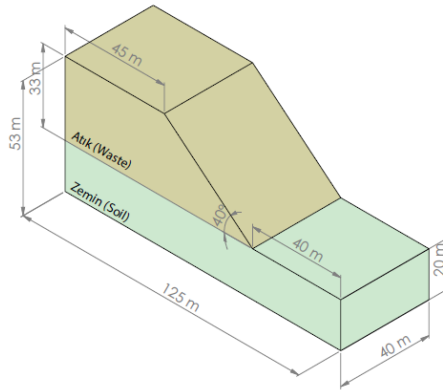
Şekil 9- Plaxis 2D’ de güvenlik sayısı grafiği



Plaxis (3D) ile Analiz

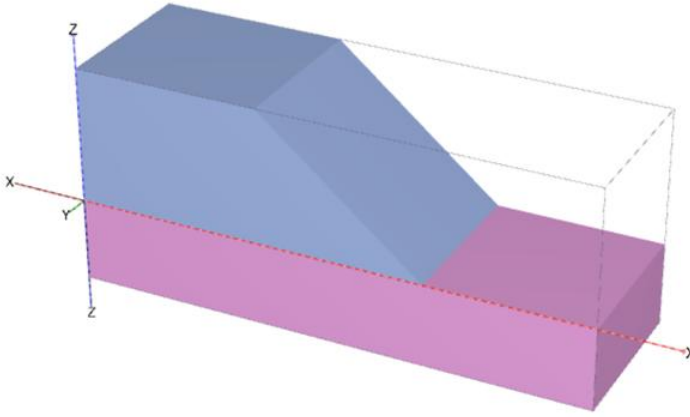
Plaxis 3D programında şev geometrisi modellendikten sonra depolama sahasında analiz gerçekleştirilmiştir. Şev geometrisi ise Şekil 10’ da verilmiştir.

Şekil 10- Payatas depolama sahasının şev geometrisi



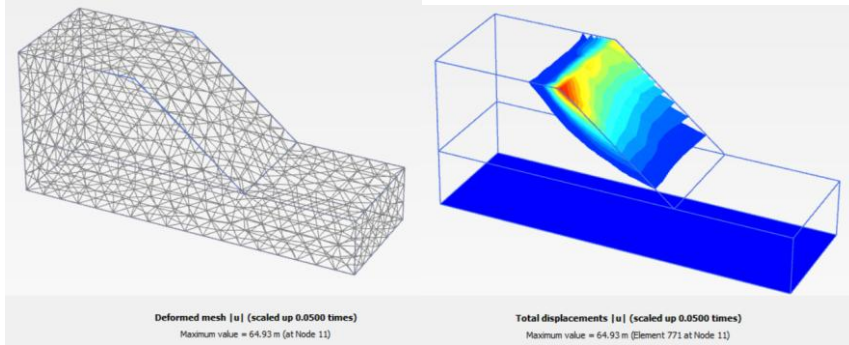
Plaxis 3D programıyla modellenen Payatas depolama sahası Şekil 11’ de verilmiştir. Modellenen depolama sahasında ağ oluştururken “Mesh- Orta” seçilmiştir. 2978 element, 5267 düğüm elde edilmiştir.

Şekil 11- Plaxis 3D' de modellenen Payatas depolama sahası



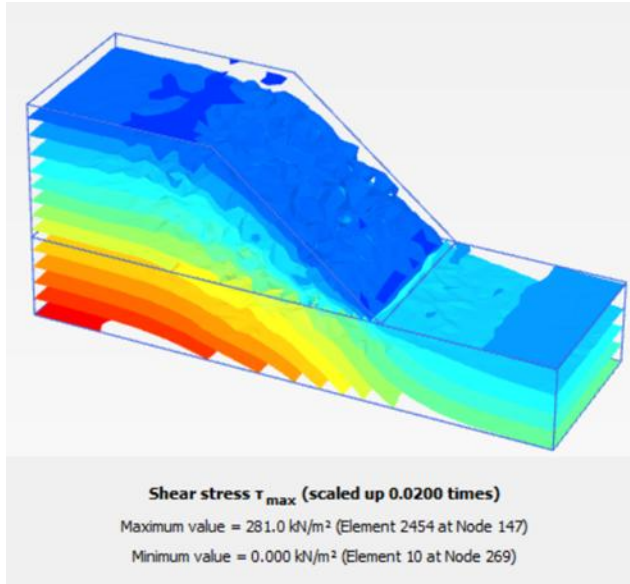
Toplam yer değiştirmeler ve deforme olmuş görünümü Şekil 12' de görülmektedir. Atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı 30° ($c=0$, $\phi=30^\circ$) olduğu durumda toplam yer değiştirme 64,93 m elde edilmiştir.

Şekil 12- Payatas depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli



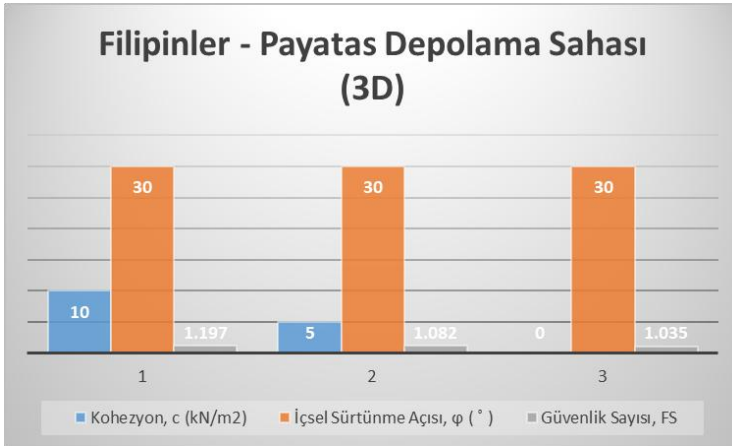
Toplam yer değiştirmelere bakıldıktan sonra analizlerde kayma gerilmesi incelenmiştir. Payatas depolama sahasında; maksimum kayma gerilmesi 147 düğüm noktasında 281 kN m-2 elde edilmiştir (Şekil 13).

Şekil 13- Payatas depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi



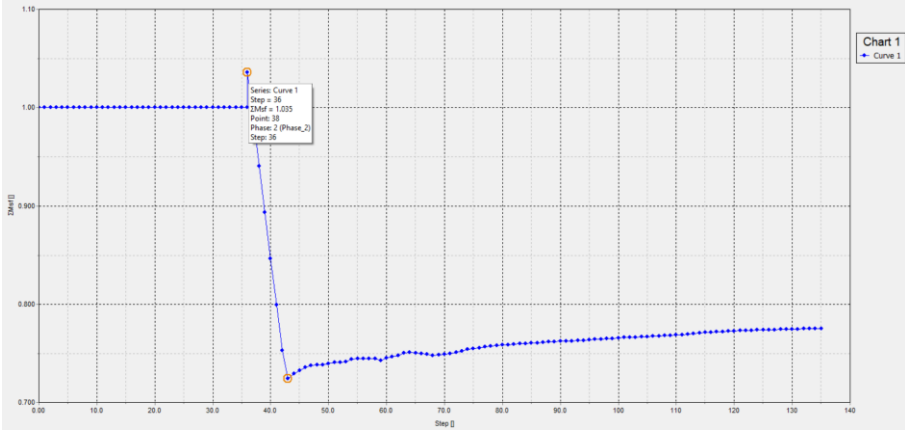
Payatas depolama sahasında yapılan 3D analizlerin güvenlik sayıları ise Şekil 14’ de grafik halinde verilmiştir.

Şekil 14- Payatas depolama sahasına ait güvenlik sayıları



Plaxis 3D’ de modellenen depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 30° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,035 elde edilmiştir (Şekil 15).

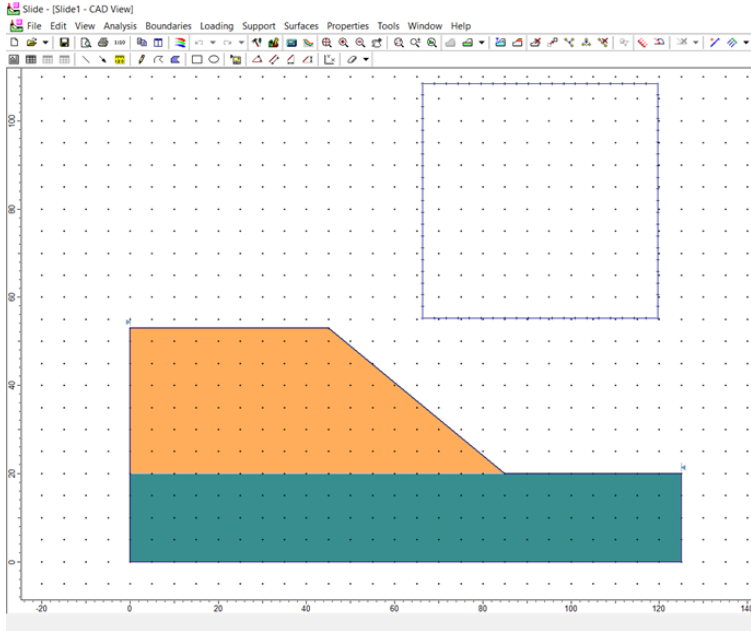
Şekil 15- Plaxis 3D’ de güvenlik sayısı grafiği



Slide ile Analiz

Slide (version 6.0) programında şev geometrisi modellendikten sonra depolama sahasında analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 16’ da Slide programında modellenen depolama sahası verilmiştir.

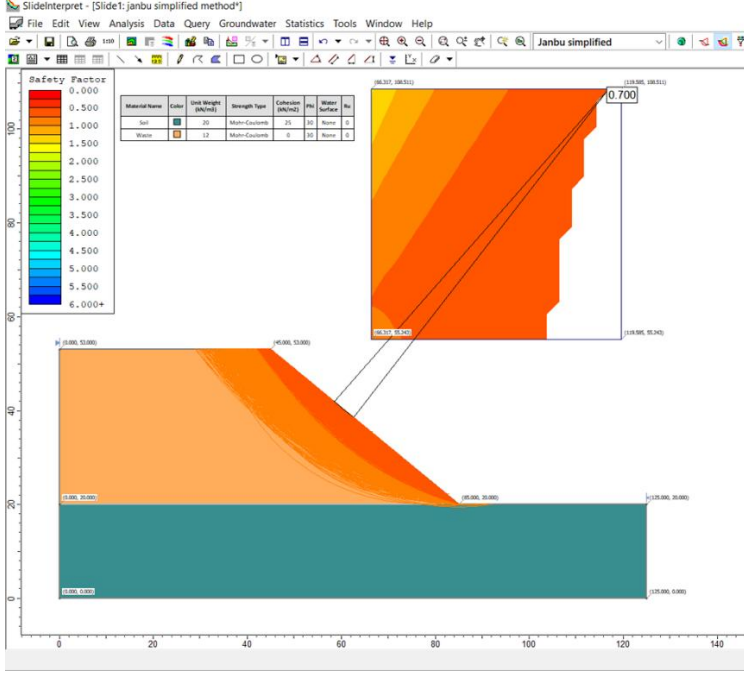
Şekil 16- Slide programında modellenen Payatas depolama sahası



Programda analiz gerçekleştirilirken daha detaylı analiz yapabilmek için Basitleştirilmiş/ Düzeltilmiş Janbu yöntemi tercih edilerek güvenlik sayısı elde edilmiştir. Şekil 17’ de de Basitleştirilmiş Janbu yöntemiyle yapılmış analiz sonucu güvenlik sayısını gözlemleyebiliriz. Güvenlik sayısı; katı atığın kohezyon

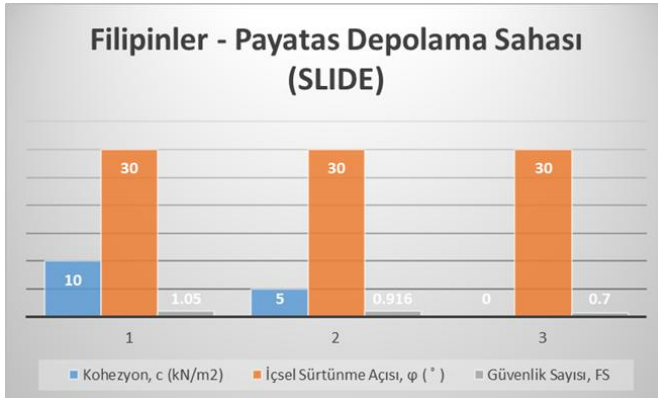
değeri 0, içsel sürtünme açısının 30° ($c=0$, $\phi= 30^\circ$) olduğu durumda 0,702 bulunmuştur. Bu da güvenlik sayısının 1' den küçük olduğu için dengesiz bir durum olduğunu gösterir.

Şekil 17- Slide programında yapılan analiz



Payatas depolama sahasında Slide programıyla yapılan analizlerin güvenlik sayıları ise Şekil 18' de grafik halinde verilmiştir.

Şekil 18- Payatas depolama sahasına ait güvenlik sayıları



Sonuç ve Öneriler

Vahşi depolama sahalarında halk sağlığı ve çevre kirliliğiyle ilgili problemler çoğunlukla daha yaygındır. Bu açık çöplükler birçok dezavantaja ve ciddi sağlık problemlerine de sebep olmaktadır. Vahşi depolama ile kötü kokular oluşmakta, özellikle yeraltı suları kirlenmekte, sinek ve kuşların bu atıklarla teması ile bulaşıcı hastalıkların taşınması ve oluşan metan gazının kontrollü bir şekilde toplanmamasından ileri gelen patlama riskleri en büyük sorunları oluşturmaktadır. Bu yüzden ki depolama sahalarının tasarımı halk sağlığı açısından çok önemlidir.

Katı atık depolama tesisinin kurulmasında yer seçimi çok önemlidir. İlgili yönetmelik ve kılavuzlara uyulması şartları ile tesis kurulmalıdır. Şev göçmelerindeki birincil faktörler, mühendislik kontrolünün eksikliği, depolama sahaları için tasarım eksikliği ve tasarım ve çalışma ilkelerinin anlaşılmamasıdır. Mühendislik kontrolleri eksiksiz ve depolama sahası standartlara uygun tasarım yapılmalıdır.

Depolama sahalarında ayrıca, yeraltı suyunun yüksekliğinin ve şev açısının stabilitesi üzerindeki etkilerinin dikkate alınmadığı gözlemlenmiştir. Bazı durumlarda, yeraltı suyu koşulları aşırı hava koşulları nedeniyle daha da kötüleşerek şev göçmelerine neden olmuştur. Atık depolama sahası içinde oluşabilecek sızıntı suyunun toplanması ve uzaklaştırılması gereklidir.

Depolama sahası içinden çıkan gaz, patlayıcı bileşime ulaşmak için hava ile karışır ve daha sonra, ya mevcut bir yangın kaynağı nedeniyle veya hareketli atık bileşenler arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısıнын etkisiyle tutuşur. Patlama, atıkların hareketini hızlandırarak şev göçmesine neden olur.

Payatas depolama sahasındaki atıkların yerleştirilmesinin ardından, atıklar üst eğime sıkıştırılarak üst kısımda daha fazla atık için daha fazla alan oluşturulmuştur. Bu da depolama sahasının şev koşullarını etkilemiştir. Ayrıca; atığın çok az sıkıştırılması ya da hiç sıkıştırma yapılmaması, düşük yoğunluklu bir atığın oluşmasına yol açmıştır. Bu da atığın birim hacim ağırlığı için etkilidir. Göçmenin oluşmasından önce atığın doygunluğunun artmasına neden olan şiddetli yağmurlar meydana gelmiştir. Şevin üzerinde oluşan su birikintisi, suyu boşaltmak için drenaj hendeğinin inşaatı ve depolama sahasındaki gaz birikimi şev göçmesini tetikleyen nedenlerden birkaçıdır.

Filipinler, Payatas depolama sahasında analiz yapılırken; Plaxis (2D CE V20), Plaxis (3D CE V20) ve Slide (version 6.0) programları kullanılmıştır ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Plaxis 2D' de modellenen Payatas depolama sahasında güvenlik sayısı 1,05 ve Plaxis 3D' de ise güvenlik sayısı 1,035 elde edilmiştir. Plaxis 2D ve 3D programlarında analiz gerçekleştirildiğinde güvenlik sayıları birbirine yakın elde edilmiştir. Slide programında ise kohezyonun 0

kN/m², içsel sürtünme açısının 30° olduğu durumda güvenlik sayısı 0,700 bulunmuştur. Plaxis ve Slide programlarında kullanılan metotların farklı olması nedeniyle Slide programında daha küçük güvenlik sayısı elde edilmiştir.

Yapılan analizlerde, kayma mukavemeti parametrelerinin küçük değişimleri F_s üzerinde çok büyük etkiler yaratmıştır. Örneğin, $\phi = 25^\circ$ alındığında $F_s \approx 1.05$ iken, $\phi = 22^\circ$ için $F_s \approx 0.95$ bulunmuştur. Bu durum, parametre belirsizliğinin stabilite analizlerinde ne kadar kritik olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kohezyonun 2–5 kPa gibi düşük değerlerde olması, atık kütlelerinin suya doygun hale geldiğinde ani göçmelere ne kadar açık olduğunu ortaya koymaktadır.

Uygunsuz depolama sahası tasarımı, depolama sahalarında günlük örtü seriminin yapılmaması ve atığın sıkıştırılmaması, atıkların ayrıştırılmaması, sızıntı suyu drenajının ve gaz tahliyesinin yetersiz oluşu, şev açısının ve yüksekliğinin fazla oluşu sahadaki duraylılığın bozulması şev göçmesinin nedenleridir.

Bazı durumlarda, yeraltı suyu koşulları aşırı hava koşulları nedeniyle daha da kötüleşerek şev göçmelerine neden olduğuna varılmıştır. Payatas depolama sahasında da bu durum gözlemlenmiştir. Ayrıca; göçmeden sonra son dolgu yerleşimi, yağış vb. geçmişinin kayıtları da dahil olmak üzere kapsamlı bir saha keşif araştırması yapmak çok önemlidir. Böylece daha doğru veriler elde edilebilir.

Dolayısıyla Payatas depolama sahası, yalnızca bölgesel bir vaka değil, dünya genelinde görülen benzer mühendislik sorunlarının tipik bir örneği olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak; Payatas depolama sahasının göçmesi, yağış sonrası boşluk suyu basıncı artışının en kritik tetikleyici olduğunu göstermiştir. Sahada sızıntı suyu drenaj sistemleri kurulmuş olsaydı, F_s değerlerinin kritik eşik altında kalması engellenebilirdi. Bu şekilde göçme tetiklenmemiş olacaktı. Günlük örtü serilmemesi ve atık sıkıştırmasının yapılmaması, atığın gevşek yapıda kalmasına neden olmuştur. Bu durum da kayma yüzeyinin kolayca gelişmesini sağlamıştır. Bu olay, mühendislik tasarım ve denetim süreçlerinin yetersizliğinde doğrudan bir felakete yol açabileceğini kanıtlamaktadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizler sayesinde katı atık düzenli depolama sahası tasarımında; iş gücü, zaman ve maliyetler açısından kazanımlar sağlanacaktır. Bu çeşit analizler depolama sahalarında şev duraysızlıklarının önlenmesi bakımından önemlidir. Depolama sahalarındaki şev göçmelerinin nedeni olan mühendislik kontrollerinin olmaması ve tasarım eksikliğini ortadan kaldırmaktadır.

Kaynakça

- Akçakal Ö. (2009), Şev stabilite analizinde geri hesap yöntemi ve bir vaka analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Akyol K. (2008), Eysel katı atıkların geoteknik özelliklerinin modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Arioğlu E. ve Tokgöz N. (2022), Bilgi Föyü: Şev stabilitesine toplu bakış. Erişim adresi: <https://yapimerkezi.com.tr/PdfDosyalari/430c0073-8602-44d0-94b0-58aeb4a5e717-c58b51df-f08a-4123-bd45-8a1c3be816da.pdf>.
- Başar E. E. (2024), Şev stabilitesinin analitik yöntem ve sonlu elemanlar yöntemleriyle incelenmesi. Teknik Bilimler Dergisi, Cilt 14, Sayı 1, S. 9-17.
- Blight G. (2008), Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review. Waste Management & Research, c. 26, ss. 448-463.
- Coşkun H. (2021), Dolgu barajlarda gövde stabilitesi ve Çukurca barajı örneği. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü (2014), Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi ve İşletme Kılavuzu.
- Güner G. B. (2022), Katı atık sahalarında duraylılığın incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Kamer A. (2018), Katı atıkların en uygun toplama tekniklerinin araştırılması ve toplanan katı maddelerden en uygun geri kazanımın belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kezer S. (2019), Katı atık sahalarında şev stabilitesi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Merry S. M., Kavazanjian E. Ve Fritz W. U. (2005), Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas landfill failure. Journal Of Performance Of Constructed Facilities, c. 19-2, ss. 100-107.
- Natur O. (2018), Şev stabilitesi analiz yöntemleri ve bir vaka analizi. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Polat A. (2019), Şev stabilitesinde sonlu elemanlar yöntemi uygulaması ve karşılaştırmalı analiz. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik.
- Pulat H. F. (2014), Kentsel katı atıkların geoteknik karakterizasyonu ve duraylılığının incelenmesi. Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.

- Sarihan N. H. (2008), T. D. Stark, “Back- analyses of landfill slope failures,” 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 11-16.
- Tekin A. (2011), Sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile şev stabilitesi analizi. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Ün B. ve Yıldız A. (2021), Şev stabilitesi probleminin geri analizle çözümü: örnek bir vaka. Academic Platform Journal of Engineering and Science, c. 9-1, ss. 174-181.



BÖLÜM 3

Geri Dönüşümün İnşaat Sektöründeki Yeri

Aylin Özodabaş¹ & Nazım Çağatay Demiral²

1. Giriş

Sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışı ile birlikte artan yapılaşma hem doğal kaynak tüketimini hızlandırmakta hem de çevresel kirliliği ciddi boyutlara taşımaktadır. Özellikle inşaat ve sanayi sektörleri hem yüksek oranda kaynak tüketimi hem de atık üretimi açısından çevresel etkileri en yüksek alanlar arasında yer almaktadır. İnşaat projelerinden kaynaklanan beton, moloz, metal, plastik ve ahşap atıklar ile sanayi üretimi sonucu oluşan kimyasal içerikli atıklar; toprak, su ve hava kirliliğine neden olmakta, ekosistem dengesi ile insan sağlığını doğrudan tehdit etmektedir [1].

Bu doğrultuda geri dönüşüm, yalnızca bir atık yönetimi değil, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için stratejik bir araç haline gelmiştir. Atıkların yeniden hammaddeye dönüştürülmesi sayesinde hem çevresel yük azaltılmakta hem de enerji ve maliyet tasarrufu sağlanmaktadır. Özellikle geri dönüştürülebilir malzemelerin inşaat sektöründe yeniden değerlendirilmesi, çevresel faydanın yanı sıra ekonomik kazanımlar da sunmaktadır [2]. Geri dönüşüm, inşaat sektöründe sürdürülebilirlik, enerji tasarrufu ve atık yönetimi açısından önemli bir yer tutmaktadır. İnşaat projelerinde ortaya çıkan beton, metal, cam, plastik, ahşap gibi malzemeler geri dönüştürülerek yeniden kullanılabilir, bu sayede hem doğal kaynaklar korunur hem de atık miktarı azaltılarak çevre kirliliği önlenir. Örneğin, geri dönüştürülmüş beton yol yapımında veya dolgu malzemesi olarak kullanılabilirken, geri dönüştürülmüş metaller yeni yapı elemanlarının üretiminde değerlendirilebilir. Bu süreç, ham madde üretimine kıyasla daha az enerji gerektirir ve maliyet avantajı sağlar. Geri dönüşüm odaklı uygulamalar, yeşil bina sertifikasyonu gibi sürdürülebilirlik hedeflerini desteklerken, aynı zamanda inşaat sektöründe inovasyon ve yeni teknolojilerin gelişimine zemin hazırlar. Geri dönüşüm, yalnızca çevre dostu bir çözüm değil, aynı zamanda sürdürülebilir bir inşaat sektörünün temel taşlarından biri olduğu literatürde vurgulanmaktadır [3,4]. İnşaat sektörü, doğal kaynak kullanımının %50'sini,

¹ Doç. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
0000-0002-6011-980X

² Arş. Gör., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
0000-0001-5927-7299

enerji tüketiminin %40'ını ve atık üretiminin %50'sini kapsayan bir alan olarak olumsuz bir çevresel etki profiline sahiptir [5].

Kentsel dönüşüm, sanayi atıkları, laboratuvar deney atıkları ve farklı şekilde oluşan inşaat ve sanayi atıkları çevremiz açısından ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu çalışmanın başlıca amacı; çevresel sürdürülebilirliğin artırılmasına ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlamaktır. Böylelikle çalışma kapsamında önerilen yöntemlerle çevresel sorunların azaltılması hedeflenmiştir. İnşaat atıkları genellikle belirli depo sahalarına gömülerek bertaraf edilmektedir. Ancak bu yöntem, sürekli yeni depolama alanları ihtiyacını doğurmakta ve çevresel sorunlara yol açmaktadır. Depolanan atıklar tamamen yok olmadığı için uzun vadede ciddi kirlilik sorunlarına neden olmaktadır. Tüm bu olumsuzluklar göz önüne alındığında, inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşümü kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir [6, 7].

Bu çalışmada beton, metal, plastik gibi yaygın yapı malzemelerinin kullanım miktarları ve oluşan atıkların çevre üzerindeki etkileri incelenmiş; doğal kaynak tüketimi, atık üretimi ve buna bağlı karbon ayak izi gibi göstergeler de değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, sürdürülebilir yapı tasarımı ve atık yönetimi stratejilerine bilimsel katkı sunmayı hedeflemektedir.

2. Geri Dönüşümün Gerekliliği

Geri dönüşüm, atıkların tekrar kullanılabilir hale getirilmesi amacıyla fiziksel ya da kimyasal işlemlerden geçirilerek yeni bir hammaddeye dönüştürülmesi sürecidir [8]. Yeniden kazanılabilir nitelikteki bu malzemeler, belirli yöntemlerle işlenerek üretimde ikinci kez kullanılacak duruma getirilir.

İnşaat projelerinden çıkan bu atıklar, yer altı sularını kirleterek ekosistemlerin dengesini bozarken, yetersiz yönetildiklerinde açık alanlarda birikerek çevreye zarar verir. Ayrıca, sanayi atıklarının içeriğinde bulunan ağır metaller ve toksik kimyasallar insan sağlığını tehdit ederken, inşaat atıklarının kontrolsüz şekilde bertaraf edilmesi doğal kaynakların tükenmesine yol açar. Bu kirlilik, sürdürülebilir bir çevre için etkin atık yönetimi ve geri dönüşüm uygulamalarının hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır [9, 10]. Hafriyattan çıkan toprak, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği'ne göre, bu tip atıklar "inşaat atıkları" ve "yıkıntı atıklar" olarak adlandırılır. Yönetmelik, inşaat atıklarını (Şekil 1); alt ve üst yapıların inşası sırasında oluşan atıklar olarak tanımlarken, yıkıntı atıklarını; bu tür yapıların tamir, tadilat, yenileme, yıkım çalışmaları veya doğal afetler sonucunda ortaya çıkan atıklar şeklinde açıklamaktadır [11].



Şekil 1. İnşaat atıkları

Yapısal atık miktarı, ülkemizde ilgili denetim kurumları mevcut olmasına rağmen, izleme ve kontrol faaliyetlerinin yetersizliği nedeniyle tam anlamıyla saptanamamaktadır. Ancak son yıllarda bu tür atıklarda belirgin bir artış yaşandığı gözlemlenmektedir. Özellikle, 2012 yılında yürürlüğe giren Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun'un, yapısal atıkların artmasında önemli bir etken olduğu düşünülmektedir. Bu yasa kapsamında izleyen 20 yıl içinde 6,5 milyon yapının yıkılması öngörülmüş; 2018 yılına kadar ise 592 bin konutun dönüşüm süreci tamamlanmıştır [12].

Tablo 1: Bazı illerin 2017 yılı hafriyat toprağı ve inşaat/yıkıntı atık miktarları [12].

İl	İnşaat/yıkıntı atık miktarı (m ³)
İstanbul	35-40 milyon
Adana	1.111.738,46
Konya	1.115.016,27
Trabzon	844.133
Malatya	1.155.424
Hatay	706.964
Manisa	4.180.000,2

Tablo 1 incelendiğinde, çeşitli illerde kayda değer düzeyde yapısal atık oluşumu gözlemlenmektedir. Özellikle yalnızca İstanbul ili özelinde değerlendirildiğinde, oluşan atık hacminin onlarca milyon metreküpe ulaştığı görülmekte ve bu durum çevresel açıdan ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu bağlamda, inşaat ve yıkım kaynaklı atıkların çevreye olan olumsuz etkilerinin en aza indirilebilmesi için, etkin geri dönüşüm stratejilerinin geliştirilmesi ve bertaraf yöntemlerinin iyileştirilmesine yönelik öncelikli ve bütüncül bir yaklaşım benimsenmesi gerekmektedir [12].

3. İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ YÖNETİMİ

Sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışı ile birlikte inşaat sektörü hızla büyümekte ve bu büyümenin doğal sonucu olarak büyük miktarda inşaat yıkıntı atığı ortaya çıkmaktadır. Türkiye’de yılda yaklaşık 30 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı oluştuğu tahmin edilmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022).

İnşaat yıkıntı atıkları yönetimi, atıkların kaynağında azaltılmasını, ayrıştırılarak toplanmasını, yeniden kullanım ve geri dönüşüm oranlarının artırılmasını ve çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesini kapsayan bütüncül bir yaklaşımla yürütülmelidir. Türkiye’de bu süreç “Atık Yönetimi Yönetmeliği” (2015) ve “İnşaat ve Yıkıntı Atıkları Kontrolü Yönetmeliği” (2004) kapsamında düzenlenmektedir. Mevzuata göre inşaat firmalarının, atık yönetim planı hazırlaması ve bu planı yerel yönetimlerin onayına sunması zorunludur.

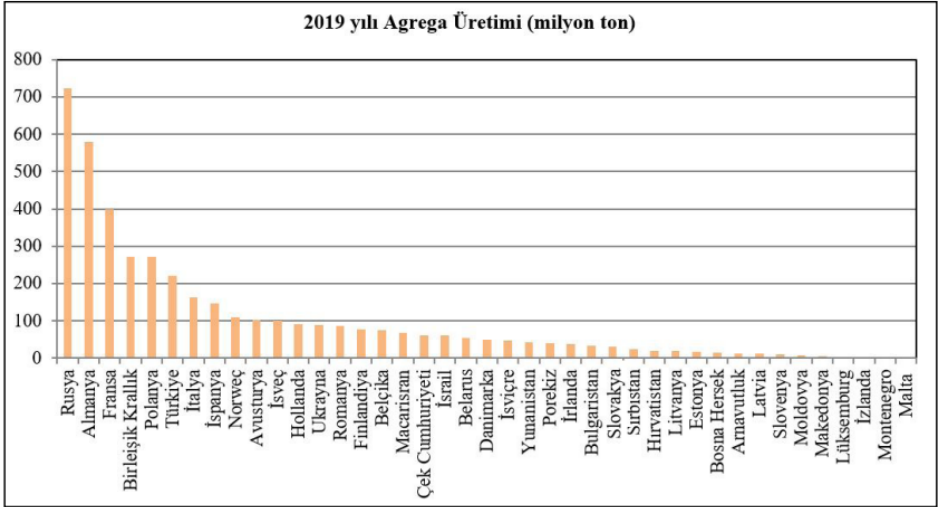
İyi uygulama örneklerine bakıldığında; Avrupa Birliği ülkelerinde inşaat ve yıkıntı atıklarının büyük bir oranı geri dönüştürülmekte ya da yeniden kullanılmaktadır. Bu oran, döngüsel ekonominin inşaat sektöründe yaygınlaştığını göstermektedir [13]. Türkiye'deki yıllık katı atık miktarı da her yıl artarak tehlikeli denilebilecek boyutlara kadar ulaşmıştır. 2020 yılı verilerine göre yıllık 30,9 milyon tonu tehlikeli olmak üzere toplam 104,8 milyon ton atık oluşmaktadır [14]. Görüldüğü üzere ülkemizde de inşaat ve yıkıntı atıklarının geri kazanılması önemli bir ihtiyaçtır.

4. YAPISAL ATIKLARIN SINIFLANDIRILMASI

4.1 Geri Dönüşüm Agregaları

Geri dönüşüm agregaları, inşaat ve yıkım atıklarının yeniden işlenerek elde edilen malzemelerdir ve sürdürülebilir inşaat uygulamalarının temel bileşenlerinden birini oluşturur. Bu agregalar, doğal kaynakların korunmasına ve atık miktarının azaltılmasına katkı sağlayarak çevresel avantajlar sunar. Beton, asfalt, tuğla ve seramik gibi malzemelerin geri dönüşümüyle üretilen agregalar, yol yapımı, dolgu malzemesi temini ve beton üretimi gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir. Bu kullanım hem ekonomik tasarruf sağlamakta hem de atık yönetimi süreçlerini iyileştirmektedir. Ancak, geri dönüşüm agregalarının kullanımı sırasında malzeme özelliklerinin ve kalite kontrolünün titizlikle analiz edilmesi, yapısal dayanıklılığın ve uzun ömürlülüğün sağlanabilmesi için kritik öneme sahiptir [15].

Şekil 2'de Avrupa ülkeleri 2019 yılında yaklaşık 4,20 milyar ton agrega üretmiştir. Bu miktar, 45 milyar tonluk dünya agrega üretiminin yaklaşık %9,3'üne denk gelmektedir. Bu grafiğe göre gelecek yıllarda artarak devam edeceği düşünülebilir [16].



Şekil 2. 2019 yılı Avrupa ülkeleri agrega üretimi (birincil ve ikincil agrega) [16]

Agregalar, kökenlerine ve içeriklerine bağlı olarak çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions) komitesi, geri kazanılmış agregaları üç ana kategori altında gruplandırmıştır. İngiltere'de ise yapı sektörüne yönelik hem ulusal hem de uluslararası standartların geliştirilmesinde etkin rol oynayan Building Research Establishment (BRE), RILEM sınıflandırmasını temel alarak bu kapsamı daha da detaylandırmıştır. BRE tarafından önerilen sınıflandırmada, geri kazanılmış agregaların içeriklerine göre aşağıdaki şekilde bir ayırım yapılmaktadır (Tablo 2). BRE sınıflandırması, RILEM'in temel yapısını baz alarak, agregaların içerik oranlarını ve kaynak materyallerini daha detaylı şekilde tanımlamaktadır. Bu sayede geri dönüşümlü agregaların kullanım alanları ve uygunluk kriterleri daha hassas bir biçimde değerlendirilebilmektedir (17, 18).

Tablo 2. Geri Kazanılmış Agrega Sınıflandırmaları (RILEM ve BRE'ye göre) [17, 18]

Sınıflandırma Kurumu	Tip	Agrega Kaynağı	Açıklama / İçerik Özeti
RILEM	Tip 1	Duvar molozları	Yıkılmış duvar yapılarından elde edilen agregalar
	Tip 2	Beton molozları	Yıkılmış beton yapı elemanlarından elde edilen agregalar
	Tip 3	Karışık (doğal + geri kazanılmış)	Doğal ve geri kazanılmış agregaların belirli oranlarda karışımı
BRE	Tip 1	Tuğla kökenli	%100'e kadar tuğla içerebilen geri kazanılmış agregalar
	Tip 2	Beton kökenli	Ağırlıkça %10'a kadar tuğla içeren beton esaslı agregalar
	Tip 3	Beton + tuğla	Ağırlıkça %50'ye kadar tuğla içeren karışık kökenli agregalar

4.1. Metal Atıkları

Metal atıkları; inşaat şantiyelerinde temel donatı çubukları (çelik hasır, nervürlü demir), çatı ve cephe kaplamaları (alüminyum levhalar, sac paneller), sıhhi tesisat boruları (bakır, galvaniz), kapı-pencere doğramaları ve bağlantı elemanları (vida, somun, çelik bağlantılar) gibi unsurlardan kaynaklanmaktadır [19,20]. Bu malzemeler, yüksek dayanımları ve biçimlendirilebilir yapıları nedeniyle inşaat sektöründe yoğun olarak kullanılır. Metallerin geri dönüşümü, %90'ların üzerinde verimle gerçekleştirilebilir ve yeni ürün üretiminde %60-70 oranında enerji tasarrufu sağlar. Özellikle çelik ve alüminyum geri dönüşümde ön plana çıkar. Hurda metaller, ergitilerek tekrar üretim sürecine kazandırılır ve çevresel ayak izi ciddi şekilde azaltılmış olur. Aynı zamanda ülke ekonomisine katkı sağlar [21].

4.2. Cam Atıkları

Cam atıkları; pencere üniteleri, vitraylar, cam tuğlalar, cam cephe panelleri gibi yapı elemanlarının montajı veya sökümü sırasında oluşur. Bu atıkların yapısal bütünlükleri ve kimyasal kararlılıkları geri dönüşüm açısından avantaj sağlasa da lamine, temperli veya kaplamalı cam türlerinin ayrıştırılması zorluk

yaratır. Lamine camlarda yer alan plastik ara katmanlar, yeniden eritme işlemini güçleştirir. Bu lamine veya temperli camların geri dönüşümü ile ilgili çeşitli çalışmalar vardır [22]. Ancak saf cam kırıkları, cam şişe ve levha üretiminde veya cam mozaik ve cam elyaf üretiminde kullanılabilir. Cam atıklarının geri dönüşümü, hammadde ihtiyacını azaltırken fırın sıcaklıklarını da düşürerek enerji tasarrufu sağlar [23].

4.3. Plastik Atıklar

Plastik atıklar; boru sistemleri (PVC, HDPE), elektrik kablosu kılıfları, izolasyon malzemeleri, zemin kaplamaları ve ambalaj ürünleri gibi geniş bir yelpazede oluşur. İnşaat plastiklerinin çoğu termoplastik özelliktedir ve bu sayede tekrar ısıtılıp şekillendirilebilir. Ancak plastiklerin geri dönüşümü sırasında karışık polimer yapıları ve katkı maddeleri (alev geciktiriciler, yumuşatıcılar) süreci zorlaştırabilir. Mekanik geri dönüşüm, en yaygın yöntem olup öğütme, yıkama ve granülasyon aşamalarından oluşur. Kimyasal geri dönüşüm ise plastikleri monomer düzeyine indirerek yüksek kalite ürünler elde edilmesini sağlar. Geri dönüştürülmüş plastikler, drenaj boruları, bordür elemanları ve bazı yalıtım ürünlerinde kullanılabilir [24].

4.4. Seramik ve Fayans Atıkları

Zemin ve duvar kaplamalarında yaygın olarak kullanılan seramik ve fayans malzemeleri; kırılma, montaj firesi veya yenileme faaliyetleri sonucu atık haline gelir. Bu atıklar genellikle sert, kırılğan ve kimyasal olarak inert yapıdadır. Doğrudan geri dönüşümleri zor olmakla birlikte, mekanik olarak kırılıp öğütülerek dolgu malzemesi, altyapı temel malzemesi, çimento klinkeri katkısı veya düşük dayanımlı beton ürünlerinde agrega olarak değerlendirilebilir. Aynı zamanda seramik atıklarının bazıları, refrakter yapı ürünleri üretiminde de kullanılabilir [25, 26].

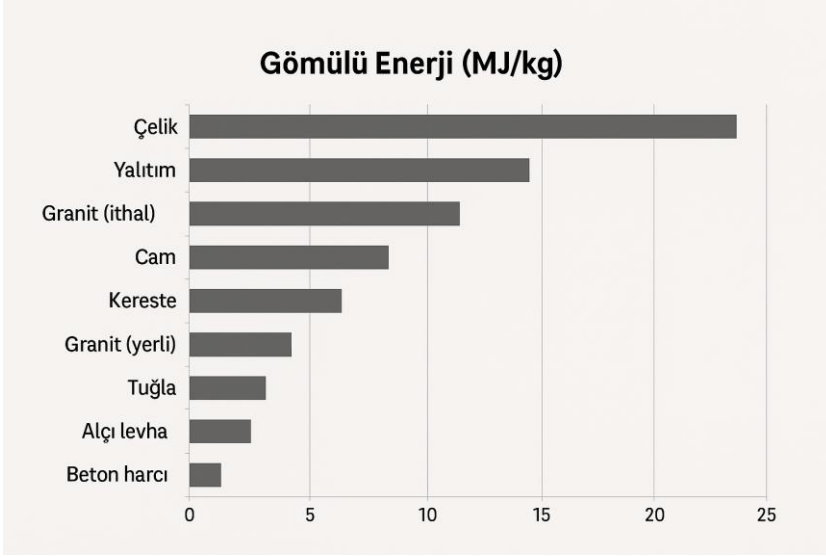
4.5. Alçı ve Alçıpan Atıkları

Alçı (kalsiyum sülfat dihidrat – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), iç mekân bölme duvarları, tavan sistemleri ve dekoratif elemanlarda yaygın şekilde kullanılır. Alçıpan atıkları ise bu malzemenin kartonla lamine edilmiş panel formudur. İnşaat sırasında oluşan kesim fireleri veya yenileme süreçlerinde çıkan söküm atıkları bu sınıfa girer [27]. Alçı atıkları, uygun koşullarda öğütülerek yeniden alçı üretiminde kullanılabilir. Geri dönüştürülmeyen alçı atıkları, çöplüklerde H_2S (hidrojen sülfür) gazı oluşumuna neden olarak çevre ve sağlık riski oluşturabilir [28].

5. İNŞAAT YAPIMI SIRASINDA VE YIKIMI SONRASINDA OLUŞAN ATIKLAR İÇİN LCA ÇALIŞMASI

5.1. İnşaat Yapımı Sırasında LCA Çalışması

İnşaat sırasında çeşitli malzemeler kullanılır. Bu malzemelerin elde edilmeleri, işlenmeleri, taşınmaları, kullanılmaları ve bertaraf edilmeleri önemli miktarda enerji gerektirir. Grafikte, birim kütle başına en yüksek enerjinin çelik, en düşük enerjinin ise harç olduğu görülmektedir (Şekil 3).

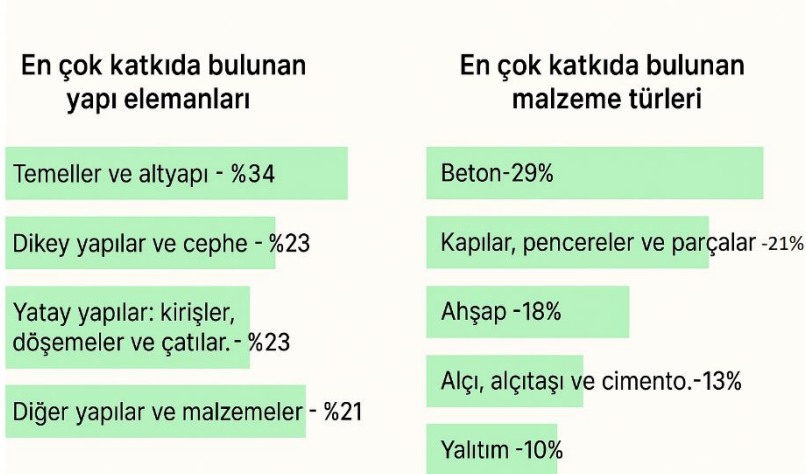


Şekil 3. Yapı Malzemelerinin Ait Enerji Miktarları [29]

İsveç'in Dalarna bölgesinde bulunan "Dalarnas Villa" adlı müstakil bir evin örnek olay incelemesini sunmaktadır. 100 yıllık beklenen kullanım ömrüne ve toplam brüt 180 m² (ana bina 150 m² ve garaj 30 m²) alana sahip, İsveç'in işlevsel gerekliliklerini karşılayan müstakil bir evdir. Önerilen değiştirme süreleri ve malzemelerin taşıma mesafeleriyle birlikte kullanılan yapı malzemeleri Tablo 3'te sunulmuştur. Küresel ısınmaya en çok katkı sağlayan yapı sınıflarına ve yapı malzemelerine Şekil 4'te yer verilmiştir. En çok karbon salınımı yapan malzemelerin beton ve kalıp parçaları olduğu anlaşılmaktadır [30].

Tablo 3. Tablo 3. İnşaat malzemelerinin taşıma mesafesi ve değiştirme mesafelerine göre ana grupları [30].

Malzeme	Adet/Birim	GWP (kg CO ₂ e/birim)	Ton CO ₂ e	Yenileşip değiştirme	Taşıma mesafesi (km)
Beton	21,8 m ³	268,68 kg CO ₂ e/m ³	6,10	0	19
Ahşap iskelet (iç + dış)	23,4 m ³	25 kg CO ₂ e/m ³	0,59	0	264
Ahşap panel cephe	15,6 m ³	25 kg CO ₂ e/m ³	0,40	0	264
CLT (çapraz lamine kereste)	5,4 m ³	140 kg CO ₂ e/m ³	0,70	0	264
Termo ahşap dış cephe (ısı işlem görmüş ahşap)	4,4 m ³	514,03 kg CO ₂ e/m ³	2,26	3	264
Selüloz yalıtımı	114,2 m ²	4,5 kg CO ₂ e/m ²	0,51	0	212
Ahşap elyaf izolasyonu	51,7 m ²	79,63 kg CO ₂ e/m ²	0,45	0	212
Geniştirilmiş Polistiren (EPS) yalıtımı – temel	21,8 m ³	50 kg CO ₂ e/m ³	1,15	0	380
Alçı	1306,2 m ²	2,1 kg CO ₂ e/m ²	2,70	0	220
Zemin iç	132 m ²	4,5 kg CO ₂ e/m ²	0,59	0	210
Plastik detaylar	1521,8 m ²	0,35 kg CO ₂ e/m ²	0,53	0	210
Pencereler-üçlü camlı	25 adet	115 kg CO ₂ e/adet	0,59	1	410
Kapılar	15 adet	93 kg CO ₂ e/adet	0,50	2	470
Çatı galvanizli çelik	155 m ²	11,5 kg CO ₂ e/m ²	1,80	1	410



Şekil 4. Küresel ısınma potansiyeline en çok katkıda bulunan yapı elemanları ve malzeme türleri

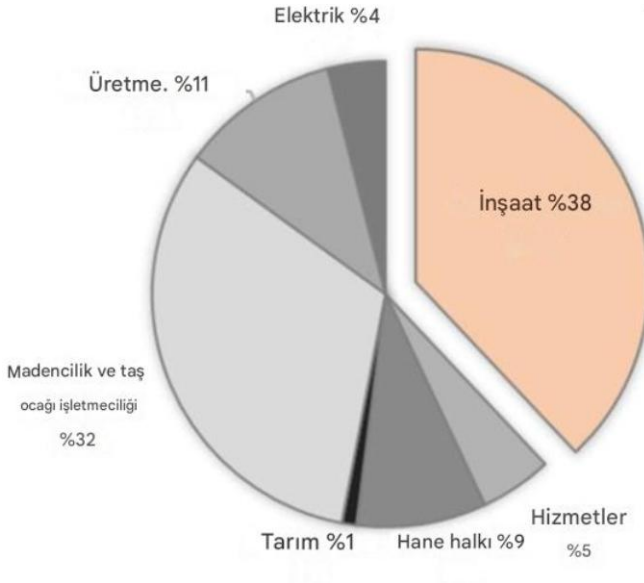
Yapılan başka bir çalışmada ahşap, çelik ve beton tasarımlarını içeren tek ailelik bir evin üç alternatif modelinin LCA sonuçları verilmiştir (Tablo 4) [31]. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde en az küresel ısınma potansiyelinin ahşap sonra çelik ve son olarak beton içerikli tasarımlar olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Üç Modelin LCA Sonuçları [31]

Gösterge	Ahşap Tasarımı	Çelik Tasarımı	Beton Tasarımı
Somutlaştırılmış Enerji (GJ)	255	389	562
Küresel Isınma Potansiyeli (kg CO ₂ eşdeğeri)	62.183	76.453	93.573
Hava Toksisitesi (kritik hacim ölçüsü)	3.236	5.628	6.971
Su Toksisitesi (kritik hacim ölçüsü)	407.787	1.413.784	876.189
Ağırlıklı Kaynak Kullanımı (kg)	121.804	138.501	234.996
Katı Atıklar (kg)	10.746	8.897	14.056

5.2. İnşaat Binasının Yıkımı Sonrası LCA Çalışması

İnşaat sektöründe kaynak verimliliği, hammaddenin üretilmesinden başlayarak, inşaat süreci, kullanım, bakım, yıkım ve bertaraf aşamalarında kullanılan kaynakların çevresel etkileri açısından değerlendirilir. Bu verimlilik, inşaat atıklarını doğrudan üreten ve bertaraf eden firmaların sağladığı veri göstergeleriyle analiz edilir. Avrupa Birliği'nin 2014 yılı atık üretim istatistiklerine göre, Şekil 5'te de görüldüğü gibi, toplam atıkların %38'i inşaat sektöründe ortaya çıkmıştır [32].

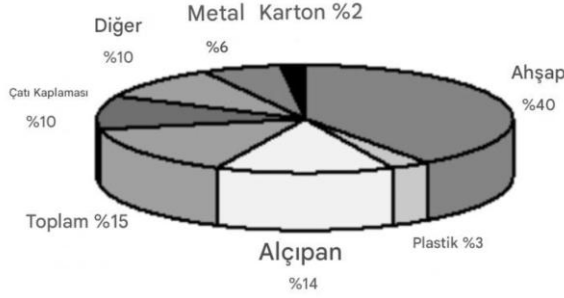


Şekil 5. Avrupa Birliği'nin 2014 yılı atık üretim istatistikleri verileri

Yapılan bir çalışmada büyük bir sergi salonu (15.473 m² net alana sahip), metal taşıyıcı bir yapıya ve metal çerçeveli çadır tipi bir çatıya sahiptir. Alanın bir bölümü ofis olarak kullanılmaktadır ve bina yıkılacaktır. Bu nedenle toplam süre yerine, her bir operasyonun süresi ayrı ayrı dikkate alınarak toplam insan gücü (insan-zaman kaynağı) hesaplanmıştır (Tablo 5) [33]. Şekil 6'da inşaat ve yıkım faaliyetleri sonucu ortaya çıkan atıkların türlerine göre yüzdesel dağılımı gösterilmektedir. Verilere göre, ahşap %40 ile en büyük paya sahip olup, onu sırasıyla agrega (%15), alçıpan %14, çatı kaplama malzemeleri %10, diğer atıklar %10, metal %6, plastik %3 ve karton %2 takip etmektedir. Bu dağılım, atık yönetimi stratejilerinin belirlenmesinde ve geri dönüşüm potansiyelinin değerlendirilmesinde önemli bir temel sunmaktadır [34].

Tablo 5. Bir sergi salonunun yıkımı ve dekonstrüksiyonuna ilişkin özellikler [33]

Operasyon	Süre (gün)	İnsan kaynakları (çalışan kişi sayısı)	İnsan zamanı kaynağı (çalışan gün)	Mekanik kaynaklar	Makinelerin enerji tüketimi (litre)	Makinelerin enerji tüketimi (litre)
Yapım söküm senaryosu	Hazırlık	2	2	4	–	–
	Sökme	29	8	224	2 adet mini ekskavatör (1 adet 12 gün, 1 adet 4 gün), 2 adet hidrolik kaldıraç (1 adet 1 gün, 1 adet 3 gün), 1 adet yükleyici (3 gün), 1 adet kompakt yükleyici (11 gün)	554
	Yapı dekonstrüksiyonu	72	5	360	2 adet hidrolik ekskavatör (72 gün için 2 adet)	16.512
	TOPLAM	-	15	588		17.066
	Hazırlık	2	2	4	–	–
Yıkım senaryosu	Yıkım	83	5	415	2 adet hidrolik ekskavatör (2 adet 83 gün)	18.675
	TOPLAM	-	7	419		18.675



Şekil 6. İnşaat ve yıkım molozlarının karakterizasyonu [34]

Tablo 6. İnşaat atıklarının brüt kat alanına göre çevresel etki değerlendirmesi [32]

İnşaat Atıkları	GWP		AP		EP	
	Emisyon	Oran	Emisyon	Oran	Emisyon	Oran
	kg-	%	kg-	%	kg-	%
	CO 2- eşdeğeri		SO 2- eşdeğeri		PO 4 3- eşdeğeri	
Beton	$1,34 \times 10^{-5}$	21.27	$1,00 \times 10^{-2}$	5.27	$3,35 \times 10^0$	1.17
Beton blok	$2,20 \times 10^5$	34.92	$5,35 \times 10^{-2}$	28.20	$8,97 \times 10^1$	31.32
Çimento	$1,34 \times 10^5$	21.27	$1,65 \times 10^{-2}$	8.70	$2,35 \times 10^1$	8.21
Donatı	$7,94 \times 10^4$	Ara.60	$5,21 \times 10^{-2}$	27.46	$7,84 \times 10^1$	27.38
Yalıtım	$2,14 \times 10^4$	Mar.40	$4,20 \times 10^{-2}$	22.14	$2,86 \times 10^1$	9.99
Fayans	$2,43 \times 10^4$	Mar.86	$5,83 \times 10^{-1}$	3.07	$8,48 \times 10^0$	2.96
Alçıpan	$1,18 \times 10^4$	Oca.87	$6,71 \times 10^{-1}$	3.54	$1,13 \times 10^1$	3.95
Granit	$4,85 \times 10^3$	0,77	$2,98 \times 10^{-1}$	1.57	$4,29 \times 10^1$	14.98
Kum	$3,21 \times 10^2$	0,05	$9,11 \times 10^{-1}$	0,05	$1,59 \times 10^{-1}$	0,06

GWP: küresel ısınma potansiyeli, AP: asitleşme potansiyeli, EP: ötrofikasyon potansiyeli.

6. ÖNERİLER

İnşaat sektöründe ortaya çıkan atıklar, tür ve miktar açısından büyük çeşitlilik göstermektedir. Bu durum, atıkların etkili bir şekilde yönetilmesini ve geri dönüşüm potansiyellerinin değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede, aşağıda sıralanan önerilerin hayata geçirilmesi hem çevresel sürdürülebilirliğe hem de sektörel verimliliğe önemli katkılar sağlayacaktır. Öncelikle, inşaat sahalarında atıkların kaynağında ayrıştırılmasını sağlamak amacıyla, şantiye bazlı atık yönetim planlarının hazırlanması ve uygulanmasının

zorunlu hale getirilmesi gerekmektedir. Metal, plastik, cam, ahşap ve seramik gibi malzemelerin ayrı toplanması, geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğini doğrudan artıracaktır. İkinci olarak, mevcut geri dönüşüm tesislerinin altyapıları güçlendirilmesi için bu tesislerde, optik ayırıcılar, otomatik kırıcılar ve malzeme tanıma teknolojileri gibi ileri seviye ekipmanlar kullanılmalıdır. Geri dönüşüm sektörünün gelişimini teşvik etmek amacıyla, yasal düzenlemeler kapsamında vergi indirimleri, gibi teşvikler sağlanmalı; kamu-özel sektör iş birlikleri desteklenmelidir. Ayrıca, üniversite-sanayi iş birlikleri ile atık malzemelerin yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesi hedeflenmelidir. Örneğin, plastik atıklardan yapı blokları, seramik atıklardan çevreci kaldırım taşları üretilmesi gibi yenilikçi projeler desteklenmelidir [35]. Atıkların yalnızca bertaraf edilmesi gereken maddeler değil, aynı zamanda ekonomik değeri olan kaynaklar olduğu bilinci oluşturulmalıdır. Bu anlayış, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada belirleyici olacaktır.

Bunun yanı sıra, yalnızca geri dönüşüm değil, yeniden kullanım stratejileri de önceliklendirilmelidir. Örneğin, cam atıklarının cam tuğlaya dönüştürülmesi gibi uygulamalar desteklenmelidir. Bu yaklaşım, döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmak açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu doğrultuda, aşağıda sıralanan önerilerin uygulanması gerekmektedir [36, 37]:

1. İnşaat ve sanayi kaynaklı atıkların kaynağında doğru şekilde sınıflandırılması ve miktar bazında izlenebilmesi için dijital veri tabanlarına dayalı bir takip sistemi oluşturulmalıdır. Bu sistemler sayesinde atık akışları şeffaf biçimde izlenebilir, gerektiğinde hızlı ve etkili müdahaleler yapılabilir.
2. Mevcut çevre mevzuatı, geri dönüşüm oranlarını artıracak ve zorunlu uygulamaları netleştirecek şekilde güncellenmelidir. Denetim ve yaptırımların güçlendirilmesiyle birlikte mevzuat, yalnızca rehberlik eden değil aynı zamanda yönlendirici bir araç haline gelmelidir.
3. Karmaşık yapılı veya tehlikeli atıkların geri kazanımı için üniversite-sanayi iş birlikleri teşvik edilmeli, yenilikçi geri dönüşüm teknolojileri ve malzeme geliştirme çalışmalarına verilen Ar-Ge destekleri artırılmalıdır. Bu sayede hem bilimsel hem de endüstriyel düzeyde sürdürülebilir üretim kültürü güçlenir.
4. Geri dönüşüm altyapısının yalnızca büyük şehirlerde değil, bölgesel ölçekte de yaygınlaştırılması gerekmektedir. Modern geri dönüşüm tesislerinin kurulması, mevcut tesislerin kapasite ve teknoloji altyapılarının geliştirilmesi, atık yönetim süreçlerinin verimliliğini önemli ölçüde artıracaktır.

5. İnşaat sektörü paydaşlarının ve toplumun geri dönüşüm, yeniden kullanım ve sürdürülebilir atık yönetimi konularında bilinçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda eğitim programları, seminerler ve kamuoyu bilgilendirme kampanyaları düzenlenerek çevreye duyarlı davranışların yaygınlaşması sağlanmalıdır.
6. Geri dönüştürülmüş malzeme kullanımını esas alan projeler, yeşil bina sertifikaları ve sürdürülebilirlik odaklı teşviklerle desteklenmelidir. Bu tür uygulamalar, çevre dostu üretim anlayışının yaygınlaşmasına ve sektörde sürdürülebilir inşaat standartlarının oluşmasına katkı sağlayacaktır.

SONUÇ

İnşaat ve sanayi faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan atıkların kontrolsüz bir şekilde çevreye bırakılması, ciddi düzeyde çevresel kirliliğe ve doğal kaynakların israfına yol açmaktadır. Bu durum, yalnızca ekosistem sağlığı açısından değil, ekonomik ve toplumsal sürdürülebilirlik açısından da önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Diğer yandan, inşaat atıklarının uygun yöntemlerle geri dönüştürülmesi, enerji verimliliğinin artırılmasına, doğal kaynakların korunmasına ve yeşil bina uygulamaları başta olmak üzere sürdürülebilir kalkınma hedeflerine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, etkin atık yönetim sistemlerinin kurulması, ileri geri dönüşüm teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve mevzuata dayalı uygulamaların etkin şekilde uygulanması, sürdürülebilir bir inşaat ve sanayi altyapısının oluşturulması açısından zorunluluk arz etmektedir.

KAYNAKÇA

- Lee, S., Chang, H., & Lee, J. (2024). Construction and demolition waste management and its impacts on the environment and human health: Moving forward. *Sustainable Cities and Society*, 115, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105855>
- Bonifazi, G., Grosso, C., Palmieri, R., & Serranti, S. (2025). Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling. *Cogent Engineering*, 53, 101032. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2025.101032>
- Abera, Y. A. (2024). Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction. <https://doi.org/10.1177/26349833241255957>
- Shivaprasad, K. N., Yang, H.-M., & Singh, J. K. (2024). A path to carbon neutrality in construction: An overview of recent progress in recycled cement usage. *Journal of CO₂ Utilization*, 83, 102816. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102816>
- Oikonomou, N. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 27, 315–318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>
- Zou, Z., Provoost, S., & Gruyaert, E. (2024). Utilization of waste brick powder as a partial replacement of Portland cement in mortars. *Sustainability*, 16(2), 624. <https://doi.org/10.3390/su16020624>
- Süleyman Demirel Üniversitesi. (2019). Atık tuğla tozunun mineral katkı olarak kullanımının kendiliğinden yerleşen betonun taze hal, mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 23(2), 540–548.
- Tekinbaş, T. (2023). Atık betonların geri dönüşümlü agrega olarak kullanımı (Yüksek lisans tezi). Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Luo, J., Yu, F., Chen, X., & Li, S. (2025). Comparative sustainability investigation on a novel industrial-waste-based soil stabilizer and cement based on life cycle assessment. *Construction and Building Materials*, 15, 19936.
- Oladimeji, T. E., Oyedemi, M., Emeteri, M. E., Agboola, O., Adeoye, J. B., & Odunlami, O. A. (2024). Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies. *Heliyon*, 10(23). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370>
- HİYAKY. (2004). Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği. *Resmî Gazete*, 18 Mart 2004, Sayı: 25406.

- <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5401&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Buzkan, C., & Erman, O. (2020). Yapısal atıkların geri dönüşüm sorunu ve Türkiye’deki durumun mevzuat bakımından değerlendirilmesi.
- Islam, N., Sandanayake, M., Muthukumaran, S., & Navaratna, D. (2024). Review on sustainable construction and demolition waste management—Challenges and research prospects. *Sustainability*, 16(8), 3289. <https://doi.org/10.3390/su16083289>
- TÜİK. (2020). Atık istatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index.php/Atik-Istatistikleri-2020-37198>
- Konca, P., Szer, I., Szer, J., Obidowski, D., Gawin, D., Wiśniewski, P., Wiśniewski, B., & Jóźwik, K. (2025). Sustainable infrastructure: Recycled concrete aggregates for cycle paths. *Materials*, 18(1), 131. <https://doi.org/10.3390/ma18010131>
- Karapınar, N. (2024). Sürdürülebilir agrega üretiminde döngüsel ekonomi yaklaşımı. *MTA Yerbilimleri ve Madencilik Dergisi*. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3427320>
- Tam, V. W. Y., & Tam, C. M. (2013). Recycled concrete aggregates: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7, 61–69. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- Building Research Establishment. (1998). Recycled aggregates (Digest 433). Watford, UK. <https://www.cpda.co.uk/wp-content/uploads/2015/03/BRE-Digest-4331.pdf>
- Murta-zaev, S.-A. Y., Ismailova, Z. K., Salamanova, M. S., & Ibragimov, S. K. (2019). Wastes recycling in the construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 663(1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/663/1/012048>
- Sormunen, P., & Kärki, T. (2019). Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. *Journal of Building Engineering*, 24, 100742. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100742>
- Yu, D., Duan, H., Song, Q., Li, X., Zhang, H., Zhang, H., Liu, Y., Shen, W., & Wang, J. (2018). Characterizing the environmental impact of metals in construction and demolition waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 13823–13832. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1632-z>
- Šooš, L., Matuš, M., Pokusová, M., Čačko, V., & Bábics, J. (2021). The recycling of waste laminated glass through decomposition technologies. *Recycling*, 6(2), 26. <https://doi.org/10.3390/recycling6020026>

- Robert, D., Baez, E., & Setunge, S. (2021). A new technology of transforming recycled glass waste to construction components. *Construction and Building Materials*, 313, 125539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125539>
- Lamba, P., Kaur, D. P., Raj, S., & Sorout, J. (2022). Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 86156–86179. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16980-y>
- Gautam, L., Jain, J. K., Kalla, P., & Choudhary, S. (2021). A review on the utilization of ceramic waste in sustainable construction products. *Materials Today: Proceedings*, 43(2), 1884–1891. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.829>
- Awoyera, P. O., Ndambuki, J. M., Akinmusuru, J. O., & Omole, D. O. (2018). Characterization of ceramic waste aggregate concrete. *HBRC Journal*, 14(3), 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.11.003>
- Morsali, S., Rakhshanbabanari, K., Osmani, M., Cavalaro, S., Gutai, M., Castro-Díaz, M., Parker, B., Sparkes, J., Needham, P., Newport, S., Sands, M., & Massey, A. (2024). Life cycle assessment of plasterboard production: A UK case study. *Sustainability*, 16(9), 3564. <https://doi.org/10.3390/su16093564>
- Bedir, Z., & Aydın İpekçi, C. (2021). Yapı malzemesi özelinde atık alçılara yönelik bir inceleme. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4(1), 13–21.
- Uysal, E. D. (2021). A comparative life cycle assessment of structural materials: A case study on TOKİ housing (Yüksek lisans tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Petrovic, B., Myhren, J. A., Zhang, X., Wallhagen, M., & Eriksson, O. (2019). Life cycle assessment of building materials for a single-family house in Sweden. *Energy Procedia*, 158, 3547–3552. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.913>
- Trusty, W. B., & Meil, J. K. (2009). Building life cycle assessment: Residential case study. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 69–75.
- Park, W.-J., Kim, R., Roh, S., & Ban, H. (2020). Identifying the major construction wastes in the building construction phase based on life cycle assessments. *Sustainability*, 12(19), 8096. <https://doi.org/10.3390/su12198096>
- Quéheille, E., Ventura, A., Saiyouri, N., & Taillandier, F. (2022). A life cycle assessment model of end-of-life scenarios for building deconstruction and waste management. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130694.
- Carpenter, A., Jambeck, J. R., Gardner, K., & Weitz, K. (2012). Life cycle assessment of end-of-life management options for construction and demolition debris. *Journal of Industrial Ecology*, 17(3). <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00568.x>

- Lubongo, C., & Alexandridis, P. (2022). Assessment of performance and challenges in use of commercial automated sorting technology for plastic waste. *Recycling*, 7(2), 11. <https://doi.org/10.3390/recycling7020011>
- Cao, J., Lu, B., Chen, Y., Zhang, X., Zhai, G., Zhou, G., Jiang, B., & Schnoor, J. L. (2016). Extended producer responsibility system in China improves e-waste recycling: Government policies, enterprise, and public awareness. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 882–894. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.078>
- Matter, A., Ahsan, M., Marbach, M., & Zurbrügg, C. (2015). Impacts of policy and market incentives for solid waste recycling in Dhaka, Bangladesh. *Waste Management*, 39, 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.032>

