

50970

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AFŞİN - ELBİSTAN TERMİK SANTRALI  
UÇUCU KÜLÜNÜN YOL STABİLİZASYONUNDA  
ÇEŞİTLİ MALZEMELERLE BİRLİKTE KULLANIMI  
ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

TANER ALATAŞ

DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ

1996

50970

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AFŞİN - ELBİSTAN TERMİK SANTRALI  
UÇUCU KÜLÜNÜN YOL STABİLİZASYONUNDA  
ÇEŞİTLİ MALZEMELERLE BİRLİKTE KULLANIMI  
ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

TANER ALATAŞ

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, ..... tarihinde, aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

(İmza)

(İmza)

(İmza)

.....

Danışman:

Prof. Bekir YILDIRIM

**ÖZET**

Doktora Tezi

**AFŞİN - ELBİSTAN TERMİK SANTRALI  
UÇUCU KÜLÜNÜN YOL STABİLİZASYONUNDA  
ÇEŞİTLİ MALZEMELERLE BİRLİKTE KULLANIMI  
ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

Taner ALATAŞ

Fırat Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

1996, Sayfa:147

Uçucu kül, kömür yakan enerji santrallerinde ortaya çıkan bir artık maddedir. Türkiye 'de yılda 10 milyon tonun üzerinde uçucu kül elde edilmekte ancak bu küllerin pek azı değerlendirilebilmektedir. Bu tez çalışması sırasında Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külü kullanılmıştır. Bu santralardan, yılda yaklaşık 2.5 milyon ton uçucu kül elde edilmektedir. Büyük hacimlerde ortaya çıkan ve bir yan ürün olan uçucu külün değerlendirilmesi, ekonomi ve çevre kirliliği açısından çok önem taşımaktadır. Uçucu külün kullanıldığı en önemli alan inşaat sektörüdür. Uçucu kül, özellikle çimento ve kireç gibi çeşitli malzemelerle kısmen yer değiştirebilmektedir. Bu sebeple uçucu küllerin, çimento ve kireç gibi bağlayıcıların bir kısmı yerine kullanılması, hem bu bağlayıcı malzemelerden tasarruf sağlayacak, hem de fabrika alanlarının dökme sahası olarak kullanılmalarını önleyecektir.

Tezin giriş bölümünden sonra ikinci bölümde genel bilgiler verilmiştir. Genel bilgiler bölümünde, yol stabilizasyonu, yol üst yapısı, uçucu küller ve uçucu külün kullanıldığı yerler hakkında bilgiler bulunmaktadır. Üçüncü bölümde, literatür taramasıyla elde edilen bilgiler, "Uçucu Küller Üzerinde Yapılan Araştırmalar" başlığıyla verilmiştir. Dördüncü bölümde, tez

çalışması sırasında yapılan deneylerin tanıtımı yer almaktadır. Beşinci bölümde, yapılan deneylerin sonuçlarının karşılaştırılması yapılmakta, altıncı bölümde de ekonomik etüd yapılmaktadır. Yedinci bölümde ise, genel sonuçlar ve önerilerden bahsedilmektedir.

Bu çalışmada, uçucu külün yol stabilizasyonunda çeşitli malzemelerle birlikte kullanımı araştırılmıştır. Değişik oranlardaki zemin - çimento, zemin-çimento-uçucu kül, temel malzemesi-çimento-uçucu kül, zemin-kireç-uçucu kül karışımları üzerinde 7, 28 ve 90 gün kür süreli olarak diziler halinde deneyler yapılmıştır.

Uçucu kül de katılarak yapılan ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerinde tesbit edilen ağırlık kayıpları, uçucu külsüz numunelere göre önemli oranda azaldığı görülmüştür. Gerek zemin-çimento, gerekse zemin-kireç ve temel malzemesi-çimento karışımlarında, uçucu kül de kullanılması halinde daha yüksek basınç mukavemetleri elde edilmiştir.

Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külünün, yol stabilizasyonunda, diğer esas bağlayıcılarla birlikte kullanılabileceği görülmüştür. Böylece hem diğer bağlayıcıların daha az kullanılmasına imkan vererek, bu malzemelerden tasarruf sağlanacak ve hem de uçucu külün kullanım alanı genişletilmiş olacaktır.

ANAHTAR KELİMELEER: Uçucu Kül, Yol Stabilizasyonu, Çimento, Kireç.

**SUMMARY**

PhD Thesis

A STUDY ON THE USE OF FLY ASH OF AFŞİN-ELBİSTAN  
THERMAL POWER PLANT IN ROAD STABILIZATION  
WITH SOME MATERIALS

Taner ALATAŞ

Fırat University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

1996, Page:147

Fly ash is a waste material from thermal power plants which consume coal. Fly ash is obtained at an amount of 10 million tons in Turkey, but a small part of it is used effectively. In this study, fly ash from Afşin-Elbistan Thermal Power plant has been used. Approximately, 2.5 million tons fly ash per year have been consumed from this power station. The appraisal of fly ash which consumed in large amount as a sub-product, is very important to use for economical and environmental reasons. The most common use of the fly ash is to be in civil engineering area. The fly ash, particularly can be used for the replacement of some materials like cement and lime, partially. For this reason, the use of fly ash in place of cement and lime is both saves the amount of cement and avoids the fertile fields from being used as debris areas.

The general informations were given in the second chapter following the introduction section of the thesis. The general information chapter contains the following informations; road stabilization, road elevation, fly ash and the place of the use of fly ash. The third chapter were given under the title of "The Research on Use of Fly Ash" and summary of literature survey were given. The presentation of experimental studies which were utilized in the study were take place in fourth chapter. The comparison and discussion

of the experimental results were made in the chapter 5 and the economical analyses were take place in chapter 6. The general results and suggestions were given in chapter 7.

In this study, the use of fly ash in road stabilization with some materials have been investigated. A series of experiments have been conducted on the mixture of soil-cement, soil-cement-fly ash, base material-cement-fly ash, soil-lime-fly ash at various rates under 7, 28 and 90 days of curing durations.

In the experimental studies with fly ash added materials on the soak-drying and freeze-thawing, it is observed that, the weight losses of the samples with fly ash are less than that of the samples without fly ash. The higher compression strengths have been obtained in both soil-cement and soil-lime, base material-cement mixtures.

It can be concluded that fly ash of Afşin-Elbistan Thermal Power plant can be used in road stabilization with the other main binder. Therefore, both the less usage of the other binders can be obtained for economical reasons and the usage area of fly ash can be expanded.

KEY WORDS: Fly Ash, Road Stabilization, Cement, Lime.

**TEŞEKKÜR**

Bu doktora tezi çalışmalarım sırasında yoğun çalışma programına rağmen bana vakit ayırıp değerli teşvik, yardım ve ilgilerini esirgemeyen Dekanımız danışman hocam sayın Prof. Bekir YILDIRIM 'a içtenlikle teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Değerli teşvik ve yardımlarını gördüğüm, sayın Öğr. Gör. Behçet AYIK 'a, sayın Yrd.Doç.Dr. Necati KULOĞLU 'na ve sayın Doç.Dr. Abdussamet ARSLAN 'a da teşekkür ederim.

Ayrıca, deneyler sırasında yardımcı olan İnşaat Mühendisliği Bölümü teknisyeni Seyfettin ÇİÇEK 'e ve tezi özenle yazan İhsan GENÇ 'e de teşekkür ederim.

**İÇİNDEKİLER**

|                                                 | Sayfa        |
|-------------------------------------------------|--------------|
|                                                 | -----        |
| ÖZET.....                                       | III          |
| SUMMARY.....                                    | V            |
| TEŞEKKÜR.....                                   | VII          |
| İÇİNDEKİLER.....                                | VIII         |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                         | XII          |
| TABLoların LİSTESİ.....                         | XVI          |
| FOTOĞRAFLARIN LİSTESİ.....                      | XIX          |
| SİMGELER.....                                   | XX           |
| <br><b>1. GİRİŞ.....</b>                        | <br><b>1</b> |
| <br><b>2. GENEL BİLGİLER.....</b>               | <br><b>6</b> |
| 2.1. Yol Stabilizasyonu.....                    | 6            |
| 2.1.1. Mekanik stabilizasyon.....               | 7            |
| 2.1.2. Zemin-çimento stabilizasyonu.....        | 8            |
| 2.1.3. Zemin-kireç stabilizasyonu.....          | 13           |
| 2.2. Yol Üstyapısı.....                         | 18           |
| 2.2.1. Alttemel tabakası.....                   | 19           |
| 2.2.2. Temel tabakası.....                      | 20           |
| 2.2.3. Kaplama tabakası.....                    | 22           |
| 2.3. Uçucu Küller.....                          | 23           |
| 2.3.1. Uçucu küllerin tanımı ve sınıflandırılm. | 24           |

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.2. Uçucu külün fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları..... | 29        |
| 2.3.3. Uçucu külün puzzolanik özelliği.....                              | 32        |
| 2.3.4. Uçucu külün betona etkileri.....                                  | 33        |
| 2.3.5. Termik santrallar.....                                            | 35        |
| 2.3.5.1. Afşin-Elbistan Termik Santrali ve Uçucu Külü.....               | 37        |
| 2.3.6. Uçucu külün üretimi, taşınması ve depolanması.....                | 41        |
| 2.3.7. Uçucu külün kullanıldığı yerler.....                              | 42        |
| 2.3.7.1. Çimento ve beton üretimi.....                                   | 44        |
| 2.3.7.2. Boşluklu beton üretimi.....                                     | 46        |
| 2.3.7.3. Hafif agrega üretimi.....                                       | 47        |
| 2.3.7.4. Dolgu işleri.....                                               | 48        |
| 2.3.7.5. Tuğla üretimi.....                                              | 50        |
| 2.3.7.6. Gazbeton üretimi.....                                           | 50        |
| 2.3.7.7. Rolkrit üretimi.....                                            | 51        |
| 2.3.7.8. Bazı elementlerin elde edilmesi.....                            | 52        |
| <b>3. UÇUCU KÜLLER ÜZERİNDE YAPILAN ARAŞTIRMALAR..</b>                   | <b>53</b> |
| 3.1. Uçucu Küllerin Betonda Kullanılması.....                            | 53        |
| 3.2. Uçucu Küllerin Yol Stabilizasyonunda Kullanılması.....              | 62        |

|                                                                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. YOL STABİLİZASYONUNDA VE TEMEL TABAKASINDA KULLANILAN MALZEMELER VE BU TEZ ÇALIŞMASI SIRASINDA YAPILAN DENEYLERİN TANITIMI.....</b>                       | <b>65</b> |
| 4.1. Çalışmada İzlenen Yöntem.....                                                                                                                              | 65        |
| 4.2. Kullanılan Malzemeler.....                                                                                                                                 | 66        |
| 4.3. Stabilizasyon Malzemeleri Üzerinde Yapılan Deneyler.....                                                                                                   | 68        |
| 4.3.1. Elek analizi ve zemin danelerinin özgül ağırlığının ölçümü.....                                                                                          | 68        |
| 4.3.2. Likit limit ve plastik limit tayini.....                                                                                                                 | 68        |
| 4.3.3. Standart Procktor deneyi.....                                                                                                                            | 69        |
| 4.3.4. Islatma-kurutma deneyi.....                                                                                                                              | 70        |
| 4.3.5. Donma-çözülme deneyi.....                                                                                                                                | 71        |
| 4.3.6. 7, 28 ve 90 günlük serbest basınç mukavemeti ölçümleri.....                                                                                              | 72        |
| <b>5. YOL STABİLİZASYONU VE TEMEL TABAKASI İÇİN DEĞİŞİK MALZEMELER ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLERDE ALINAN SONUÇLAR VE DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....</b> | <b>73</b> |
| 5.1. Taban zemini ve Temel Malzemesi Üzerinde Yapılan Deneyler.....                                                                                             | 73        |
| 5.1.1. Elek Analizi Deneyi.....                                                                                                                                 | 73        |
| 5.1.2. Likit Limit ve Plastik Limit Deneyi.....                                                                                                                 | 74        |
| 5.1.3. Özgül Ağırlık Deneyi.....                                                                                                                                | 77        |
| 5.1.4. Organik Madde Tayini.....                                                                                                                                | 78        |

|                                                    |            |
|----------------------------------------------------|------------|
| 5.2. Zemin-Çimento-Uçucu Kül Karışımı Numuneler    |            |
| Üzerinde Yapılan Deneyler.....                     | 78         |
| 5.2.1. Standart Procktor deneyi ve sonuçları....   | 78         |
| 5.2.2. Serbest basınç deneyi ve sonuçları.....     | 83         |
| 5.3. Temel Malzemesi-Çimento-Uçucu Kül Karışımı    |            |
| Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler.....           | 91         |
| 5.3.1. Standart Procktor deneyi ve sonuçları....   | 91         |
| 5.3.2. Serbest basınç deneyi ve sonuçları.....     | 96         |
| 5.4. Zemin-Kireç-Uçucu Kül Karışımı Numuneler      |            |
| Üzerinde Yapılan Deneyler.....                     | 101        |
| 5.4.1. Standart Procktor deneyi ve sonuçları....   | 101        |
| 5.4.2. Serbest basınç deneyi ve sonuçları.....     | 106        |
| 5.5. Islatma-Kurutma ve Donma-Çözülme Deneyleri    |            |
| ve Sonuçları.....                                  | 111        |
| <b>6. EKONOMİK ETÜD.....</b>                       | <b>120</b> |
| 6.1. Taban Zemini-Çimento-Uçucu Kül Karışımlarının |            |
| Maliyetlerinin Karşılaştırılması.....              | 120        |
| 6.2. Taban Zemini-Kireç-Uçucu Kül Karışımlarının   |            |
| Maliyetlerinin Karşılaştırılması.....              | 128        |
| <b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                | <b>130</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                              | <b>133</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                               | <b>147</b> |

**ŞEKİLLERİN LİSTESİ**

|                                                                                                                                                         | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
|                                                                                                                                                         | ----- |
| Şekil 2.1. Karayolu enkesiti.....                                                                                                                       | 18    |
| Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan zemin<br>malzemesinin granülometri eğrisi.....                                                                         | 74    |
| Şekil 5.2. Deneylerde kullanılan temel<br>malzemesinin granülometri eğrisi.....                                                                         | 75    |
| Şekil 5.3. Deneylerde kullanılan zemin<br>malzemesinin likit limit grafiği.....                                                                         | 76    |
| Şekil 5.4. Zemin-çimento karışımlarındaki çimento<br>yüzdesine göre optimum su içeriğinin<br>değişimi.....                                              | 81    |
| Şekil 5.5. Zemin-çimento karışımlarındaki çimento<br>yüzdesine göre maksimum kuru birim<br>hacim ağırlıkları değişimi.....                              | 82    |
| Şekil 5.6. Zemin-çimento-uçucu kül karışımlarındaki<br>çimento ve uçucu kül yüzdesine göre<br>optimum su içeriğinin değişimi.....                       | 82    |
| Şekil 5.7. Zemin-çimento-uçucu kül karışımlarındaki<br>çimento ve uçucu kül yüzdesine göre<br>maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının<br>değişimi..... | 83    |
| Şekil 5.8. Zemin-çimento karışımlarında 7, 28 ve 90<br>günlük serbest basınç mukavemetleri ...                                                          | 89    |
| Şekil 5.9. Zemin-çimento uçucu kül karışımlarında<br>7 günlük serbest basınç mukavemetleri..                                                            | 89    |
| Şekil 5.10. Zemin-çimento uçucu kül numunelerinin<br>28 günlük serbest basınç mukavemetleri.                                                            | 90    |

|                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.11. Zemin-çimento uçucu kül numunelerinin<br>90 günlük serbest basınç mukavemetleri.                                                                     | 90  |
| Şekil 5.12. Zemin-çimento karışımlarında serbest<br>basınç mukavemetlerinin kür süresine<br>göre değişimi.....                                                   | 91  |
| Şekil 5.13. Temel malzemesi-çimento karışımlarındaki<br>çimento yüzdesine göre optimum su<br>içeriğinin değişimi.....                                            | 94  |
| Şekil 5.14. Temel malzemesi-çimento karışımlarındaki<br>çimento yüzdesine göre maksimum kuru<br>birim hacim ağırlığının değişimi.....                            | 94  |
| Şekil 5.15. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül<br>numunelerinde uçucu kül ve çimento<br>oranlarına göre optimum su<br>içeriklerinin değişimi.....                 | 95  |
| Şekil 5.16. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül<br>numunelerinde uçucu kül ve çimento<br>oranlarına göre maksimum kuru birim<br>hacim ağırlıklarının değişimi..... | 95  |
| Şekil 5.17. Temel malzemesi-çimento numunelerinin<br>7, 28 ve 90 günlük serbest basınç<br>mukavemetleri.....                                                     | 99  |
| Şekil 5.18. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül<br>numunelerinin 7 günlük serbest basınç<br>mukavemetleri.....                                                     | 100 |
| Şekil 5.19. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül<br>numunelerinin 28 günlük serbest basınç<br>mukavemetleri.....                                                    | 100 |

|                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.20. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül<br>numunelerinin 90 günlük serbest basınç<br>mukavemetleri (amprik formülden).....                   | 101 |
| Şekil 5.21. Zemin-kireç numunelerinin optimum su<br>içerikleri eğrisi.....                                                                         | 104 |
| Şekil 5.22. Zemin-kireç numunelerinin maksimum<br>kuru birim hacim ağırlıkları eğrisi...                                                           | 104 |
| Şekil 5.23. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinde<br>uçucu kül ve kireç oranlarına göre<br>optimum su içeriklerinin değişimi.....                    | 105 |
| Şekil 5.24. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin<br>maksimum kuru birim hacim<br>ağırlıklarının uçucu kül ve kireç<br>oranlarına göre değişimi..... | 105 |
| Şekil 5.25. Zemin-kireç numunelerinin 7 ve 28<br>günlük serbest basınç mukavemetleri...                                                            | 109 |
| Şekil 5.26. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin<br>7 günlük serbest basınç mukavemetleri.                                                          | 109 |
| Şekil 5.27. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin<br>28 günlük serbest basınç mukavemetleri.                                                         | 110 |
| Şekil 5.28. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin<br>90 günlük serbest basınç mukavemetleri<br>(amprik formülden).....                               | 110 |
| Şekil 5.29. Islatma-kurutma deneyinde değişik uçucu<br>kül ve çimento oranlarına göre ağırlık<br>kayıpları.....                                    | 113 |

- Şekil 5.30. Donma-çözülme deneyinde değişik uçucu kül ve çimento oranlarına göre ağırlık kayıpları..... 113
- Şekil 5.31. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin ıslatma-kurutma deneyinde değişik uçucu kül ve çimento oranlarına göre ağırlık kayıpları..... 116
- Şekil 5.32. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin donma-çözülme deneyinde değişik uçucu kül ve çimento oranlarına göre ağırlık kayıpları..... 116
- Şekil 5.33. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin ıslatma-kurutma deneyinden sonra serbest basınç mukavemetleri.... 117
- Şekil 5.34. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin donma-çözülme deneyinden sonra serbest basınç mukavemetleri.... 117
- Şekil 5.35. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin ıslatma-kurutma deneyinde değişik uçucu kül ve kireç oranlarına göre ağırlık kayıpları..... 119
- Şekil 5.36. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin donma-çözülme deneyinde değişik uçucu kül ve kireç oranlarına göre ağırlık kayıpları..... 119
- Şekil 6. 1. Aynı malzeme maliyetini veren eşdeğer şantiye-çimento fabrikası ve şantiye-termik santral mesafeleri..... 127

**TABLoların LİSTESİ**

|                                                                                                                  | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
|                                                                                                                  | ----- |
| Tablo 2.1. Zemin-çimento stabilizasyonuna uygun<br>zemin granülometrisi sınır değerleri...                       | 9     |
| Tablo 2.2. En önemli çimentoların kimyasal<br>bileşimleri ve ağırlık yüzdeleri.....                              | 12    |
| Tablo 2.3. Teorik (saf) kireç özellikleri.....                                                                   | 16    |
| Tablo 2.4. Ticari kireç özellikleri.....                                                                         | 17    |
| Tablo 2.5. TS 32 'ye göre söndürülmüş ve<br>torbalanmış toz kirecin kimyasal<br>analizi.....                     | 17    |
| Tablo 2.6. Alttemel tabakası granülometri limitleri.                                                             | 20    |
| Tablo 2.7. Temel tabakası granülometri limitleri..                                                               | 21    |
| Tablo 2.8. Kimyasal yapı bakımından uçucu külün<br>curuf, kil ve çimento ile<br>karşılaştırılması.....           | 29    |
| Tablo 2.9. Türkiye'deki bazı termik santrallardan<br>elde edilen uçucu küllerin kimyasal<br>kompozisyonları..... | 31    |
| Tablo 2.10. Türkiye 'de termik santrallardaki<br>1980-1995 yılları arası uçucu kül<br>üretim miktarları.....     | 42    |
| Tablo 2.11. Uçucu kül üretim ve kullanımı.....                                                                   | 44    |
| Tablo 4. 1. Afşin-Elbistan Termik Santralı uçucu<br>külü kimyasal analizi.....                                   | 67    |
| Tablo 4. 2. Elazığ Çimento Fabrikası'nda üretilen<br>çimentonun özellikleri.....                                 | 67    |

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 5. 1. Deneylerde kullanılan zemin malzemesinin elek analizi sonuçları...                                                                            | 73  |
| Tablo 5. 2. Deneylerde kullanılan temel malzemesinin elek analizi sonuçları...                                                                            | 75  |
| Tablo 5. 3. Zemin-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor deneyi sonuçları.....                                                  | 80  |
| Tablo 5. 4. Zemin-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan 7, 28 ve 90 günlük kür süreli serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları.....      | 85  |
| Tablo 5. 5. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor deneyi sonuçları.....                                        | 93  |
| Tablo 5. 6. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan 7 ve 28 günlük kür süreli serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları..... | 98  |
| Tablo 5. 7. Zemin-kireç-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor deneylerinin sonuçları.....                                              | 103 |
| Tablo 5. 8. Zemin-kireç-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan 7 ve 28 günlük kür süreli serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları.....             | 107 |

|             |                                                                                                                                                                                                      |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 5.9.  | Zemin-çimento-uçucu kül numuneleri<br>üzerinde yapılan ıslatma-kurutma ve<br>donma-çözülme deneylerinin sonuçları..                                                                                  | 112 |
| Tablo 5.10. | Temel malzemesi-çimento-uçucu kül<br>numuneleri üzerinde yapılan ıslatma-<br>kurutma ve donma-çözülme deneylerinin<br>sonuçları ve deneylerin sonunda numu-<br>nelerin basınç mukavemeti değerleri.. | 115 |
| Tablo 5.11. | Zemin-kireç-uçucu kül numuneleri<br>üzerinde yapılan ıslatma-kurutma ve<br>donma-çözülme deneylerinin sonuçları.                                                                                     | 118 |
| Tablo 6. 1. | Aynı malzeme maliyetini veren eşdeğer<br>şantiye-çimento fabrikası ve şantiye-<br>termik santral mesafeleri.....                                                                                     | 126 |

**FOTOĞRAFLARIN LİSTESİ**

|                                                                                                                | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
|                                                                                                                | ----- |
| Resim 2.1. Afşin-Elbistan Termik Santrali.....                                                                 | 38    |
| Resim 5.1. Hazırlanmış olan numuneler kürde<br>bekletilirken görülmektedir.....                                | 79    |
| Resim 5.2. Serbest basınç mukavemeti deneyine tabi<br>tutulan bir numunenin deney esnasındaki<br>görünüşü..... | 84    |
| Resim 5.3. Serbest basınç mukavemeti deneyinden<br>sonra numunelerin görünümü.....                             | 86    |

**SİMGELER**

- Z : Genel maliyet (TL).
- C : 1 ton uçucu külün termik santraldan temin edilme maliyeti (TL/ton).
- A : 1 ton uçucu külün satın alma bedeli (TL/ton).
- F1: 1 ton uçucu külün santraldan şantiyeye taşıma bedeli (TL/ton).
- P : 1 m<sup>2</sup> stabilizasyonu oluşturan karışımın ağırlığı (ton/m<sup>2</sup>).
- V : 1 m<sup>2</sup> stabilizasyonu oluşturan karışımın hacmi (m<sup>3</sup>).
- $\gamma$  : Karışımın yoğunluğu (ton/m<sup>3</sup>).
- d : Stabilizasyonun kalınlığı (m).
- D : 1 ton çimentonun fabrikadan temin edilme maliyeti (TL/ton).
- B : 1 ton çimentonun satın alma bedeli (TL/ton).
- F2: 1 ton çimentonun fabrikadan şantiyeye taşıma bedeli (TL/ton).
- F3: 1 ton kirecin şantiyeye taşıma bedeli (TL/ton).
- KY: Karışımındaki uçucu kül yüzdesi (%).
- CY: Karışımındaki çimento yüzdesi (%).
- KİY: Karışımındaki kireç yüzdesi (%).
- $y=M_{\phi, fab.}$ : Şantiye-çimento fabrikası mesafesi (km).
- $X=M_{sant.}$ : Şantiye-termik santral mesafesi (km).
- M : Mesafe (km).
- K : Taşıma bağıntısında enflasyona bağlı olarak her yıl tesbit edilen katsayı.

$M_{90zk}$ : 90 günlük taban zemini-kireç karışımı numunelerin serbest basınç mukavemeti.

$M_{90tç}$ : 90 günlük temel malzemesi-çimento karışımı numunelerin serbest basınç mukavemeti.

$M_{90tçu}$ : 90 günlük temel malzemesi-çimento-uçucu kül karışımı numunelerin serbest basınç mukavemeti.

$M_{90zku}$ : 90 günlük taban zemini-kireç-uçucu kül karışımı numunelerin serbest basınç mukavemeti.

$k$  : Karışımdaki kireç yüzdesi.

$ç$  : Karışımdaki çimento yüzdesi.

$u$  : Karışımdaki uçucu kül yüzdesi.

$y=M_{kireç}$ : Şantiyeden kirecin temin edildiği yere mesafesi (km).

$KF$  : 1 ton kirecin satın alma bedeli (TL/ton).

$KM$  : 1 ton kirecin temin edilme maliyeti (TL/ton).

## 1. GİRİŞ

Ülkemiz, son yıllarda gerek hızlı nüfus artışı, gerekse endüstrinin hızlı büyümesi sonucu, önemli boyutlarda çevre sorunlarıyla karşı karşıya bulunmaktadır.

Kalkınma yolundaki ülkelerin endüstriyel gelişmelerini yeterli hız ile sürdürebilmeleri, enerji ihtiyaçlarını en akılcı yoldan karşılayabilecek yönde tedbirleri süratle alabilmelerine bağlıdır. Bu ülkeler bir yandan endüstride birim üretimler için, tüketilen enerji miktarlarını minimum düzeylere indirmek yönünde tedbirleri almak, diğer yandan da kullanılagelmekte olan enerjiyi yeni kaynaklardan daha ucuza mal edecek yöntemleri tesbit etmek ve uygulamak durumuyla karşı karşıya gelmişlerdir.

Ülkemizde son yıllarda ortaya çıkan enerji ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla, elektrik üretimi için termik santralleri kurulması gerekli olmuş ve bu santrallerin çalışması sırasında, ortaya çıkan uçucu küller, gerek taşıma ve gerekse depolama sırasında önemli sorunlar oluşturmaya başlamıştır.

Türkiye 'de bugün halen bol miktarda endüstriyel bir artık madde olarak bulunduğu halde yeterli derecede faydalanılmayan hatta santrallerden atılması büyük bir problem olan ve bunun için de enerji harcanan uçucu küllerin değerlendirilmesi faydalı olacaktır.

Uçucu kül, çimentoya göre çok ucuzdur. Termik santrallarda kömürün yanması sonucu meydana çıkan uçucu kül çok değişik ve faydalı alanlarda kullanılmakla beraber dünyada en çok kullanım sahası beton içinde çimentonun yerine belli bir oranda kullanılarak hem tasarruf sağlanmakta hem de betonun bazı fiziki, kimyasal ve mekanik özellikleri iyileştirilmektedir.

Ülkemizde ise, değerlendirilemeyen uçucu küllerin santral dışına, genellikle santraldan oldukça uzak bir yere taşınması ve atılması gerekmektedir. Uçucu küllerin değerlendirilememesi nedeniyle işletmelere yüklenen ek taşıma ve çevre kirliliği sorunları çok büyük boyutlara ulaşmıştır. Örneğin, 150 MW 'lık üç grupta Seyitömer Termik Santrali 'nda 1978 yılında üretilen 1.050.000 ton külün santraldan 3 km. uzaklıkta olan bir vadiye bantla taşınarak, bu vadide dağıtıcı bantlarla, kamyon ve dozerlerle dağıtılması yapılmıştır (Demir,1989).

Günlük 5-6 bin ton külün taşınmasının güçlüğü, pahalılığı ve meydana getirdiği çevre kirliliği yanında, taşıma sistemindeki arızalar nedeniyle santralların zaman zaman düşük kapasitede çalıştıkları, hatta tamamen durdukları gözlenmektedir. Örneğin, 1978 yılında Seyitömer Termik Santralında külün santraldan depo yerine taşınmasındaki arızalar nedeniyle üretilmeyen enerjinin, öngörülen üretime oranı % 4.72 'dir. Kül, değerlendirildiği takdirde külün atılacağı mesafe kısılacak ve bu kayıp önlenebilecektir (Demir, 1989).

Endüstriyel artıkların inşaat sektöründe kullanılması çok yönlü yarar sağlayabilecek bir konudur. Bu kullanımı ile, bir taraftan sınırlı tabii kaynakların hızlı tüketimi önlenirken diğer taraftan artıkların sebep olduğu çevre problemlerine de bir ölçüde çözüm getirilmiş olacaktır. Ayrıca, alışılmış malzemelerin yerine daha ekonomik, daha iyi özelliklere sahip malzemelerin üretimi mümkün olabilecektir.

Değişik kaynaklı artık ürünler ele alındığında, bunlar arasında gerek miktar olarak ve gerekse kullanım olanakları bakımından en büyük yeri termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin aldığı görülmektedir.

Günümüzde hızlı nüfus artışı, ekonomik kalkınma ve hayat standartlarının yükselmesi ile birlikte ülkelerdeki ulaşım talebi de hızla artmakta, bu artış bir yandan mevcut ulaştırma yapılarının bakım ve onarım giderlerini, diğer yandan yeni ulaştırma yapılarına olan ihtiyacı hızla artırmaktadır. Dolayısıyla kara ulaştırma yapılarında büyük miktarlardaki malzeme tüketimi de hızla artmaktadır. İstenen özelliklerdeki tabii kaynakların da kısıtlı olması ve malzeme maliyetlerinin yükselmesi, artık malzemelerin ulaştırma yapılarında da değerlendirilmesi konusunu gündeme getirmektedir.

Uçucu küllerin yol inşaatlarında kullanılması halinde diğer bağlayıcılardan tasarruf sağlanacak ve diğer taraftan, uçucu küle de bir kullanım alanı bulunmuş olacaktır.

Bu çalışmada, uçucu küllerin kullanım alanının genişletilmesi amaçlanmıştır. Uçucu külün daha fazla kullanılması, yol inşaatında ekonomik bir malzeme olarak elde edilmesine bağlıdır. Ayrıca, uçucu külün çeşitli malzemelerle etkileşmesi ve değişik ortamlardaki davranışının uzun süreli deneylerle incelenmesi bu sahadaki bilgi birikimine de katkıda bulunacaktır.

Ülkemizde yol stabilizasyonu ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle serbest basınç mukavemeti deneylerinde numuneler 60 güne kadar kür edilmiştir. Deneylerde kullanılan agrega malzemeleri ıslah edilmesi gereken dere malzemeleridir. Uçucu külün kullanılması, özellikle bu malzemelerin ıslahı için düşünülmüştür. Bağlayıcı malzeme olarak ise yalnız çimento kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında ise, yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinde numuneler 90 güne kadar kür edilerek, numunelerin daha ileri yaşlardaki mukavemetleri tesbit edilmeye çalışılmıştır. Genellikle düz ve dalgalı arazilerde yol güzergahı boyunca taban zemini killi-kum zeminden oluşmaktadır. Bu nedenle deneylerde kullanılan taban zemini killi-kum (SC) tipi bir zeminden seçilmiştir. Yollar Fenni Şartnamesi granülometri sınırları içerisinde bulunan D tipi bir malzeme de, temel malzemesi olarak seçilmiştir.

Bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanılmıştır. Sonraki bir seri deneyde ise, karışımlarda çimento yerine kireç kullanılmıştır. Kireç ile birlikte Afşin-Elbistan Termik Santralı uçucu külünün de davranışları

incelenmiştir. Ülkemizde yapılan uygulamalarda kireç ile Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külü karışımı yol stabilizasyonunda kullanılmamıştır. Özellikle taban zemini stabilizasyonu üzerinde durulmuş, taban zemini stabilizasyonunun yolun sağlamlığına ve kalitesine etkisi çok önemli görülmüştür.



## **2. GENEL BİLGİLER**

### **2.1. Yol Stabilizasyonu**

Yol inşaatında, zemin stabilizasyonu, zeminin direncini artırmak, sahip olduğu direnci değişik hava şartlarında korumak ve aynı zamanda değişken yük ve iklim şartlarının zararlı etkileri altında uzun zaman dayanacak hale getirilmelerini sağlamak amacı ile yapılır. Bunun için zemin, katkı maddeleriyle karıştırılıp sıkıştırılarak kararlı hale getirilir. Bu işleme zemin stabilizasyonu denir. Stabilizasyon sebebiyle, üstyapı kalınlığı azaltılarak tasarruf sağlanır.

Yol inşaatında genellikle uygulanan stabilizasyon metodları şunlardır:

- 1- Mekanik stabilizasyon,
- 2- Zemin-çimento stabilizasyonu,
- 3- Zemin-kireç stabilizasyonu,
- 4- Zemin-asfalt stabilizasyonu.

Yol yapımında, yolun sağlam olması, uzun zaman ağır trafiğin etkisine dayanması ve ekonomik olması ana prensip olduğundan, yola yakın olan ve yapıma elverişsiz zeminlerin, yerine göre çeşitli stabilizasyon metodları uygulamak suretiyle yararlı bir hale getirilmesi gerekmektedir (Atanur, 1966).

### 2.1.1. Mekanik stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon; uygun granülometriye sahip olmayan zemine, tesbit edilen oranda uygun granülometrilili zemin ilavesi ile iyi bir dane çapı dağılımı elde edilerek, bu malzemeyi su ile karıştırıp, mekanik araçlarla sıkıştırarak zeminin dayanıklılığını artıran bir stabilizasyon metodudur. Aşınma mukavemeti yeterli olan malzeme, mekanik stabilizasyona elverişlidir.

Günümüzde mekanik stabilizasyonla yapılan yollar günden güne artan ağır trafiği taşıyamamakta, kısa bir süre sonra bakım ve takviye tabakasına ihtiyaç göstermektedirler. Yol yapımına elverişli olmayan zeminlerin de yol yapımında kullanılabilir hale getirilmeleri için çeşitli malzemelerle kimyasal stabilizasyonlar yapılmakta, böylece mekanik stabilizasyonla elde edilenlerden daha dayanıklı malzemeler elde edilmektedir.

Tabii stabilize malzeme ocaklarının zamanla tükenmesi veya yoldan uzak oluşu yanında daha dayanıklı bir stabilizasyon sağlaması ve daha ekonomik olması nedeniyle çimento ve kirecin yanında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi çeşitli endüstriyel artık maddelerle yapılan kimyasal stabilizasyon, uygulamada giderek mekanik stabilizasyonun yerini almaktadır (Bayazıt, 1980).

### 2.1.2. Zemin-çimento stabilizasyonu

Zemin-çimento stabilizasyonu, pülverize edilmiş (=ufalanmış) zemine belirli oranlarda çimento ilave edilerek, optimum su içeriğinde sıkıştırılmasıyla elde edilir.

Zemin-çimento stabilizasyonu 1917 yılında İngiltere 'de H.E. Brooke-Bradley isminde bir mühendisin uygulaması ile başlar. Bugün, dünyanın birçok yerinde ekonomik inşaat sistemi olarak kullanılmaktadır. Zemin-çimento karışımları, yalnız yol inşaatında değil, aynı zamanda bina inşaatında, temel ve tuğla işlerinde de bir dereceye kadar kullanılmıştır (Cilason, 1964).

Zemin-çimento stabilizasyonu, yol inşaatında daha çok siltli ve killi zeminlere uygulanır. Stabilizasyonun kalınlığı 0.15 m kadardır. Çimento stabilizasyonunda uygun sonuçlar veren toprak granülometrisi Tablo 2.1 'deki sınırlar arasında olmalıdır (Yıldırım, 1984).

Karışımda 3" den büyük malzeme bulunmaması gerekir. Zeminin plastisite indisi 25 'den ve likit limiti 50 'den az olmalıdır. Yol bir iş gününde stabilizasyon yapılabilecek uzunluklara ayrılır. Temel zemini belirli bir derinliğe kadar tırmıkla kabartılıp gevşetilir. Bu malzeme havalandırılıp kuru karıştırılarak yola serilir ve üzerine belli oranda çimento ilave edilir. Zemin ve çimento

**Tablo 2.1.** Zemin-çimento stabilizasyonuna uygun zemin granülometrisi sınır değerleri.

| Elek No       | % Geçen |
|---------------|---------|
| 4 (4.76 mm)   | 80-100  |
| 10 (2.00 mm)  | 50-100  |
| 40 (0.42 mm)  | 20-95   |
| 80 (0.177mm)  | 10-65   |
| 200 (0.074mm) | 5-15    |

tırmık veya harrow diski ile kuru olarak karıştırılır. Sonra tesbit edilmiş olan miktarda su püskürtülerek malzeme karıştırılır ve ıslak karışım keçi ayağı ile sıkıştırılır. Greyder ile yüzey tesviye edilir. Yol bir hafta bekletildikten sonra trafiğe açılır. Çimento stabilizasyonunun üzerine bir süre sonra yüzeysel kaplama yapılırsa aşınma da önlenmiş olur (Yıldırım, 1984).

Çimento, zemin içindeki mineral parçaları arasında kuvvetli bir bağlantı oluşturur. Zemin parçaları tesbit edilir ve birbiri üzerinden kaymaları önlenir. Böylece zeminin plastisitesi değişir ve kesmeye karşı direnci artar (Umar ve Ağar, 1985).

Çimento, killi zeminlerin su tutma kapasitesini azaltıcı rol oynadığından, çimento ile stabilize edilmiş zeminler, absorbe edilmiş suyun hacim artırıcı ve yumuşatıcı etkilerine karşı korunmuş olur. Çimento, donma ve çözülme olaylarının bozucu etkilerinden de

zemini korur. Çimento ile stabilizasyonun başarısında zeminin cinsi, çimento miktarı, sıkıştırma sırasındaki su oranı, sıkıştırma sonunda elde edilen yoğunluk etkilidir. Bu değerler incelikli bir biçimde belirtilmeli ve yapım sırasında da kontrol edilmelidir.

İyi granülometrili zeminler, aynı zamanda dona karşı daha az hassas ve şişmeye karşı daha az elverişli olduklarından bu gibi malzemelerin stabilizasyonu daha az çimento ile yapılabilir. Buna karşılık üniform daneli kumlar ve dona karşı hassas siltler için stabilizasyonda daha fazla çimento gerekir (Umar ve Ağar, 1985).

En iyisi, stabilize edilecek malzemeyi maksimum yoğunluklar yakınlarında azar azar artan miktarlarda çimento ile karıştırıp bu karışımları deneyerek en uygun zemin-çimento oranını bulmaktır. Su miktarı, optimum su içeriğini sağlayacak kadar olmalıdır. Su içinde yabancı madde bulunmamalıdır.

Çimento tabii zeminle karıştırılırsa, karışımın kuru yoğunluğunu düşürür. Belirli bir su içeriğinde, zemin-çimento karışımı küre tabi tutulduğunda, aynı beton gibi sertleşir. Hidratasyon ise betondaki gibi olur. En uygun sonucu veren minimum çimento miktarı her zemin cinsi için ayrı ayrı tayin edilmelidir.

Genel olarak, zemin-çimento karışımları 7-8 günlük bir kürden sonra sertleşir. Bu sertleşme çimento miktarına da bağlıdır. Kür süresince, zemin-çimento karışımı rutubetli tutulmalı ve su kaybı en aza indirilmelidir.

Zemin-çimento stabilizasyonu bir aşınma tabakası olarak kullanılmamalıdır. Çünkü, ağır trafik yükleri altında yüzey sökülmelere maruz kalır ve toz yapmaya başlar. Trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı ince bir bitümlü yüzey kaplaması gereklidir. Bu bitümlü tabaka hem kür için bir koruyucu tabaka ve hem de üzerine gelecek olan aşınma tabakası için bir astar görevi yapacaktır (Cilason, 1964).

Zemin-çimento stabilizasyonu plastik topraklar ile de yapılmaktadır. Bununla beraber, en iyi sonucu granüler malzeme ihtiva eden topraklar vermektedir. Çimentonun zemin ile üniform bir şekilde karışması şarttır. Bu nedenle, eğer plastik zeminler söz konusu ise, özellikle bunlar fazla rutubet ihtiva ediyorsa, zeminin iyice kurutulması ve pülverize edilmesi gerekir.

Zemin-çimento stabilizasyonunun yol inşaatında en fazla kullanıldığı yer, altyapının üst yüzeyinde belirli bir kalınlıktaki kısımdır. Hafif trafikli yollarda bu kısım temel tabakası olarak da görev yapabilir. Zemin-çimento temel tabakası yarı rijit bir plak gibi çalışır. Zemin - çimento stabilizasyonunun yüzeyinde rötreden dolayı kılcal çatlaklar oluşabilir.

Kullanılacak olan zemin içindeki organik madde miktarı az olmalıdır. Çünkü, organik madde zemin-çimento karışımının mukavemetini düşürür. Organik madde oranı % 2 'den fazla olmamalıdır.

Zemin-çimento karışımından iyi bir sonuç alabilmek için sıkıştırılmaya önem verilmesi gerekir. Bu konuda çalışmalar yapmış olan Stanton Hweem ve Beatty 'nin

aldıkları sonuçlara göre, yoğunlukta % 5 'lik bir azalma, çimento miktarında %10-15 'lik bir azalmadan daha fazla bir mukavemet düşüklüğüne sebep olmaktadır (Cilason, 1964).

Çimento, kalker ile kil karışımının yüksek ısıda (1300-1500°C) pişirilmesiyle elde edilen ve adına klinker denen kitlenin, dövülerek övütölüp ince toz haline getirilmesi ve içërisine bir miktar alçı atılmasıyla meydana gelen bir bağlayıcı maddedir. Çeşitli çimento tiplerinin kimyasal bileşimleri tablo-2.2 'de verilmiştir (İlıcılı, 1988).

**Tablo 2.2.** En önemli çimentoların kimyasal bileşimleri ve ağırlık yüzdeleri.

| Kimyasal Bileşenler                                                                                                           | Portland Çimentosu | Demirli Portland Çimentosu | Yüksek Fırın Çimentosu | Tras Çimentosu | Alüminyum Oksitli Çimento |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|----------------|---------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                                                                                                              | 19-23              | 21-26                      | 22-29                  | 21-27          | 5-15                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub>                                                                              | 4-7                | 5-10                       | 6-13                   | 7-10           | 38-52                     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO                                                                                           | 1-4                | 1-4                        | 1-3                    | 2-4            | 1-10                      |
| CaO                                                                                                                           | 61-67              | 54-64                      | 47-60                  | 48-53          | 35-50                     |
| MgO <sub>3</sub>                                                                                                              | 0.5-3              | 1-5                        | 1-5                    | 1-3            | 0.5-1                     |
| Mn                                                                                                                            | -                  | 0-2                        | 0-4                    | -              | 0-1                       |
| SO <sub>3</sub>                                                                                                               | 1-4                | 1-3                        | 1-4                    | 1-3            | 0-1                       |
| Özgöl                                                                                                                         |                    |                            |                        |                |                           |
| Ağırlık                                                                                                                       | 3.0-3.1            | 3.0-3.1                    | 3.0-3.2                | 2.8-3.0        | 2.8-3.1                   |
| Birim hacim ağırlık (gevşek) öğütme inceliğine göre 0.9-1.3<br>Birim hacim ağırlık (sarsılmış) öğütme inceliğine göre 1.6-1.9 |                    |                            |                        |                |                           |

### 2.1.3. Zemin-kireç stabilizasyonu

Stabilizasyon maddesi olarak kirecin en uygun uygulama alanı karayolu inşaatıdır. Kireç stabilizasyonu köy yollarından devlet ekspres yollarına kadar bütün yolların altyapı, üstyapı inşaatlarında rahatlıkla kullanılabilir.

Karayolları teşkilatında şimdiye kadar kireç stabilizasyonu uygulanmış olan bazı projeler şunlardır (Atanur, 1973):

Karaman-Mut yolunun 5 km 'lik bir kesimi, 15 cm kalınlığında kireç stabilizasyonu uygulamasına tabi tutulmuştur. Ankara-Polatlı yolu (17+200 -17+700 km 'leri arası) toplam 500 m 'lik bir kesime kireç stabilizasyonu uygulanmıştır. Ayrıca, Sorgun-Akdağ Madeni yolu, Adana şehiriçi geçidi yolu 2 km 'lik kısım, Pınarbaşı-Gürün-Darende yolu (25+050-98+350 km 'leri arası), Burdur-Antalya yolu, Bolu-Gerede yolu (Ankara-istanbul yolunun, Gerede girişinde 5 km 'lik kısım), Tekirdağ-Silivri yolu (2 km 'lik kesimde) kireç stabilizasyonu yapılmıştır.

Sönmemiş kireç su ile karıştırıldığında hidrasyon oluşur. Yani, sönmüş kireç meydana gelir. Sönmüş kireç killi zeminlerle karıştırıldığında aktif kil iyonları ile kalsiyum iyonları arasında iyon alışverişi olur. Diğer taraftan, aynı zamanda killerin birçoğu puzzolan olduğundan puzzolanik reaksiyon meydana gelir. Bu arada zemin kolay dağılabilir bir hal alır. Puzzolanlar ile kirecin reaksiyona girmesi

sonucunda tabii çimento meydana gelmiş olur. Tabii çimento maddesi belirli bir su muhtevasında sıkıştırılır ve ilk sertleşme başlar.

Ortamda kalan Kalsiyum ve Mağnezyum hidroksit grubu ve başlangıçtaki çimentolaşmada meydana gelen kalsiyum oksit ile havadaki karbon dioksit birleşerek karbonatlaşma olur ve bunun neticesinde kireç taşı meydana gelir.

Zemin-kireç karışımı, kireçsiz zeminden daha düşük yoğunlukta sıkışmaktadır. Zemin - kireç karışımlarında optimum su içeriği fazla olmakla birlikte bu karışımlar, kireç ilave edilmeyen zemine göre daha iyi sıkışabilmektedir.

Zemin-kireç ve zemin-çimento stabilizasyonlarının mukavemet kazanma hızları birbirlerinden farklıdır. Zemin-kireç stabilizasyonunda mukavemet kazanma hızı yavaş olmakta ve karışım optimum kireç yüzdesinde maksimum mukavemeti vermektedir. Zemin-çimento stabilizasyonunda ise mukavemet kazanma hızı zemin-kireç stabilizasyonuna göre daha hızlı olmaktadır.

Zemin-kireç karışımları üzerinde yapılan arazi deneyleri mukavemetin zamanla arttığını göstermektedir. Zemin-kireç karışımlarının uzun ömürlü olmasına etki eden faktörler şunlardır :

- Kirecin uygun miktarda ilave edilmesi (optimum kireç miktarı),
- Sıcak havada ve yeterli sürede kür edilmesi,
- Maksimum kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılması,
- Kireç ve zemin cinsidir (Atanur, 1973).

Bazı killi zeminler, suyun etkisi altında şişme göstermektedirler. Kireç ilavesi ile şişme basıncında belirli miktarda azalma olmaktadır. Yol inşaatında kullanılacak zeminlerin donma-çözülme ve ıslatma-kurutma gibi tabii etkilere karşı da dayanıklı olması istenir.

Kireç, su ile karıştırıldığında, başlangıçta plastik sonra gittikçe sertleşen anorganik bir bileşiktir. Kireç üretiminde hammadde olarak kalker ( $\text{CaCO}_3$ ) ve dolomit ( $\text{CaCO}_3+\text{MgCO}_3$ ) kullanılır. Kireç özelliklerine etki eden başlıca faktörler; üretimde kullanılan kalker ve dolomitin saflık derecesi ve boyutu, fırın çeşidi ve yakıt çeşididir (İllicalı, 1988).

Kalsiyum karbonatın pişirilmesi ile elde edilen sönmemiş kirece su ilave edildiği zaman ısı açığa çıkar. Hacim büyümesi çok fazla olur ve ince daneli kalsiyum hidroksit meydana gelir. Daha fazla su ilave edildiğinde beyaz sönmüş kireç meydana gelir. Kalkerin yakılmasında elde edilen kireçlere kalsitik kireç; kireç taşı ve magnezyum karbonatın ( $\text{CaCO}_3+\text{MgCO}_3$ ) yakılmasından elde edilen kirece de dolomatik kireç denir. Fazla ısı etkisinde yakılan dolomatik kireçler aşırı yanmış kireçler olup, kolay kolay su ile reaksiyona girmezler. Bağlayıcı olarak fazla değerleri yoktur.

Kireçleri teorik (saf) ve ticari kireçler olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Bu kireçlere ait bazı özellikler Tablo-2.3 ve Tablo-2.4 'de verilmiştir (İllicalı, 1988).

TS32 'ye göre söndürülmüş ve torbalanmış toz kirecin kimyasal analizi ise, Tablo-2.5 'de verilmiştir.

Kireç, daha çok orta ve ince daneli zeminlerle reaksiyona girerek, mukavemeti yükseltir. Genel olarak kireç, zeminin yoğunluğunda azalmaya, plastik özelliklerinde değişmeye ve zeminin taşıma kapasitesinde yükselmeye neden olur. Zemin-kireç karışımının özellikleri, ilave edilen kireç miktarı, zeminin tipi ve zemin-kireç karışımının kür süresi ile değişir (Cilason, 1964).

**Tablo 2.3.** Teorik (saf) kireç özellikleri.

| Özellikler             | Sönmemiş Kireç |         | Sönmüş Kireç        |                     |
|------------------------|----------------|---------|---------------------|---------------------|
| Kimyasal bileşim       | CaO            | MgO     | Ca(OH) <sub>2</sub> | Mg(OH) <sub>2</sub> |
| Kristal şekli          | Kübik          | Kübik   | Hekzagonal          | Hekzagonal          |
| Erime noktası          | 2570 °C        | 2800 °C | -                   | -                   |
| Ayrışma noktası        | -              | -       | 580 °C              | 345 °C              |
| Kaynama noktası        | 2850 °C        | 3600 °C | -                   | -                   |
| 18°C 'de çözülme ısısı | +13.33 Kcal    | -       | +2.79 Kcal          | 0.0 Kcal            |
| Yoğunluk               | 3.40           | 3.65    | 2.34                | 2.40                |

**Tablo 2.4.** Ticari kireç özellikleri.

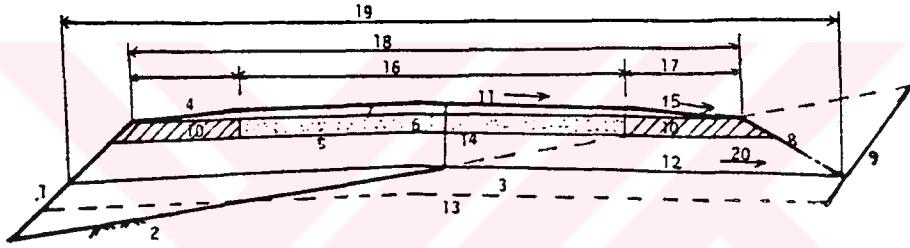
| Sönmemiş Kireç                 |                     |                          |                                          |
|--------------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| Kimyasal Bileşimi              | Kalsitik Kireç (%)  |                          | Dolomatik Kireç (%)                      |
| CaO                            | 92.25-98.00         |                          | 55.50-57.20                              |
| MgO                            | 0.30-2.50           |                          | 37.60-40.80                              |
| CO <sub>2</sub>                | 0.40-1.50           |                          | 0.40-1.50                                |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.20-1.50           |                          | 0.10-1.50                                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.10-0.40           |                          | 0.05-0.40                                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.10-0.50           |                          | 0.05-0.50                                |
| H <sub>2</sub> O               | 0.10-0.90           |                          | 0.10-0.90                                |
| Yoğunluk                       | 3.20-3.40           |                          | 3.20-3.40                                |
| Sönmüş Kireç                   |                     |                          |                                          |
|                                | Yüksek Kalsiyumlu   | Monohidratlı Dolomatik   | Dihidratlı Dolomatik                     |
| Kimyasal bileşim               | Ca(OH) <sub>2</sub> | Ca(OH) <sub>2</sub> +MgO | Ca(OH) <sub>2</sub> +Mg(OH) <sub>2</sub> |
| Yoğunluk                       | 2.3-2.4             | 2.7-2.9                  | 2.4-2.6                                  |

**Tablo 2.5.** TS 32 'ye göre söndürülmüş ve torbalanmış toz kirecin kimyasal analizi (% olarak).

| Kızdırma Kaybı | SiO <sub>2</sub> | R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | Aktif Kireç |
|----------------|------------------|-------------------------------|-------|------|-----------------|-------------|
| 30.30          | 0.61             | 0.45                          | 67.76 | 0.35 | 0.43            | 35.71       |
| 23.66          | 2.49             | 0.42                          | 67.93 | 0.38 | 0.25            | 49.63       |

## 2.2. Yol Üstyapısı

Yol üstyapısı; alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşur. Karayolu yapısına ait bir enkesit Şekil-2.1.'de verilmiştir (Ilıcalı, 1988).



- |                                                       |                                 |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Dolgu şevi                                         | 11. Yolun enine eğimi           |
| 2. Tabii zemin                                        | 12. Taban yüzeyi                |
| 3. Seçme malzeme tabakası<br>(gerekli olduğu durumda) | (tesviye yüzeyi)                |
| 4. Banket kaplaması                                   | 13. Yol gövdesi                 |
| 5. Alttemel                                           | (taban zemini)                  |
| 6. Temel tabakası                                     | 14. Üstyapı proje kalınlığı     |
| 7. Kaplama tabakası                                   | 15. Banket eğimi                |
| 8. Hendek şevi                                        | 16. Trafik şeritleri genişliği  |
| 9. Yarma şevi                                         | 17. Banket genişliği            |
| 10. Banket temeli                                     | 18. Yol genişliği               |
|                                                       | 19. Üstyapı taban genişliği     |
|                                                       | 20. Taban yüzeyinin enine eğimi |

Şekil 2.1. Karayolu enkesiti.

### 2.2.1. Alttemel tabakası

Alttemel, trafik yüklerinin taban zemini üzerine yayılmasını sağlamak, ince daneli alt yapıların temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek ve ayrıca su ve don tesirlerine karşı tampon bölge görevi yapmak üzere; belirli bir granülometride hazırlanan agreganın su ile karıştırılarak tesviye yüzeyine serilmesi ile oluşturulan tabakadır (İlıcılı, 1988).

Alttemel yapımında kullanılacak kum, çakıl, kırmataş ve benzeri malzemede tayin edilecek olan granülometri değerleri Tablo-2.6 'da verilen limitlere uygun olmalıdır. Malzemenin 0.075 mm eleği geçen kısmı, 0.425 mm eleği geçen kısmının 2/3 'ünden fazla olmamalıdır.

Alttemel malzemesi, tesviyesi tamamlanmış taban üzerine, sıkışmış kalınlığı 20 cm 'yi geçmeyecek şekilde tabakalar halinde serilip sıkıştırılır. Ancak, sıkıştırma makinalarının kapasitelerinin büyük olması halinde tabaka kalınlığı 30 cm'ye kadar artırılabilir. Alttemel kalınlığının bu değerlerden fazla olması durumunda, birden fazla tabaka yapma durumu hasıl olur ki, bu durumda tabaka kalınlıkları eşit alınır. Her tabaka, üzerine yenisi serilmeden istenen yoğunluğa getirecek şekilde sıkıştırılmalıdır. Alttemel malzemesinin serilmesi ve tesviye edilmesi esnasında, bulunan optimum su içeriği  $\pm 2$  tolerans limitleri dahilinde uygulanır.

**Tablo 2.6.** Alttemel tabakası granülometri limitleri.

| Elek Açıklığı |        | Elekten Geçen |
|---------------|--------|---------------|
| mm            | inç    | %             |
| 75            | 3      | 100           |
| 37.5          | 1 1/2  | 85-100        |
| 9.5           | 3/8    | 45-100        |
| 4.75          | No:4   | 25-85         |
| 0.425         | No:40  | 7-40          |
| 0.075         | No:200 | 0-12          |

### 2.2.2. Temel tabakası

Temel tabakası, alttemel tabakası üzerine ve kaplama tabakasından önce yerleştirilen malzemedir. Temel tabakasının başlıca görevi, kaplama tabakasına destek olarak üstyapının yük taşıma kabiliyetini artırmaktır. Trafik yüklerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilmeli ve yüksek nem oranında stabil kalabilmeli, ayrıca drenaja yardımcı olmalı ve don etkisine karşı da ek bir koruma sağlayabilmelidir (İllicalı, 1988).

Yollar Fenni Şartnamesi'ne göre, temel tabakasında kullanılacak olan agregalarda likit limit maksimum 25, plastisite indeksi maksimum 6 olmalıdır. Temel ta-

bakası; çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf veya kırmataş ile ince malzeme kullanılarak Tablo-2.7 'de verilen sınır şartlarına uymak şartıyla hazırlanan malzemenin, serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır. Ayrıca bitümlü temel tabakası da yapılmaktadır.

Yollar Fenni Şartnamesi'ne göre, alttemel yüzeyinde gevşek kısımlar varsa onarılmalı, serbest malzeme, çukurlar, kabarmalar bulunmamalıdır. Serme işi, homojen ve üniform miktar ve kalınlıklarda sermeyi sağlayabilecek düzeneğe sahip araçlarla yapılmalı ve bir defada serilip sıkıştırılan tabakanın sıkışmış kalınlığı 20 cm 'yi geçmemelidir. Sermeye, malzemenin alındığı yere en uzak noktadan

**Tablo 2.7.** Temel tabakası granülometri limitleri.

| Elekler |        | % Geçen |        |        |        |
|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| mm      | inç    | A       | B      | C      | D      |
| 50      | 2      | 100     | 100    | -      | -      |
| 37.5    | 1 1/2  | 80-100  | 85-100 | -      | -      |
| 25      | 1      | 60-90   | 70-95  | 100    | 100    |
| 19      | 3/4    | -       | -      | 75-100 | 80-100 |
| 9.5     | 3/8    | 30-70   | 40-75  | 50-85  | 60-100 |
| 4.75    | No:4   | 25-55   | 30-60  | 35-65  | 50-85  |
| 2.00    | No:10  | 15-40   | 20-45  | 25-50  | 40-70  |
| 0.425   | No:40  | 8-20    | 10-25  | 12-30  | 20-45  |
| 0.075   | No:200 | 2-8     | 0-12   | 0-12   | 0-12   |

başlanır, malzemenin alındığı yere doğru devam edilir. Serme işi, sıkıştırma işinden en çok 200 m ileride olmalı, her iş günü sonunda serilmiş bütün malzeme sıkıştırılmış olmalıdır.

Granüler temel tabakası projede belirtilen kalınlığın fazlalığı nedeni ile birden fazla tabakalar halinde serildiğinde, tabaka kalınlıkları birbirlerine eşit olarak alınmalı ve her tabaka, üzerine yenisi serilmeden önce istenen birim ağırlığa kadar sıkıştırılmış olmalıdır. Malzeme yayıldıktan sonra bütün kesit genişliğince greyderle tesviyesi yapılmalı ve bu sırada malzeme gradasyonunun bozulmamasına dikkat edilmelidir. Sıkıştırma, yolun eksenine paralel olarak ve kenarlardan başlayarak merkeze doğru kaymalıdır. Her geçişte, bir önceki geçişte sıkıştırılan kısma, silindir genişliğinin %10 'u kadar bindirme yapılmalıdır. Şeritlerin tümünde ilk geçiş tamamlanmadan ikinci geçiş yapılmamalıdır. Sıkıştırma sırasında görülen segregasyona uğramış kesimlerde temel malzemesi kaldırılarak, yerine uygun temel malzemesi konulmalıdır.

### **2.2.3. Kaplama tabakası**

Kaplama tabakası, üstyapının trafik yüklerine doğrudan doğruya maruz kalan en üst tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme

gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle, diğer tabakalara nazaran daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olmalıdır. Kaplama tabakası, suya karşı geçirimsizlik sağlayarak yolu bozulmalardan korur. Ayrıca, yazın toz ve kışın çamur gibi konfor bozucu etkileri önler. Düzgün yuvarlanma yüzeyi ile de konforun artmasını sağlar (İlıcılı, 1988).

### 2.3. Uçucu Küller

Yaklaşık 2000 yıldan beri söndürülmüş kireç ile birleştirilerek hidrolik bağlayıcı olarak kullanılan ve adını ilk olarak kullanıldığı İtalya 'da Vezüv yanardağı eteklerindeki Puzzouli kasabasından "puzzolan" olarak alan volkanik küller, kimyasal bileşenleri itibariyle, uçucu küllere çok benzemektedirler. Volkanik küller, tüfler, ponza taşları ve traslar doğal puzzolanlar sınıfına girerler. Uçucu küller, pişirilmiş küller, granüle yüksek fırın cürufları ve silikon metallerin üretiminde yan ürün olarak elde edilen yoğunlaştırılmış silis dumanı da yapay puzzolanlar sınıfında yer almaktadırlar (Erdoğan, 1993).

Eski Romalılar, volkanik küllerin veya öğütülmüş tuğla ve kiremitlerin söndürülmüş kireç ile birleştirilmesiyle elde edilen bağlayıcı malzemeleri,

irili ufaklı çok sayıdaki yapılarda kullanmışlardır (Erdoğan ve Parla, 1993).

Uçucu küllerin puzzolanik özellikleri, 1930'lu yılların başlarında ABD 'de farkedilmiş ve takibeden yıllarda bu malzeme, özellikle kütle beton elde edilmesinde kullanılmıştır. Puzzolanik bir malzeme olan uçucu küller, bağlayıcılık özellik kazanabilmek için, gerekli olan kalsiyum hidroksiti beton içerisindeki portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda açığa çıkan üründen bulabilmekte ve yeni kalsiyum-silikat-hidrat jellerinin oluşmasına neden olabilmektedir.

### **2.3.1. Uçucu küllerin tanımı ve sınıflandırılması**

Uçucu kül; toz halinde veya öğütülmüş taş kömürü ile yakıldığı zaman standartda belirtilen bileşimde kül bırakan yüksek özelliklerde linyit kömürlerinin, kazanlarda yanması sonucunda meydana gelen ve baca gazları ile sürüklenen, çok ince silis ve alümino-silisli bir yanma kalıntısıdır (TS 639, 1975). Uçucu küller camsal, içi boşluklu veya dolu kürevi tanecikler ile süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden meydana gelir.

Termik santralin tipine göre 1100-1600°C sıcaklıkta yakılan kömürlerin %10-20 'si kazan altına düşerek su ile uzaklaştırılır. Buna kazan altı cürufu

denir. Bunların tane çapları 20 mikron-3 mm arasındadır. Geri kalan daha ince partiküller baca çekimi ile taşınarak siklon veya elektrofiltrelerde toplanırlar. Bu uçucu küller, baca gazları ile sürüklenir ve hava ile temas ederek ani soğuma ile puzzolanik özellik kazanırlar. Puzzolan; içerisinde silisli ve alüminli bileşikler bulunan tek başına bağlayıcı olmayan ancak su ve kireçle birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir. Uçucu kül, bir suni puzzolandır (Bayazıt, 1980).

Genel olarak yanma odasından çıkan baca gazı, önce siklonlardan daha sonra da elektrofiltrelerden geçer. Nisbeten iri taneli olan uçucu küller siklonlarda, daha ince ve hafif olanları ise elektrofiltrelerde tutulur. Elektrofiltreler, kl taneciklerinin yüksek voltajlı iyonizasyon alanından geçirilerek statik elektrikle yüklenmesi ve elektrodlar üzerinde toplanması prensibine dayanır. Elektrod yüzeylerinde toplanan kl, bunkerlere ve oradan da pnömatik olarak kül atma tesisine taşınır.

Elektrofiltrelerde külün yakalanmasında en önemli faktör külün direncidir. Klde fazla yanmamış madde olursa direnç düşer, düşük dirençli küller elektrod yüzeylerinde yüklerini kolayca boşaltırırlar ve tekrar gaza karışarak sürüklenirler. Yüksek kükürtlü kömür küllerinde ise direnç çok artar ve toplam yüzeyleri yalıtkan bir tabaka ile örtülür. Randıman düşer. Külün direncinin kontrol edilmesi amacı ile baca gazlarına su, amonyak gibi enjeksiyonlar yapılabilir. Külün %85-99 'u elektrofiltrelerde tutulur (Tuğal, 1989).

Bir termik santraldan 3 çeşit artık madde elde edilmektedir:

-Baca gazları ile taşınmayan yanarak tabana düşen küle taban külü denir.

-Siklon tipi ocaklarda yanan kömür külünün ergime ve suda soğutularak uzaklaştırılması ile elde edilen küle cüruf denir.

-Baca gazları ile taşınan mekanik veya elektostatik toz tutucularda tutulan çok ince küllere de uçucu kül denir.

Zemin-çimento stabilizasyonunda en geniş kullanım alanı bulan puzzolan uçucu küldür. %80'i No:325 eleğinden geçen uçucu küller, iyi kalitede sayılır (Woods, 1960).

Birçok ülke standartları uçucu küller hakkında kesin bir sınıflandırma yapmamakla birlikte C618 sayılı ASTM (American Society for Testing Materials) standardına göre, uçucu küller kimyasal kompozisyonları ve üretildikleri kömür cinsi gözönünde tutularak iki genel sınıfa ayrılmaktadır.  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \leq \%70$  olduğu takdirde "F" sınıfı ve  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$  olduğu takdirde ise "C" sınıfı olarak kabul edilmektedirler. F sınıfı uçucu küller taşkömürü gibi bitümlü kömürlerden, C sınıfı uçucu küller linyitli veya bitüm miktarı düşük kömürlerden elde edilmektedirler. C618 sayılı ASTM standardına göre, bazı C sınıfı uçucu küllerde %10 'dan daha fazla kireç bulunabilmektedir (Erdoğan ve Parla, 1993).

Genel olarak, içerisinde %10 'dan daha fazla CaO bulunan uçucu küller "yüksek kireçli uçucu küller" ve

%10 'dan daha az CaO bulunanlar ise "düşük kireçli uçucu küller" olarak tanınmaktadırlar. Betonda kullanılan uçucu küller, daha çok, düşük kireçlidir. Son yıllara kadar yüksek kireçli uçucu küller kullanılmamıştır. Öte yandan, düşük kireçli uçucu küller sadece puzzolanik özelliğe sahip iken yüksek kireçli uçucu küllerin hem puzzolanik özelliğe sahip oldukları ve hem de içerisindeki kireç miktarı nedeniyle bir miktar hidrolik bağlayıcılık özelliğe sahip oldukları görülmüştür. Bu durum yüksek kireçli uçucu küllerin betonda kullanımı hususunda yeni bir değerlendirme yapılmasını gerektirmektedir. Örnek olarak, Tunçbilek Termik Santrali uçucu külü düşük kireçli, Afşin-Elbistan ve Soma-B Termik Santralleri uçucu külleri ise yüksek kireçli uçucu kül sınıfına girmektedirler.

Uçucu küller, kimyasal yapılarına göre üçe ayrılırlar (Bayazıt, 1980):

a) Siliko Alüminöz uçucu küller: Bunlar taş kömürü uçucu külleridir. Bu uçucu küller normal sıcaklıklarda kireci bağlama özelliğine sahiptirler, Yani hidrolik bir bağlayıcı gibi sulu ortamda priz yaparlar. Bu tip uçucu küller çok ince taneli ve yapılarının camsı oluşu, çok miktarda silis ve alümin içermeleri dolayısıyla diğer hidrolik bağlayıcılar gibi özellik gösterirler.

b) Sülfö-Kalsik uçucu küller: Bu tip uçucu küller genellikle linyit kömürlerinden elde edilir ve bazı hallerde bağlayıcı olmadan da kendi kendilerine priz alırlar.

c) Tiplendirilmeyen ve yapısı muntazam olmayan uçucu küller: Bunlar elde edildikleri kömürün ve yanma sisteminin homojen olmadığı hallerde elde edilen uçucu küllerdir.

Uçucu külleri, elde edildikleri kömürün tipine göre de genel olarak ikiye ayırmak mümkündür (Bayazıt, 1980):

a) Linyit uçucu külü: Uçucu maddesi fazla ve genel olarak esmerdir. Bu uçucu küllerin kullanılma imkanları tamamen fiziksel ve kimyasal yapılarına bağlıdır. Etkili fiziksel özellikleri, su absorpsiyonu, görünen yoğunluk, spesifik yüzey olarak tanımlanabilir. Spesifik yüzey ve granülometri kömürün ezilme durumuna göre her ülkede ve santralda farklıdır.

b) Taş kömürü uçucu külü: Taş kömürü uçucu külü genel olarak 3-100 mikron incelikte ve 200 nolu elekte %16-20 kalacak şekilde elde edilir. Bunlar tamamen kuru olarak elde edilirler.

Kimyasal yapı bakımından uçucu külün curuf, kil ve çimento ile karşılaştırılması, Tablo-2.8 'de gösterilmiştir. Uçucu kül temel olarak silis, alüminyum ve demirin oksitlerinden oluşur. Bu üç elementin oksitlerinin toplamı genellikle toplam maddenin %70-95 'i arasında değişir.

**Tablo 2.8.** Kimyasal yapı bakımından uçucu külün curuf, kil ve çimento ile karşılaştırılması (Bayazıt, 1980).

|                                | Siliko<br>alüminöz<br>uçucu<br>külü<br>(%) | Sülfo<br>kalsik<br>uçucu<br>külü<br>(%) | Yüksek<br>fırın<br>curufu<br>(%) | Kil<br>(%) | Çimento<br>(%) |
|--------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|------------|----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 50                                         | 18                                      | 29                               | 50         | 22             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 30                                         | 12                                      | 14                               | 17         | 6              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7                                          | 7                                       | -                                | 8          | 3              |
| CaO                            | 2.5                                        | 45                                      | 45                               | 5          | 65             |
| Serbest CaO                    | 0.1                                        | 22                                      | -                                | -          | -              |
| MgO                            | 1.8                                        | 1.8                                     | -                                | 7          | -              |
| SO <sub>3</sub>                | 0.5                                        | 6                                       | -                                | 0.4        | -              |
| K <sub>2</sub> O               | 5                                          | 6                                       | -                                | 0.4        | 1              |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.8                                        | 8.2                                     | -                                | 1.4        | -              |
| TiO <sub>2</sub>               | 1                                          | -                                       | -                                | -          | -              |
| Kızdırma<br>kaybı              | 2.0                                        | 1.2                                     | -                                | 11         | -              |

### 2.3.2. Uçucu külün fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları

Uçucu külün özellikleri; yakılan kömüre, yakma ve külü toplama metodu gibi faktörlere bağlı olarak her termik santral için hatta aynı santral için bile

farklılıklar gösterir. Ancak, genel olarak uçucu kül, çimentodan daha koyu renkte, çok ufak taneli, elle dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir. Mikroskopla bakıldığında çeşitli şekil ve büyüklükte, çeşitli biçimlerde genellikle kürevi, şeffaf, bazen açık renkli, bir kısmı siyah, çok az esmer kırmızı renkte taneciklerden meydana gelen bir yapı gösterir. Renginin koyuluğu açıklığı elde edildiği kömüre ve yanma özelliğine bağlıdır. Linyit kömüründen elde edilen uçucu küller daha esmerdir. Tane çapları 1-150 mikron arasındadır.

Uçucu külün tane şekli bilhassa boyut bakımından birbirinden çok farklıdır. Büyük bir kısmı küre şeklinde olup, daha az bir kısmı ise iğne şekillidir. Uçucu kül, hafif ve ağır küre taneciklerinden ibaret olmakla beraber genellikle büyük parçaların içinde boşluklar vardır. Uçucu kül içindeki boşluk oranı, iri uçucu küllerde %20 'ye çıkmaktadır. Özgül ağırlık 2.1-2.4 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir (Bayazıt, 1980).

Uçucu külün inceliği SiO<sub>2</sub> miktarı ile birlikte puzzolanik aktivite özelliğine etkiyen en önemli faktördür. Bu özellik ayrıca harcın işlenebilmesine de etkir. İnceliğin tayini için, genel olarak uygulanan iki metodda da ya elek analizi ya da hava permeabilitesi aleti ile bulunan spesifik yüzey belirlenir. Bugün birçok araştırmacılar ikinci metodu kullanmaktadırlar. Çünkü, bu metod hem basit hem de en küçük tane ebadını tahmine yaramaktadır.

Türkiye 'deki bazı termik santrallardan elde edilen uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları Tablo-2.9 'da verilmiştir.

**Tablo 2.9.**Türkiye 'deki bazı termik santrallardan elde edilen uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları (Tokyay, 1993).

| UÇUCU KÜL                      |                |           |            |       |           |         |                 |                          |     |
|--------------------------------|----------------|-----------|------------|-------|-----------|---------|-----------------|--------------------------|-----|
| Oksit (%)                      | Afşin-Elbistan | Çatalağzı | Seyit-ömer | SomaB | Tunçbilek | Yatağan | TS639 Sınırları | ASTMC618 Sınırlar<br>F C |     |
| SiO <sub>2</sub>               | 27.4           | 56.8      | 40.6       | 39.8  | 56.4      | 51.2    | -               | -                        | -   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.8           | 24.1      | 9.1        | 22.3  | 23.0      | 22.9    | -               | -                        | -   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.5            | 6.8       | 7.7        | 4.4   | 10.1      | 7.8     | -               | -                        | -   |
| S+A+F                          | 45.7           | 87.7      | 57.4       | 66.5  | 89.5      | 81.9    | >70             | >70                      | >50 |
| CaO                            | 47.0           | 1.4       | 19.9       | 25.4  | 2.1       | 13.0    | -               | -                        | -   |
| MgO                            | 2.5            | 2.4       | 8.1        | 1.9   | 3.3       | 2.8     | <5              | <5                       | <5  |
| SO <sub>3</sub>                | 6.2            | 2.9       | 10.6       | 4.8   | 0.4       | 0.3     | <5              | <5                       | <5  |
| Alkali                         | 0.3            | 3.0       | 1.4        | 0.4   | 0.9       | 2.9     | -               | <15                      | <15 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.7            | 1.1       | 0.7        | 0.6   | 1.1       | 0.9     | -               | -                        | -   |
| Kızdırma Kaybı                 | 2.4            | 0.6       | 1.4        | 0.4   | 1.1       | 0.4     | <10             | 12                       | <6  |

### 2.3.3. Uçucu külün puzzolanik özelliği

Siliko alüminöz bir uçucu kül, kireç ile sulu ortamda reaksiyona girer. Buna puzzolanik özellik denir. Belirli oranlarda birleşen kireç+uçucu kül+su belirli bir süre sonra su altında dayanım kazanır. Ancak, uçucu külün kireç olmadan bağlayıcı özelliğinin olmayacağı da bilinmelidir. Çok nadir olarak bazı siliko-alüminöz uçucu küller su ile sertleşebilirlerse de genel olarak su ile priz yapmazlar.

Puzzolanik özellik çok yavaş ortaya çıkar. Oda sıcaklığında uçucu kül+kireç+kum karışımı ancak 2-3 günde belirli bir mekanik dayanıma erişir. Fakat aynı şartlar altında bekleyen kireç+kum karışımı sıfır dayanım gösterir.

Uçucu külle ise belli dayanım için belli sürelerde beklemek gerekir. Uçucu külün inceliği ve sıcaklığı, reaksiyon hızına pozitif yönde etkir. Aynı şekilde beton yapılırken kullanılan çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül katıldığında, ileriki günlerde sadece çimento ile yapılan betonlara nazaran daha yüksek mukavemetler elde edildiği bilinmekte ve bundan ise bilhassa hidrolik yapılarda faydalanılmaktadır (Bayazıt, 1980).

Uçucu külü kullanmadan önce fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanısıra puzzolanik özelliğini tesbit etmek üzere puzzolanik aktivite deneyi TS639 'a uygun olarak yapılmalıdır. Bu aktivite çimento ve uçucu külle harç dökülerek tayin edilir. Bir uçucu külün

puzzolanik özelliğinin var sayılması için uçucu küllü karışımın yalnız çimento ile yapılan karışımın verdiği dayanımın en az %70 'ini vermesi gerekmektedir (TS639, 1975).

#### 2.3.4. Uçucu külün betona etkileri

Yakılan kömürün cinsi, uçucu külün inceliği gibi uçucu külün kalitesine etki eden birçok faktöre göre her uçucu kül aynı sonucu vermemektedir.

- Bir uçucu kül-çimento karışımında, uçucu kül miktarı arttıkça, karışımın stabilitesi artar, akıcılığı azalır. Şerbet prizini aldıktan sonra ise, 90 günde mukavemetini daha çok arttırır, rötreyi azaltır, korozif sulara karşı dayanıklılığını arttırır ve permeabiliteyi azaltır (Şentürk ve Sayman, 1972).

- Uçucu külün permeabilite yönünden de pozitif etkileri görülmüştür. Davis, altı aylık betonlarda betonun permeabilite katsayısını karşılaştırmış, netice olarak %30 oranında uçucu kül kullanıldığında uçucu külsüzlere göre permeabilite katsayısının 1/5 'i olduğunu, eğer bu kullanılan uçucu kül %50 oranını bulursa katsayısının 1/12 olduğunu tesbit etmiştir.

- Uygun oranda iyi kaliteli bir uçucu kül kullanımı işlenebilmeyi arttırmakta, yerleşme anında suyun azalmasına sebep olarak su-çimento oranı

azaldığı için ileriki günlerde mukavemetin artmasına pozitif yönde etkili olmaktadır (Bayazıt, 1980).

- Beton harcında, uçucu külün çimentoya katkı maddesi olarak katılması halinde beton özelliklerinde görülen bellibaşlı etkiler aşağıda açıklanmıştır (Bayazıt, 1980):

- Çimentodan tasarruf sağlanır.

- İşlenebilirlik ve kıvam artar.

- Dayanım kazanma süresini uzatır. İleri yaşlardaki betonun dayanımını arttırır. Eşit dayanıma uçucu kül cinsine göre 1-6 ay içinde erişilir ve bundan sonra uçucu küllü betonların dayanımı katkısız betonları geçer (Bayazıt, 1980).

- Yoğunlukta bir miktar azalma olur. Fakat iyi sıkıştırılmış betonlarda bu azalma farkedilmeyecek boyuttadır.

- Uçucu küllü betonların hidratasyon ısısının düşük ve beton ısı yükselmesinin az olması nedeniyle termal rötire normal betona göre çok azdır. Özellikle kütle betonlarında uçucu külün kullanılması faydalıdır.

- Taze betonun kalıp içine yerleşmesinden kısa bir süre sonra daha ağır olan beton bileşenlerinin çökmesi nedeniyle beton yüzeyinde bir su tabakası toplanır. Uçucu kül ise; betonun görünüş, homojenlik, dayanım ve dayanıklılığı için zararlı olan bu kuma olayını azaltmaktadır.

- Uçucu kül betonda kusmayı azalttığı ve taneler arasındaki yapışma kuvvetini artırdığı için ayrışmayı da azaltır.

- Uçucu külün kullanılmasıyla betonda hidratasyon ısısı azalmakta, bundan dolayı da kılcal çatlak oluşma ihtimali uçucu külsüzlere göre çok az olmaktadır.

### **2.3.5. Termik santrallar**

Elektrik enerjisi elde edebilmek amacıyla kullanılan iki önemli üretim kaynağından birisi hidroelektrik enerjisi sağlayan barajlar, diğeri genellikle yakıt olarak pülverize kömürün kullanıldığı termik santrallardır. Türkiye'deki toplam elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık olarak yarısı, hatta yarıdan biraz daha fazlası, termik santrallardan sağlanmaktadır (Erdoğan, 1993).

Yetmişli yıllarda birkaç kez yaşanan ve zaman zaman ortaya çıkan enerji krizleri, gelişen endüstrinin giderek artan elektrik ihtiyacı, Türkiye 'de yeni santralların yapılması gereğini ortaya çıkarmıştır. Bilindiği gibi, hidroelektrik potansiyel yönünden, ülkemiz Norveç'in ardından, Avrupa'da ikinci sırada bulunmasına rağmen, bu potansiyelimizin ancak küçük bir kısmını değerlendirebilmekteyiz. Hidroelektrik santralların, yapımı uzun süre alan ve çok büyük mali kaynaklara gerek duyulan yatırımlarla gerçekleştirilmesine karşılık, termik santrallar çok daha kısa sürede inşaa edilebilmektedir (Özbayoğlu, 1993).

Ülkemizde yaygın linyit yatakları bulunmaktadır. Linyitin Türkiye'nin enerji üretimindeki payı 1975 'de %9.5 iken, 1985 'de %19.1 'e çıkmıştır. Linyit rezervinin yarısına yakın bölümü (%48) K.Maraş-Elbistan yöresinde bulunmakta ve kalitesi düşük olup, kül oranı da yüksektir. Son yıllarda yapılan termik santrallerle bu düşük kaliteli kömürlerin değerlendirilmesine çalışılmaktadır (Tuğal, 1989).

Türkiye 'deki bütün termik santrallerde yıllık toplam kömür tüketimi 55 milyon ton civarında olup, elde edilen kül miktarı 13.5 milyon ton kadardır (Tokyay, 1993).

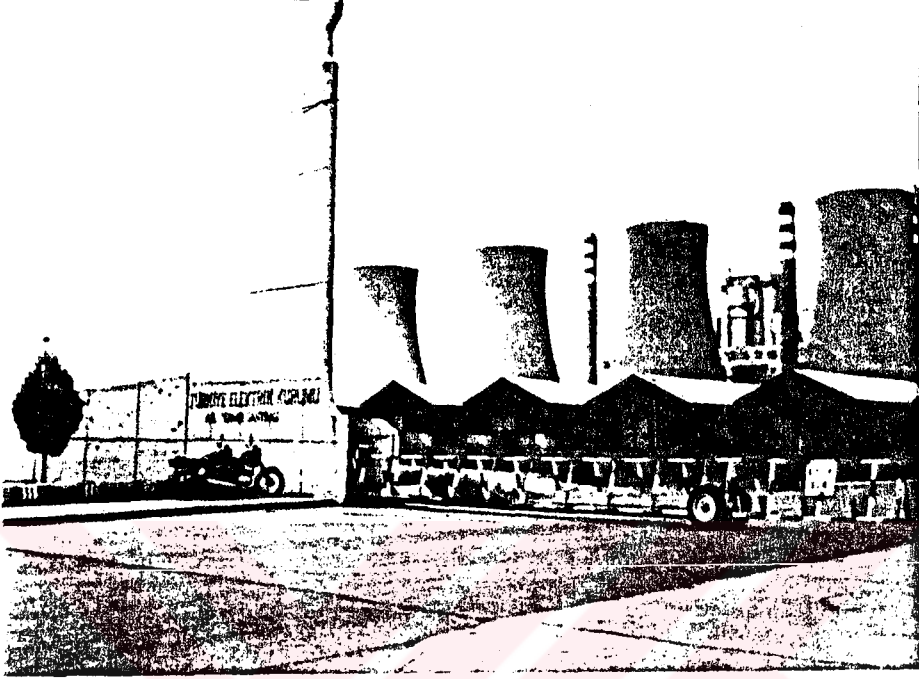
Termik santrallerde enerji üretiminde yakıt olarak kullanılan pülverize kömür artık olarak değişik özellikte küllerin ve cürufun ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Modern termik santrallerde en önemli artık malzeme, yanma nedeniyle baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen çok ince kül tanecikleridir. Bu ince kül tanecikleri elektrofiltrelerde ve siklonlarda yakalanmakta, baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir. Artık malzeme olarak elde edilen küllerin yaklaşık %75-80 'ini uçucu kül oluşturmaktadır. Günümüzde, enerji açığının kısa sürede karşılanması amacıyla yapılan yeni termik santraller çevreyi kirleten uçucu kül sorununu da beraberinde getirmiştir. Bu küller değişik ortamları kirletme potansiyeline sahiptir. Ekonomi ve çevre kirliliği açısından değerlendirilmesi önem arzeden bu ürün birçok araştırmaya konu olmaktadır.

### 2.3.5.1. Afşin-Elbistan Termik Santrali ve Uçucu Külü

Kahramanmaraş ilinin Afşin ve Elbistan ilçeleri sınırları içinde 120 km<sup>2</sup> 'lik bir alanda elde edilen linyit kömürü yakılmaktadır. Halen işletme faaliyetleri devam etmekte olan havzanın Kışlaköy açık işletmesi, Afşin ilçe merkezine 15 km. ve Elbistan ilçe merkezine ise 26 km. mesafede bulunmaktadır.

Kışlaköy işletmesinde tesis edilmekte olan 4 x 344 MW gücündeki termik santral için 18.6 milyon ton/yıl ve çevre illerin yakıt ihtiyacı için 1.4 milyon ton/yıl olmak üzere 20 milyon ton/yıl linyit üretimi öngörülmüştür. Yılda 4 milyon ton civarında uçucu kül üretmektedir. Afşin-Elbistan termik santrali, havzanın düşük kaliteli linyit rezervini değerlendirerek, elektrik enerjisi üretmek amacıyla kurulmuştur. Yıllık üretim kapasitesi 8.1 milyar kwh 'dır (Tuğal, 1989).

Linyit rezervi, günümüzde mevcut maden üretim teknolojisine göre 1.7 milyar tonu ekonomik olarak işletilebilir nitelikte olmak üzere 3.4 milyar ton olup, Türkiye 'nin en büyük linyit rezervidir. Kömürün kül ve rutubet yüzdesinin yüksek ve ısı değerinin düşük olmasına rağmen rezervin topluca bulunması ve yüksek üretimli bir işletmeye imkan vermesi büyük termik santraller kurulmasını mümkün kılmaktadır. Afşin-Elbistan termik santrali bu santrallerden ilkidir.



**Resim 2.1.** Afşin-Elbistan Termik Santrali.

Linyit, bantlar vasıtasıyla 1 milyon ton kapasiteli stok sahasına gönderilmektedir. Stok sahası santralin 15 günlük ihtiyacını karşılayabilmektedir. Değişik ısı değerindeki tabakalardan alınmış olan linyit burada harmanlanmakta ve 1050 kcal/kg 'lık ortalama değerdeki linyit bantlarla santrale verilmektedir. Santralin yakıt ihtiyacı saatte 3000 tondur.

Açık işletmeden alınan linyit kömürü 4900 t/h kapasiteli iki adet konveyör vasıtasıyla ana kömür bunkerine depolanır. Bunlar 6 vibrasyonlu 4 adet

çıkarıcılar vasıtasıyla kırıcılara gelen kömür 0-60 mm ebatlara kadar kırılır. Bu arada içerisinde bulunan taş, tahta v.s. gibi yabancı maddeler ayrılır.

Yine kömür içerisinde karışmış olabilecek metal malzemeler magnetik separatörler vasıtasıyla ayrılır. Buraya kadar olan kısım kömür kırma binasında olan işlemlerdir. Kömür kırma binasında ayrıca kömürün karakteristiklerini tesbit etmeye yarayan numune alma sistemi de mevcuttur. Alınan numuneler laboratuvarında incelenerek kömürün nemi, CaO, kalori ve kül oranı tesbit edilir.

Kömür kırma işleminden sonra, yine kömür 4000 t/h kaba sistemli iki konveyör vasıtasıyla ünitelerin bunkerlerine gönderilir. 4 ünite mevcut olması nedeniyle her üniteye herbiri 495 m<sup>3</sup> kapasiteli 6 adet bunker mevcuttur. Bunker altındaki blendomat ismi ile tabir edilen kollu çıkarıcılar vasıtasıyla kömür çıkarılır. Konveyörlere yüklenerak kömürü öğütmede kullanılan değirmenlere gelir. Burada 0-2 mm ebatlara kadar öğütülür. Öğütme esnasında kömür aynı zamanda içerisindeki nemi ayrıştırmak için kurutulur. Değirmen çıkışındaki fan vasıtasıyla ana kömür yakıcıları ve brüden sistemlerine gelir. Burada kömür tozları elektrostatik olarak tutulur. Buhar kısmı ise fan vasıtasıyla atmosfere atılır.

Brüden bunkerlerinde toplanan kömür, çıkarıcılar ve bir hat vasıtasıyla kazana gönderilir. Kömürün içindeki nemin alınmasıyla kalorisi de zenginleştirilmiş olur. Kazanda kömürün yanması için gerekli olan hava, hava fanları ile sağlanır. Kazanda kömür

yakılmaya başlamadan önce kazan sıvı yakıtla ateşlenir.

Kazanda yanan kömürün curuf kısmı kazan altı ızgaralarda toplanır. Hareketli ızgaralardan içi su dolu curuf teknesine dökülür. Paletli tip curuf çıkarıcılarıyla alınan curuf konveyörler ile bunkerlere gönderilir. Kömürün yanması sonucu açığa çıkan uçucu kül partikülleri ise baca gazı ile birlikte elektrofiltrelere gelir. Yine burada Bruden sisteminde olduğu gibi kül elektrostatik olarak tutulur. Baca gazı çekme fanlarıyla bacadan atmosfere atılır. Elektrofiltrede tutulan küller, kül bunkerlerinde toplanır. Burada kül çıkarıcıları vasıtasıyla ara bunkerde toplanır. Ara bunkerde toplanan küller pnomatik olarak ana kül bunkerinde depolanır. Çıkarıcılar vasıtasıyla kül çıkarılır. Suyu %15-25 oranında nemlendirilir. Nemlendirilen kül ve curuf bunkerinde toplanan curuflar ara konveyörlere yüklenir. Burada 1900 t/h kapasiteli iki adet curuf konveyörü mevcuttur. Bunlarla döküm sahasına sevk edilir.

Santralda yakılan linyitten elde edilen buharın sıcaklığı 535 °C ve basıncı 197.5 kg/cm<sup>2</sup>g olup, her kazanda saatte 1020 ton buhar elde edilmektedir. Bu buharla çalıştırılan buhar türbinine jeneratörlerde enerji üretilmekte, jeneratör çıkışında 21.000 volt olan gerilim transformatörle 380.000 volta yükseltilerek enterkonnekte sisteme verilmektedir.

Külün bacaya giden bölümü elektrostatik tutucularda %99 oranında tutulmakta ve 145 m baca yüksekliği ile meteorolojik ve coğrafi şartların da

etkisi ile çıkan kül çevreye bir zarar vermeyecek mertebeye indirilmektedir (TEK).

### **2.3.6. Uçucu külün üretimi, taşınması ve depolanması**

Türkiye 'de mevcut termik santrallardan oldukça büyük miktarda uçucu kül elde edilmekte olup kurulmakta olanlarla bu değerlerin daha da artacağı açıktır. Türkiye'deki termik santrallardan elde edilen kül miktarları Tablo-2.10 'da gösterilmiştir.

Külün tam süspansiyon halinde taşınması, kompresörlü yüksek basınç sistemleri gerektirir. Pahalı olan bu sistem yerine külün alçak basınçlı hava ile kabartılarak pompalanması geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. Uçucu külün düşük yoğunluğu, depolanmasında güçlükler çıkartır. Depolanan kül sıkışarak topaklanabilir.

Bu nedenle depolarda akmaya yardımcı yöntemler kullanılmalıdır. Boşaltma sistemleri çimento teknolojisindeki gibi olmalıdır. Külün ticari amaçla kullanılabilmesi için kuru olarak elde edilmesi gerekir. Santral yakınında büyük bir tüketim merkezi bulunması halinde kül pnömatik olarak taşınabilir. Uzak tüketim yerlerine kara ve demiryolu ile özel tankerlerle, küçük tüketim bölgelerine ise torbalama yoluyla taşınabilir (Bayazıt, 1980).

**Tablo 2.10.** Türkiye 'de termik santrallerdeki 1980-1995 yılları arası uçucu kül üretim miktarları (1000 ton/yıl), (Bayazıt, 1980), (Tuğal, 1989), (Çevik, 1993) ve (TEAŞ, 1996).

| Santral Adı | Tunç-bilek | Seyit-ömer | Çatal-ağzı | Soma-A Soma-B | Yata-ğan | Çayır-han | Yeniköy | Afşin-Elbistan | Kan-gal | Toplam |
|-------------|------------|------------|------------|---------------|----------|-----------|---------|----------------|---------|--------|
| Yıl         |            |            |            |               |          |           |         |                |         |        |
| 1980        | 300        | 1000       | 250        | 70            | 670      | -         | -       | -              | -       | 2290   |
| 1981        | 700        | 1000       | 200        | 60            | -        | -         | -       | -              | -       | 1960   |
| 1982        | 700        | 1000       | 200        | 60<br>360     | -        | -         | -       | -              | -       | 2320   |
| 1983        | 700        | 1000       | 200        | 60<br>720     | 800      | -         | -       | 875            | -       | 4355   |
| 1984        | 700        | 1000       | 200        | 60<br>720     | 1160     | 252       | -       | 1750           | -       | 5842   |
| 1985        | 700        | 1000       | 200        | 360<br>720    | 1160     | 504       | -       | 3500           | 306     | 8450   |
| 1986        | 700        | 1330       | 432        | 720<br>720    | 1160     | 504       | 1224    | 3500           | 612     | 10902  |
| 1987        | 700        | 1330       | 432        | 720<br>720    | 1160     | 504       | 1224    | 3500           | 612     | 10902  |
| 1989        | 600        | 1420       | 830        | 1400<br>1250  | 1075     | 420       | 1130    | 2430           | 575     | 11130  |
| 1992        | 540        | 1600       | 525        | 1400<br>1250  | 1520     | 438       | 750     | 2620           | 630     | 11273  |
| 1993        | 585        | 1710       | 525        | 3600          | 800      | 272       | 1060    | 1442           | 356     | 10350  |
| 1994        | 696        | 1823       | 603        | 4100          | 751      | 349       | 814     | 2051           | 651     | 11838  |
| 1995        | 481        | 1915       | 512        | 3500          | 951      | 391       | 968     | 2153           | 504     | 11375  |

### 2.3.7. Uçucu külün kullanıldığı yerler

Başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere, endüstrileşmiş ülkelerde taş kömürü veya linyit kömürü yakan termik santrallerin kazan ve bacalarında tutulan uçucu küller, içerdiği puzzolanik özellik nedeniyle inşaat sektöründe ilkin çimento ikame maddesi olarak

1950'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bugün ise, madencilik sektöründen (dolgu işlemleri), inşaat sektörünün değişik alanlarına kadar uzanan çok geniş bir alan içinde önemli endüstriyel ölçeklerde kullanılmaktadır (Arıoğlu ve Manzak, 1992).

Dünyada birçok ülkede yıllık uçucu kül üretiminin %25'den fazlası değerlendirilmektedir. Hatta bu rakamlar bazı ülkeler için %100 değerine bile ulaşmaktadır. Hal böyle iken ve ülkemiz uçucu kül üretiminde dünyada onuncu sırada yer alırken, ülkemizde üretilen uçucu küller değerlendirilmemektedir. 1960 ve 1970 'li yıllarda bile ülkemizdeki bilim adamları tarafından uçucu kül konusunda çok değerli çalışmalar yapılmasına rağmen, uygulama birkaç yerde yapılabilmiş ve sonradan neredeyse tamamen durmuştur. Bazı ülkelerdeki uçucu kül üretim ve kullanımı Tablo-2.11 'de gösterilmiştir (Baykal vd., 1993).

Aşağıda açıklanacağı gibi uçucu külün dünyada çok geniş bir kullanım alanı vardır. Günden güne de bu alan büyümektedir. Pratik önemi olan bazı kullanım yerleri şunlardır:

- Çimento ve betonda katkı maddesi olarak,
- Boşluklu beton üretiminde,
- Tuğla üretiminde,
- Boşluk doldurma-enjeksiyon işlerinde,
- Hafif agregâ üretiminde,
- Gazbeton üretiminde,
- Rolkrit üretiminde kullanılmaktadır.

**Tablo 2.11.** Uçucu kül üretim ve kullanımı  
(1000 ton/yıl).

| ÜLKE       | Uçucu Kül | Bacaaltı Külü | Kullanım | Yüzde Kullanım | Yıl  |
|------------|-----------|---------------|----------|----------------|------|
| Hollanda   | 815       | 85            | 900      | 100            | 1991 |
| Hong Kong  | 1012      | 112           | 1124     | 100            | 1989 |
| Danimarka  | 840       | 140           | 880      | 90             | 1990 |
| Almanya    | 7980      | 4330          | 10710    | 87             | 1989 |
| Finlandiya | 434       | 49            | 412      | 85.3           | 1990 |
| Belçika    | 930       | 160           | 795      | 73             | 1990 |
| İtalya     | 1300      | 135           | 900      | 63             | 1988 |
| İsrail     | 370       | 40            | 250      | 61             | 1989 |
| Fransa     | 2200      | 405           | 1300     | 50             | 1987 |
| Japonya    | 3341      | 459           | 1758     | 46.2           | 1991 |
| Britanya   | 13300     | 2200          | 5467     | 35.3           | 1989 |
| ABD        | 48458     | 16766         | 15974    | 24.4           | 1989 |
| SSCB       | 90000     | 35000         | 11500    | 9.2            | 1990 |
| İspanya    | 7391      | 1304          | 1500     | 17.3           | 1989 |
| Türkiye    | 15250     | 1865          | -        | -              | 1991 |

#### 2.3.7.1. Çimento ve beton üretimi

Portland çimentosu üretiminde, uçucu küllerin klinkere katılarak onunla birlikte öğütülmesi halinde, çimento sınıflamasında "Puzzolanik Portland Çimentoları" olarak adlandırılan sınıftan özel tipte

çimentolar elde edilir (TS640, 1975). Bu tip çimento üretiminde, uçucu küller klinkere pülverize halde katıldıklarından klinkerin öğütülmesini kolaylaştırmakta üretim kapasitesini ve rantabiliteyi artırmaktadır. Bu tip imalatta uçucu kül, öğütülme esnasında kimyasal bileşimi yönünden bir değişikliğe uğramamaktadır (Bayazıt, 1980).

Uçucu küller, oldukça homojen olduklarından çimento üretiminde, düzeltici malzeme olarak kullanılmaktadır. Uçucu küller, taşıma masrafı çok olmadığı takdirde ekonomik olmaktadır. Uçucu küller, pülverize halde olduğundan çimento üretiminde bir ön öğütme işlemine lüzum kalmadan doğrudan fırına verilebildikleri için öğütme enerjisinden de tasarruf yapılabilmektedir. Uçucu küller, bu şekilde hammadde olarak kullanıldıklarında elde edilen çimentoya ve klinkere sonradan ayrıca uçucu kül ilave edilmesi de mümkündür. Böylece uçucu küller, çok faydalı ve tasarruf sağlayan bir malzeme olarak görülmektedir (Bayazıt, 1980).

Uçucu külün doğrudan çimentoya katılması, külün klinkere katılmasına eş sonuç vermekte yani bu yöntem ile de "Uçucu Küllü Çimentolar" elde edilmektedir. Bu nedenle sonuç olarak uçucu kül klinkere ilave edilmesi halinde fabrika kapasitesini artırmakta, işletmeyi daha rantabl yapmakta ve özel yapılarda tercihen kullanılan özel bir çimentonun elde edilmesine imkan vermektedir. Portland çimentosuna karıştırılacak olan uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri TS639 (1975)'da verilmiştir. Almanya'da yapılan uygula-

malarda uçucu kül, doğrudan doğruya yaklaşık 1/2 ağırlık oranında çimentoya katılmaktadır (1 ağırlık uçucu kül + 2 ağırlık portland çimentosu), (Kavalalı, 1988).

Düşük kireçli uçucu külün betonda kullanımına dair, büyük bir bilgi birikimi ve tecrübe bulunmaktadır. Son zamanlara kadar betonda yüksek kireçli uçucu kül kullanılmamıştır. Bu küllerin kendiliğinden bağlayıcı özellikleri vardır. Öte yandan, termik santrallarda kullanılan linyit kömüründen elde edilen yüksek kireçli uçucu küller miktar olarak da büyük bir potansiyele sahiptir (Erdoğan ve Parla, 1993).

Beton üretiminde bağlayıcı madde olarak kullanılan portland çimentosunun bir kısmı yerine mineral katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılabilmekte, böylece uçucu kül katkılı beton elde edilebilmektedir. Bazen beton üretiminde kullanılan ince agreganın ince tanelerini oluşturmak üzere de uçucu kül kullanılabilir. Uçucu kül katılarak elde edilen betonların performansı katılan kül tipi ve kül miktarı tarafından etkilenebilmektedir.

#### **2.3.7.2. Boşluklu beton üretimi**

Boşluklu beton, çimento ya da kireç ile uçucu kül karışımından hava ya da daha başka bir gaz geçirilerek

elde edilmektedir. Genellikle istenen büyüklükte hazırlanan boşluklu beton blokları, hafif olduklarından taşımada kolaylık, ucuzluk, binanın hafifliği, inşaat sırasında işçi masrafları bakımından avantajlar sağlamaktadır. Uçucu küllü boşluklu betonlarda mukavemet, kum-kireç-çimento karışımından daha yüksek olmakta, ısı iletkenliği ise daha düşük olmaktadır. Bu nedenle her çeşit iklim şartlarında kullanılabilir.

Yoğunluk normal betonun 1/5 'i ile 1/3 'ü arasında olup amaca uygun olarak değişmektedir. Ateşe dayanıklı olan uçucu küllü boşluklu beton bloklar, uçucu külü ayrıca öğütmek gerekmediği için de daha ucuza üretilmektedir. Bloklar testere ile kesmeye, çivi çakmaya ve vidalamaya da son derece uygundur.

#### **2.3.7.3. Hafif agregâ üretimi**

Hafif betonun inşaatlarda önem kazanması ile birlikte, hafif agregâ ile hafif beton elde etme çalışmaları da önem kazanmıştır. Uçucu kül bu amaçla 1950 'lerin başından beri kullanılmaktadır. Uçucu kül belirli oranda su ile karıştırılarak sinterleştirilmekte ve istenen irilikte, doğal agregaya göre hafif bir malzeme elde edilmektedir. Bu şekilde elde edilen agregalarla yapılan betonlar, doğal agregâ ile yapılan betonlar kadar dayanıklı olmakta, bunun yanı

sıra hafif olması nedeniyle yüksek binalarda işçilik ve temel masraflarını azaltması, ısı ve ses iletkenliğinin düşük ve ateşe dayanıklı olması bakımından bazı önemli üstünlükler sağlamaktadır.

Uçucu külü sinterlemek için, önce su ve gerekiyorsa belli oranda yakıt ile karıştırılır. Karışım, ya doğrudan ya da hızla dönen silindirlerle havaya savrularak topaklaştırıldıktan sonra 1200°C 'de sinterlenir. Bu işlem sayesinde tanecikler birbirlerine yapışarak sert bir malzeme oluştururlar. Taneciklerin ergiyerek yapışması olayına sinterlenme denir. Sinterlendikten sonra, istenilen dane boyutunu elde etmek için karışım öğütülerek elenir. Böylece hafif agrega elde edilir (Çevik, 1993).

#### **2.3.7.4. Dolgu işleri**

Dolgu işlerinde başlıca amaçlar; dolgu yapılan yerde geçirgenliği azaltmak, mekanik özellikleri geliştirmek ve boşlukları doldurmaktır. Bu işler, özellikle baraj göllerinin altında ve çevresinde su kaçaklarına sebep olan çatlakları, boşlukları, çeşitli temel sondajlarında çürük temellerdeki boşlukları ve inşaatlarda hemen her çeşit çatlakları doldurmada önem kazanmaktadır.

Uçucu kül, çimento içerisine %30-50 arasında katılarak sulu süspansiyon halinde istenen yere

enjekte edilir. Puzzolanik özelliği nedeniyle çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan kireçle birleşen uçucu kül, kimyasal etkilere dayanıklı ve geçirimi çok düşük bağlayıcı bir madde meydana getirir. Bu nedenle genel olarak su içinde, özellikle de sülfatlı su içinde bulunan inşaatlardaki dolgu işlerinde büyük avantajlar sağlamaktadır.

Uçucu küller, düşük yoğunlukları sebebiyle, betonda yoğunluk azalmasına sebep olurlar. Taze beton, kalıp içerisine yerleştirildiğinde, küller hafiflikleri ve elektrostatik itme yetenekleri sonucu askıda kalır, çökelmezler. Ortamdaki çimentoların çökmesi de bu nedenle kısıtlanmış olur. Çökme olmayınca terleme olayı da önemli ölçüde azalır.

Böylece harç stabil hale gelir, daha homojen bir yapıda sertleşir. Stabilitate, özellikle enjeksiyon şerbetlerinde aranılan bir niteliktir. Bu yüzden uçucu küllü çimento şerbetleri öngerilme enjeksiyonlarında veya zemin enjeksiyonlarında kullanılırlar (Toros, 1987).

Uçucu kül sıkıştırıldığında, diğer dolgu malzemelerine oranla daha düşük bir yoğunluğa sahip olmaktadır. Bu durum, özellikle sıkıştırılabilme özelliği yüksek zeminler üzerinde bu malzemenin daha uygun bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesine neden olmaktadır. Ayrıca, birçok uçucu kül sıkıştırıldığında kendi kendine bağlayıcılık vasfı kazanmaktadır. Bu tip uçucu külün kullanılması ile malzemede yerleşme nedeniyle oluşan deformasyonlar daha küçük olmaktadır. Özellikle yerleşme hareketinin

büyük sorunlar çıkardığı köprü ayaklarında uçucu kül kullanılması büyük yararlar sağlamaktadır (Erdoğan, 1993).

#### **2.3.7.5. Tuğla üretimi**

Küllerin tuğla üretiminde hammadde olarak kullanılması yeni değildir. Küller, tuğla üretiminde kilin hacim küçülmesini azaltmak amacıyla 17. yüzyıldan beri kullanılmaktadır. Uçucu kül, çok ince taneli olması ve sinterlendiğinde yüksek mukavemet vermesi nedeniyle tuğla üretiminde değişik amaçlara göre, çok değişik oranlarda (%20-70) kullanılmaktadır (Bayazıt, 1980).

#### **2.3.7.6. Gazbeton üretimi**

Gazbeton, ince öğütülmüş silisli bir malzemenin anorganik bir bağlayıcı (kireç veya çimento) ile birleştirilmesi, gözenekleştirici bir madde ile hafifletilmesi ve sertleşmesi ile elde edilen, birbirinden bağımsız hava hücreleri içeren hafif bir betondur.

Elde edilen uçucu küllü gazbeton, hafif ve ısı iletkenliği düşük olacağından yapılarda kullanılması duvar kalınlıklarını azaltacak, böylece binaların yükü azalacaktır. Gazbeton, uygulamada birçok yerde normal betonla aynı amaçla kullanılmakta ise de, bileşim ve yapı bakımından betondan birçok farklılıklar gösterdiğinden "Havalı Harç" veya "Havalı Kum-Kireç Blok" diye de tanımlanır.

Türkiye'de gazbeton olarak adlandırılan bu betonun sınıflandırma ve özellikleri TS 453 "Gazbeton malzeme ve yapı elemanları" standardında verilmiştir.

Uçucu kül kullanılarak üretilen gazbetonun kuvars kullanılarak üretilen gazbetondan daha dayanıklı olmasının nedeni, uçucu kül ile kireç arasındaki reaksiyon ile açıklanabilir (Demir, 1989).

#### **2.3.7.7. Rolkrit üretimi**

Rolkrit, Roller Compacted Concrete (RCC, Silindirle Sıkıştırılmış Beton) deyiminin kısaltılmış şeklidir. Çok düşük çimento dozajları ile üretilen bu betonlar, hiç çökme vermeyen ve titreşimli yol silindirlerini taşıyabilecek kadar kuru ve bu araçlarla sıkıştırıldıklarında alt tabakalara yapışacak kadar nemlenen betonlardır. Bunların taşınmasında ve serilmesinde de yol yapım araçları olan damperler ve dozerler kullanılır.

1992 yılı verilerine göre inşaatı tamamlanmış 49 adet RCC barajında uçucu kül kullanılmıştır. Günümüzde Yunanistan'da Selanik'in kuzeyinde Platanovryssi bölgesinde 100 m yüksekliğinde inşaa edilmekte olan barajda Ptolemaida 'da çıkan ve 350 km. mesafeden getirilen yüksek kireçli ve sülfatlı uçucu kül kullanılmaktadır. Rolkrit 'de karışım oranları ise 35 kg/m<sup>3</sup> portland çimentosu ve 250 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül olarak tasarlanmıştır. Yani, bağlayıcıda uçucu kül oranı %88 'dir. 1976 'dan beri yapılan araştırmalar sonunda inşaat aşamasına geçilmiştir (Akman, 1993).

#### **2.3.7.8. Bazı elementlerin elde edilmesi**

Uçucu kül analizleri, içindeki bazı elementlerin çeşitli metodlarla elde edilebileceği fikrinden hareketle bugün çeşitli ülkelerde uçucu külden alüminyum, demir, titan, germanyum, galyum ve vanadyum gibi elementlerin elde edilmesi üzerine araştırmalar sürmektedir. Ülkemizde de "Alümina kazanılması" üzerine bir çalışma yapılmıştır (Tümen, 1984).

### 3. UÇUCU KÜLLER ÜZERİNDE YAPILAN ARAŞTIRMALAR

#### 3.1. Uçucu Küllerin Betonda Kullanılması

Kaynaklara göre Türkiye 'de uçucu külle ilgili ilk önemli çalışmalar 1964 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Kimya laboratuvarlarında yapılmıştır. Buradaki çalışmalarda, özellikle uçucu külün çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması üzerinde incelemeler yapılmıştır. Tunçbilek Termik Santralından alınan uçucu külün betonda katkı maddesi olarak kullanılmaya uygun olduğu görülmüştür. Değişik miktarlarda kül katılan çimento harcı ve beton karışımları üzerinde yapılan deneyler sonucu kül katkısının hidratasyon ısısını düşürdüğü, çimento içinde %20 'ye kadar katılan külün 90 gün sonra normal beton dayanımlarından daha yüksek sonuçlar verdiği tesbit edilmiştir. Bu verilere dayanarak Gökçekaya barajı inşaatında uçucu kül, beton katkı maddesi olarak başarıyla kullanılmıştır.

Karayolları Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında da 4. Bölge Pazar Köprüsü inşaatıyla ilgili olarak uçucu küllü betonlar üzerinde bir araştırma yapılmıştır. Kısmen çimento yerine kullanılan külün erken sürelerdeki basınç dayanımını düşürdüğü, kısmen ince kum yerine kullanılan külün ise dayanımı her zaman olumlu bir şekilde etkilediği bildirilmiştir.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi 'nde 1968 yılında Soma Termik Santralı külünün beton briket yapımında kullanılması ve betonun donma dayanımına etkileri konusunda çalışmalar yapılmış ve belirli oranlarda katılacak kül ile olumlu sonuçlar alınabileceği belirtilmiştir. Aynı yıl, Türk Standartları Enstitüsü, uçucu külün çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılmasına ilişkin standartları yayınlamıştır.

Kasım 1970'de Ankara'da Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu ve Devlet Su İşleri tarafından bir uluslararası kül sempozyumu düzenlenmiş, araştırmacılar çalışmalarının sonuçlarını bu sempozyumda sundukları tebliğlerde belirtmişlerdir. Bu tebliğler şöylece özetlenebilir:

İnceliği en az 3000 cm<sup>2</sup>/gr olan Tunçbilek uçucu külü beton karışımına %25 oranında katıldığında standartlara uygun basınç dayanımlarının elde edildiği, hidrasyon ısısının azaldığı, işlenebilme ve su geçirimsizlik niteliklerinin geliştirildiği görülmüştür.

Uçucu külün, betonun çekme dayanımına etkisi, çimento içindeki yüzdesi olarak uçucu kül miktarı %15 'den %30 'a kadar değiştirilerek incelenmiştir. Sonuç olarak, uçucu kül katılmış betonun katkısız betona kıyasla daha uzun zamanda sertleştiği, katkılı betonda külün olumlu etkisinin 60 gün sonra ortaya çıktığı ve optimum kül yüzdesinin %15-20 arasında olduğu tesbit edilmiştir.

Uçucu kül katılmış harç numuneleri üzerinde ilk 24 saat içinde sıcaklığın etkileri incelenmiştir. Özel-

likle kısa priz süresi ve yüksek kül katkı oranı gerektiren çalışmalar için en uygun sıcaklık araştırılmıştır. Bu araştırmada Tunçbilek Termik Santrali uçucu külü ve normal portland çimentosu kullanılmış ve sıcaklığın artırılmasıyla priz süresinin kısaltılabileceği görülmüştür. Yüksek dayanım için 30°C, erken priz için ise 50°C en uygun sıcaklıklar olarak tesbit edilmiştir.

Gökçekaya barajında, uçucu kül katılmış beton kullanılması dolayısıyla sağlanacak ekonomik yararlar incelenmiş, külün maliyetinin çimento maliyetinin %5 'i civarında olduğu gözönüne alınarak bu inşaata %25 oranında kül kullanılmasıyla önemli miktarda tasarruf sağlanacağı görülmüştür.

Betonların sülfatlı sulara karşı dayanımlarının incelendiği bir çalışmada %20 uçucu kül katılmış betonlarda sülfatlı sulara karşı dayanımın arttığı görülmüştür.

Değişik dozajlarda ve değişik uçucu kül oranlarında çalışılarak uçucu külün betonun geçirgenliği üzerindeki etkisi incelenmiş, dozaj ve uçucu kül yüzdesinin arttırılmasının betonun geçirgenliğini azalttığı, özellikle düşük dozajlarda uçucu külün olumlu katkısının daha belirli olduğu görülmüştür.

Porsuk barajı inşaatında uçucu kül kullanılmasına ilişkin çalışmada Tunçbilek uçucu külü kullanılmış ve %25-30 oranında uçucu kül katılmasının kütle betonlarında hidratasyon ısisını düşürdüğü ve betonun nihai dayanımının katkısız betona kıyasla daha yüksek olduğu tesbit edilmiştir.

Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu 'nun da konuyla ilgili bazı araştırma ve incelemeleri bulunmaktadır. Bu çalışmalarda da özellikle Tunçbilek, Çatalağzı ve Soma elektrofiltrelerinden elde edilen kül numunelerinin incelik, kimyasal bileşim ve puzzolanik özellikleri bakımından çimento ve beton katkı maddesi olarak kullanılmaya uygun oldukları, ayrıca tuğla imalinde uçucu kül katkısının tuğla kalitesinde uçucu kül katılmamış tuğlalara kıyasla bazı üstünlükler sağladığı belirtilmiştir.

Elektrik İşleri Etüd İdaresi tarafından 1979 'da yapılan bir çalışma, Çatalağzı, Tunçbilek, Soma ve Seyitömer termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin hafif agrega yapımına tamamen uygun olduğunu göstermiştir.

Tokyay ve diğerlerinin yaptığı çalışmada termik santrallerimizden çıkan küllerin kimyasal ve mineralojik analizi yapılarak bunların diğer ülkelerdeki küllerle aynı vasıfta oldukları görülmüştür (Çevik, 1993).

1982 yılında, E.İ.E. 'nin koordinatörlüğünde, D.S.İ., T.C.K., Çitosan, çeşitli bakanlıklar ve üniversitelerin temsilcilerinden oluşturulan bir çalışma grubu Türkiye uçucu küllerinin üretimi, kullanım olanakları, karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri hakkında kapsamlı bir rapor hazırlamıştır (Tokyay, 1993).

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği 'nin Ankara 'daki laboratuvarlarında, Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu küllerinin doğrudan, bir miktar kil ve

kalkerle karıştırılarak çimento hammaddesi şeklinde kullanılması çalışmaları yapılmıştır (Toros, 1987).

Kim, Park ve çalışma grubu, 1992 'de İstanbul 'da düzenlenen Uluslararası IV. CANMET-ACI konferansında sundukları "Kore'de Yüksek Mukavemetli Uçucu Küllü Beton Üretimi" konulu bildiride, yüksek mukavemetli beton üretiminde %30 'a varan ikame oranlarında uçucu külün işlenebilmeyi arttırdığını ve sabit çökme değeri için gerekli su miktarının arttığını ve kullandıkları uçucu kül tanelerinin pürüzlü yüzeyi ve boşluklu yapısının buna neden olduğunu ileri sürmüşlerdir (Özturan, 1993).

Mineral katkı maddelerinin kullanımıyla genelde betonun priz süreleri gecikmektedir. Okada ve çalışma grubu, uçucu kül oranıyla priz sürelerindeki gecikmenin arttığını ileri sürmektedirler. Kashima ve çalışma grubu, su altı betonu üretiminde yüksek oranda uçucu kül kullanımının prizi aşırı geciktirmediğini ileri sürmektedirler. Rodway ve çalışma grubu, yüksek oranda C tipi uçucu kül ile 0.33 su-çimento oranında 22.5 cm çökme veren betonda priz sürelerinin normal olduğunu gözlemişlerdir.

Aynı konferansta, Kanazawa ve çalışma grubu, uçucu kül katkılı çimento ile yapılan betonlarda sıcaklık artışında azalma gözlemişlerdir. Dunstan ve çalışma grubu, yüksek miktarda uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinde 28 günden sonra önemli gelişmeler gözlemlendiğini ve bunun da uçucu külün betonun uzun süreli mukavemetine olan olumlu katkısını gösterdiğini ileri sürmektedirler.

Aynı konferansta, Papayianni ve Goma, yüksek oranda kireç ve sülfat içeren uçucu küllerin betonda kullanımına dair yaptıkları araştırmaların sonuçlarını sunmuşlardır. Papayianni, %80 uçucu kül içeren silindirlenmiş betonlarda 91 günde 24-34 MPa basınç mukavemetleri elde edilebildiğini ileri sürmüştür. Goma ise, %60 uçucu kül içeren düşük işlenebilen betonların mukavemetlerinin erken yaşlarda daha düşük, 2 yıl sonra ise kontrol betonundan %18 daha yüksek olduğunu gözlemiştir.

Çeşitli yöntemlerle uçucu külün inceliğini arttırmak ve betonun mukavemet gelişimini etkilemek mümkün olabilmektedir. Ukita ve çalışma grubu, sınıflandırılmış uçucu kül ile yapılan betonların 28 günden sonra aynı su-çimento oranındaki kontrol betonuna göre süper bir mukavemet kazanma hızı gösterdiklerini rapor etmişlerdir. Tazawa ve çalışma grubu, inceliği 200.000-1.300.000  $\text{cm}^2/\text{gr}$  olan uçucu küller ile yapılan harçlarda mukavemetin ileri yaşlarda çok hızlı arttığını gözlemişlerdir. Matsufuji ve çalışma grubu, özel bir yöntemle uçucu külden en ince taneleri ayırabilmişler ve inceliği 30  $\text{m}^2/\text{gr}$  olan kül ile 0.2 su-çimento oranında ürettikleri betonda 91 günde 127 MPa mukavemet elde edebilmişlerdir. Hornain ve çalışma grubu ise uçucu külün içindeki yanmamış karbon miktarının mukavemet üzerinde olumsuz etkilerinin olmadığını tesbit etmişlerdir.

Bilodeau ve Malhotra yüksek oranda uçucu kül kullanılan betonda sünme değerlerinin oldukça düşük ancak kuruma rötrelerinin biraz daha fazla olduğunu

rapor etmişlerdir. Diğer taraftan Aimin ise, mukavemetleri 30-60 MPa arası olan harçlarda uçucu külün rötreyi azalttığını ileri sürmektedir.

Nasser ve Lai, %20 uçucu kül içeren betonların yeterli dayanım gösterdiğini ancak uçucu kül oranının artmasıyla durabilite faktörünün azaldığını gözlemişlerdir. Dunstan ve çalışma grubu, yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılan deniz yapısının sürekli gel-git olaylarına maruz kalmasına rağmen gayet iyi performans gösterdiğini rapor etmişlerdir. Paillere ve çalışma grubu, uçucu kül ve yüksek fırın curufu katkılı harç numunelerini yapay deniz suyu içinde tutmuşlar ve uçucu küllü harçların curuflu harçlardan daha az şişme yaptığını gözlemişlerdir.

Dunstan ve çalışma grubu, yüksek oranda uçucu kül ile yapılmış deniz yapılarında 10 yıl sonra yapılan incelemelerde donatının iyi korunmuş olduğunu gözlemişlerdir.

Yamashita ve çalışma grubu, özel bir fırın kullanarak uçucu külden hafif agrega üretiminde optimum sinterleme sıcaklığını tesbit etmişlerdir. Kuru özgül ağırlığı  $1.40 \text{ gr/cm}^3$  civarında olan uçucu kül hafif agregasının su emme değeri %25 civarında olmaktadır. Bu agrega ile birim ağırlığı  $1810 \text{ kg/m}^3$  olan hafif beton üretilebildiği ve 0.25 su-çimento oranında betonda 65 MPa basınç mukavemeti elde edilebildiğini belirtmişlerdir (Özturan, 1993).

Erdoğan ve Parla (1993) yaptıkları deneylerde, çimentonun %20 'si yerine uçucu kül kullanarak elde

edilen betonların 7 günlük basınç dayanımlarını, aynı yaştaki uçucu külsüz betonun basınç dayanımının %81.1 'i olarak elde etmişlerdir. Uçucu küllü ve kül kullanılmayan betonların basınç dayanımları arasındaki farkın 28 gün sonunda çok daha az olduğu görülmektedir. %20 ve %40 yüksek kireçli uçucu kül kullanarak yapılan betonların basınç dayanımları külsüz betonların dayanımlarının %102.8 ve %97.9 'u olarak bulunmuştur. %20 yüksek kireçli uçucu kül ile yapılan betonların basınç dayanımı, külsüz betonların basınç dayanımını geçmiştir.

Yine, Erdoğan ve Parla (1993) yaptıkları deneylerde, aynı yaşlardaki yüksek kireçli uçucu kül ile yapılan bütün beton numunelerinin basınç dayanımlarının, düşük kireçli uçucu kül ile yapılanlarından daha yüksek olduğunu tesbit etmişlerdir. Yüksek kireçli uçucu kül ile yapılan betonların daha yüksek dayanıma sahip olmaları bu tip uçucu küllerin bir miktar hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olmaları ile açıklanabilmektedir. Yüksek kireçli uçucu kül ile yapılan betonların 28 ve 90 günlere kadar dayanım kazanma hızında, düşük kireçli uçucu kül ile yapılanlara göre herhangi bir olumsuz etkiye rastlanmamıştır.

Başka bir araştırmada ise, kireç veya çimentonun bir kısmı veya tamamı yerine kullanılan ASTM sınıflandırmasına göre C sınıfı uçucu külünün, kumlar ve killerin modifikasyonu ve stabilizasyonuna etkileri incelenmiştir. Basınç ve durabilite testleri göster-

miştir ki, C sınıfı uçucu külleri çimentonun bir kısmı yerine kullanılabilmektedir (McManis ve Arman, 1989).

Zayıf betonların uçucu kül ihtiva etmesiyle basınç gerilmelerinde artışlar görölmüştür. Yapılan deneylerde, beton harcında sırasıyla 251, 307 ve 335 kg/m<sup>3</sup> olarak çimento kullanılmıştır. Karışımlarda, uçucu kül de kullanılmıştır. Uçucu kül, çimentonun %25 ve 50'si oranlarında çimento ile yer değiştirmiştir (Whiting, 1990).

Granüler malzeme üzerinde yapılmış olan deneylerde ise, bir düşük bir de yüksek oranda CaO ihtiva eden iki değişik uçucu kül kullanılmıştır. Yüksek oranda kireç ihtiva eden uçucu küllerle yapılan deneylerde, bütün yaşlarda düşük oranda kireç ihtiva eden uçucu küllere göre daha yüksek basınç mukavemetleri ve daha düşük hidratasyon değerleri elde edilmiştir (Douglas vd., 1990).

Batı Virginia'da termik santrallardan elde edilen F tipi uçucu küller, toprak barajlarda çimento ve kirece değişik yüzdelerde katılarak stabilizasyonu incelenmiştir. Yapılan deneylerin sonunda yeterli dayanım ve durabilite değerleri elde edilmiştir (Bowders vd., 1987).

### 3.2. Uçucu Küllerin Yol Stabilizasyonunda Kullanılması

1970'de yol stabilizasyonu çalışmalarında düşük kaliteli agregaların ıslahı için uçucu kül + çimento karışımının gerek laboratuvar deneylerinde gerekse Kütahya-Tavşanlı yolunun 700 m'lik bir kesiminde başarıyla kullanıldığı bildirilmiştir.

İzmir-Turgutlu Nif dere malzemesinin inşaat yerine yakın oluşu nedeniyle stabilizasyonda kullanılması uygun görülmüştür. Yapılan uçucu kül-çimento stabilizasyonunda Soma Termik Santrali uçucu külü kullanılmıştır. Karışımlarda çimento yüzdeleri %2,3,4 olarak, uçucu kül yüzdeleri ise %4,6,8 olarak alınmıştır. Standart Procktor deneyi sonuçlarına göre, malzemeye çimento ve uçucu kül ilave edildiğinde karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında düşüş, optimum su içeriklerinde ise artışlar meydana gelmiştir. Hazırlanan numuneler 7,14,28 ve 60 günlük kürlerden sonra serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde %8 uçucu kül oranında maksimum mukavemet değeri elde edilmiştir. %4 çimento, %8 uçucu kül için 28 günlük mukavemet  $38.2 \text{ kg/cm}^2$  bulunmuştur. Islatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerinde ise, uçucu kül oranları %4,6 ve 8 olarak arttıkça, ağırlık kayıplarında azalmalar görülmüştür (Atanur, 1971).

Yine benzer çalışma Kütahya-Çamlık malzemesi üzerinde yapılmıştır. Bu malzemenin aşınma ve dona karşı mukavemeti düşük olduğu belirtilmektedir. Bu malzeme, Kütahya Azot Sanayi'nin artık maddesi olan uçucu külün.

çimento ile stabilizasyonu ile ıslah edilmesi uygun görülmüştür. Karışımlarda %2,3,4 çimento ve %5,10,15,20 uçucu kül oranları kullanılmıştır. Yapılan Standart Procktor deneylerinde maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında düşüş, optimum su içeriklerinde ise artış meydana gelmiştir. Serbest basınç mukavemeti deneylerinde ise maksimum mukavemetler %5 ve %10 değerlerinde elde edilmiştir. %4 çimento, %10 uçucu kül için 28 günlük mukavemet  $68 \text{ kg/cm}^2$  bulunmuştur. Yine bu oranlarda, ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerindeki ağırlık kayıpları en az olmuştur (Atanur, 1971).

Soma-Bergama dere ocağı malzemesi üzerinde de, Soma Termik Santrali uçucu külü ve çimento ile yol stabilizasyonu çalışması yapılmıştır. Malzemeye %10,20,30 uçucu kül ve %2,3,4 çimento ilavesiyle deneyler yapılmıştır. Standart Procktor deneyinde uçucu kül oranları arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıklar azalmış, optimum su içerikleri ise artmıştır. Serbest basınç mukavemeti deneylerinde de, %10 uçucu kül oranında maksimum mukavemetler elde edilmiştir. %4 çimento, %10 uçucu kül için 28 günlük mukavemet  $29.3 \text{ kg/cm}^2$  bulunmuştur. Islatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerinde ise yine %10 uçucu kül oranında ağırlık kayıpları en az olmuştur (Atanur, 1971).

Bursa-Dede ocağı malzemesi üzerinde de aynı çalışma yapılmıştır. Burada Tunçbilek Termik Santrali uçucu külü kullanılmıştır. %2,3,4 çimento ve %7.5,10,12.5 uçucu kül oranları kullanılmıştır. Yapılan deneylerde, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda dü-

şüş, optimum su içeriklerinde artış olmuştur. Serbest basınç mukavemet değerleri birbirine yakın çıkmıştır. %4 çimento, %10 uçucu kül için 28 günlük mukavemet  $61.8 \text{ kg/cm}^2$  bulunmuştur. Islatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerinde ise ağırlık kayıpları yine azalmıştır (Atanur, 1971).

Genellikle karayolu inşaatlarında olmak üzere, büyük dolgu inşaatlarında uçucu külün kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu konuda harçların hazırlanması, dizayn metodları, yapım özellikleri ve kalite kontrolü hakkında bilgiler verilmektedir. Arazi ve laboratuvar test metodları hakkında açıklamalar yapılmaktadır (Anon, 1986).

Wasti(1990), uçucu küllerin geoteknik özelliklerini (indeks, kompaksiyon, kayma mukavemeti ve kompressibilite) incelemiş, uçucu küllerin toprak dolgu malzemesi yerine ve yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde kullanılarak değerlendirilebileceği sonucuna varmıştır.

#### **4. YOL STABİLİZASYONUNDA VE TEMEL TABAKASINDA KULLANILAN MALZEMELER VE BU TEZ ÇALIŞMASI SIRASINDA YAPILAN DENEYLERİN TANITIMI**

##### **4.1. Çalışmada İzlenen Yöntem**

Bu tez çalışmasında, Afşin-Elbistan Termik Santrali'nden sağlanan uçucu külün taban zemini stabilizasyonunda ve temel tabakasında çeşitli malzemelerle birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bu tez çalışması sırasında yapılan deneylerde kullanılan taban zemini ve temel malzemesi üzerinde;

-Elekt analizleri,

-Likit limit, plastik limit, zemin danelerinin özgül ağırlığının ölçümü ve organik madde tayini yapılmıştır.

Değişik oranlardaki zemin-çimento, zemin-çimento-uçucu kül, zemin-kireç, zemin-kireç-uçucu kül, temel malzemesi-çimento ve temel malzemesi-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde ise aşağıdaki deneyler yapılmıştır:

-Standart procktor deneyi (Kuru birim hacim ağırlık-su içeriği tesbiti),

-Serbest basınç mukavemeti deneyi (7, 28 ve 90 günlük kür süreli deneyler),

-Islatma-kurutma deneyi ve

-Donma-çözülme deneyidir.

Deneyler, F.Ü.Müh.Fak.İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.

#### 4.2. Kullanılan Malzemeler

Deneylerde, Afşin-Elbistan Termik Santralı uçucu külü, Elazığ Çimento Fabrikası portland çimentosu ve torbalanmış kireç kullanılmıştır. Zemin, Elazığ'da Fırat Üniversitesi Kampüsü dahilinde bir bina temel kazısından alınmıştır. D tipi temel malzemesi ise, T.C.K. 8. Bölge Müdürlüğü 'nden temin edilmiştir.

Afşin-Elbistan Termik Santralı uçucu külü kimyasal analizi Tablo-4.1 'de, Elazığ Çimento Fabrikası 'nda üretilen çimentonun özellikleri de Tablo-4.2 'de verilmiştir.

Amerikan Karayolları Araştırma Merkezi (Highway Research Board) 'ne göre ekonomik olarak stabilizasyonda kullanılabilecek zemin özellikleri şöyle olmalıdır (Atanür, 1966):

- Maksimum dane çapı: 3 inç.
- No:4 eleğinden geçen %50 'den az olmamalı,
- No:40 eleğinden geçen %15-100 arasında olmalı,
- No:200 eleğinden geçen %50 'den fazla olmamalı,
- Likit limiti 40 'dan fazla olmamalı ve
- Plastisite indisi 18 'den fazla olmamalıdır.

**Tablo 4.1.** Afşin-Elbistan Termik Santralı uçucu külü kimyasal analizi (Fabrika verileri).

| Ağırlıkça (%)                      |                 |          |
|------------------------------------|-----------------|----------|
| Bileşenler                         | Sınır Değerleri | Ortalama |
| SiO <sub>2</sub>                   | 7.0-56.0        | 29.6     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 1.4-23.9        | 6.6      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 2.0-21.0        | 10.8     |
| CaO                                | 6.2-78.2        | 30.8     |
| MgO                                | - 3.6           | 2.8      |
| SO <sub>3</sub>                    | 3.8-22.4        | 14.3     |
| Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O | - 2.5           | 0.8      |

**Tablo 4.2.** Elazığ Çimento Fabrikası'nda üretilen çimentonun özellikleri (Fabrika verileri).

| Bileşenler                                              | Ağırlıkça (%) |                                              |
|---------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                                        | 18.54         | 900 Elekte kalan % 0.2-0.3                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                          | 5.17          | (200 mikron)                                 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                          | 3.00          | 4900 Elekte kalan % 7.0-10.0                 |
| CaO                                                     | 54.78         | (90 mikron)                                  |
| MgO                                                     | 2.91          |                                              |
| SO <sub>3</sub>                                         | 2.13          | Yoğunluk: 970 gr/lt                          |
| Çözünmeyen kalıntı                                      | 8.70          | 2 günlük basınç muk.:100 kg/cm <sup>2</sup>  |
| Kızdırma kaybı                                          | 3.71          | 7 günlük basınç muk.:210 kg/cm <sup>2</sup>  |
| Tayin edilemeyen (K <sub>2</sub> O , Na <sub>2</sub> O) | 1.06          | 28 günlük basınç muk.:325 kg/cm <sup>2</sup> |

#### **4.3. Stabilizasyon Malzemeleri Üzerinde Yapılan Deneyler**

##### **4.3.1. Elek Analizi (ASTM D.422-61T, AASHO T.88-57, TS 1900) ve Zemin Danelerinin Özgül Ağırlığının Ölçümü (ASTM D.854-58, AASHO T.100-60, TS 1900)**

Elek analizi için, etüvde  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$  'da 24 saat kurutulan zemin malzemesi, elek makinasında elenir ve No:4, No:10, No:40, No:80 ve No:200 elekleri üstünde kalan malzemeler tartılır.

Temel malzemesinin elek analizi için ise, 1", 3/4", 3/8", No:4, No:10, No:40 ve No:200 elekleri kullanılır. Her elek üstünde kalan malzeme tartılır. Her elekten yüzde geçen miktarları bulunur ve verilen sınır değerleri ile karşılaştırılır.

Zemin danelerinin özgül ağırlığının ölçümü de TS 1900 'e göre yapılmıştır.

##### **4.3.2. Likit Limit (ASTM D.423-61T, AASHO T.89-60, TS 1900) ve Plastik Limit Tayini (ASTM D.424-59, AASHO T.90-56, TS 1900)**

Likit limit, alete sıvanmış zeminde, standart boyutta bir oluk ile ikiye ayrılan zeminin 25 darbede

oluk boyunca 1 cm kapandığı andaki su içeriğidir. Bu deney için, havada kurutulmuş ve 40 nolu elekten elenmiş zemin numunesi üzerinde likit limit deneyi TS 1900'de gösterildiği gibi yapılır. Likit limit grafiği çizilir.

Plastik limit, malzemenin 3 mm çapında silindirik çubuk biçiminde yuvarlandıklarında, çubukların yüzeyinde çatlamlar ve kopmalar olduğu andaki su içeriğidir. Havada kurutulmuş ve 40 nolu elekten elenmiş zemin numunesi üzerinde plastik limit deneyi TS1900 (1987)'e göre yapılır. Tayin edilen su içeriği zeminin plastik limitini vermektedir.

#### **4.3.3. Standart Procktor Deneyi**

**(ASTM D.698-58T, AASHTO T.99-57, TS 1900)**

Bu deney, Standart Procktor kalıbında, serbest basınç mukavemeti deneyi ve ıslatma - kurutma, donma - çözülme deneylerinde kullanılan numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriklerini tesbit etmek için yapılır. Deney, her bir değişik malzeme oranlarındaki karışımlar için tekrarlanır. TS 1900'e göre zemin numuneleri 945 cm<sup>3</sup> 'lük çelik silindirik kalıp içinde 3 tabaka halinde ve 2.5 kg ağırlıklı standart tokmağın 30.5 cm yükseklikten her tabakaya 25 defa düşürülmesi suretiyle sıkıştırılır. Sıkıştırılan numunelerin hacmi, ağırlığı ve kalıptaki

numuneden alınan küçük bir parçanın etüvde kurutulması ile bulunan su içeriği yardımı ile kuru birim hacim ağırlıkları tayin edilir. Bu işlem farklı su içeriklerinde hazırlanmış numuneler üzerinde tekrarlanmak suretiyle proctor eğrisi, dolayısıyla optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlıklar elde edilir.

#### **4.3.4. Islatma-Kurutma Deneyi**

**(ASTM D.559-57, AASHTO T135-57)**

Numunelerin rutubet değişimine ve iklim değişikliklerine maruz kaldıklarında bu etkilere karşı dayanıklı olup olmadıklarını tesbit etmek için ıslatma-kurutma deneyleri yapılır. Islatma-kurutma deneyleri özellikle kil ve silt yüzdeleri fazla olan zeminler için önemlidir. Çünkü, numuneler kuruduklarında büyük hacim değişikliği gösterirler. Granüler zeminlerde ve tek boy kumlarda zayıf yüzdeleri killi-siltli zeminlere göre daima fazla olur. Bu da granüler zeminlerin fırçalanması sırasında kum tanelerinin ve çakıl tanelerinin numuneden çıkmasından ileri gelmektedir.

Zemin 3/4" eleğinden elenerek, çeşitli oranlarda hazırlanan ve optimum su içeriğinde maksimum yoğunluğa kadar sıkıştırılmış olan numuneler 7 gün kür edildikten sonra 12 devre ıslatılıp kurutulur ve her

devre sonunda fırçalanır. En sonunda da 110°C 'da etüvde 24 saat bekletilerek numunelerin uğradıkları ağırlık kayıpları tayin edilir. Her bir devrede, ıslatma halinde numuneler 5 saat suda, kurutma halinde ise 42 saat 71°C 'da etüvde bekletilir (Kumbasar vd., 1970).

#### **4.3.5. Donma-Çözülme Deneyi**

**(ASTM D.560-57, AASHTO T136-57)**

Yeteri derecede sertleşmiş numunelerin don olayına karşı dayanıklı olup olmadığını tesbit etmek için bu deney yapılır. Donma ve çözülmeden, siltli ve killi zeminler, kumlu ve çakıllı zeminlere göre daha fazla etkilenirler.

Zemin 3/4" eleğinden elenerek, çeşitli oranlarda hazırlanan ve optimum su içeriğinde maksimum yoğunluğa kadar sıkıştırılmış olan numuneler, 7 gün kürde bekletilir. Sonra 12 devre donma-çözülme periyotlarına tabi tutularak, her devre sonunda fırçalama işlemi uygulanır. 12 devrenin sonunda 110°C 'da etüvde 24 saat bekletilerek numunelerin uğradıkları ağırlık kayıpları bulunur. Her bir devrede, donma halinde numuneler 22 saat -23°C 'da, çözülme halinde ise oda sıcaklığında rutubetli ortamda 22 saat bekletilir (Kumbasar vd., 1970).

#### **4.3.6. 7, 28 ve 90 Günlük Serbest Basınç Mukavemeti Ölçümleri (TS 1900)**

Deney, optimum su içeriğinde Standart Procktor kalıbında sıkıştırılmış değişik oranlardaki karışımlar üzerinde yapılır. Rutubetli ortamda, 7, 28 ve 90 günlük kürlere tabi tutulduktan sonra her değişik karışım oranı için üçer adet hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti deneyi yapılır. Serbest basınç mukavemeti üç numunenin ortalaması olarak alınır. Deney, numunelerin basınç mukavemetini ölçmekte kullanılan Versa Tester (Söiltest, INC. Evanston, İLL., USA) marka maksimum 15 ton yük alabilen preste yapılmıştır.

## 5. YOL STABİLİZASYONU VE TEMEL TABAKASI İÇİN DEĞİŞİK MALZEMELER ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLERDE ALINAN SONUÇLAR VE DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

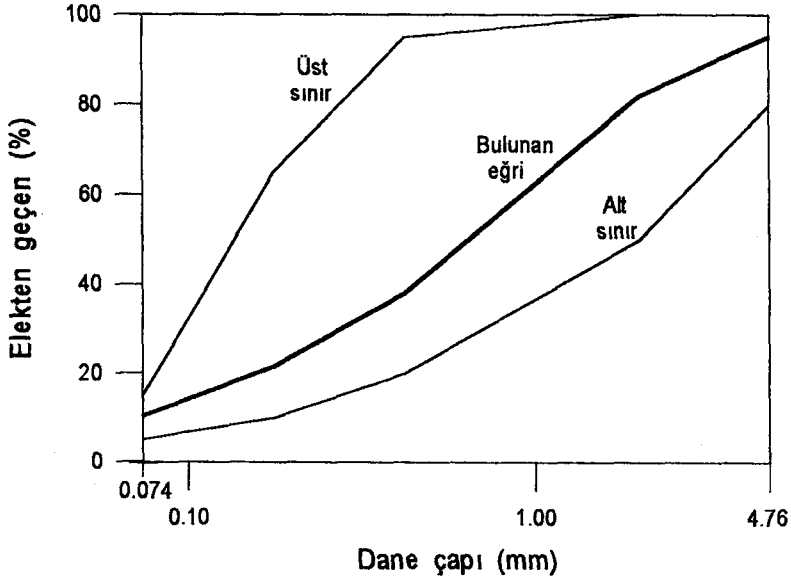
### 5.1. Taban Zemini ve Temel Malzemesi Üzerinde Yapılan Deneyler

#### 5.1.1. Elek Analizi Deneyi

Deneylerde kullanılan taban zemini malzemesinin elek analizi sonuçları Tablo-5.1 'de ve granülometri eğrisi ise Şekil-5.1 'de verilmiştir. Şekil-5.1 'de görüldüğü gibi deneylerde kullanılan zemin malzemesinin gra-nülometri eğrisi istenilen sınır değerleri arasında kalmaktadır (Yıldırım,1984).

**Tablo 5.1.** Deneylerde kullanılan zemin malzemesinin elek analizi sonuçları.

| Elek No | Toplam geçen (%) | Sınırlar geçen (%) |
|---------|------------------|--------------------|
| 4       | 95.2             | 80-100             |
| 10      | 82.0             | 50-100             |
| 40      | 38.1             | 20-95              |
| 80      | 21.6             | 10-65              |
| 200     | 10.3             | 5-15               |



**Şekil 5.1.** Deneylerde kullanılan taban zemini malzemesinin granülometri eğrisi.

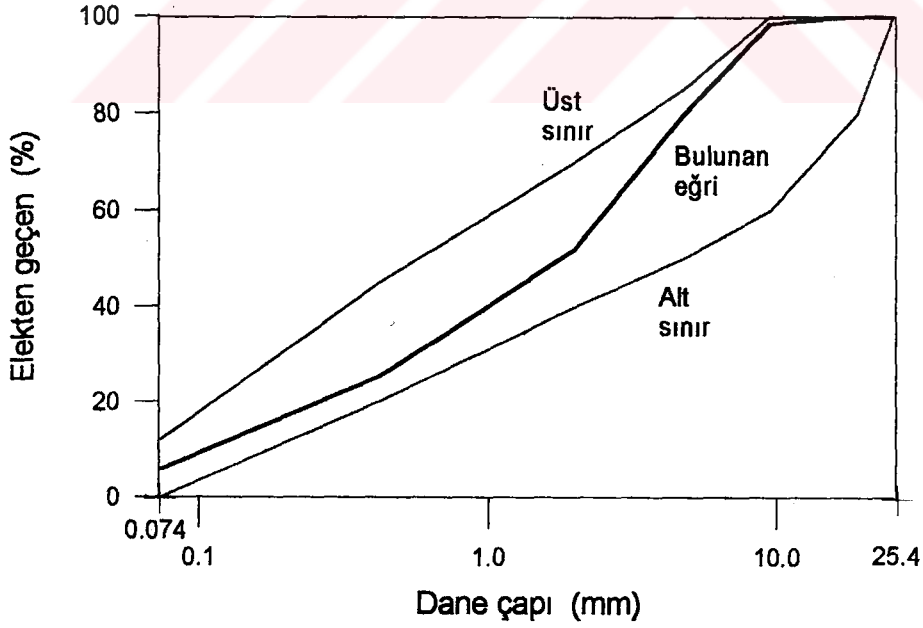
Deneylerde kullanılan temel malzemesinin elek analizi sonuçları da Tablo-5.2 'de ve granülometri eğrisi ise Şekil-5.2 'de verilmiştir. Şekil-5.2 'de de görüldüğü gibi, deneylerde kullanılan temel malzemesinin granülometri eğrisi istenilen sınır değerleri arasında kalmaktadır.

#### 5.1.2. Likit Limit ve Plastik Limit Deneyi

Zemin malzemesi için, likit limit deneyi sonunda elde edilen darbe sayıları apsiste logaritmik olarak, su içerikleri de ordinatta işaretlendi. Tesbit edilen

**Tablo 5.2.** Deneylerde kullanılan temel malzemesinin elek analizi sonuçları.

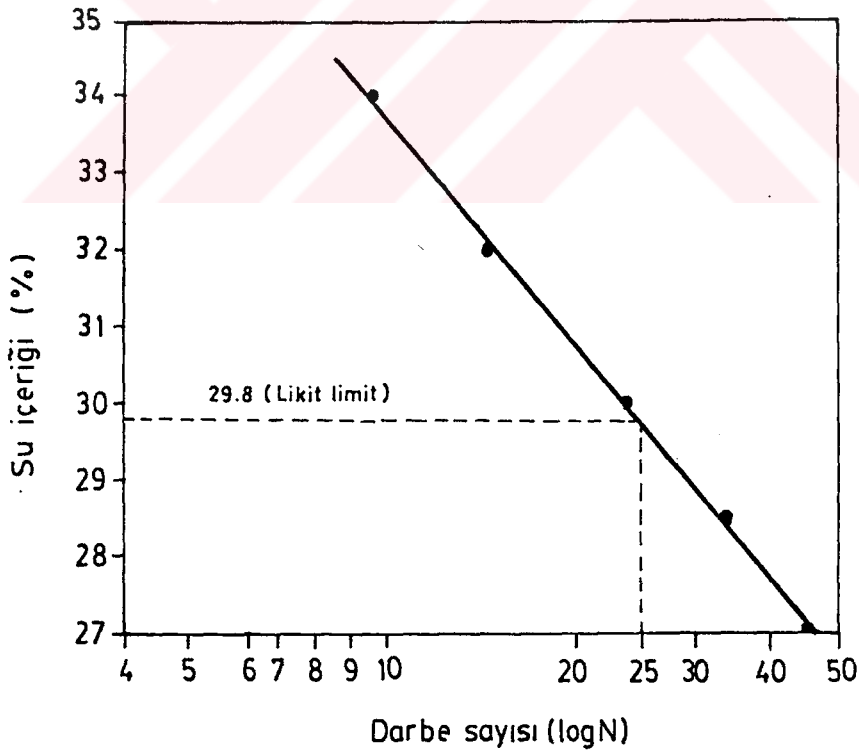
| Elek No | Toplam geçen (%) | D tipi sınırlar geçen (%) |
|---------|------------------|---------------------------|
| 1"      | 100.0            | 100                       |
| 3/4"    | 100.0            | 80-100                    |
| 3/8"    | 98.5             | 60-100                    |
| No: 4   | 79.9             | 50-85                     |
| No: 10  | 52.1             | 40-70                     |
| No: 40  | 25.4             | 20-45                     |
| No:200  | 5.8              | 0-12                      |



**Şekil 5.2.** Deneylerde kullanılan temel malzemesinin granülometri eğrisi.

noktalara uygun bir doğru çizildi. 25 darbeye karşılık gelen su içeriği zeminin likit limitidir. Likit limit 29.8 olarak bulundu. Su içeriği ve darbe sayısına bağlı olarak deneylerde kullanılan zemin malzemesi için çizilen likit limit grafiği Şekil-5.3 'de verilmiştir.

Plastik limit deneyi ise, hataları önlemek için üç defa tekrarlandı. Elde edilen su içeriklerinin ortalaması alınarak plastik limit değeri 20.5 olarak bulundu. Plastisite indisi = likit limit - plastik limit=29.8-20.5=9.3 olarak bulundu. Bulunan likit limit ve plastisite indisi değerleri Bölüm-4.1 'de



**Şekil 5.3.** Deneylerde kullanılan taban zemin malzemesinin likit limit grafiği.

verilen sınırlara uymaktadır. Temel malzemesinin ise, likit limiti 21, plastik limiti 16 ve plastisite indisi 5 olarak bulunmuştur.

### 5.1.3. Özgül Ağırlık Deneyi

TS 1900'e göre, zemin danelerinin özgül ağırlığı tesbit edildi.

$$W_1 = \text{Piknometre ağırlığı} = 119.6 \text{ gr}$$

$$W_2 = \text{Piknometre + Kuru zemin ağırlığı} = 172.3 \text{ gr}$$

$$W_3 = \text{Piknometre + Zemin + Su ağırlığı} = 251.0 \text{ gr ve}$$

$$W_4 = \text{Piknometre + Su ağırlığı} = 218.8 \text{ gr}$$

bulundu.

$\gamma = \text{Zemin danelerinin özgül ağırlığı.}$

$$\gamma = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{172.3 - 119.6}{(218.8 - 119.6) - (251.0 - 172.3)} = 2.57 \text{ gr/cm}^3$$

olarak bulundu.

#### **5.1.4. Organik Madde Tayini**

Deneylerde kullandığımız taban zemini içerisindeki organik madde miktarı da, TS 8336 'ya göre Yüzdürme Metoduyla yapılan Organik Madde Tayini deneyi ile %0.8 olarak bulunmuştur. Bu bulunan değer %2 olan maksimum sınır değerinden küçük olduğu için uygundur.

Elek analizi sonuçları ve bulunan likit limit, plastik limit değerleri gözönünde tutularak, TS 1500 'e göre yapılan zemin sınıflandırmasında, deneylerde kullanılan zeminin ince malzemeli ve killi kum (SC) olduğu tesbit edildi.

#### **5.2. Zemin-Çimento-Uçucu Kül Karışımı Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerde Alınan Sonuçlar**

##### **5.2.1. Standart Procktor Deneyi ve sonuçları**

Bu karışımlardaki çimento ve uçucu kül yüzdeleri, kaynaklardaki çalışmalardan örnek alınarak ve yapılan bir ön çalışmadan elde edilen sonuçlara göre yeterli mukavemet değerlerinin elde edilebileceği oranları dikkate alarak seçildi. Önce uçucu külsüz, değişik çimento oranları denendi, sonra uçucu kül de karışıma değişik oranlarda ilave edildi. Her bir karışım için 5

adet olmak üzere 110 adet Standart Procktor numunesi hazırlandı.

Her değişik karışım oranlarında hazırlanan numuneler için Standart Procktor deneyi yapıldı. Bu deneyle numunelerin optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tesbit edildi. Hazırlanmış olan numuneler Resim 5.1.'de görülmektedir. Zemin-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor deneyi sonuçları da Tablo-5.3'de verilmiştir.



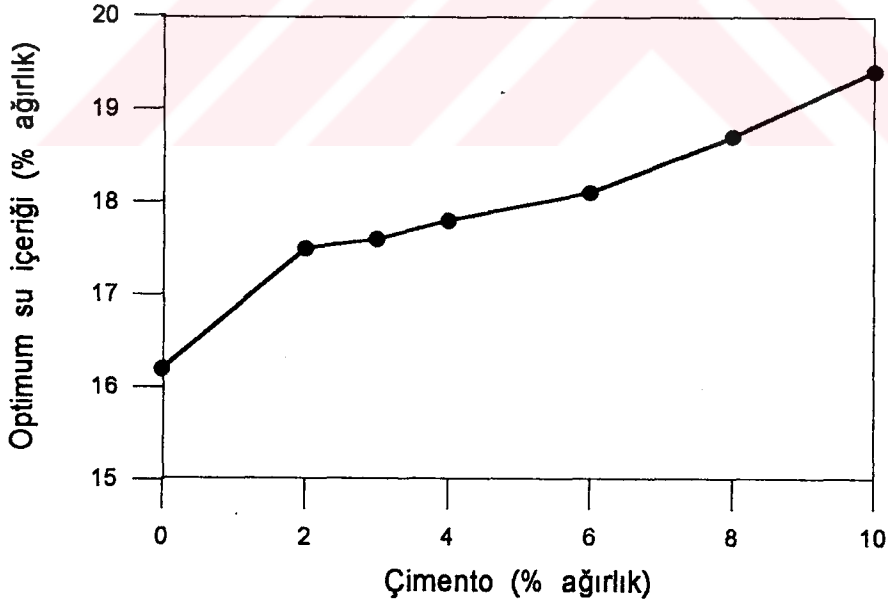
**Resim 5.1.** Hazırlanmış olan numuneler kürde bekletilirken görülmektedir.

**Tablo 5.3:** Zemin-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor Deneyi sonuçları.

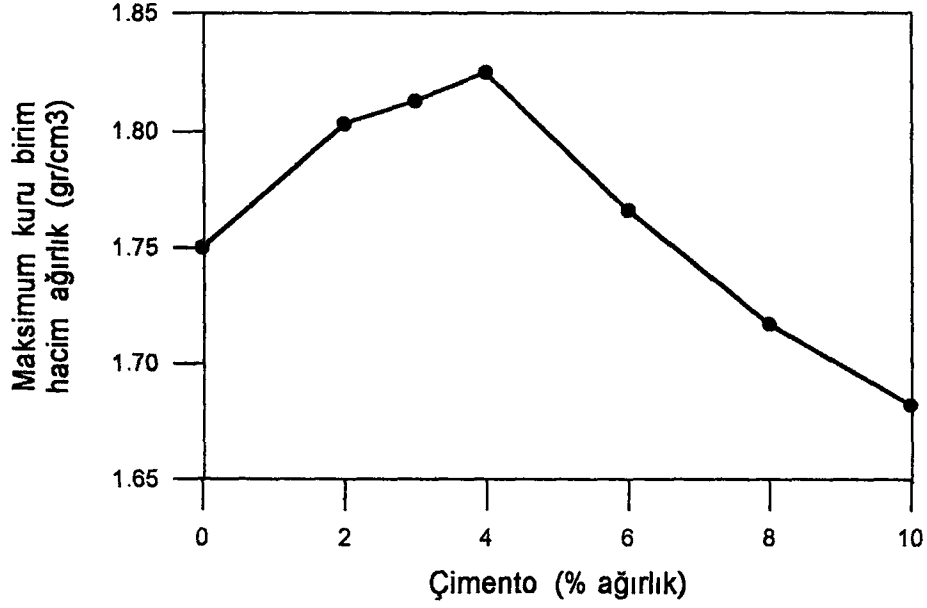
| Karışım oranları<br>ağırlıkça (%) |           | Optimum<br>su<br>içeriği<br>(%) | Maksimum kuru<br>birim hacim<br>ağırlıkları<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|-----------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Çimento                           | Uçucu kül |                                 |                                                                      |
| -                                 | -         | 16.2                            | 1.750                                                                |
| 2                                 | -         | 17.5                            | 1.803                                                                |
| 3                                 | -         | 17.6                            | 1.813                                                                |
| 4                                 | -         | 17.8                            | 1.825                                                                |
| 6                                 | -         | 18.1                            | 1.766                                                                |
| 8                                 | -         | 18.7                            | 1.717                                                                |
| 10                                | -         | 19.4                            | 1.682                                                                |
| 2                                 | 4         | 18.0                            | 1.773                                                                |
| 2                                 | 6         | 18.3                            | 1.668                                                                |
| 2                                 | 8         | 19.2                            | 1.652                                                                |
| 2                                 | 10        | 18.3                            | 1.644                                                                |
| 2                                 | 15        | 15.8                            | 1.562                                                                |
| 3                                 | 4         | 17.4                            | 1.810                                                                |
| 3                                 | 6         | 18.0                            | 1.751                                                                |
| 3                                 | 8         | 18.7                            | 1.684                                                                |
| 3                                 | 10        | 17.5                            | 1.652                                                                |
| 3                                 | 15        | 14.9                            | 1.574                                                                |
| 4                                 | 4         | 17.2                            | 1.820                                                                |
| 4                                 | 6         | 17.5                            | 1.761                                                                |
| 4                                 | 8         | 17.7                            | 1.724                                                                |
| 4                                 | 10        | 16.6                            | 1.677                                                                |
| 4                                 | 15        | 14.6                            | 1.632                                                                |

Zemin-çimento karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor deneylerinde, çimento oranı arttıkça optimum su içerikleri de artmaktadır (Şekil-5.4). Maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise önce artmakta, %4 çimento oranında maksimuma ulaşmakta, daha yüksek çimento oranlarında ise düşmektedir (Şekil-5.5).

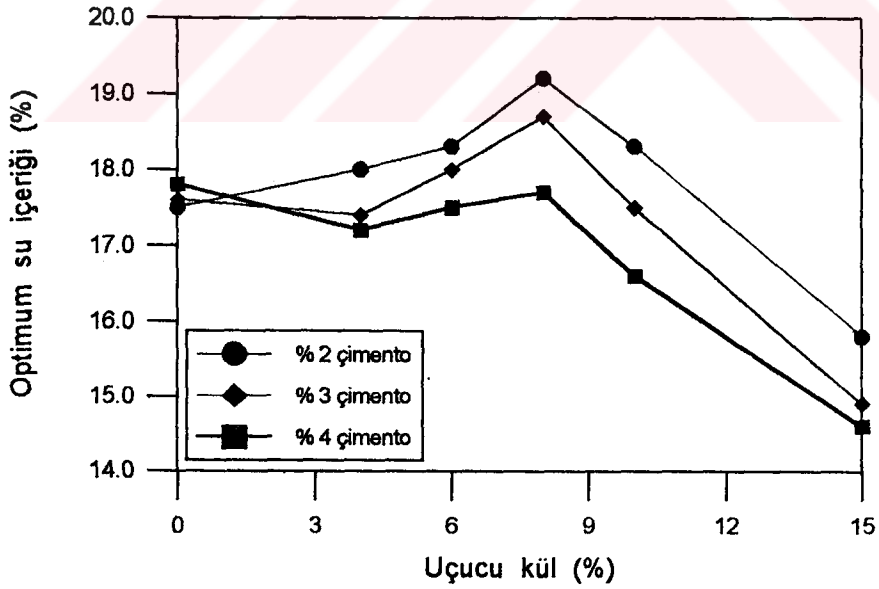
Zemin-çimento-uçucu kül karışımlarında, Şekil-5.6'da optimum su içerikleri %2, 3 ve 4 çimento oranları için %8 uçucu kül oranında maksimuma ulaşmakta, sonra düşmektedir. Şekil-5.7.'de uçucu kül oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıkları azalmaktadır.



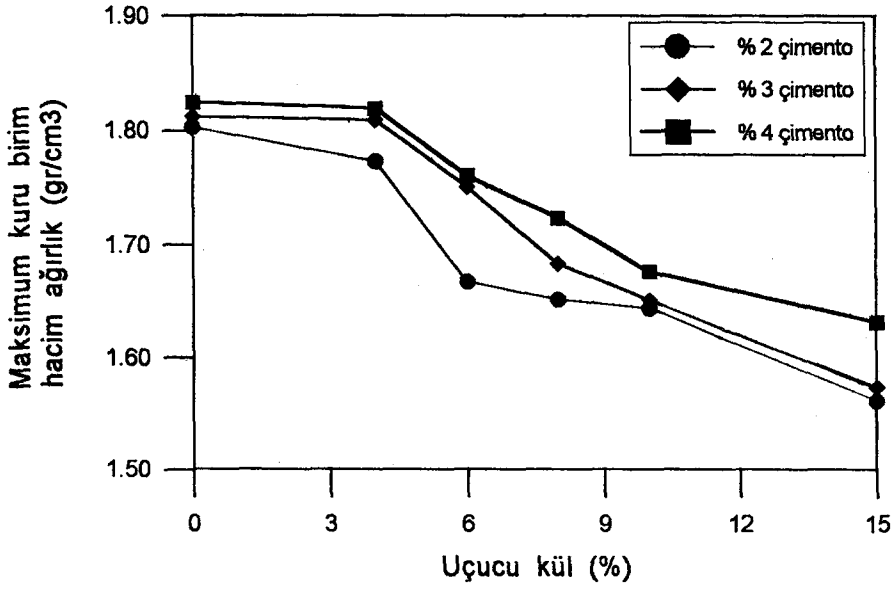
**Şekil 5.4.** Zemin-çimento karışımlarındaki çimento yüzdesine göre optimum su içeriğinin değişimi.



**Şekil 5.5.** Zemin-çimento karışımlarındaki çimento yüzdesine göre maksimum kuru birim hacim ağırlıkları değişimi.



**Şekil 5.6.** Zemin-çimento-uçucu kül karışımlarındaki çimento ve uçucu kül yüzdesine göre optimum su içeriğinin değişimi.

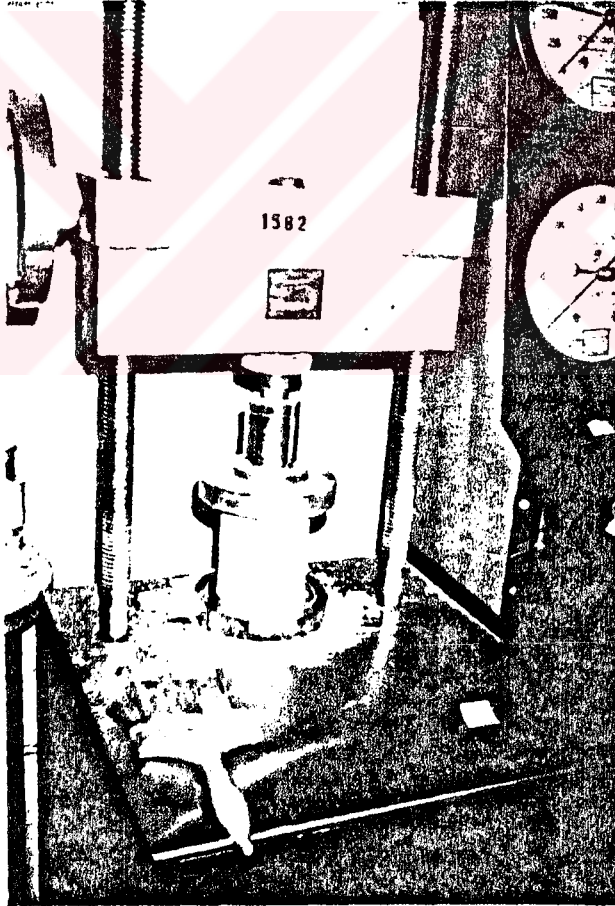


**Şekil 5.7.** Zemin-çimento-uçucu kül karışımlarındaki çimento ve uçucu kül yüzdesine göre maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi.

#### 5.2.2. Serbest Basınç Mukavemeti Deneyi ve sonuçları

Serbest basınç mukavemeti deneyleri, değişik zemin-çimento-uçucu kül karışımları için Standart Procktor deneyi ile tesbit edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda yapıldı. Bu deneyler önce zemin-çimento karışımları üzerinde yapıldıktan sonra, değişik oranlarda uçucu kül de ilave edilerek tekrarlandı. Bu deneyler için 198 adet silindir numunesi hazırlandı. Bütün karışım oranlarında 3'er adet hazırlanan numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 gün kürlerden sonra serbest basınç mukavemeti deneyleri uygulandı.

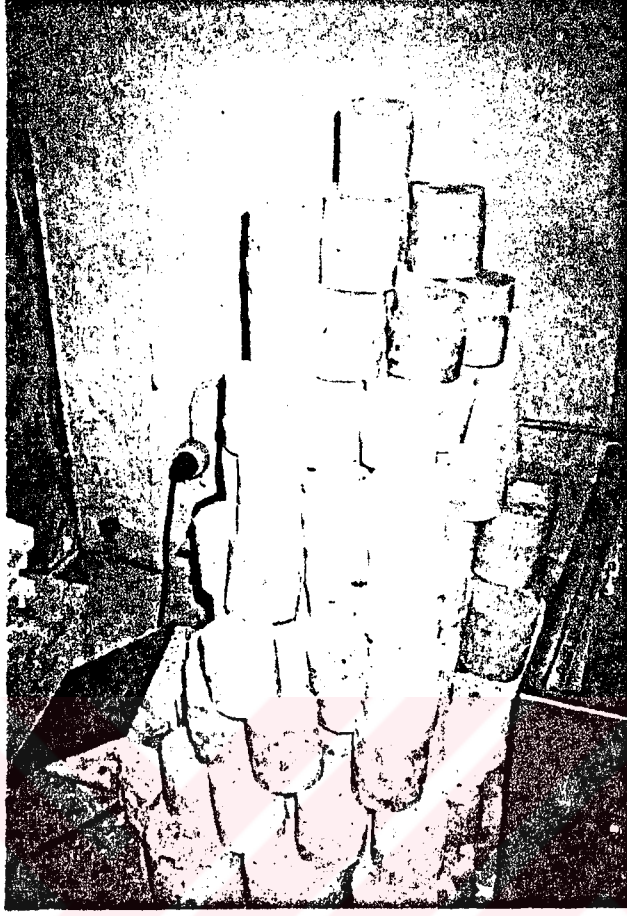
Serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutulan bir numune Resim-5.2. 'de görülmektedir. Zemin-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan 7, 28 ve 90 günlük kür süreli serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları Tablo-5.4. 'de verilmiştir. Serbest basınç mukavemeti deneyinden sonra numuneler Resim-5.3. 'de görülmektedir.



**Resim 5.2.** Serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutulan bir numunenin deney esnasındaki görünüşü.

**Tablo 5.4.** Zemin-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan 7, 28 ve 90 günlük kür süreli serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları.

| Karışım oranları<br>ağırlıkça (%) |           | 7 günlük<br>serbest<br>basınç<br>mukavemeti<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 28 günlük<br>serbest<br>basınç<br>mukavemeti<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 90 günlük<br>serbest<br>basınç<br>mukavemeti<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Çimento                           | Uçucu kül |                                                                      |                                                                       |                                                                       |
| -                                 | -         | 2.7                                                                  | 3.2                                                                   | 3.4                                                                   |
| 2                                 | -         | 5.6                                                                  | 6.4                                                                   | 6.8                                                                   |
| 3                                 | -         | 8.7                                                                  | 9.4                                                                   | 9.5                                                                   |
| 4                                 | -         | 9.8                                                                  | 13.2                                                                  | 15.4                                                                  |
| 6                                 | -         | 14.7                                                                 | 19.1                                                                  | 21.1                                                                  |
| 8                                 | -         | 16.7                                                                 | 23.6                                                                  | 27.4                                                                  |
| 10                                | -         | 17.4                                                                 | 32.2                                                                  | 36.2                                                                  |
| 2                                 | 4         | 15.0                                                                 | 18.1                                                                  | 19.2                                                                  |
| 2                                 | 6         | 16.8                                                                 | 20.8                                                                  | 21.9                                                                  |
| 2                                 | 8         | 19.4                                                                 | 23.2                                                                  | 24.7                                                                  |
| 2                                 | 10        | 14.8                                                                 | 22.2                                                                  | 27.8                                                                  |
| 2                                 | 15        | 12.3                                                                 | 16.6                                                                  | 31.8                                                                  |
| 3                                 | 4         | 17.6                                                                 | 19.8                                                                  | 21.1                                                                  |
| 3                                 | 6         | 20.8                                                                 | 22.5                                                                  | 23.6                                                                  |
| 3                                 | 8         | 22.6                                                                 | 25.9                                                                  | 28.3                                                                  |
| 3                                 | 10        | 17.7                                                                 | 25.3                                                                  | 31.6                                                                  |
| 3                                 | 15        | 13.5                                                                 | 23.8                                                                  | 34.8                                                                  |
| 4                                 | 4         | 18.2                                                                 | 22.6                                                                  | 24.7                                                                  |
| 4                                 | 6         | 22.7                                                                 | 25.8                                                                  | 26.7                                                                  |
| 4                                 | 8         | 25.3                                                                 | 29.2                                                                  | 30.8                                                                  |
| 4                                 | 10        | 19.0                                                                 | 26.5                                                                  | 32.8                                                                  |
| 4                                 | 15        | 16.3                                                                 | 24.0                                                                  | 43.1                                                                  |



**Resim 5.3.** Serbest basınç mukavemeti deneyinden sonra numunelerin görünümü.

Zemin-çimento numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinde çimento oranı %0 ile 10 arasında değiştirildi. Çimento oranı arttıkça serbest basınç mukavemetleri de artmaktadır (Şekil-5.8).

Zemin-çimento karışımına % 4, 6, 8, 10, 15 oranlarında uçucu kül de ilave edilerek yeni numuneler hazırlandı. Bu numunelerdeki çimento oranları %2, 3 ve 4 alınarak bu numuneler 7, 28 ve 90 günlük küre

tabi tutulduktan sonra üzerlerinde serbest basınç mukavemeti deneyleri yapıldı.

7 ve 28 günlük numuneler, çimento oranları % 2, 3 ve 4 değerlerinde iken, %8 uçucu kül oranında maksimum basınç mukavemetine ulaşmaktadırlar. Uçucu kül, daha fazla oranda karışıma katıldığında basınç mukavemetleri düşmektedir (Şekil-5.9 ve 5.10). 90 günlük zemin-çimento-uçucu kül numunelerinde ise uçucu kül oranı %0'dan %15'e artarken, basınç mukavemetleri de sürekli artmaktadır (Şekil-5.11).

Zemin-çimento-uçucu kül numunelerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinden elde edilen bu sonuçlara göre, %8 uçucu kül oranından daha fazla uçucu kül kullanıldığında 7 ve 28 günlerde bu fazla katılan kısmın reaksiyona girmediği ve mukavemetleri düşük kaldığı, ancak 90 günlük numunelerde bu fazla kısım da reaksiyona katılarak mukavemetleri artırdığı anlaşılmaktadır. Buna göre, uçucu küllü numunelerin mukavemet kazanma sürelerinin uzun olduğu, yani nihai dayanıma uzun sürede eriştikleri söylenebilir.

Örnek olarak, %4 çimento ve %15 uçucu kül için, basınç mukavemet değerleri; 7 günde  $16.3 \text{ kg/cm}^2$ , 28 günde  $24.0 \text{ kg/cm}^2$  ve 90 günde ise  $43.1 \text{ kg/cm}^2$  olduğu Şekil-5.9, 5.10 ve 5.11 'den görülmektedir.

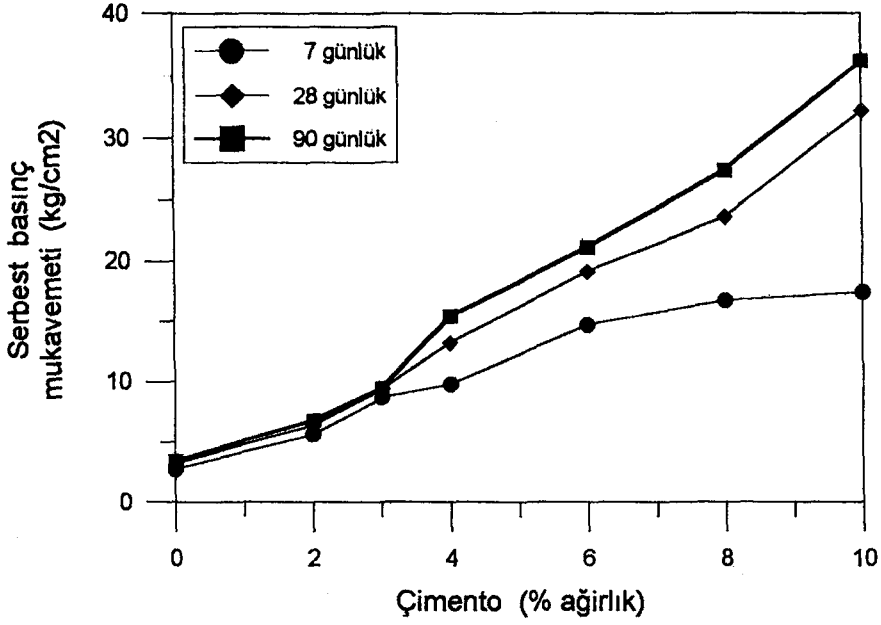
Zemin-çimento karışımlarına uçucu kül ilave edilmesiyle ilk karışıma göre daha yüksek mukavemetler elde edilmektedir. Örnek olarak, 7 günlük numuneler için %4 çimento oranında basınç mukavemeti değeri  $9.8 \text{ kg/cm}^2$  iken, bu karışıma %4 de uçucu kül ilave edildiğinde bu değer  $18.2 \text{ kg/cm}^2$  'ye çıkmaktadır. 28

günlükler için %4 çimento oranında  $13.2 \text{ kg/cm}^2$ , %4 uçucu kül de ilavesiyle  $22.6 \text{ kg/cm}^2$  olmaktadır. 90 günlükler ise, %4 çimento oranında  $15.4 \text{ kg/cm}^2$ , %4 'de kül ilavesiyle  $24.7 \text{ kg/cm}^2$  basınç mukavemeti elde edilmektedir (Şekil-5.9, 5.10 ve 5.11).

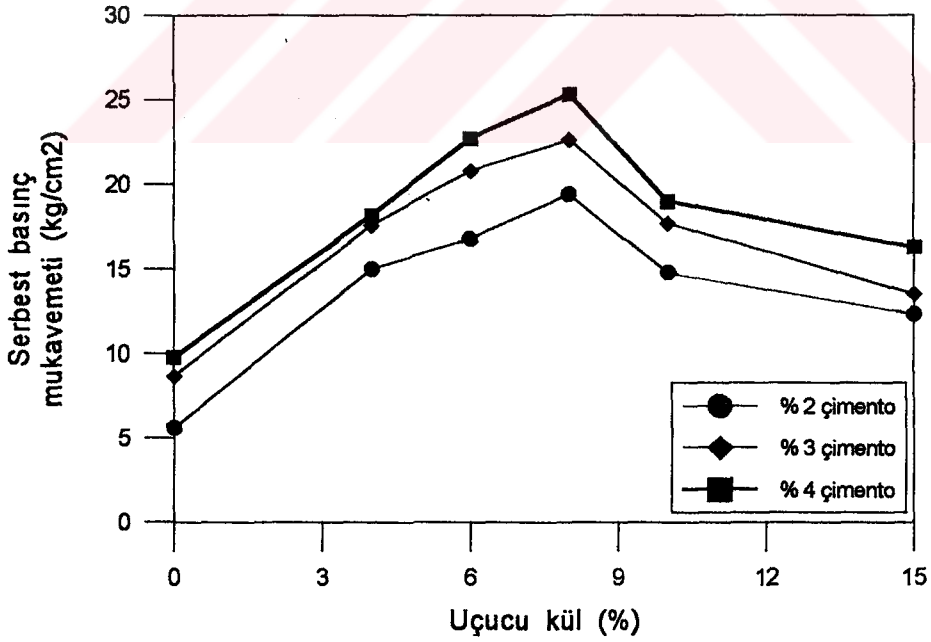
Kür süreleri yönünden değerlendirmek gerekirse, özellikle %4 çimento oranına kadar kür süreleri fazla etkili olmamakta, ancak %4 çimento oranından sonra daha yüksek çimento oranlarında kür süresi arttıkça, oldukça yüksek mukavemetler elde edilmektedir. Bu durum Şekil-5.12 'de görülmektedir.

%4 çimento oranında 90 günlük mukavemet değeri  $15.4 \text{ kg/cm}^2$  iken, %2 çimento ve %4 uçucu kül oranlarında  $19.2 \text{ kg/cm}^2$  'ye çıkmaktadır. Yalnız %6 çimento oranında 90 günlük mukavemet değeri  $21.1 \text{ kg/cm}^2$  iken, %2 çimento ve %6 uçucu kül oranlarında  $21.9 \text{ kg/cm}^2$  'ye çıkmaktadır.

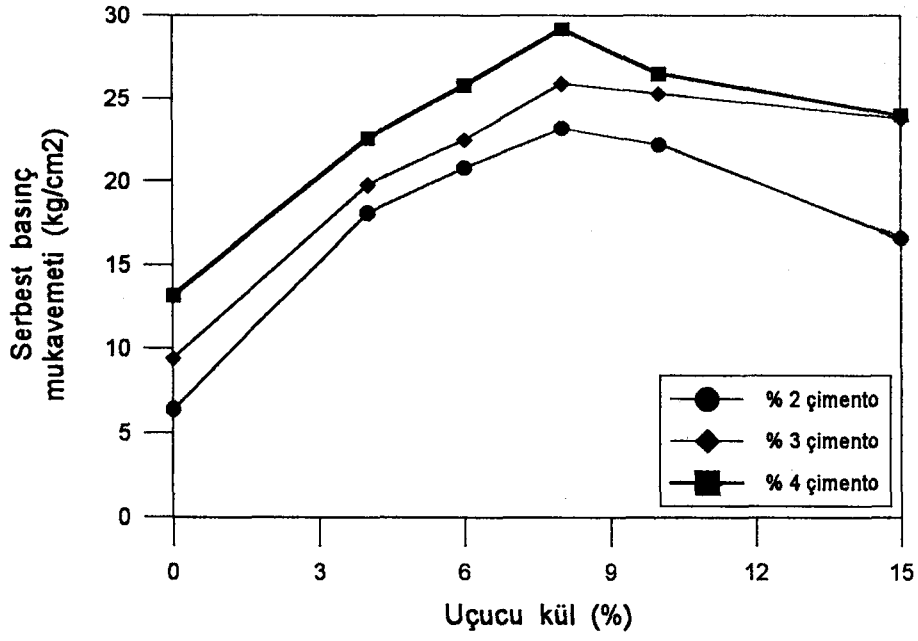
Bu örnekler de gösteriyor ki, uçucu kül bir mineral katkı maddesi olarak kullanılabilmekte ve bağlayıcı gibi davranmakta, zemin-çimento karışımlarının özelliklerini iyileştirmektedir. Çimento oranının azaltılmasıyla da, çimentodan tasarruf sağlanacaktır.



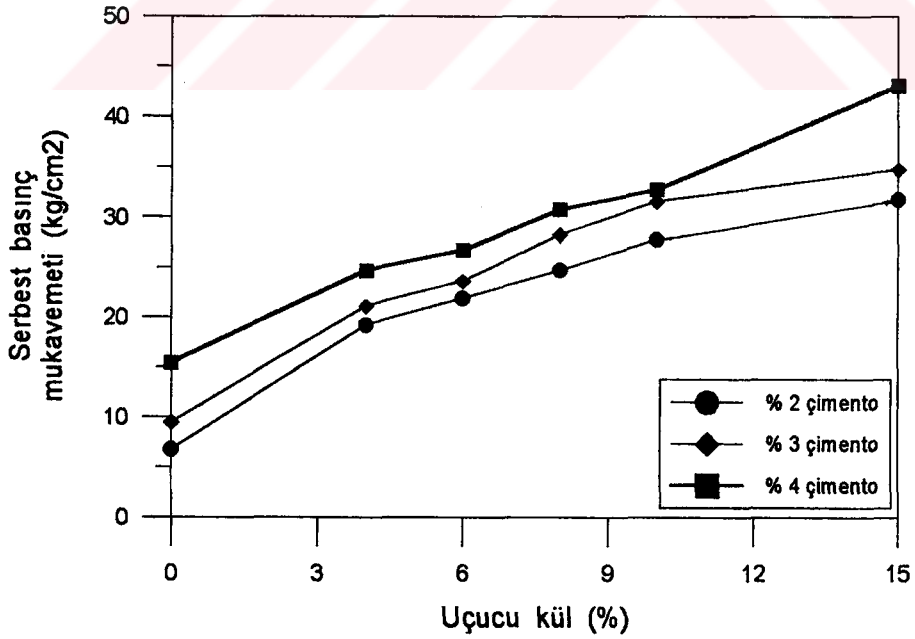
Şekil 5.8. Zemin-çimento karışımlarında 7, 28 ve 90 günlük serbest basınç mukavemetleri.



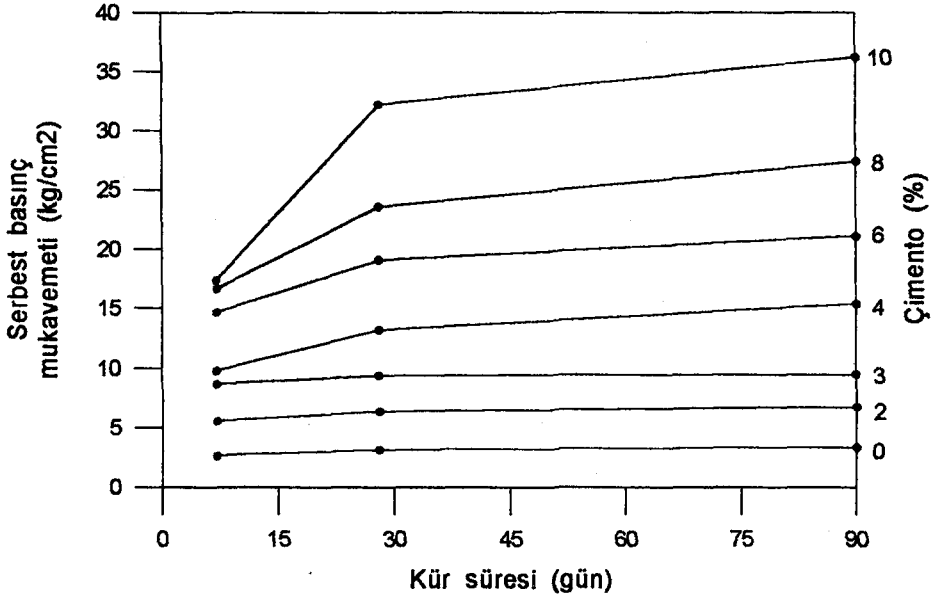
Şekil 5.9. Zemin-çimento-uçucu kül karışımlarında 7 günlük serbest basınç mukavemetleri.



Şekil 5.10. Zemin-çimento-uçucu kül numunelerinin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri.



Şekil 5.11. Zemin-çimento-uçucu kül numunelerinin 90 günlük serbest basınç mukavemetleri.



**Şekil 5.12.** Zemin-çimento karışımlarında serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine göre değişimi.

### 5.3. Temel Malzemesi-Çimento-Uçucu Kül Karışımı Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

#### 5.3.1. Standart Procktor Deneyi ve sonuçları

Üstyapıda, temel tabakasında da çimento stabilizasyonu kullanılmaktadır (Umar ve Ağar, 1985). Bu çalışmada, temel tabakası stabilizasyonunda çimento ile birlikte uçucu külünde kullanılması düşünülmüştür.

Zemin-çimento-uçucu kül karışımları ile yapılan deneyler, bir de taban zemini yerine temel malzemesi

kullanarak tekrarlandı. Her bir karışım için 5 adet olmak üzere 110 adet Standart Procktor numunesi hazırlandı. Her bir temel malzemesi çimento-uçucu kül karışımı için, önce Standart Procktor deneyleri yapılarak, optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tesbit edildi. Bu deneyler önce temel malzemesi - çimento karışımları üzerinde yapıldı. Sonra değişik oranlarda uçucu kül de ilave edilerek tekrarlandı.

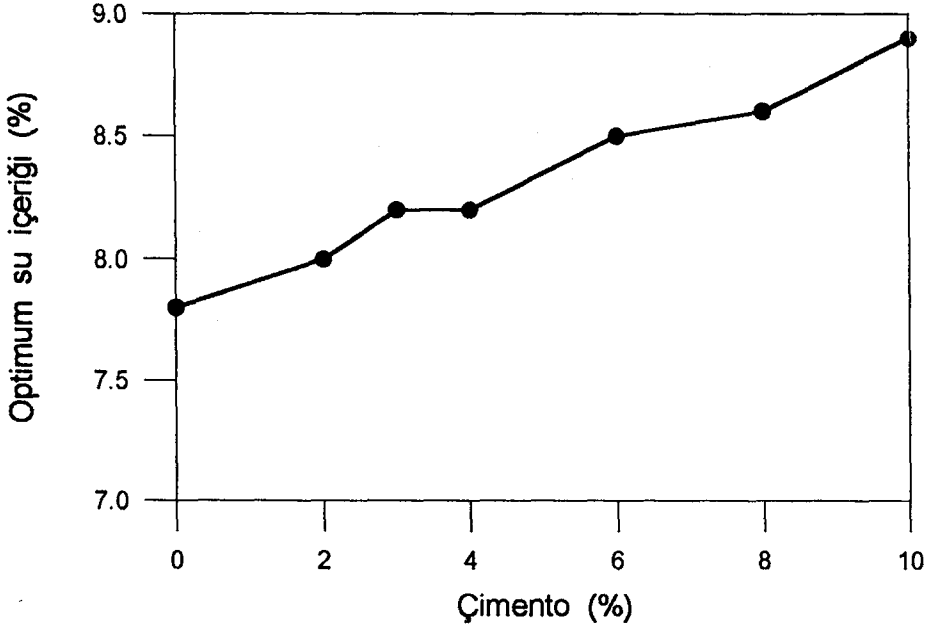
Temel malzemesi-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor deneylerinin sonuçları Tablo-5.5 'de verilmiştir.

Temel malzemesi-çimento karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor deneylerinde, çimento oranı arttıkça optimum su içerikleri da bir miktar artmaktadır (Şekil-5.13). Maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise önce artmakta, %4 çimento oranında maksimuma ulaşmakta, daha yüksek çimento oranlarında ise düşmektedir (Şekil-5.14).

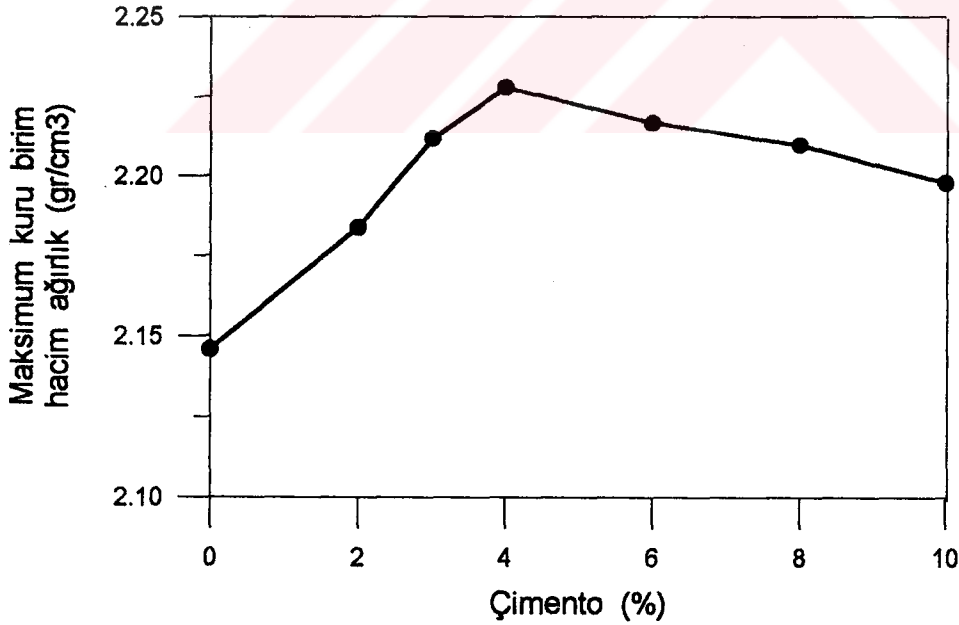
Temel malzemesi-çimento-uçucu kül karışımlarında, Şekil-5.15 ve Şekil-5.16 'de de görüldüğü gibi uçucu kül oranı %0 'dan %15 'e doğru arttıkça, %2, 3 ve 4 çimento oranları için, optimum su içerikleri artmakta, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ise azalmaktadır.

**Tablo 5.5.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor Deneyi sonuçları.

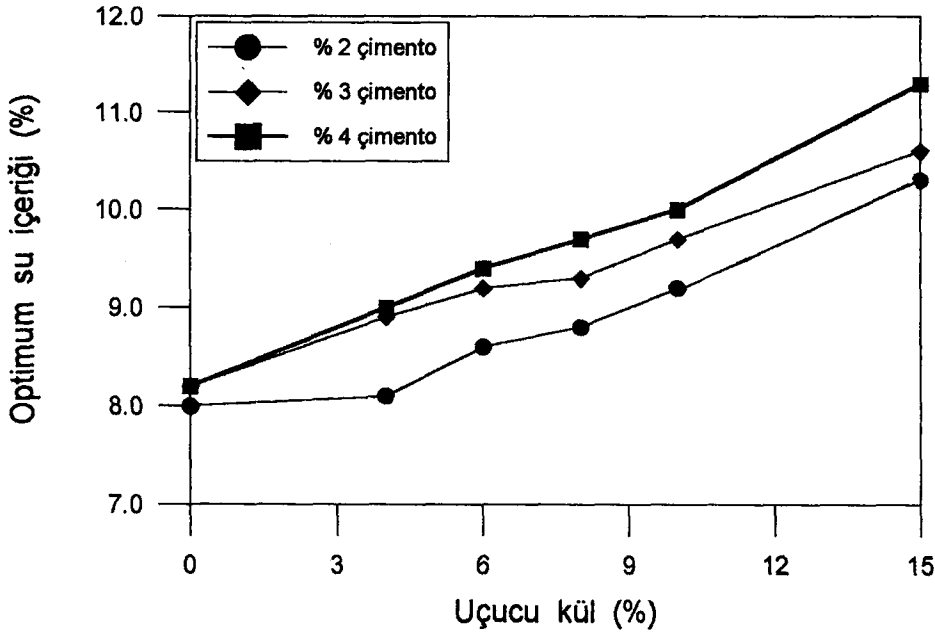
| Karışım oranları<br>ağırlıkça (%) |              | Optimum<br>su<br>içeriği<br>(%) | Maksimum<br>kuru birim<br>hacim ağır-<br>lıkları<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Çimento                           | Uçucu<br>kül |                                 |                                                                           |
| -                                 | -            | 7.8                             | 2.146                                                                     |
| 2                                 | -            | 8.0                             | 2.184                                                                     |
| 3                                 | -            | 8.2                             | 2.212                                                                     |
| 4                                 | -            | 8.2                             | 2.228                                                                     |
| 6                                 | -            | 8.5                             | 2.217                                                                     |
| 8                                 | -            | 8.6                             | 2.210                                                                     |
| 10                                | -            | 8.9                             | 2.198                                                                     |
| 2                                 | 4            | 8.1                             | 2.140                                                                     |
| 2                                 | 6            | 8.6                             | 2.120                                                                     |
| 2                                 | 8            | 8.8                             | 2.107                                                                     |
| 2                                 | 10           | 9.2                             | 2.083                                                                     |
| 2                                 | 15           | 10.3                            | 2.008                                                                     |
| 3                                 | 4            | 8.9                             | 2.149                                                                     |
| 3                                 | 6            | 9.2                             | 2.123                                                                     |
| 3                                 | 8            | 9.3                             | 2.117                                                                     |
| 3                                 | 10           | 9.7                             | 2.089                                                                     |
| 3                                 | 15           | 10.6                            | 2.023                                                                     |
| 4                                 | 4            | 9.0                             | 2.154                                                                     |
| 4                                 | 6            | 9.4                             | 2.142                                                                     |
| 4                                 | 8            | 9.7                             | 2.127                                                                     |
| 4                                 | 10           | 10.0                            | 2.097                                                                     |
| 4                                 | 15           | 11.3                            | 2.033                                                                     |



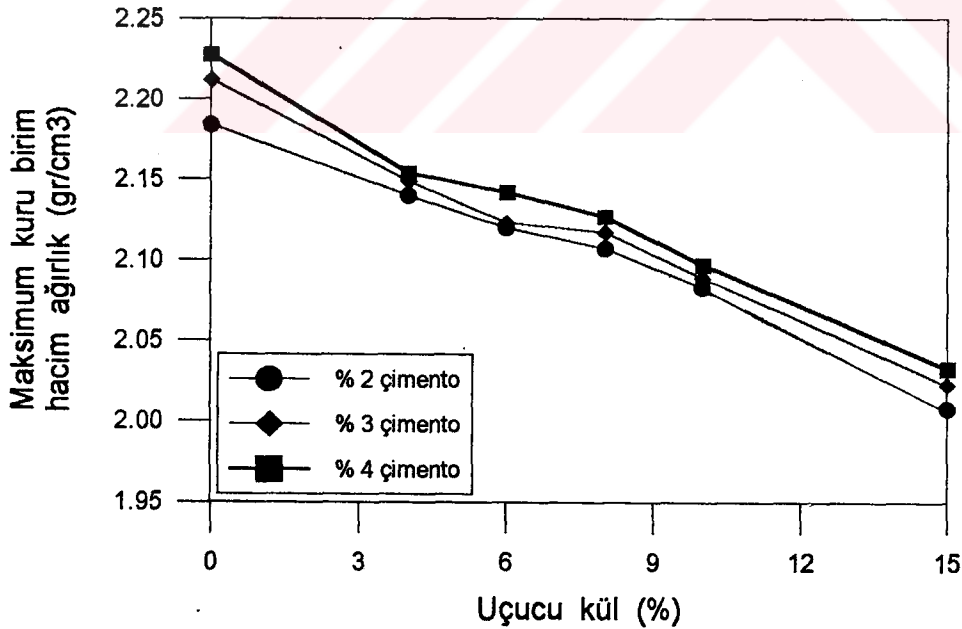
**Şekil 5.13.** Temel malzemesi-çimento karışımlarındaki çimento yüzdesine göre optimum su içeriğinin değişimi.



**Şekil 5.14.** Temel malzemesi-çimento karışımlarındaki çimento yüzdesine göre maksimum kuru birim hacim ağırlığının değişimi.



**Şekil 5.15.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinde uçucu kül ve çimento oranlarına göre optimum su içeriklerinin değişimi.



**Şekil 5.16.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinde uçucu kül ve çimento oranlarına göre maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi.

### 5.3.2. Serbest Basınç Mukavemeti Deneyi ve sonuçları

Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numuneleri üzerinde bir de serbest basınç mukavemeti deneyleri yapıldı. Her bir karışım için 3 adet olmak üzere 132 adet silindir numunesi hazırlandı. Numuneler, 7 ve 28 günlük kürlerde bekletildiler. Her karışım için 3 adet numune hazırlandı. Deney sonunda bulunan üç değerlerin ortalaması alındı.

90 günlük kürler ise, çok uzun zaman alacağından bu karışımlar için, 90 günlük serbest basınç mukavemeti değerleri, hazırlanan ampirik bağıntılarla bulunmuştur. Bu bağıntılar, uçucu külsüz karışımlar için,

$$M_{90t\phi} = 3.9 + e^{(0.35\phi)} + 7.4\phi \quad (2)$$

uçucu küllü karışımlar için ise,

$$M_{90t\phi u} = 15 + e^{(0.3\phi + 0.1u)} + 3.4\phi + 1.2u \quad (3)$$

dur. Oluşturulan bu bağıntılarda çimento ve uçucu kül yüzdeleri, yerine konularak 90 günlük mukavemet değerleri bulunmuştur.

$M_{90t\phi}$ : 90 günlük temel malzemesi-çimento karışımı numunelerin serbest basınç mukavemeti.

$M_{90t\phi u}$ : 90 günlük temel malzemesi-çimento-uçucu kül karışımı numunelerin serbest basınç mukavemeti.

$\phi$ : Karışımdaki çimento yüzdesi.

u:Karişımdaki uçucu kül yüzdesidir.

(2) ve (3) amprık bağıntılarını oluştururken, taban zemini-çimento-uçucu kül karişımları üzerinde yapılmış olan 90 günlük mukavemet deneylerinin sonuçları dikkate alındı. Bu sonuçlara uygun eğriler veren amprık bağıntılar üzerinde çalışılarak, bilgisayarla eğrileri çizildi. En uygun eğriyi veren katsayılar amprık bağıntılarda kullanıldı.

Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan 7 ve 28 günlük kür süreli serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları ve amprık formüllerden bulunan 90 günlük mukavemet değerleri Tablo-5.6 'da verilmiştir.

Temel malzemesi-çimento numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinde çimento oranı %0 ile 10 arasında değiştirildi. Çimento oranı arttıkça serbest basınç mukavemetleri de artmaktadır. 7 günlük numunelere göre, 28 günlük numunelerde ve 28 günlük numunelere göre de 90 günlük numunelerde daha yüksek mukavemetler elde edildi (şekil 5.17.).

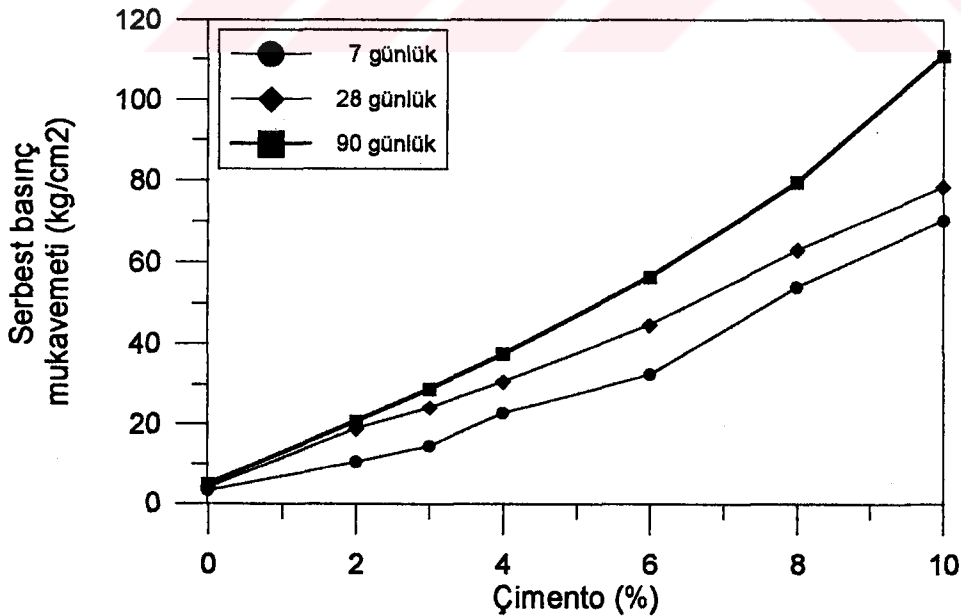
Karişıma uçucu kül de ilave edilerek (%4, 6, 8, 10 ve 15 oranlarında) temel malzemesi-çimento-uçucu kül numuneleri hazırlandı. Bu numunelerdeki çimento oranları ise % 2, 3 ve 4 'dür. Bu numuneler üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneyleri önce 7 günlük daha sonra da 28 günlük numuneler üzerinde yapıldı. 90 günlükler ise, (2) ve (3) bağıntılarından bulundu.

**Tablo 5.6.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan 7 ve 28 günlük kür süreli Serbest Basınç Mukavemeti deneylerinin sonuçları ve 90 günlükler için amprik bağıntıdan bulunan değerler.

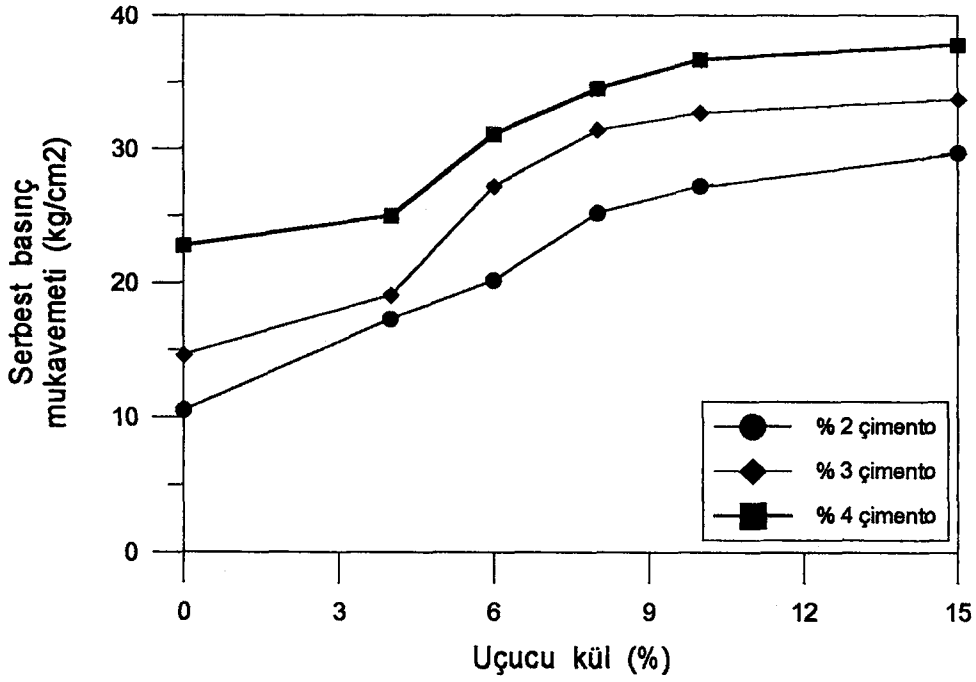
| Karışım oranları<br>ağırlıkça (%) |              | 7 günlük<br>serbest<br>basınç<br>mukavemeti<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 28 günlük<br>serbest<br>basınç<br>mukavemeti<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 90 günlük<br>s.bas.muk<br>Amprik<br>formülünden<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Çimento                           | Uçucu<br>kül |                                                                      |                                                                       |                                                                          |
| -                                 | -            | 3.3                                                                  | 4.1                                                                   | 4.9                                                                      |
| 2                                 | -            | 10.5                                                                 | 18.8                                                                  | 20.7                                                                     |
| 3                                 | -            | 14.6                                                                 | 24.2                                                                  | 28.9                                                                     |
| 4                                 | -            | 22.8                                                                 | 30.6                                                                  | 37.5                                                                     |
| 6                                 | -            | 32.5                                                                 | 44.7                                                                  | 56.5                                                                     |
| 8                                 | -            | 54.0                                                                 | 63.1                                                                  | 79.5                                                                     |
| 10                                | -            | 70.3                                                                 | 78.4                                                                  | 111.0                                                                    |
| 2                                 | 4            | 17.3                                                                 | 24.1                                                                  | 29.3                                                                     |
| 2                                 | 6            | 20.2                                                                 | 27.2                                                                  | 32.3                                                                     |
| 2                                 | 8            | 25.2                                                                 | 28.1                                                                  | 35.5                                                                     |
| 2                                 | 10           | 27.2                                                                 | 29.3                                                                  | 38.8                                                                     |
| 2                                 | 15           | 29.7                                                                 | 32.0                                                                  | 48.0                                                                     |
| 3                                 | 4            | 19.1                                                                 | 29.9                                                                  | 33.7                                                                     |
| 3                                 | 6            | 27.2                                                                 | 32.5                                                                  | 36.9                                                                     |
| 3                                 | 8            | 31.4                                                                 | 36.1                                                                  | 40.3                                                                     |
| 3                                 | 10           | 32.7                                                                 | 38.3                                                                  | 43.9                                                                     |
| 3                                 | 15           | 33.7                                                                 | 41.0                                                                  | 54.2                                                                     |
| 4                                 | 4            | 25.0                                                                 | 37.1                                                                  | 38.4                                                                     |
| 4                                 | 6            | 31.1                                                                 | 38.2                                                                  | 41.8                                                                     |
| 4                                 | 8            | 34.5                                                                 | 40.7                                                                  | 45.6                                                                     |
| 4                                 | 10           | 36.7                                                                 | 41.9                                                                  | 49.6                                                                     |
| 4                                 | 15           | 37.8                                                                 | 43.8                                                                  | 61.5                                                                     |

7, 28 ve 90 günlük numuneler, aynı çimento oranı için, uçucu kül oranı arttıkça daha yüksek basınç mukavemetleri kazanmaktadırlar (Şekil-5.18., 5.19., 5.20.). 28 günlük numunelerde, 7 günlük numunelere göre daha yüksek mukavemetler elde edildi.

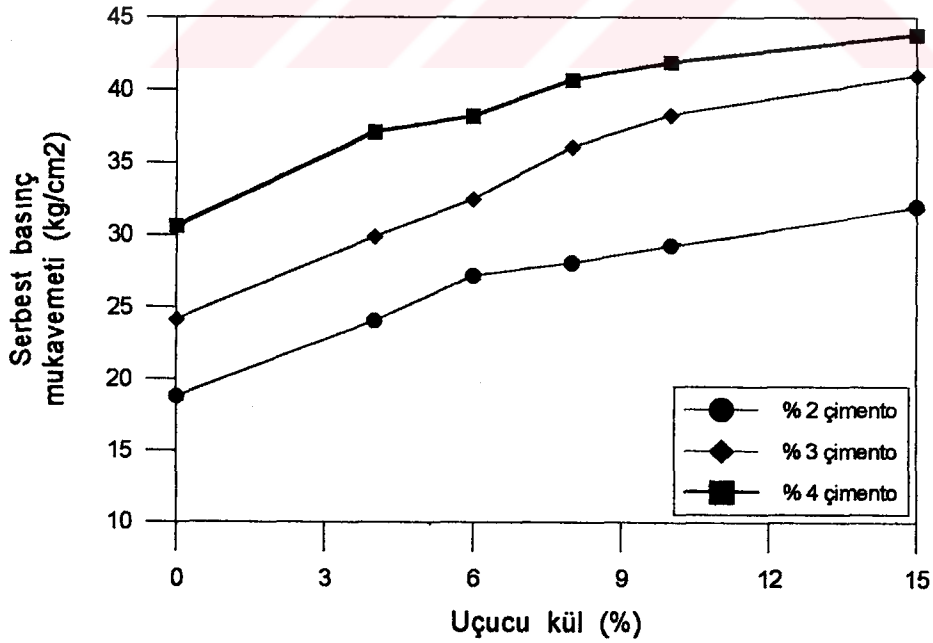
Örnek olarak, 7 günlük numuneler için %3 çimento oranında basınç mukavemeti değeri  $14.6 \text{ kg/cm}^2$  iken, karışıma %4 de uçucu kül ilave edildiğinde bu değer  $19.1 \text{ kg/cm}^2$  ye çıkmaktadır. 28 günlükler için %3 çimento oranında  $24.2 \text{ kg/cm}^2$ , %4 uçucu kül de ilavesiyle  $29.9 \text{ kg/cm}^2$  olmaktadır. 90 günlükler için, %3 çimento oranında  $28.9 \text{ kg/cm}^2$ , %4 uçucu kül de ilavesiyle  $33.7 \text{ kg/cm}^2$  'ye çıkmaktadır. Buna göre uçucu külün temel malzemesi-çimento karışımlarının mukavemetlerini artırdığı saptanmıştır.



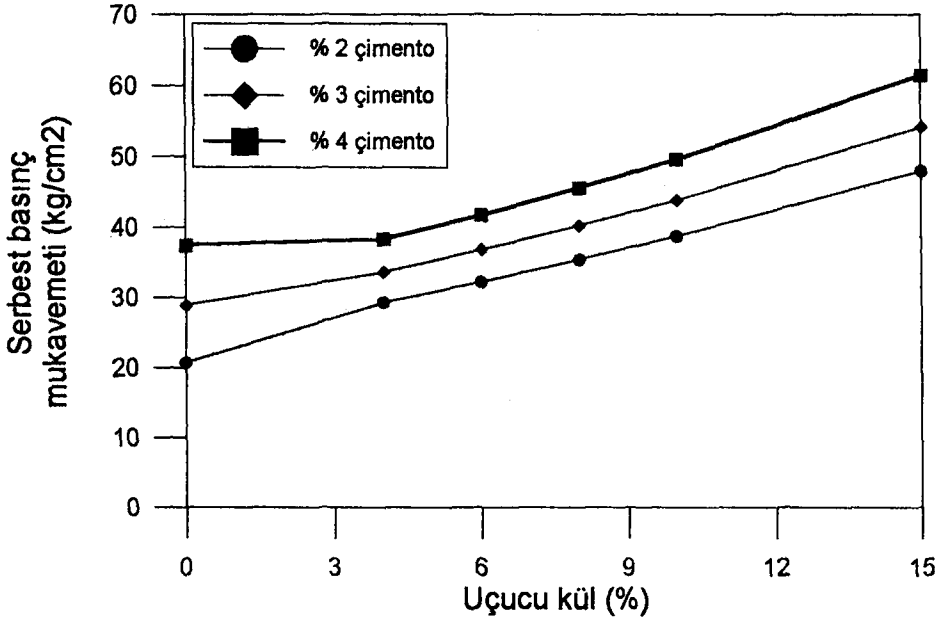
**Şekil 5.17.** Temel malzemesi-çimento numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük serbest basınç mukavemetleri.



Şekil 5.18. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin 7 günlük serbest basınç mukavemetleri.



Şekil 5.19. Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri.



**Şekil 5.20.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin 90 günlük serbest basınç mukavemetleri.

#### 5.4. Zemin-Kireç-Uçucu Kül Karışımı Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

##### 5.4.1. Standart Procktor Deneyi ve sonuçları

Bu karışımlardaki kireç ve uçucu kül yüzdeleri, zemin-çimento-uçucu kül karışımlarına göre değiştirildi. Çimentolu karışımlardaki %2, 3 ve 4 oranları yerine, bu oranları artırarak, kaynaklarda görülen örnekler de dikkate alınarak ve kireçli karışımlarda bu oranların etkili olamayacağı düşünüldüğünden %5, 10 ve 15 oranları seçildi. Her bir karışım için, 5 adet

olmak üzere 65 adet Standart Procktor numunesi hazırlandı.

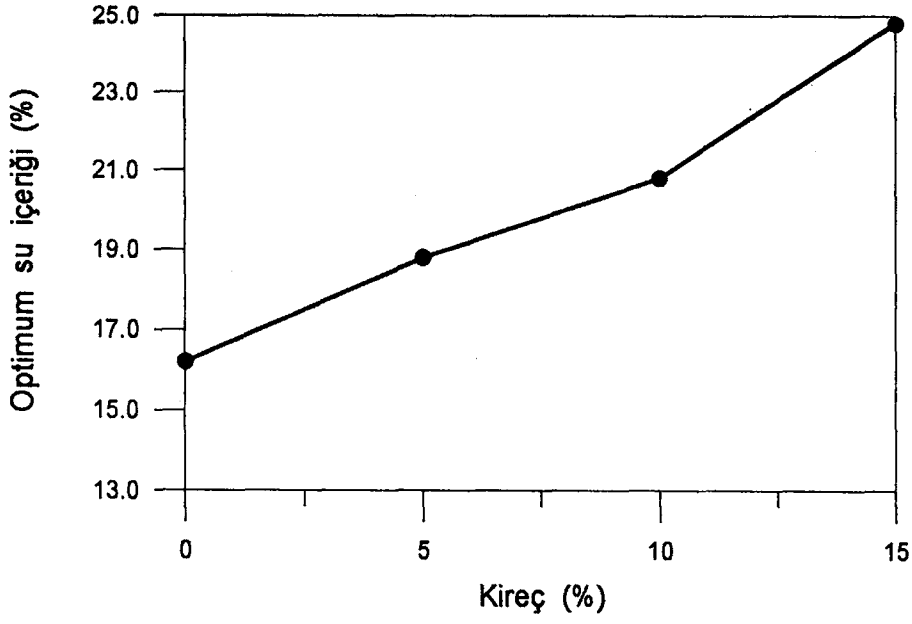
Zemin-çimento-uçucu kül karışımları ile yapılan deneyler, bu defa da çimento yerine değişik oranlarda kireç kullanarak tekrarlandı. Her bir zemin-kireç-uçucu kül karışımı için, önce Standart Procktor deneyleri yapılarak, optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tesbit edildi. Zemin-kireç-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan Standart Procktor deneylerinin sonuçları Tablo-5.7'de verilmiştir.

Uçucu külsüz zemin-kireç karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor deneylerinde, kireç oranı arttıkça optimum su içerikleri de artmaktadır (Şekil-5.21), maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise azalmaktadır (Şekil-5.22).

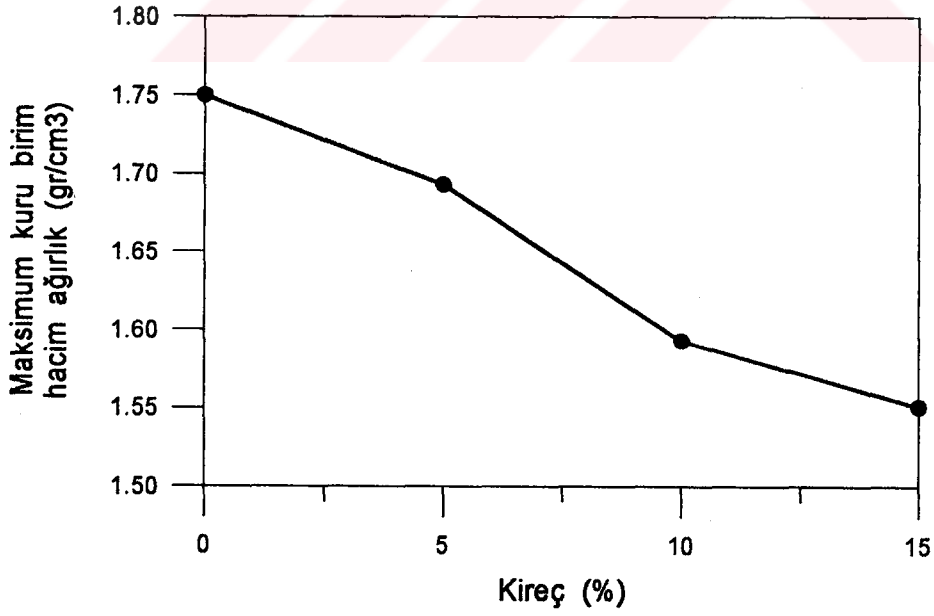
Ayrıca zemin-kireç-uçucu kül karışımlarında, Şekil-5.23'de de görüldüğü gibi uçucu kül oranı %0'dan %15'e doğru arttıkça, %5, 10 ve 15 kireç oranları için, optimum su içerikleri önce bir miktar artmakta %5, 10 uçucu kül oranlarından sonra düşmektedir. Çünkü bu orandan sonra, maksimum kuru birim hacim ağırlığını veren su ihtiyacı azalmaktadır. Bu da daha fazla bağlayıcının filler olarak görev yapması ve boşluk oranını azaltmasına bağlanmaktadır. Uçucu kül oranı arttıkça, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar da azalmaktadır (Şekil-5.24).

**Tablo 5.7.** Zemin-kireç-uçucu kül karışımları üzerinde yapılan Standart Procktor deneylerinin sonuçları.

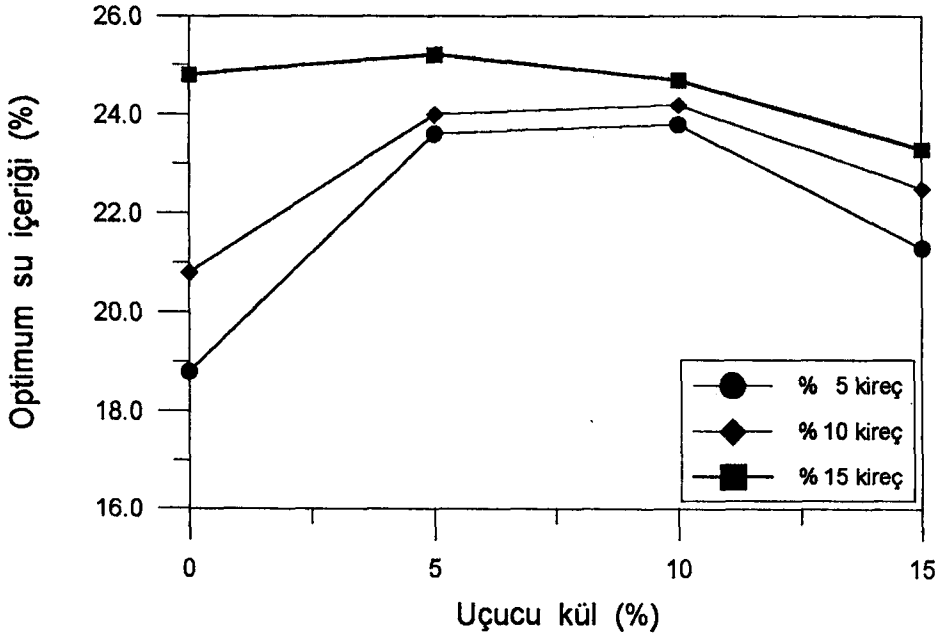
| Karışım oranları<br>ağırlıkça (%) |           | Optimum<br>su<br>içeriği<br>(%) | Maksimum kuru<br>birim hacim<br>ağırlıkları<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|-----------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Kireç                             | Uçucu kül |                                 |                                                                      |
| -                                 | -         | 16.2                            | 1.750                                                                |
| 5                                 | -         | 18.8                            | 1.693                                                                |
| 5                                 | 5         | 23.6                            | 1.611                                                                |
| 5                                 | 10        | 23.8                            | 1.558                                                                |
| 5                                 | 15        | 21.3                            | 1.553                                                                |
| 10                                | -         | 20.8                            | 1.593                                                                |
| 10                                | 5         | 24.0                            | 1.552                                                                |
| 10                                | 10        | 24.2                            | 1.538                                                                |
| 10                                | 15        | 22.5                            | 1.522                                                                |
| 15                                | -         | 24.8                            | 1.551                                                                |
| 15                                | 5         | 25.2                            | 1.520                                                                |
| 15                                | 10        | 24.7                            | 1.491                                                                |
| 15                                | 15        | 23.3                            | 1.465                                                                |



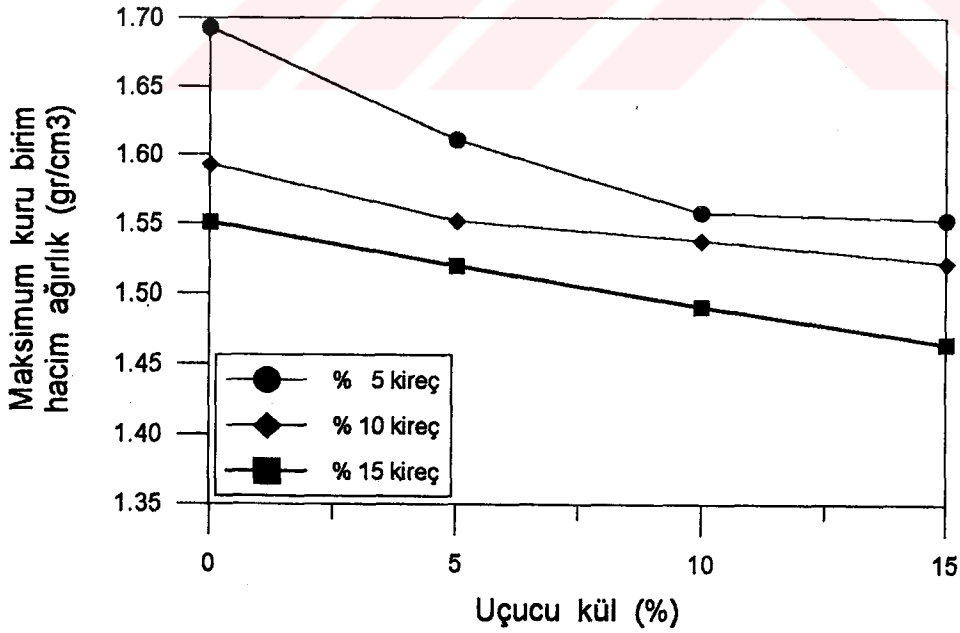
**Şekil 5.21.** Zemin-kireç numunelerinin optimum su içerikleri eğrisi.



**Şekil 5.22.** Zemin-kireç numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları eğrisi.



**Şekil 5.23.** Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinde uçucu kül ve kireç oranlarına göre optimum su içeriklerinin değişimi.



**Şekil 5.24.** Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının uçucu kül ve kireç oranlarına göre değişimi.

#### 5.4.2. Serbest Basınç Mukavemeti Deneyi ve sonuçları

Numuneler 7 ve 28 günlük kürlerde bekletildiler. Her karışım için üç adet numune hazırlandı ve deney sonunda bulunan üç değerın ortalaması alındı. Her bir karışım için 3 adet olmak üzere, 78 adet silindir numunesi hazırlandı.

90 günlük kürler ise, çok uzun zaman alacağından bu karışımlar için, 90 günlük serbest basınç mukavemeti değerleri, hazırlanan amprık bağıntılarla bulunmuştur. Bu bağıntılar, uçucu külsüz karışımlar için,

$$M_{90zk}=2.4+e^{(0.2k)}+k \quad (4)$$

uçucu küllü karışımlar için ise,

$$M_{90zku}=21+e^{(0.1k+0.05u)}+0.7k+0.5u \quad (5)$$

dur. Oluşturulan bu bağıntılarda kireç ve uçucu kül yüzdeleri, yerine konularak 90 günlük mukavemet değerleri bulunmuştur.

$M_{90zk}$ :90 günlük taban zemini-kireç karışımı numunelerin serbest basınç mukavemeti.

$M_{90zku}$ :90 günlük taban zemini-kireç-uçucu kül karışımı numunelerin serbest basınç mukavemeti.

k:Karışımdaki kireç yüzdesi.

u:Karışımdaki uçucu kül yüzdesidir.

Zemin-kireç-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları ve amprik formüllerden bulunan 90 günlük mukavemet değerleri Tablo-5.8 'de verilmiştir.

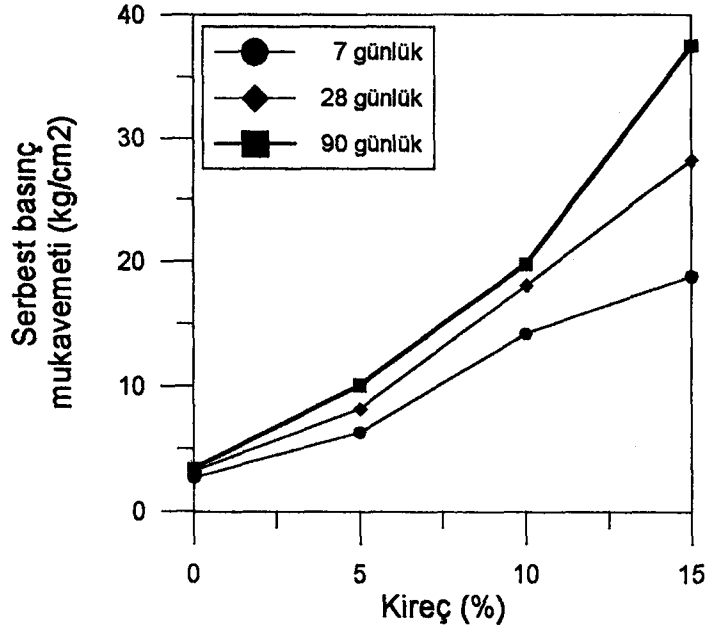
**Tablo 5.8.** Zemin-kireç-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları ve 90 günlükler için amprik formülden bulunan değerler.

| Karışım oranları<br>ağırlıkça (%) |           | 7 günlük<br>serbest<br>basınç<br>mukavemeti<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 28 günlük<br>serbest<br>basınç<br>mukavemeti<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 90 günlük<br>s.bas.muk<br>Amprik<br>formülden<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Kireç                             | Uçucu kül |                                                                      |                                                                       |                                                                        |
| -                                 | -         | 2.7                                                                  | 3.2                                                                   | 3.4                                                                    |
| 5                                 | -         | 6.3                                                                  | 8.2                                                                   | 10.1                                                                   |
| 5                                 | 5         | 20.8                                                                 | 24.6                                                                  | 29.1                                                                   |
| 5                                 | 10        | 25.0                                                                 | 29.2                                                                  | 32.2                                                                   |
| 5                                 | 15        | 18.4                                                                 | 21.4                                                                  | 35.5                                                                   |
| 10                                | -         | 14.2                                                                 | 18.1                                                                  | 19.8                                                                   |
| 10                                | 5         | 24.4                                                                 | 27.0                                                                  | 34.0                                                                   |
| 10                                | 10        | 27.6                                                                 | 31.3                                                                  | 37.5                                                                   |
| 10                                | 15        | 22.3                                                                 | 23.6                                                                  | 41.3                                                                   |
| 15                                | -         | 18.8                                                                 | 28.2                                                                  | 37.5                                                                   |
| 15                                | 5         | 27.6                                                                 | 31.1                                                                  | 39.8                                                                   |
| 15                                | 10        | 28.7                                                                 | 33.3                                                                  | 43.9                                                                   |
| 15                                | 15        | 23.9                                                                 | 24.9                                                                  | 48.5                                                                   |

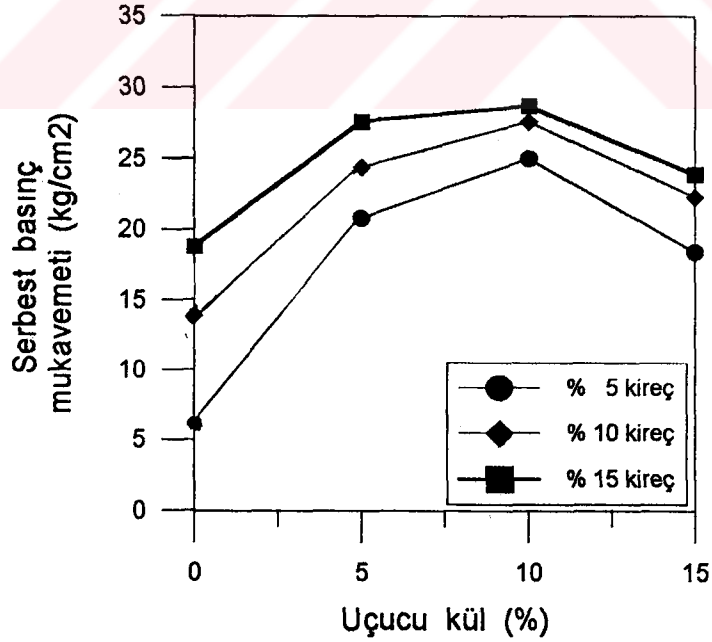
Zemin-kireç numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinde kireç oranı %0 ile 15 arasında alınarak numunelere 7 ve 28 günlük kür süreleri uygulandı. Bu numunelerde kireç oranı arttıkça serbest basınç mukavemetleri de artmaktadır. 7 günlük numunelere göre 28 günlük numunelerde ve 28 günlük numunelere göre de 90 günlük numunelerde daha yüksek mukavemetler elde edildi (Şekil 5.25.).

%5, 10 ve 15 oranlarında uçucu kül de ilave edilerek zemin-kireç-uçucu kül numuneleri hazırlandı. Bu numunelerdeki kireç oranları ise %5, 10 ve 15 'dir. Bu numunelere 7 ve 28 günlük kürlerden sonra serbest basınç mukavemeti deneyleri uygulandı. Aynı kireç oranı için, uçucu kül oranı arttıkça basınç mukavemetleri de artmakta %10 uçucu kül oranından sonra ise azalmaktadır. 28 günlük numunelerde, 7 günlük numunelere göre daha yüksek mukavemetler elde edildi (Şekil-5.26., 5.27). 90 günlük numunelerde ise, aynı kireç oranında uçucu kül oranı arttıkça, serbest basınç mukavemetleri de sürekli artmaktadır (Şekil-5.28).

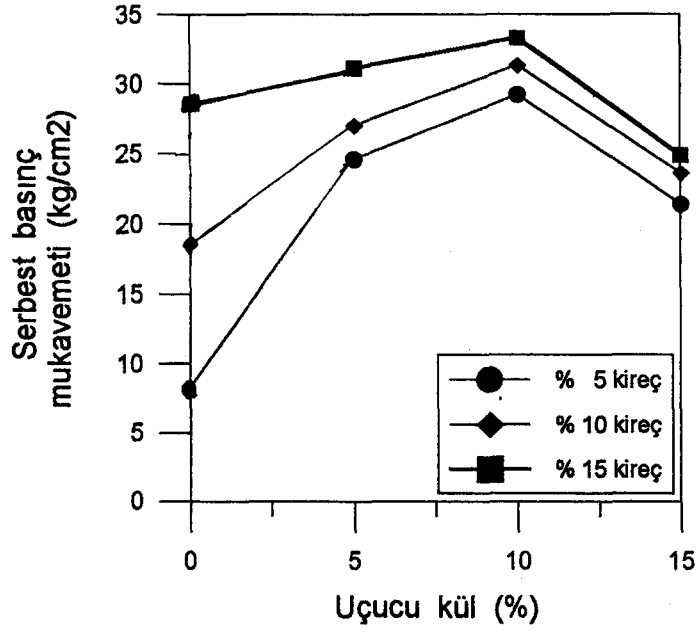
Örnek olarak, %10 kireç oranında mukavemet değeri 7 günlüklerde  $14.2 \text{ kg/cm}^2$  iken, %5 kireç - %5 uçucu kül için basınç mukavemeti  $20.8 \text{ kg/cm}^2$  olarak bulundu. Yalnız %5 kireç için basınç mukavemeti  $6.3 \text{ kg/cm}^2$  iken, karışıma %5'de uçucu kül katıldığında  $20.8 \text{ kg/cm}^2$  olmaktadır. Bunun sonucunda uçucu külün zemin-kireç karışımlarının mukavemetlerini artırdığı görülmektedir.



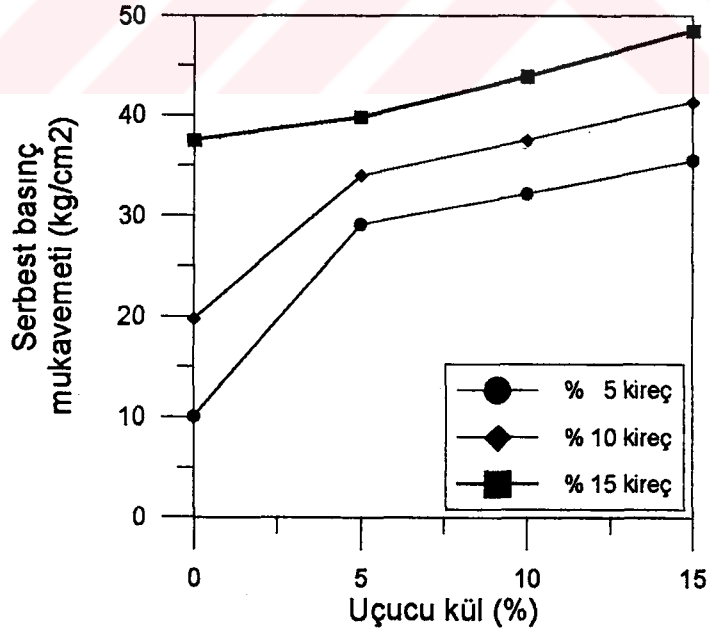
Şekil 5.25. Zemin-kireç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük serbest basınç mukavemetleri.



Şekil 5.26. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin 7 günlük serbest basınç mukavemetleri.



Şekil 5.27. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri.



Şekil 5.28. Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin 90 günlük serbest basınç mukavemetleri.

### 5.5. ıslatma-Kurutma ve Donma-Çözölme Deneyleri ve Sonuçları

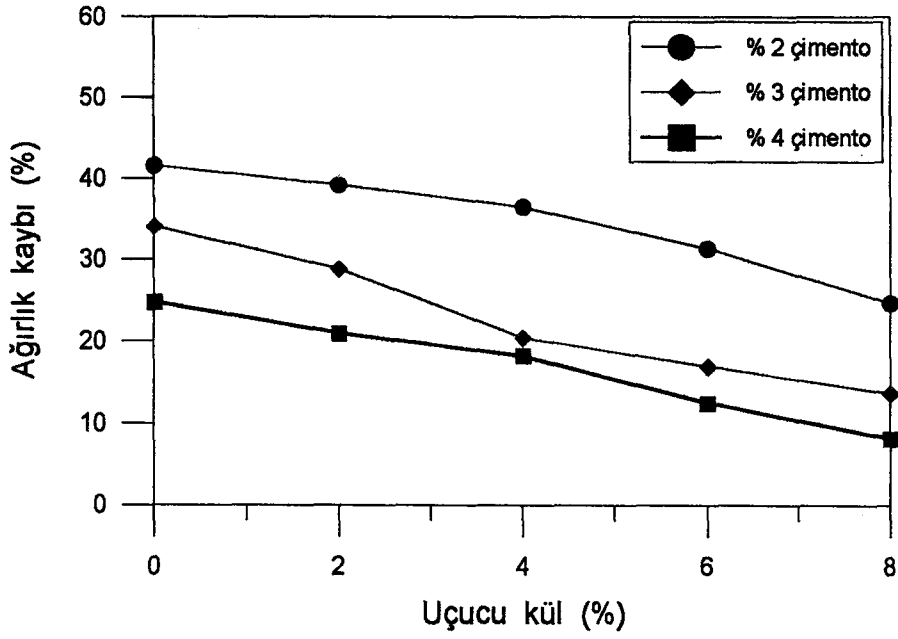
Bu deneylerde, daha önceki deneylerde uygulanmış olan karışım oranlarından bazı ara değerleri çıkartılarak deney sayısı azaltılmaya çalışılmıştır. Bu deneyler için 30 adet silindir numunesi hazırlanmıştır.

Numunelerin rutubet değişimine ve don olayına karşı dayanıklılığını tesbit etmek amacıyla ıslatma-kurutma ve donma-çözölme deneyleri yapıldı. Bunun için zemin-çimento-uçucu kül karışımlı numuneler hazırlandı. Bu numuneler 7 günlük kürlerden sonra 4.Bölüm 'de açıklandığı gibi ıslatma-kurutma ve donma-çözölme deneylerine tabi tutuldular. Önce uçucu külsüz değişik çimento oranlarında deneyler yapıldı. Daha sonra bu karışımlara değişik oranlarda uçucu kül de ilave edildi. Bu numunelere ait deneylerin sonuçları Tablo-5.9 'da verilmiştir.

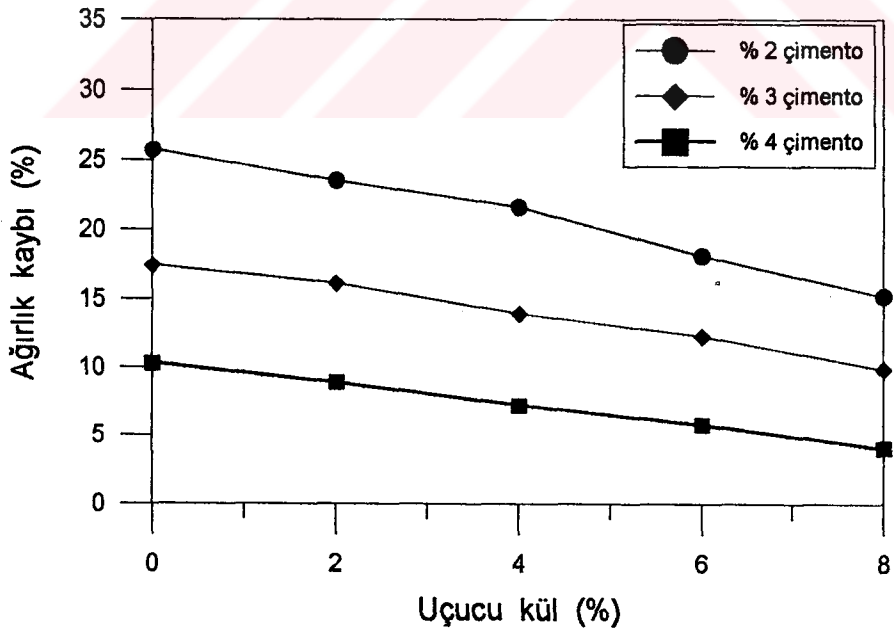
Hem ıslatma-kurutma ve hem de donma-çözölme deneylerinde, uçucu külsüz numunelerden tesbit edilen ağırlık kayıpları büyük değerlere vardığı halde, aynı karışımlara uçucu kül de katılarak tekrarlanan deney numunelerinden tesbit edilen ağırlık kayıplarının önemli oranda azaldığı görüldü (Şekil-5.29. ve 5.30.).

**Tablo 5.9.** Zemin-çimento-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan ıslatma kurutma ve donma-çözülme deneylerinin sonuçları.

| Karışım oranları<br>ağırlıkça (%) |           | Islatma-<br>kurutma<br>ağırlık<br>kaybı<br>(%) | Donma-<br>çözülme<br>ağırlık<br>kaybı<br>(%) |
|-----------------------------------|-----------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Çimento                           | Uçucu kül |                                                |                                              |
| 2                                 | -         | 41.6                                           | 25.7                                         |
| 2                                 | 2         | 39.2                                           | 23.5                                         |
| 2                                 | 4         | 36.5                                           | 21.6                                         |
| 2                                 | 6         | 31.3                                           | 18.1                                         |
| 2                                 | 8         | 24.6                                           | 15.2                                         |
| 3                                 | -         | 34.1                                           | 17.4                                         |
| 3                                 | 2         | 28.8                                           | 16.1                                         |
| 3                                 | 4         | 20.4                                           | 13.9                                         |
| 3                                 | 6         | 16.9                                           | 12.3                                         |
| 3                                 | 8         | 13.7                                           | 9.9                                          |
| 4                                 | -         | 24.7                                           | 10.3                                         |
| 4                                 | 2         | 20.9                                           | 8.9                                          |
| 4                                 | 4         | 18.2                                           | 7.2                                          |
| 4                                 | 6         | 12.5                                           | 5.8                                          |
| 4                                 | 8         | 8.2                                            | 4.1                                          |



Şekil 5.29. Islatma-kurutma deneyinde değişik uçucu kül ve çimento oranlarına göre ağırlık kayıpları.



Şekil 5.30. Donma-çözülme deneyinde değişik uçucu kül ve çimento oranlarına göre ağırlık kayıpları.

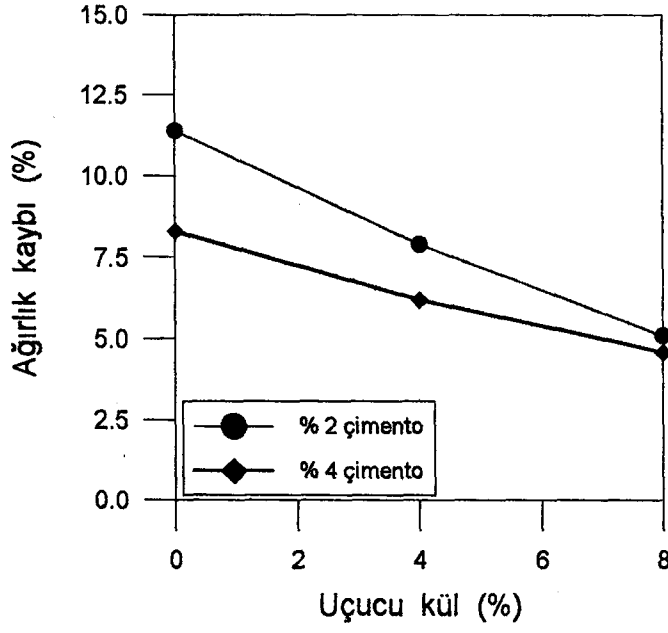
Islatma-kurutma ve donma-çözülme deneyleri için bir de zemin yerine temel malzemesi kullanarak temel malzemesi-çimento-uçucu kül karışıklı numuneler hazırlandı. Bu numunelere ait deneylerin sonuçları Tablo-5.10 'da verilmiştir. Bu deneyler için 30 adet silindir numunesi hazırlanmıştır.

Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerinde, uçucu kül ile yapılan numunelerdeki ağırlık kayıplarının uçucu külsüz numunelerdeki ağırlık kayıplarına göre daha az olduğu görülmüştür (Şekil-5.31. ve 5.32.). Bu deneylerin sonunda bu numunelerin serbest basınç mukavemetleri de tesbit edilmiştir. %4 çimento oranında, Tablo-5.6.'da 28 günlük mukavemet değeri  $30.6 \text{ kg/cm}^2$  iken, ıslatma-kurutma deneyinden sonra bu değer Tablo-5.10.'da  $23.4 \text{ kg/cm}^2$  ye düşmüştür. Mukavemet kaybı %23.5'dur. %4 çimento ve %4 uçucu kül için, Tablo-5.6.'da 28 günlük mukavemet  $37.1 \text{ kg/cm}^2$  iken, ıslatma-kurutma deneyinden sonra ise bu değer Tablo-5.10.'da  $32.5 \text{ kg/cm}^2$  'ye düşmüştür. Mukavemet kaybı ise, %12.4 olmuştur. Buna göre özellikle uçucu küllü numunelerin bu deneylerden fazla etkilenmediği görülmüştür (Şekil-5.33. ve 5.34.).

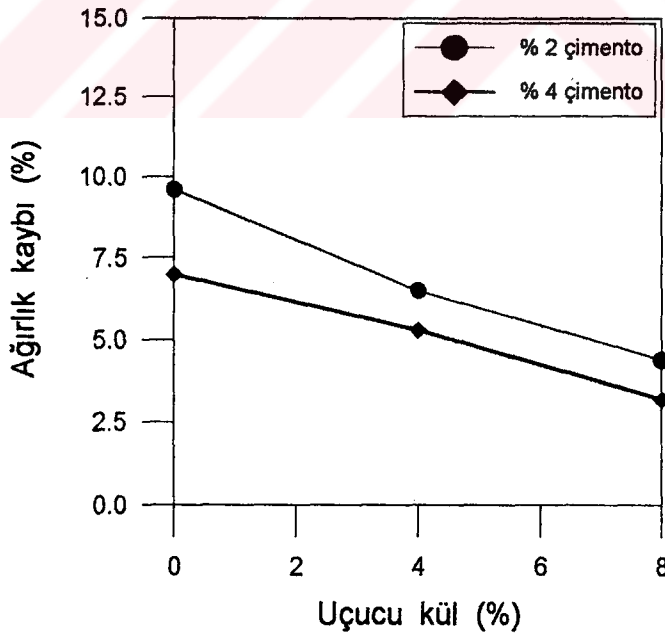
**Tablo 5.10.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerin sonuçları ve deneylerin sonunda numunelerin basınç mukavemeti değerleri.

| Karışım oranları<br>ağırlıkça (%) |           | Islatma Kurutma   |                                             | Donma Çözülme     |                                             |
|-----------------------------------|-----------|-------------------|---------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------|
| Çimento                           | Uçucu kül | Ağırlık kaybı (%) | Basınç mukavemeti (kg/cm <sup>2</sup> ) (*) | Ağırlık kaybı (%) | Basınç mukavemeti (kg/cm <sup>2</sup> ) (*) |
| 2                                 | -         | 11.4              | 11.9                                        | 9.6               | 13.1                                        |
| 2                                 | 2         | 9.7               | 18.1                                        | 8.1               | 15.5                                        |
| 2                                 | 4         | 7.9               | 24.3                                        | 6.5               | 17.8                                        |
| 2                                 | 6         | 6.5               | 27.6                                        | 5.5               | 19.9                                        |
| 2                                 | 8         | 5.1               | 30.9                                        | 4.4               | 21.9                                        |
| 3                                 | -         | 9.9               | 17.7                                        | 8.3               | 17.4                                        |
| 3                                 | 2         | 8.5               | 23.1                                        | 7.2               | 19.3                                        |
| 3                                 | 4         | 7.1               | 28.4                                        | 5.9               | 21.1                                        |
| 3                                 | 6         | 6.0               | 31.9                                        | 4.9               | 23.2                                        |
| 3                                 | 8         | 4.9               | 35.3                                        | 3.8               | 25.1                                        |
| 4                                 | -         | 8.3               | 23.4                                        | 7.0               | 21.6                                        |
| 4                                 | 2         | 7.3               | 28.0                                        | 6.2               | 23.0                                        |
| 4                                 | 4         | 6.2               | 32.5                                        | 5.3               | 24.4                                        |
| 4                                 | 6         | 5.4               | 36.1                                        | 4.3               | 26.4                                        |
| 4                                 | 8         | 4.6               | 39.6                                        | 3.2               | 28.3                                        |

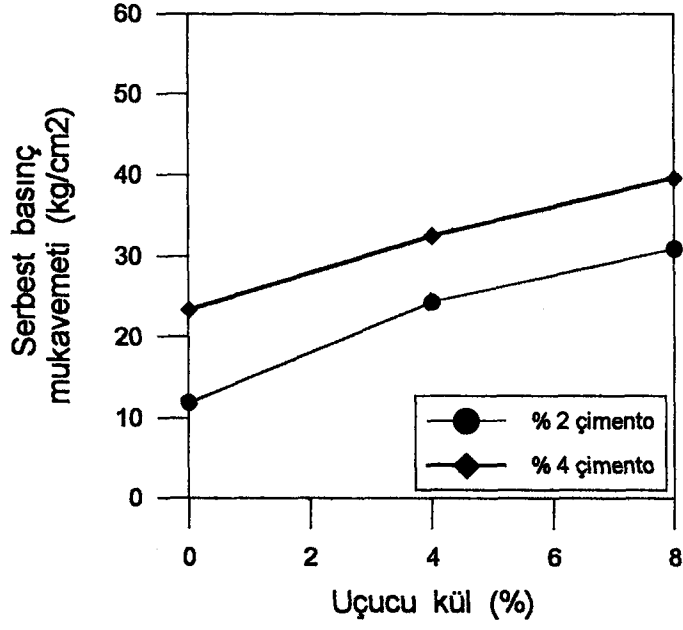
(\*) 7 günlük kürden sonra numuneler, 12 ıslatma-kurutma ve 12 donma-çözülme periyotlarına tabi tutulmuşlardır. Bu deneylerin sonunda (numuneler 31 günlük olduklarında), basınç mukavemeti deneyi uygulanmıştır.



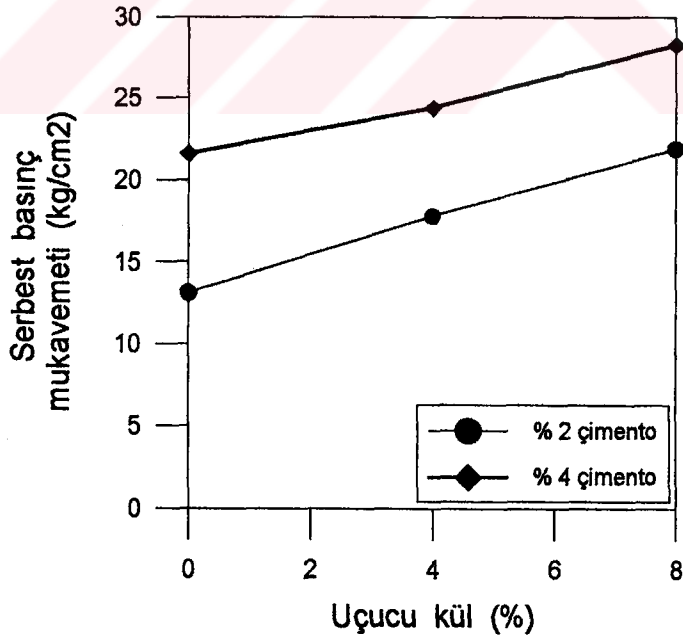
**Şekil 5.31.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin ıslatma-kurutma deneyinde değişik uçucu kül ve çimento oranlarına göre ağırlık kayıpları.



**Şekil 5.32.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin donma-çözülme deneyinde değişik uçucu kül ve çimento oranlarına göre ağırlık kayıpları.



**Şekil 5.33.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin ıslatma-kurutma deneyinden sonra serbest basınç mukavemetleri.



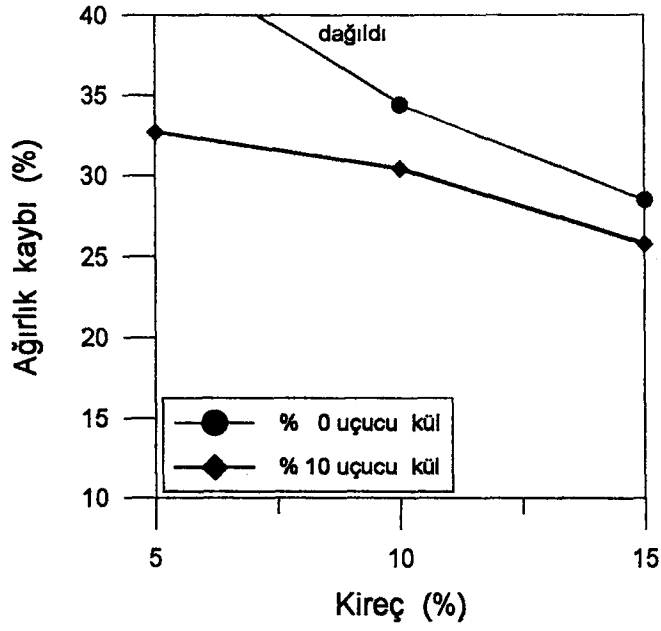
**Şekil 5.34.** Temel malzemesi-çimento-uçucu kül numunelerinin donma-çözülme deneyinden sonra serbest basınç mukavemetleri.

Zemin-kireç-uçucu kül numuneleri üzerinde de ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneyleri yapıldı. Bu numunelere ait deneylerin sonuçları Tablo-5.11 'de verilmiştir. Bu deneyler için 18 adet numune hazırlanmıştır.

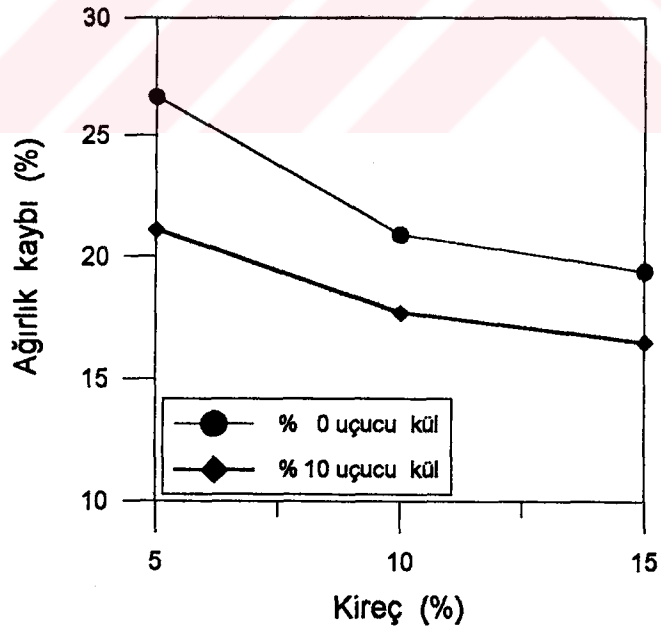
Zemin-kireç-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerinde, uçucu külsüz numunelere göre uçucu küllü numunelerin ağırlık kayıplarının daha az olduğu tesbit edilmiştir (Şekil-5.35. ve 5.36.).

**Tablo 5.11.** Zemin-kireç-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerinin sonuçları.

| Karışım oranları<br>ağırlıkça (%) |              | Islatma<br>Kurutma      | Donma<br>Çözülme        |
|-----------------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| Kireç                             | Uçucu<br>kül | Ağırlık<br>kaybı<br>(%) | Ağırlık<br>kaybı<br>(%) |
| 5                                 | -            | dağıldı                 | 26.6                    |
| 5                                 | 5            | 39.1                    | 23.9                    |
| 5                                 | 10           | 32.7                    | 21.1                    |
| 10                                | -            | 34.4                    | 20.9                    |
| 10                                | 5            | 32.4                    | 19.3                    |
| 10                                | 10           | 30.4                    | 17.7                    |
| 15                                | -            | 28.5                    | 19.4                    |
| 15                                | 5            | 27.2                    | 18.0                    |
| 15                                | 10           | 25.8                    | 16.5                    |



**Şekil 5.35.** Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin ıslatma-kurutma deneyinde değişik uçucu kül ve kireç oranlarına göre ağırlık kayıpları.



**Şekil 5.36.** Zemin-kireç-uçucu kül numunelerinin donma-çözülme deneyinde değişik uçucu kül ve kireç oranlarına göre ağırlık kayıpları.

## **6. EKONOMİK ETÜD**

Ülkemizdeki termik santrallardan artık ürün olarak elde edilen uçucu külün, çok büyük bir kısmı ya da tamamı değerlendirilememekte, işletme sahasında ve yakınlarında depolanarak, ileride değerlendirilebilecek olan alanlar, uçucu kül ile doldurulmak suretiyle çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu konuda gerekli önlemler alınmazsa, ileride işletmelerde daha büyük problemler çıkabilecektir. Bu durumda uçucu külün değerlendirilmesi, yalnız işletmeler açısından değil, ülkenin genel çıkarları açısından da gereklidir.

Uçucu külün yol stabilizasyonunda kullanılabilirliği ile ilgili teknik etüd ve sonuçları bir önceki bölümde açıklanmıştı. Bunun yanında bu kullanılabilirliğin ekonomik yönden de incelenmesi gereklidir.

### **6.1. Taban Zemini-Çimento-Uçucu Kül Karışımlarının Maliyetlerinin Karşılaştırılması**

Çalışmaya eklenmiş olan bu ekonomik etüd hesabında basit bir Doğrusal Matematik Model kullanılmıştır. Malzeme temini, maliyetleri, nakliye bedelleri dikkate alınarak yol stabilizasyonunun inşaa maliyetini en az yapacak çözüm aranmıştır. Burada örnek olarak, taban

zemini-çimento-uçucu kül karışımlarında aynı mukavemet değerleri elde edilmiş iki değişik karışımın maliyetleri karşılaştırılmıştır. Bu karışımlar:1-Kül yüzdesi:%8 ve Çimento yüzdesi:%3, 2-Kül yüzdesi:%0 ve Çimento yüzdesi:%8 'dir. Bütün denenmiş olan karışım oranlarında da bu ekonomik incelemeyi yapmak mümkündür. Ancak önemli olan, uygulanabilir oranların dikkate alınmasıdır. Taban zemini stabilizasyonunun kalınlığı 15 cm olarak alınmıştır.

Örnekte kullanılan simgeler:

- Z : Genel maliyet (TL).
- C : 1 ton uçucu külün termik santraldan temin edilme maliyeti (TL/ton).
- A : 1 ton uçucu külün termik santraldan 1996 yılında satın alma bedeli (TL/ton).
- F1: 1 ton uçucu külün santraldan şantiyeye taşıma bedeli (TL/ton).
- P : 1 m<sup>2</sup> stabilizasyonu oluşturan karışımın ağırlığı (ton/m<sup>2</sup> ).
- V : 1 m<sup>2</sup> stabilizasyonu oluşturan karışımın hacmi (m<sup>3</sup>).
- $\gamma$  : Karışımın yoğunluğu (ton/m<sup>3</sup>).
- d : Stabilizasyonun kalınlığı (m).
- D : 1 ton çimentonun fabrikadan temin edilme maliyeti (TL/ton).
- B : 1 ton çimentonun çimento fabrikasından 1996 yılında satın alma bedeli (TL/ton).
- F2: 1 ton çimentonun fabrikadan şantiyeye taşıma bedeli (TL/ton).

KY: Karışımdaki uçucu kül yüzdesi (%).

CY: Karışımdaki çimento yüzdesi (%).

$$Z = C \times P \times KY + D \times P \times CY \quad (6)$$

$$C = A + F1$$

$$P = V \times \gamma$$

$$V = 1 \times 1 \times d$$

$$D = B + F2$$

Sayısal Örnek :

Bir karayolu inşaatında, stabilizasyonda kullanılmak üzere gerekli olan uçucu külün termik santraldan ve çimentonun fabrikadan temin edilmesi için gerekli bağlayıcının en düşük maliyetle sağlandığı şantiye-termik santral ve şantiye-çimento fabrikası mesafeleri istenmektedir.

Örnek Çözüm :

Taşıma bedeli T.C. Karayolları 'nın kullandığı formülden hesaplandı. 1996 birim fiyatları esas alındı.

$K=3\ 100\ 000$   $M$  ; km cinsinden alınacak.

$$0 \leq M \leq 10 \text{ km} \Rightarrow F = 1.25 \times 0.00017 \times K \times \sqrt{M} \text{ TL/ton} \quad (7)$$

$$M > 10 \text{ km} \Rightarrow F = 1.25 \times K \times (0.0007 \times M + 0.01) \text{ TL/ton} \quad (8)$$

$$y = M_{\text{ç.fab.}} = 20 \text{ km} > 10 \text{ km}$$

$$Z_1: KY = \%8$$

$$Z_2: KY = \%0$$

$$X = M_{\text{sant.}} = 230 \text{ km} > 10 \text{ km}$$

$$CY = \%3$$

$$CY = \%8$$

$$A = 158\,000 \text{ TL/ton}$$

$$\gamma = 2 \text{ ton/m}^3$$

$$B = 3\,162\,000 \text{ TL/ton}$$

$$d = 0.15 \text{ m}$$

$$F1 = 1.25 \times 3100000 \times (0.0007 \times 230 + 0.01) = 662\,625 \text{ TL/ton}$$

$$C = A + F1 = 158000 + 662625 = 820\,625 \text{ TL/ton}$$

$$V = 1 \times 1 \times 0.15 = 0.15 \text{ m}^3$$

$$P = V \times \gamma = 0.15 \times 2 = 0.3 \text{ ton/m}^2$$

$$F2 = 1.25 \times 3100000 \times (0.0007 \times 20 + 0.01) = 93\,000 \text{ TL/ton}$$

$$D = B + F2 = 3162000 + 93000 = 3\,255\,000 \text{ TL/ton}$$

$$Z = C \times P \times KY + D \times P \times CY$$

$$Z_1 = 820625 \times 0.3 \times 0.08 + 3255000 \times 0.3 \times 0.03 = 48\,990 \text{ TL/m}^2$$

$$Z_2 = 3255000 \times 0.3 \times 0.08 = 78\,120 \text{ TL/m}^2$$

$$Z_1/Z_2 = \%62.7$$

100-62.7 = \%37.3 maliyetten tasarruf olmaktadır.

Miktar olarak da çimentodan  $8-3=5$  ,  $5/8 = \%62.5$

tasarruf sağlanmaktadır.

Aynı Malzeme Maliyetlerini Veren Eşdeğer Mesafelerin Hesabı :

$$a) \quad X > 10 \text{ km}$$

$$0 \leq y \leq 10 \text{ km}$$

$$F1 = 1.25 \times 3100000 \times (0.0007 \times X + 0.01) = 2712.5X + 38750$$

$$C = A + F1 = 158000 + 2712.5X + 38750 = 196750 + 2712.5X$$

$$F2 = 1.25 \times 0.00017 \times 3100000 \times \sqrt{y} = 658.75\sqrt{y}$$

$$D = B + F2 = 3162000 + 658.75\sqrt{y}$$

$$Z = C \times P \times KY + D \times P \times CY$$

$$Z_1 = (196750 + 2712.5X) \times 0.3 \times 0.08$$

$$+ (3162000 + 658.75\sqrt{y}) \times 0.3 \times 0.03$$

$$Z_1 = 33180 + 65.1X + 5.93\sqrt{y}$$

$$Z_2 = (3162000 + 658.75\sqrt{y}) \times 0.3 \times 0.08 = 75888 + 15.81\sqrt{y}$$

$$Z_1 = Z_2 \quad \Rightarrow \quad 33180 + 65.1X + 5.93\sqrt{y} = 75888 + 15.81\sqrt{y}$$

$$y = (6.59X - 4323)^2$$

-----

$$y = 0 \text{ km} \quad \Rightarrow \quad X = 656.0 \text{ km}$$

$$y = 5 \text{ km} \quad \Rightarrow \quad X = 656.3 \text{ km}$$

$$y = 10 \text{ km} \quad \Rightarrow \quad X = 656.5 \text{ km}$$

$$b) \quad X > 10 \text{ km}$$

$$y > 10 \text{ km}$$

$$F1 = 1.25 \times 3100000 \times (0.0007 \times X + 0.01) = 2712.5X + 38750$$

$$F2 = 1.25 \times 3100000 \times (0.0007 \times y + 0.01) = 2712.5y + 38750$$

$$C = A + F1 = 158000 + 2712.5X + 38750 = 196750 + 2712.5X$$

$$D = B + F2 = 3162000 + 2712.5y + 38750 = 3200750 + 2712.5y$$

$$Z = C \times P \times KY + D \times P \times CY$$

$$Z_1 = (196750 + 2712.5X) \times 0.3 \times 0.08 + (3200750 + 2712.5y) \times 0.3 \times 0.03$$

$$Z_1 = 33528.8 + 65.1X + 24.4y$$

$$Z_2 = (3200750 + 2712.5y) \times 0.3 \times 0.08 = 76818 + 65.1y$$

$$Z_1 = Z_2 \quad \Rightarrow \quad 33528.8 + 65.1X + 24.4y = 76818 + 65.1y$$

$$y = 1.6X - 1063.6$$

$$y = 10 \text{ km} \quad \Rightarrow \quad X = 671.0 \text{ km}$$

$$y = 50 \text{ km} \quad \Rightarrow \quad X = 696.0 \text{ km}$$

$$y = 100 \text{ km} \quad \Rightarrow \quad X = 727.3 \text{ km}$$

$$y = 150 \text{ km} \quad \Rightarrow \quad X = 758.5 \text{ km}$$

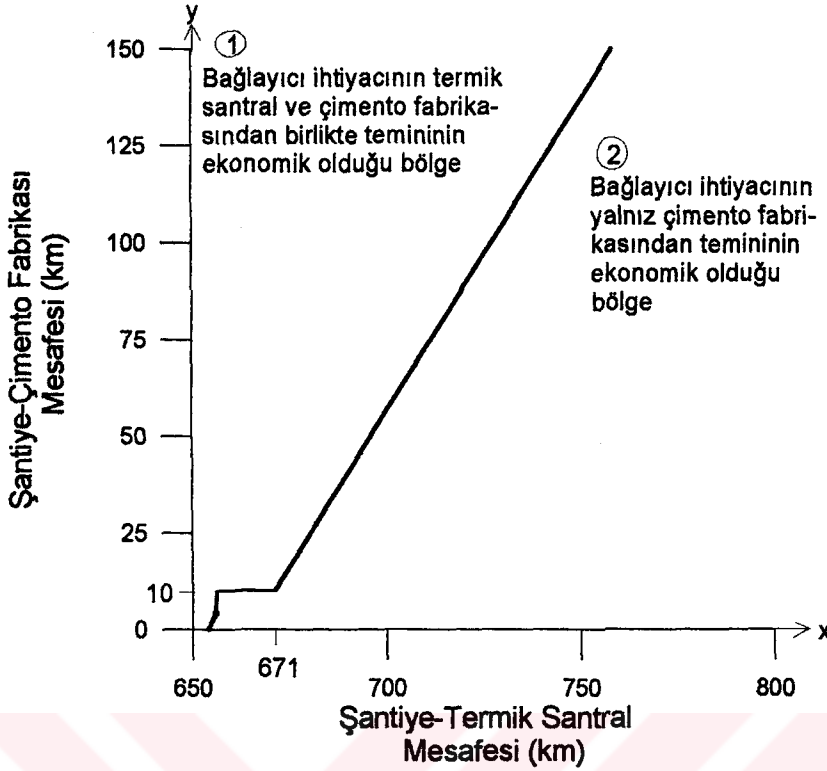
Sonuçların Değerlendirilmesi :

Aynı malzeme maliyetini veren eşdeğer şantiye-çimento fabrikası ve şantiye-termik santral mesafeleri Tablo 6.1. 'de verilmiştir.

**Tablo 6.1.** Aynı malzeme maliyetini veren eşdeğer şantiye-çimento fabrikası ve şantiye-termik santral mesafeleri.

| (y)<br>Şantiye-çimento<br>fabrikası<br>mesafesi (km)<br>(min) | (X)<br>Şantiye-termik<br>santral<br>mesafesi (km)<br>(maks) |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $0 \leq y \leq 10$ km                                         | $X > 10$ km                                                 |
| 0                                                             | 656.0                                                       |
| 5                                                             | 656.3                                                       |
| 10                                                            | 656.5                                                       |
| $y > 10$ km                                                   | $X > 10$ km                                                 |
| 10                                                            | 671.0                                                       |
| 50                                                            | 696.0                                                       |
| 100                                                           | 727.3                                                       |
| 150                                                           | 758.5                                                       |

Problemin çözümünden, şantiye ihtiyaçlarının, şantiyelere hangi uzaklıklardaki termik santral (X) veya çimento fabrikasından (y) temininin ekonomik olduğu bölgeler tesbit edilerek Şekil 6.1. 'de verilmiştir.



**Şekil 6.1.** Aynı malzeme maliyetini veren eşdeğer şantiye-çimento fabrikası ve şantiye-termik santral mesafeleri.

Şantiye-çimento fabrikası mesafesi 0 km olsa bile, şantiye-termik santral mesafesi 656.0 km'ye kadar ekonomik olmaktadır.

Uçucu küllü ve uçucu külsüz karışım maliyetlerini eşit kılan, şantiye-çimento fabrikası ve şantiye-termik santral mesafeleri ilişkisi parabol ve doğrudan oluşmaktadır. Şantiye-çimento fabrikası mesafelerinin 0-10 km değerleri arasında, karayolu nakliye bedeli, mesafenin karekökü ile orantılı olduğundan bu aralıkta ilişki  $y=(6.59X-4323)^2$  şeklinde bir parabol olarak bulunmuştur. 10 km 'den büyük şantiye-çimento fabrikası

mesafeleri için, karayolları nakliye bedeli, doğrudan mesafe ile orantılı olduğundan bu aralıktaki şantiye-çimento fabrikası, şantiye-termik santral mesafeleri arasındaki ilişki  $y=1.6X-1063.6$  şeklinde doğru denklemi ile hesaplanmıştır.

## 6.2. Taban Zemini-Kireç-Uçucu Kül Karışımlarının Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Maliyet hesabı, taban zemini-kireç-uçucu kül karışımları için de yapıldı. Birinci karışım %5 uçucu kül ve %10 kireç, ikinci karışım %0 uçucu kül ve %15 kireç alınarak, birbirine yakın mukavemet değerlerinin elde edildiği bu karışımların maliyet karşılaştırmaları aşağıda yapılmıştır. Stabilizasyonun kalınlığı 15 cm alınmıştır.

Kullanılan simgeler:

$y=M_{\text{kireç}}$  : Şantiye-kireç ocağı mesafesi (km).

KİY : Karışımdaki kireç yüzdesi (%).

KF : 1 ton kirecin satın alma bedeli (TL/ton).

F3 : 1 ton kirecin kireç ocağından şantiyeye taşıma bedeli (TL/ton).

KM : 1 ton kirecin temin edilme maliyeti (TL/ton).

$$y=M_{\text{kireç}}=20\text{km}>10\text{km}$$

$$Z1 : KY=\% 5$$

$$Z2 : KY=\% 0$$

$$X=M_{\text{sant.}}=230\text{km}>10\text{km}$$

$$KİY=\%10$$

$$KİY=\%15$$

$$A= 158\ 000\ \text{TL/ton}$$

$$\gamma=2\ \text{ton/m}^3$$

$$KF=3\ 400\ 000\ \text{TL/ton}$$

$$d=0.15\ \text{m}$$

$$F1=1.25 \times 3100000 \times (0.0007 \times 230 + 0.01) = 662\ 625\ \text{TL/ton}$$

$$C=A+F1=158000+662625= 820\ 625\ \text{TL/ton}$$

$$V=1 \times 1 \times 0.15 = 0.15\ \text{m}^3$$

$$P=V \times \gamma = 0.15 \times 2 = 0.3\ \text{ton/m}^2$$

$$F3=1.25 \times 3100000 \times (0.0007 \times 20 + 0.01) = 93\ 000\ \text{TL/ton}$$

$$KM=KF+F3=3400000+93000= 3\ 493\ 000\ \text{TL/ton}$$

$$Z = C \times P \times KY + KM \times P \times KİY$$

$$Z1=820625 \times 0.3 \times 0.05 + 3493000 \times 0.3 \times 0.10 = 117\ 099\ \text{TL/m}^2$$

$$Z2=3493000 \times 0.3 \times 0.15 = 157\ 185\ \text{TL/m}^2$$

$$Z1/Z2 = \% 74.5$$

$$100-74.5 = \% 25.5\ \text{maliyetten tasarruf olmaktadır.}$$

Miktar olarak da kireçten  $15-10=5$  ,  $5/15 = \% 33.3$  tasarruf sağlanmaktadır. Maliyet karşılaştırması, bütün karışımlar için, aynı şekilde yukarıdaki bağıntılardan bulunabilir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Zemin-çimento-uçucu kül numunelerinde optimum su içerikleri %8 uçucu kül oranında maksimum değere ulaşmakta, bu orandan az ya da çok kül katıldığında numunelerin optimum su içerikleri düşmektedir. Ayrıca, uçucu kül oranları arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıkları düşmektedir.

Zemin-çimento karışımlarından hazırlanan numunelerin basınç mukavemetleri, uçucu kül ilavesiyle oldukça yükselmektedir. Çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül kullanarak da, aynı basınç mukavemetleri elde edilebilmektedir. 7 ve 28 günlük numunelerde, % 2, 3 ve 4 çimento oranları için, % 8 uçucu kül oranında maksimum basınç mukavemetleri elde edilmekte, bu orandan az ya da çok kül katıldığında numunelerin basınç mukavemetleri düşmektedir. 90 günlük numunelerde ise, uçucu kül oranı arttıkça basınç mukavemetleri de sürekli artmaktadır. Böylece, uçucu küllü numunelerin nihai dayanıma uzun sürede eriştikleri görülmüştür.

Bu deneylerin sonuçları da gösteriyor ki, Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külü bir mineral katkı maddesi olarak kullanılabilmekte ve bağlayıcı gibi davranmakta, zemin-çimento karışımlarının özelliklerini iyileştirmektedir. Çimento oranının azaltılmasıyla da, çimentodan tasarruf sağlanmaktadır.

Taban zemini yerine temel malzemesi kullanıldığında da, 7 ve 28 günlük numunelerde, aynı çimento oranı için

uçucu kül oranı arttıkça daha yüksek basınç mukavemetleri elde edilmektedir.

Zemin-çimento-uçucu kül karışımlarında, çimento yerine kireç de denendi. Bu deneylerin sonuçlarına göre ise, 7 ve 28 günlük zemin-kireç-uçucu kül numunelerinde aynı kireç oranı için, uçucu kül oranı arttıkça basınç mukavemetleri de artmakta %10 uçucu kül oranından sonra ise azalmaktadır.

Numunelerin rutubet değişimine ve don olayına karşı dayanıklılığını tesbit etmek amacıyla ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Zemin-çimento karışımlarından hazırlanan numunelerin ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneyleri sonucu uğradıkları ağırlık kayıplarının, bu numunelerin uçucu kül de ihtiva etmeleri halinde önemli miktarda azaldığı görülmüştür. Örnek olarak, zemin-çimento karışımlarında ıslatma-kurutma deneyinde %4 çimento oranında ağırlık kaybı %24.7 iken, bu karışıma %6 uçucu kül de katıldığında ağırlık kaybı %12.5 'a düşmüştür. Zemin yerine temel malzemesi kullanıldığında da yine ağırlık kayıplarında azalmalar görülmüştür. Örnek olarak, temel malzemesi-çimento karışımlarında ıslatma-kurutma deneyinde %4 çimento oranında ağırlık kaybı %8.3 iken, bu karışıma %8 uçucu kül de katıldığında ağırlık kaybı %4.6'ya düşmüştür.

Temel malzemesi-çimento-uçucu kül karışımlarında yapılan ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerinin sonunda, bu numunelerin serbest basınç mukavemetleri de tesbit edilmiştir. Islatma-kurutma deneyi sonunda uçucu küllü numunelerin ağırlık kayıpları, uçucu külsüz

numunelere göre daha az olmuştur. Ayrıca uçucu külün kullanılmasıyla, zemin-kireç karışımlarının ıslatma-kurutma ve donma-çözülme deneylerindeki ağırlık kayıplarının azaldığı da tesbit edilmiştir.

Yapılan ekonomik etüdde de Afşin-Elbistan uçucu külünün, karışımlarda maliyetten önemli ölçüde tasarruf sağladığı görülmüştür.

Türkiye'de halen büyük miktarlarda uçucu kül elde edilmekte ancak değerlendirilebilen kül miktarı yok denecek kadar azdır. Kullanılmayan uçucu küller boş arazilere dökülerek büyük bir çevre kirlenmesine sebep olmaktadır.

Bu sebeple Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu küllerinin, yol stabilizasyonlarında çeşitli malzemelerle birlikte değerlendirilmesi, hem uçucu külün kullanım alanını genişletecek, hem de çevre kirliliğini azaltacaktır. Bu arada, uçucu külün yol stabilizasyonlarında kullanılmasıyla, stabilizasyonda kullanılan diğer yapı malzemelerinden daha az kullanarak tasarruf sağlanacaktır.

## **KAYNAKLAR**

AASHTO, (1991), "**Transportation Landscape, Environmental Design**", 184 p. Planning and Environment Ser., Paperback Text Edition.

ACI Committee Report, (1987), "**Use of Fly Ash in Concrete**", ACI Materials Journal, Title no:84-M39, ACI 226.3R-87, pp:381-409.

AKIN, D., (1992), "**Stabilization Of Crushed Stone Mixes With Low Bitumen Content**", FBE/CEE-AR-316, Sh:119-150, Dokuz Eylül Univ., İzmir.

AKMAN, M. S., (1989), "**Genel Rapor**", Yeni Malzemeler-Yeni Kullanım Alanları, Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongresi, Bildiriler Kitabı, Cilt: I, Sh: IX-XI, Ankara.

AKMAN, M. S., (1993), "**Ağırlık Barajlarında Uçucu Küllü Rolkrit Kullanımı**", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Sh:9-21, Ankara.

ALATAŞ, T., (1989), "**Yol İnşaatında Uçucu Küllerin Toprak-Çimento Stabilizasyonlarında Kullanımının Araştırılması**", Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.

ANON, (1986), **"Fly Ash Design Manual For Road and Site Applications, Volume 2, Slurried Placement"**, Electr Power Res Inst. Coal Combust Syst Div Rep. 200 p.

ARIOĞLU, E., MANZAK, O., (1992), **"İnşaat Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Ekonomik Analizi"**, Prefabrik Birliği Dergisi, Ankara, Sayı:22, Sh:25-33.

ARMSTRONG, C., F., (1961), **"Soil Mechanics"**, Second Edition, Volume 10, The Roadmakers' Library, London.

ATANUR, A., (1966), **"Toprak - Çimento Stabilizasyonu Laboratuvar Deneyleri"**, K.G.M., Ankara.

ATANUR, A., (1971), **"Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması"**, KGM, Yayın No:193, Ankara.

ATANUR, A., (1972), **"Çimento Tipi ve Yüzde Rutubetin Toprak - Çimento Karışımları Üzerindeki Fiziki Tesirleri"**, K.G.M., Teknik Bülten, Sayı:38, Ankara.

ATANUR, A., (1973), **"Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikatı"**, K.G.M., Yayın No:208, Ankara.

ATANUR, A., TERCÜMANOĞLU, R., (1971), **"Adana Şehiriçi Geçişinde Çimento Stabilizasyonlu Temel Teşkili"**, K.G.M., Ankara, Teknik Bülten:34.

BATSON, R.G., (1968), **"Roads"**, Second Edition by J. A. Proudlove, London, Sh:108-110.

BAYAZIT, Ö.L., (1980), **"Tunçbilek Uçucu Küllerinin Betonun Fiziko-Kimyasal ve Mekanik Özelliklerine Etkileri"**, Doktora Tezi, Ankara.

BAYKAL, G., ÖZTURAN, T., SAVAŞ, M., RAMADAN, K., (1993), **"Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Bazı Kullanım Olanakları"**, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Sh:89-102, Ankara.

BOWDERS, J., USMEN, M., GIDLEY, J., (1987), **"Stabilized Fly Ash For Use As Low-Permeability Barriers"**, Geotechnical Practice For Waste Disposal '87, West Virginia Univ., Morgantown, USA, p 320-333.

BRENDEL, G., KELLY, J., (1991), **"Fly Ash In Roller Compacted Concrete Pavement"**, Energy in the 90's Proc. ASCE Energy DIV., Spec. Conf. Energy Publ. by ASCE Ny. USA., The British Library Document Supply Centre, pp:333-338.

BULUTOĞLU, İ., ATANUR, A., (1969), **"Eymir Gölü Malzemesinin Yüksek Fırın Curufu İle Stabilizasyonu Laboratuvar Çalışmaları"**, K.G.M., Ankara, Teknik Bülten, No:18.

CİLASON, N., (1964), **"Toprak Stabilizasyonu"**, K.G.M., Ankara, Yayın No:122.

COLLINS, R., POUND, J., (1988), **"Guidelines for Design and Construction of Pozzolanitic Stabilized Base Course Mixtures"**, Disposal and Utilization of Electric Utility Wastes, Proceedings, Nashville, USA, p 35-49.

ÇEVİK, M., (1993), **"Yüksek Fırın Curufu ve Uçucu Kül Den Taşıyıcı Hafif Agrega Üretimi"**, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Sh:235-242, Ankara.

DEMİR, A., (1989), **"Uçucu Küllü Gazbeton Araştırması"**, Türkiye İnşaat Mühendisliği, X. Teknik Kongre, Bildiriler Kitabı, Cilt:I, Sh:403-423, Ankara.

DEMİREL, Z., KADIOĞLU, M., (1991), **"Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvarı El Kitabı"**, Bay. ve İsk. Bakanlığı, K.G.M., Ankara.

DORUK, M., (1972), **"Yüksek Fırın Curufu-Çimento ve Tabii Dere Malzemesi-Çimento Stabilizasyonları İle"**

**İlgili Bir Çalışma",** K.G.M., Teknik Bülten, Sayı:36, Ankara.

DOUGLAS, E.; ELOLA, A.; MALHOTRA, M., (1990), **"Characterization of Ground Granulated Blast-Furnace Slags and Fly Ashes And Their Hydration in Portland Cement Blends"**, Cement, Concrete and Aggregates, Ottawa, Can., p 38-46.

ERDOĞAN, T., (1993), **"Atık Malz. İnş. Endüstrisinde Kullanımı"**, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Sh: 1-8, Ankara.

ERDOĞAN, T., PARLA, B., (1993), **"Yüksek Kireçli Uçucu Küllerin Beton Basınç Dayanımları"**, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara, Sh:79-87.

ERTAN, Y., ÜLKÜ, S., (1978), **"Zemin Özellikleri ve Deneyleri (I)"**, DSİ, Gn. Müd., Ankara.

GREENWOOD, D., (1984), **"Ground Stabilization"**, American Society of Civil Engineers, 52 p.

HEIBER, H., MOERTEL, H., (1986), **"Fly Ash Containing Stoneware Plate"**, Inst Fuer Werkstoffwissenschaften III, Erlangen, West Ger. p 64-68.

HINISLIOĞLU, S., (1991), "Stabilization Of Crushed Stone Mixes With Low Cement Content", FBE/İNŞ-AR-265, Sh:79-95, Dokuz Eylül Üniv., İzmir.

ILICALI, M., (1988), "Karayolu Üstyapısında Erdemir Curufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, Y.T.Ü., İstanbul.

K.G.M., "Toprak Mühendisliği Bilgileri", Yayın No:145, Bayındırlık Bakanlığı, Ankara.

K.G.M., "Numune Alma ve Tecrübe Metodları", Yayın No:59, Standart Şartname , Bayındırlık Bakanlığı, Ankara.

K.G.M., (1981), "Stabilizasyon Plentlerinde Hazırlanan Temel Tabakası Teknik Şartnamesi", Araş. Dairesi Bşk., Ankara.

K.G.M., (1989), "Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvarı Ders Notları", Teknik Araştırma Dairesi Bşk., Üstyapı Şubesi Md., Ankara.

K.G.M., (1989), "Yollar Fenni Şartnamesi", Yayın No:170/2.

KARAŞAHİN, M., (1993), "Resilient Behaviour of Granular Materials for Analysis of Highway Pavements", Doktora Tezi, University of Nottingham.

KAVALALI, M.S., (1988), "Toplu Konut Yapımı İçin Türkiye 'deki Çalışma Şartlarına Uygun Yapı Elemanları ve Yapım Yöntemlerinin Geliştirilmesi", TMMOB, İnş. Müh. Odası, İzmir Şubesi Haber Bülteni, Sayı:18.

KUMBASAR, V., KUMBASAR, F., ÖNALP, A., (1970), "Yol Mühendisleri İçin Zemin Mekaniği", Kısım I, Çeviri, İTÜ, İstanbul.

LANGAN, B., JOSHI, R., WARD, M., (1990), "Strength and Durability of Concretes Containing 50% Portland Cement Replacement by Fly Ash and Other Materials", Canadian Journal of Civil Engineering, Univ. of Calgary, Calgary, Alberta, Can., p 19-27.

MALEK, R., LICASTRO, P., ROY, D., (1986), "Short And Long-Term Leaching Behaviour of a Low-Calcium Fly Ash and Cement-Stabilized Fly Ash", Fly Ash and Coal Conversion By-Products, Pennsylvania State Univ. University Park, USA, p 269-284.

MENON, M. P., vd., (1990), "Physico - Chemical Characterization of Water Extracts of Different Coal Fly Ashes and Fly Ash-Amended Composts", Air and Soil Pollution, Savannah State Coll, Savannah, USA, p 343-353.

McMANIS, K., ARMAN, A., (1989), **"Clas C Fly Ash As a Full or Partial Replacemet for Portland Cement or Lime"**, Univ. of New Orleans, New Orleans, USA, Transportation Research Record, p:68-81, Journal Article.

MILLER, D., MOSLEMİ, A., SHORT, P., (1989), **"Use of Fly Ash in Wood-Cement Composites"**, Forest Products Journal, Univ. of Idaho, USA, p 34-38.

NOWOK, J., vd., (1990), **"Sintering Behaviour and Strength Development in Various Coal Ashes"**, Univ. of North Dakota, USA, p:1020-1028.

O'FLAHERTY, C.A., (1974), **"Highway Engineering"**, Vol:2, Highways, Second Edition, Sh:221-268, London.

OGLESBY, C.H., HEWES, L.I., (1963), **"Highway Engineering"**, 2 nd Edition, USA.

ÖZBAYOĞLU, F., (1994), **"Patlatma Yöntemi İle Pratik Bir Gölet Seddesi Yapını"**, Köy Hiz. Genel Müd. Yayını, Sayı:49, Sh:18-21, Ankara.

ÖZBAYOĞLU, F., (1993a), **"Köy Yollarının Termik Santral Külleriyle Stabilizesi"**, Köy Hiz. Genel Müd., Ankara, Köy Hizmetleri Dergisi, Sayı:45.

ÖZBAYOĞLU, F., (1993b), "Uçucu Küllerin, Bentonit, Kireç ve Çimento Katkılarıyla Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonlarında Kullanımı", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, Bildiriler Kitabı, Sh:103-118.

ÖZTEKİN, E., KURBETÇİ, Ş., (1993), "Uçucu Küllü Betonlara Hızlandırılmış Kür Uygulaması", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara, Sh:45-56.

ÖZTEKİN, E., SÜMER, M., (1993), "Uçucu Küllü ve Fillerli Betonların Bazı Karşılaştırmalı Özellikleri", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara, Sh:23-28.

ÖZTURAN, T., (1993), "Uluslar Arası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Curuf ve Doğal Puzzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara, Sh:57-78.

RAMYAR, K., (1993), "Uçucu Küllerin Çimento Harcının Büzülmesine ve Betonun Karbonatlaşmasına Olan Etkileri", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara, Sh:133-138.

SCHOLZ, H., (1987), **"Fly Ash in Concrete Technology"**,  
Ash-A Valuable Resource, Papers v2 Concrete, Ash  
Resources Ltd., 11p.

SONUÇ, T., (1976), **"Karayolu Tekniği"**, Cilt:2, Sh:253-  
258, İstanbul.

ŞENTÜRK, F., SAYMAN, Y., (1972), **"Çimento Enjeksi-  
yonlarında Uçucu Kül ve Betonit Kullanılması"**,  
DSİ, Arş. Dai. Bşk., Ankara, Yayın No:KI-517.

ŞENTÜRK, F., SAYMAN, Y., BAYAZIT, L., (1971),  
**"Puzzolanik Katkı Maddelerinin Çimento Hidratasyon  
Isısına Etkisi"**, Malzeme Bülteni, DSİ Gn. Müd.,  
Arş. Dai. Bşk., Ankara, Rapor No:ML2-514.

TEAŞ, (1996), **"Termik Santralların Uçucu Kül Üretimleri"**  
Türkiye Elektrik Üretim-İletim A.Ş., Genel Müdürlü-  
ğü, Termik Santrallar İşletme ve Bakım Daire Baş-  
kanlığı, Ankara.

TEK, **"Termik Santral Uçucu Küllerinin Değerlendi-  
rilmesi"**, Termik Santral İşlt. Dai. Bşk., Merkez  
Lab. Şube Müd., Akköprü, Ankara.

TOKYAY, M., (1993), **"Betonda Uçucu Kül Kullanımı  
(Türkiye Deneyimi)"**, Endüstriyel Atıkların İnşaat  
Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler  
Kitabı, Ankara, Sh:29-36.

TOKYAY, M., (1989), "Uçucu Küllerin Mineralojik Kompozisyonlarının Hidratasyon ve Pozolanik Reaksiyonlara Etkileri", Türkiye İnşaat Mühendisliği, X. Teknik Kongre, Ankara, Bildiriler Kitabı, Cilt:I, Sh:389-401.

TOROS, H., (1987), "Afşin - Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.

TS 1500, (1974), "İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması", Ankara.

TS 1900, (1987), "İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri", Ankara.

TS 29, (1959), "Tras Teknik Muayene Metodları", Ankara.

TS 4022, (1984), "Söndürülmüş Kireçler - Yapı İçin", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 639, (1975), "Portland Çimento Klinkerine ve Portland Çimento Betonuna Karıştırılacak Uçucu Küller", Ankara.

TS 640, (1975), "Uçucu Küllü Çimentolar", Ankara.

TS 8336, (1990), **"Topraklar-Organik Madde Tayini"**, 6 sh  
Ankara.

TUĞAL, M., (1989), **"Uçucu Küllerden Tuğla Tipi Bir Yapı Malzemesinin Elde Edilmesi"**, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

TÜMEN, F., (1984), **"Termik Santral Uçucu Küllerinden Alümina Kazanılması Üzerine Bir Çalışma"**, Doktora Tezi, Elazığ.

Türkiye Elektrik Kurumu, Afşin-Elbistan Termik Santrali Broşürü.

UMAR, F., AĞAR, E., (1985), **"Yol Üstyapısı"**, İTÜ, İnş. Fak., İstanbul, Sh:178-181.

UMAR, F., YAYLA, N., (1986), **"Yol İnşaatı"**, İTÜ, İnş. Fak., İstanbul, Sayı:1333.

USMEN, M., BOWDERS, J., (1988), **"Low Permeability Liners Incorporating Fly Ash"**, Disposal and Utilization of Electric Utility Wastes, West Virginia Univ., Morgantown, USA, p 50-65.

VUKOVIC, M., (1992), **"Soil Stability"**, 100 p.

WASTI, Y., (1990), **"Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri ve Kullanım Olanakları"**, İMO, Teknik Dergi, Cilt:1, Sayı:4, Ankara, Sh:177-188.

WASTI, Y., (1993), "Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, Bildiriler Kitabı, Sh:37-44.

WHITING, D., (1990), "Compressive Strengths of Lean Concretes Containing Fly Ash", Serv. Durability Constr. Mater. Proc. First Mater. Eng. Congr., Boston, USA, p 1335-1344.

WILLIAMS, R.I.T., (1986), "Cement-Treated Pavements, Materials, Design and Construction", Elsevier Applied Science Publishers Ltd., University of Surrey, London, UK.

WITCZAK, W., YODER, E.J., (1975), "Principles of Pavement Design", Second Edition, USA.

WOODS, K.B., BERRY, D.S., GOETZ, W.H., (1960), "Highway Engineering Handbook", First Edition, New York, Sh:21.1-21.133.

YAĞIZ, F., ATANUR, A., (1970), "Türkiye 'de Elde Edilen Uçucu Küllerin Menşeleri, Özellikleri ve Bu Uçucu Küllerin Agregat-Çimento Karışımlarında Portland Çimentosunun Bir Kısımını İkame Edebilmek İmkânlarının Araştırılması", K.G.M., Ankara, Teknik Bülten:30.

YAĞIZ, F., ATANUR, A., (1972), "Çimento - Uçucu Kül Karışımının Yol Stabilizasyonunda Kullanılması Hakkında Bir Araştırma", K.G.M., Ankara, Teknik Bülten:37.

YAZICI, Ş., (1991), "Stabilization Characteristics Of Class C Fly Ash", FBE/İNŞ-AR-263, Sh:27-45, Dokuz Eylül Üniv., İzmir.

YILDIRIM, B., (1984), "Yol İnşaatı", F.Ü., İnş. Müh. Böl., Elazığ, Sh:168-188.

YILDIRIM, B., ALATAŞ, T., (1989), "Karayollarında Uçucu Küllerin Toprak-Çimento Stabilizasyonunda Kullanımı", Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı, Cilt:I, Sh:425-436, Ankara.

**ÖZGEÇMİŞ**

1960 yılında Elazığ 'da dünyaya gelen Taner ALATAŞ, Elazığ Atatürk Lisesi'nden 1977 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Eskişehir Eğitim Enstitüsü 'ne girmiş ve 1980 yılında mezun olmuş, daha sonra girdiği F.Ü. Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1986 'da İnşaat Mühendisi olarak mezun olmuştur. 1989 yılında Yüksek Mühendis olan Taner ALATAŞ, 1987 yılından beri Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Evli ve bir çocuk babasıdır.