

PAPER DETAILS

TITLE: Bentonitin kireç ve tf ile stabilizasyonu sonrasinda meydana gelen dokusal degisimlerin
Fourier Dnsml Kiziltesi (FT-IR) Spektroskopisi yöntemi ile incelenmesi

AUTHORS: Yasemin ASLAN,Zülfü GÜROCAK

PAGES: 599-610

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2492781>



Araştırma Makalesi / Research Article

Bentonitin kireç ve tuf ile stabilizasyonu sonrasında meydana gelen dokusal değişimlerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) Spektroskopisi yöntemi ile incelenmesi

Investigation of the textural changes after the stabilization of bentonite with lime and tuff by Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy method

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU*¹, Zülfü GÜROCAK²

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, yaslan@firat.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3135-5926>

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, zgurocak@firat.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1049-8346>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 17 Haziran 2022
Revizyon 7 Temmuz 2022
Kabul 7 Temmuz 2022
Online 30 Eylül 2022

Anahtar Kelimeler:

Kil, kompaksiyon, stabilizasyon, tuf, FT-IR

ÖZ

Puzolanik özelliğe sahip katkı malzemeleri kullanılarak killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak tanımlanan stabilizasyon, kolay uygulanabilir ve ekonomik bir yöntem olması nedeniyle günümüzde çok fazla tercih edilmektedir. Stabilizasyon, zemine eklenen katkı malzemesi ve zemin arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonların bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Bu çalışmada, katkı malzemesi olarak farklı özellikteki tüfler ile birlikte sönmüş kireç kullanılarak hazırlanan karışımların Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) kullanılarak bentonitin ve katkılı örneklerin mikroyapısal değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla farklı oranlarda sönmüş kireç ile birlikte asidik ve bazik karakterli tüflerin katkı malzemesi olarak kullanıldığı örnekler hazırlanmış ve bu örneklerde 28 günlük kür sonrasında FT-IR analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda kireç ve tüflerin eklenmesiyle 1412 cm⁻¹, 1417 cm⁻¹, 1451 cm⁻¹, 1470 cm⁻¹, 1472 cm⁻¹ dalga sayısında yeni pikler oluşmuştur. Bu dalga sayılarında oluşan pikler kireçteki Ca-O bağlarının özelliğidir. Kireç miktarının artmasıyla Ca-O bağlarının oluşturduğu pik sayısı artmıştır. %10 kireç katkılı örnekte hem dalga sayısında hem de geçirgenlik değerlerinde en fazla değişim meydana gelmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 June 2022
Received in revised form 7 July 2022
Accepted 7 July 2022
Available online 30 September 2022

Keywords:

Clay, compaction, stabilization, tuff, FT-IR

ABSTRACT

Stabilization, which is defined as the improvement of the geotechnical properties of clayey soils by using additives with pozzolanic properties, is highly preferred today because it is an easily applicable and economical method. Stabilization occurs as a result of the pozzolanic reactions occurring between the additive material added to the soil and the soil. In this study, microstructural changes of bentonite and samples with additives were investigated by using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) of mixtures prepared using slaked lime with tuffs with different properties as additives. For this purpose, samples in which acidic and basic tuffs with slaked lime in different proportions were used as additives were prepared and FT-IR analyzes were performed on these samples after 28 days of curing. As a result of the analysis, new peaks were formed with the addition of lime and tuffs in wave numbers of 1412 cm⁻¹, 1417 cm⁻¹, 1451 cm⁻¹, 1470 cm⁻¹, 1472 cm⁻¹. The peaks occurring in these wave numbers are characteristic of the Ca-O bonds in lime. The number of peaks formed by the Ca-O bonds increased with the increase in the amount of lime. The maximum change occurred in both wave number and transmittance values in the 10% lime added sample.

Doi: 10.24012/dumf.1132252

* Sorumlu Yazar

Giriş

Mühendislik ihtiyaçlarını karşılamak için killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi işlemi stabilizasyon olarak tanımlanmaktadır [1]. Kile eklenen çimento, uçucu kül, kireç, silis dumanı, tuf, şeyl, volkanik cam, diatomit ve volkanik kül gibi katkı maddeleri zemine ait elementlerle kimyasal reaksiyona girerek zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmektedir [2, 19]. Zemin ve katkı maddeleri arasında oluşan bu reaksiyonlar zeminin mikro yapısında değişimlere neden olmakta ve bu moleküler bağ değişimlerini karakterize etmek için infrared (titreşim) spektroskopisi (IR) olarak isimlendirilen yöntem kullanılmaktadır. IR maddenin infrared ışınlarını absorptlaması üzerine kurulmuş olan hızlı, ekonomik ve yıkıcı olmayan fiziksel bir yöntemdir ve katı yüzeyindeki gaz ve sıvı adsorpsiyonunun incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [20, 21]. Infrared tekniğinde, moleküllerdeki kimyasal bağların titreşim, eğilme, bükülme, sallanma gibi tüm hareketleri için gerekli olan enerji, infrared ışınların elektro manyetik enerjisinden absorplanır. Bu absorpsiyonlar ile elde edilen IR spektrumları, molekül içindeki fonksiyonel grupları göstermekte ve ölçülen absorpsiyonlar pikler ile ifade edilmektedir. Infrared spektrumlar yoğunlukla dalga sayısı ile belirtilmekte ve pikler yapılarına göre zayıf, orta, kuvvetli; şekillerine göre ise dar, orta ve geniş olarak tanımlanmaktadır. Örneklerde malzeme cinsini belirlemek için IR spektrumları, piklerin bulunduğu yere, şekillerine ve yapılarına göre incelenmektedir [22]. Tanecik yüzeylerindeki molekül gruplarını tanımlamak için moleküler analizlerde de Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi (FT-IR) tekniği kullanılmaktadır. Çimento, katkılı çimento ve puzolanlarla ilgili yapılan çalışmalarda infrared spektrumu başlıca 4 geniş band bölgesinde değerlendirilmektedir. Bunlar Silisyum-Alüminyum (Si-Al), Kükürt (S), Karbon (C) ve Hidroksit (OH) titreşim ve deformasyon bağlarındaki titreşim sayılarından oluşmaktadır ve titreşim sayıları aralarındaki farklar bölgesel olarak değerlendirilebilmektedir [23].

FT-IR analizlerindeki birinci bölge 400-1100 cm^{-1} bölgesidir. Bu titreşim dalgaları Si (Si-O ve Si-O-Si) ve Al (Al-O, Al-O-Al) bağlarına karşılık gelmektedir. Çimentonun bileşenlerinden kalsiyum silikatlar 930 ve 1000-1010 cm^{-1} dalga sayılarında, kalsiyum ve karbon titreşimleri ise 2920-2930 ve 2850-2855 cm^{-1} dalga sayıları aralığında daha yoğundur. Bütün çimentolarda bu kalsiyum silikat titreşimleri görülmektedir. 1000-1010 cm^{-1} dalga sayısında referans çimentoların titreşim bandları daha yoğundur [23].

S bölgesi ise ikinci bölgedir ve üç bölgede (1100-1300, 1620-1685 ve 3100-3600 cm^{-1}) S titreşim pikleri S-O bağı olarak görülmektedir. Bu bağlar çimento içeriğindeki alçı taşından kaynaklanmaktadır [24]. Üçüncü bölgeyi 700-1500 cm^{-1} titreşim dalgaları göstermektedir. Bu bölgede C (C-O) titreşim bağları vardır ve çimentonun karbonasyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [20, 25]. Dördüncü bölge ise su moleküllerini göstermekte olup, 3400-3450 ile 1620-1650 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim ve deformasyon bağları (O-H) bulunmaktadır. Katkısız çimento harç örneklerinde daha düşük dalga sayılarında

(3409-3414 cm^{-1}) görülmekte ve susuz bileşiklerin varlığını göstermektedir. Portland çimentosu harçlarında ise daha yüksek dalga sayılarında (3441-3446 cm^{-1}) oluşmakta ve daha az oranda susuz bileşikler göstermektedir. Hidrate edilmiş çimentolarda portlandit 3650 cm^{-1} , tobermorite ise 3630 cm^{-1} dalga sayılarında görülmektedir [25, 26]. Minerallerdeki moeküler bağ karakterizasyonu ise bu bölgelerde oluşan dalga sayıları yardımıyla belirlenebilmektedir.

Birçok araştırmacı farklı özellikteki zeminlerde FT-IR analizleri yaparak, stabilizasyon sonrasında zeminde meydana gelen moleküler değişiklikleri incelemişlerdir. Bu çalışmalardan birkaçı aşağıda kısaca verilmiştir

Etin vd. [27] tarafından kilde yapılan FT-IR spektrometresine göre 749.2 cm^{-1} , 882.1 cm^{-1} , 909.8, 995.2 cm^{-1} , 1030 cm^{-1} , 1420.1 cm^{-1} , 1408.9 cm^{-1} , 3693 cm^{-1} , 3623 cm^{-1} , 3693 cm^{-1} dalga sayılarında pikler belirlenmiştir. Çalışmada, katkısız kilde olmayan ancak kireç ve çimento katkılı örneklerde 1420.1 cm^{-1} ve 1408.9 cm^{-1} dalga sayılarında yeni pikler ortaya çıktığı ve bu piklerin kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat silikat hidrat (C-A-S-H) bileşikler formunda kalsit oluşumu ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir.

Cheng vd. [28] FT-IR analizleriyle inceledikleri zeminin tipik absorpsiyon bandını 1100 cm^{-1} ile 950 cm^{-1} aralığında gözlemlemiş ve stabilizatörler ile zemin arasındaki puzolanik reaksiyonun bir sonucu olarak kil mineralinde Si-O-M⁺'nin (M⁺ = Na⁺, K⁺ veya Ca²⁺) azaldığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar IR spektrumunda 1420 cm^{-1} de belirlenen absorpsiyon pikinin Hajimohammadi vd. [29] tarafından yapılan çalışmada verdiği bilgilere göre değerlendirilerek, bu pikin kireçteki Ca-O'nun gerilme titreşiminden kaynaklandığı ifade etmişlerdir. Kür süresinin artmasıyla önemli ölçüde azalan bu pik, 28 günlük kürlemeden sonra kaybolmuştur. Araştırmacılara göre kireç tüketimi, zeminin karışık stabilizatörlerle reaksiyona girdiğini ve yeni mineraller üretildiğini göstermektedir. Bu çalışmada, kireç ve uçucu kül karışımlarının kullanılmasının, kürlenme süresiyle birlikte kil minerallerinde kademeli bir azalmaya neden olduğu, ayrıca C-A-H ve bazı amorf mineraller gibi çeşitli yeni minerallerin ortaya çıktığı belirlenmiştir.

Tabak vd. [30] Reşadiye bentonitinde yaptığı çalışmada, kilin FT-IR spektrometresinde 3600-3400 cm^{-1} dalga sayısındaki piklerin OH gerilmeleri ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar 1430-1382 cm^{-1} ve 888 cm^{-1} 'deki pikleri Bukka vd. [31]'nin yaptığı çalışmaya göre değerlendirmiş ve bu piklerin sırasıyla kalsit ve dolomit CO₃ gerilmeleri ve OH-bağlı Fe³⁺ ve Al³⁺'nin bükülme moduyla ilişkili olduğu ifade etmişlerdir. Ayrıca, çalışmada elde edilen 465-1052 cm^{-1} 'deki piklerin Si-O-Si gerilmesi, 524 ve 530 cm^{-1} 'deki piklerin Al-Si-O eğilme moduyla ve 798 cm^{-1} 'deki pikin ise silis ve kuvarsın Si-O gerilmesi ile ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Eisazadeh vd. [32] kireç ile stabilize ettikleri montmorillonit ve lateritik killerde yaptıkları Katı Hal Nükleer Manyetik Rezonans (SS-NMR) ve FT-IR Spektroskopisi çalışmaları sonucunda FT-IR spektrometresinde 3632 cm^{-1} ve 3446 cm^{-1} 'de iki

absorbsiyon piki belirlenmişlerdir. Bu pikleri Madejova ve Komadel [33] tarafından yapılan çalışmaya göre değerlendiren araştırmacılar, bu piklerin montmorilloniti karakterize eden yapısal hidroksil grupları ve OH gerilme titreşimleriyle ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca 1640 cm^{-1} 'deki pikin suyun OH grubunun gerilme titreşimleriyle, 913 cm^{-1} ve 885 cm^{-1} 'deki piklerin $\text{Al}(\text{OH})_3$ ve AlFeOH 'ye ait olduğunu, 466 cm^{-1} 'deki pikin Si-O-Si deformasyon titreşimini gösterdiğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, 524 cm^{-1} 'deki pikin Al-O-Si gruplarının deformasyon moduna, 620 cm^{-1} 'deki pikin Al-O ve Si-O düzlem dışı titreşimlerine, 778 ve 791 cm^{-1} piklerinin ise Marel ve Beutelspacher [34] tarafından yapılan çalışmaya göre kuvars piklerine karşılık geldiğini belirtmişlerdir. Çalışmada kireç katkılı karışımlarda 1420 cm^{-1} 'de yeni bir pik gözlenmiş, bu pikin kireçteki Ca-O bağlarının özelliği olduğu ve %0 kireç içeriği için pik yokken artan kireç içeriği ile ortaya çıktığı belirlenmiştir. Kürleme süresi ile azalan bir yoğunluk gösteren bu absorpsiyon bandının, Gunasekaran ve Anbalagan [35] ve Nacamoto [36] tarafından yapılan araştırma sonuçlarına göre kirecin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ titreşim bandıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir.

Bandipally [37] Na-Bentonit kullandığı FT-IR analizlerinde 3694 cm^{-1} , 3620 cm^{-1} , 3420 cm^{-1} , 1636 cm^{-1} , 1100 cm^{-1} - 900 cm^{-1} arasında, 795 cm^{-1} , 688 cm^{-1} dalga sayılarında pikler belirlemiştir. Araştırmacı kireç katkısıyla IR spektrumunda meydana gelen değişikliklerin, puzolanik reaksiyonlarla oluşturulan çimentolu ürünlerinin hidratasyonu için moleküler ve adsorbe edilmiş su tüketimi sonucunda meydana geldiğini ifade etmiştir. Çalışmada 1418 cm^{-1} civarında, katkısız bentonit kilinin IR spektrumunda bulunmayan bir başka pik gözlenmiştir. Bu pikin kireçteki Ca-O bağlarının özelliği olduğu ve %0 kireç içeriği için pik yokken (veya ~ % 100 geçirgenlik) artan kireç içeriği ile geçirgenlik değerinin azaldığı belirlenmiştir.

Kechouane ve Nechnech [38] yaptıkları çalışmada kompaksiyonun şişme basıncı üzerindeki etkisini incelemiş ve kile kireç eklenmesi sonucunda şişme basıncının azaldığını belirlemişlerdir. Çalışmada FT-IR spektrometresine göre elde edilen 3620 cm^{-1} 'deki absorpsiyon bandının montmorilloniti karakterize eden oktahedral tabakanın O-H gruplarının gerilme titreşimleriyle, 3430 cm^{-1} pikteki absorpsiyonun ise montmorillonit içindeki adsorbe edilmiş su molekülleriyle ilişkili olduğu belirtilmektedir. Araştırmacılara göre 1630 cm^{-1} 'deki pik suyun OH grubunun gerilme titreşimlerine, 1468 cm^{-1} 'deki pik CH_2 gruplarının deformasyon titreşimine, 1040 cm^{-1} 'deki pik ise Si-O bağının gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir.

Saeed vd. [39] tarafından kaolin kilinde yapılan FT-IR spektrometresinde 3696 cm^{-1} , 3620 cm^{-1} , 1638 cm^{-1} , 1115 cm^{-1} , 1031 cm^{-1} , 1007 cm^{-1} , 912 cm^{-1} , 794 cm^{-1} , 698 cm^{-1} , 540 cm^{-1} ve 470 cm^{-1} dalga sayılarında pikler gözlemlenmiştir. Ayrıca 1422 cm^{-1} 'de bir başka küçük pikin varlığı kalsit varlığına işaret ettiği ve kireç katkılı örneklerde yapılan FT-IR spektrumlarında önemli bir değişiklik gözlenmediği belirtilmiştir. Çalışmada 1425 cm^{-1} bandında artan absorpsiyon yoğunluğunun, kireç tarafından

sağlanan artan kalsiyum kaynaklarından dolayı meydana geldiği belirtilmiştir.

Özcan [40] doğal bentonitin FT-IR spektrumunda 3435 ve 3626 cm^{-1} 'de Si-O yüzeyine zayıf olarak hidrojen bağı ile bağlı su moleküllerinin gerilim titreşim bandını, 3435 cm^{-1} 'de ise adsorplanan su moleküllerinin yayvan bandını belirlemiştir. Çalışmada 1640 cm^{-1} dalga sayısındaki pikin suyun hidroksilinin deformasyon bandı ve 1040 cm^{-1} 'de gözlenen pikin ise Si-O-Si gruplarının Si-O gerilim titreşimiyle ilgili olduğu belirtilmiştir. 522 cm^{-1} ve 468 cm^{-1} 'de gözlenen bantların ise sırasıyla Si-O-Al ve Si-O-Si bükülme titreşimlerinin varlığını gösterdiği ifade edilmiştir.

Bilgiç ve Bilgiç [41] farklı killerde yaptıkları çalışmada, bentonitin FT-IR analiziyle 3620 cm^{-1} 'deki geniş pikin montmorillonit bakımından zengin smektit kilinin göstergesi olan $\text{Al}(\text{Mg})\text{-O-H}$ gerilmesinden, 3410 cm^{-1} 'deki pikin, su molekülü katyonlarında bulunan H-O-H gerilmesi (H_2O için) H-OH bağlarından, 1635 cm^{-1} 'deki pikin H-O-H bükülmesinin gerilme titreşiminden kaynaklandığını belirlemiştir. Araştırmacılar Tabak vd. [30] tarafından yapılan çalışmadaki verileri dikkate alarak 840, 980, 1030 ve 1277 cm^{-1} 'deki piklerin Si-O titreşimleriyle, 470 cm^{-1} 'deki pikin, Si-O-Si titreşimleriyle, 525 cm^{-1} 'deki pikin ise Si-O-Al titreşimleriyle ilgili olduğunu ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada katkı malzemesi olarak kireç ile asidik ve bazik özellikteki tüflerin kullanımı ile stabilize edilen bentonitin mikro yapısında meydana gelen değişikliklerin belirlenmesi için FT-IR Spektroskopisi analizleri yapılmıştır. Bentonite farklı oranlarda eklenen kireç ve tüf katkılarının bentonitin yapısal birimlerinde meydana getirdiği moleküler değişiklikler araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Bentonit ve katkı malzemelerinin özellikleri

Deneyisel çalışmalarda, Tokat-Reşadiye (Turkey) kil ocağında üretilen katkısız bentonit kullanılmıştır. Montmorillonit ailesine bağlı bir kil minerali olan bentonit kili, alüminyum ve magnezyum içeriği bakımından zengin volkanik kül, lav ve tüflerin kimyasal ayrışması ya da bozulması sonucunda meydana gelen [42, 43] ve kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmaktadır. En önemli özelliği su ile etkileşime geçtiğinde şişerek hacimlerinin büyük oranda artmasıdır ve dane boyutu 2 μm (0.002 mm) veya daha küçüktür. İyonlaşma kapasitesi yüksek olan bentonitin plastisitesi yüksektir, yoğunluğu yaklaşık 2.6 gr/cm^3 olan koloidal özelliğe sahip bir kil türüdür [44]. Bentonitte yapılan XRF analiz sonuçlarına göre bu çalışmada kullanılan kil Na-bentonittir [45].

Katkı malzemesi olarak kullanılan asidik karakterli tüf Gümüşhane ili ve civarında yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyon'undan, bazik karakterli tüfler ise Elazığ ili Ağın bölgesinde yüzleme veren Karabakır Formasyonu'ndan derlenmiştir. XRF analizi sonuçlarına göre Kızılkaya Formasyonu'ndan derlenen tüflerin SiO_2 miktarı %63'den fazladır ve tüf asidik karakterlidir. Karabakır Formasyonu'na ait tüflerde kimyasal olarak tüflerin SiO_2 miktarı %45'den azdır ve bazik karakterlidir [45]. Bu çalışmada Karaca Harput CL 80.S marka sönmüş kireç

kullanılmıştır ve kimyasal malzeme satan firmalardan temin edilmiştir. Bentonit ve katkı malzemelerinin kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Bentonit ve katkı malzemelerinin kimyasal özellikleri [45].

Ana Oksit (%)	Bentonit	Sönmüş Kireç	Asidik Tüf	Bazik Tüf
SiO ₂	62.50	1.55	69.10	31.40
Al ₂ O ₃	17.60	0.44	20.70	7.15
Fe ₂ O ₃	3.63	0.14	0.47	3.49
MgO	2.00	0.57	0.19	2.11
CaO	2.86	70.10	0.76	28.70
Na ₂ O	2.58	0.26	0.39	0.60
K ₂ O	0.92	0.07	1.43	0.87
TiO ₂	0.32	0.04	0.29	0.41
MnO	0.10	0.05	<0.01	0.03
P ₂ O ₅	0.14	0.04	0.06	0.09
SO ₃	0.076	1.39	0.90	0.036
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
Sr	0.073	0.015	0.024	0.033
Kızdırma kaybı	6.60	26.40	5.50	24.80

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT: Bazik Tüf

2.2 Örnek Hazırlama

Asidik ve bazik karakterli tüfler yapılan arazi çalışmaları ile derlenmiş ve laboratuvara getirilen tüf blokları öğütülerek 200 nolu elekten elenmiştir. İlk olarak kil etüvde 24 saat 105°C’de kurutulduktan sonra kile farklı oranlarda sönmüş kireç, asidik tüf ve bazik tüf katkıları eklenmiş iyice karıştırılarak Standard proktor deneyi ve FT-IR analizlerinde kullanılacak örnekler hazırlanmıştır.

2.3. Standard proktor deneyi

Deneyisel çalışmaların ilk aşamasında, Tablo 2’de verildiği gibi farklı oranlarda KÇT, AT ve BT katkıları eklenerek hazırlanmış olan katkılı örneklerde ve katkısız bentonitte (K) optimum su içeriği (w_{opt})’ni belirleyebilmek amacıyla ASTM D698 [46] standardına göre standard proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Standard proktor deneylerine ait sonuçlar

Örnek	w_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)
K	38.50	12.36
K+%5 KRÇ	40.91	10.49
K+%10 KRÇ	43.00	10.30
K+%5 AT	48.00	10.77
K+%5 BT	40.00	10.98
K+%5 AT+%5 KRÇ	54.00	9.91
K+%5 BT+%5 KRÇ	50.00	9.71
K+%5 AT+%10 KRÇ	65.00	8.83
K %5 BT+%10 KRÇ	56.00	9.61

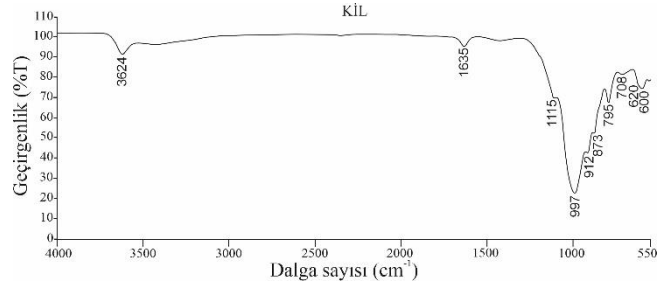
2.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) Spektroskopisi Çalışmaları

Çalışmanın ikinci aşamasında, katkısız ve katkılı örnekler Standart proktor deney ile belirlenen optimum su içeriklerinde sıkıştırılmış, proktor kalıbından silindirik

örnekler halinde çıkartılıp 28 gün uygun şartlarda oda sıcaklığında kür uygulandıktan sonra ATR Ünitesi Thermo Scientific™ Nicolet™ iS5 FT-IR Spektroskopi cihazıyla 400-4000 cm⁻¹ dalga boyunda, katı haldeki örneklerde FT-IR analizleri yapılmıştır. Yapılan FT-IR analizlerine ait değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

2.4.1. Katkısız kilin FT-IR analizi değerlendirmesi

Katkısız kilin FT-IR spektrumunda 600 cm⁻¹, 620 cm⁻¹, 708 cm⁻¹, 795 cm⁻¹, 873 cm⁻¹, 912 cm⁻¹, 997 cm⁻¹, 1115 cm⁻¹, 1635 cm⁻¹, 3624 cm⁻¹ dalga sayılarında pikler oluşmuştur (Şekil 1).



Şekil 1. Katkısız kile ait FT-IR spektrumu

Belirlenen ilk pik 3624 cm⁻¹ pikidir ve bu pik kilin iç hidroksil gruplarının O-H gerilim titreşimleriyle ilişkilidir. Elde edilen bu değer literatürde verilen değerlerle uyumludur. Nitekim Etim vd. [27] 3623 cm⁻¹ ve 3693 cm⁻¹ piklerinin yapısal hidroksil gruplarının O-H gerilmesiyle ilişkili olduğunu ifade ederken, Tabak vd. [30] 3631 cm⁻¹’deki pikin, Eisazadeh vd. [32] 3632 cm⁻¹’deki pikin, Bandipally [37] ve Saeed vd. [39] 3696 cm⁻¹ ve 3620 cm⁻¹ dalga sayısındaki piklerin, Kechouane ve Nechnech [38] ise 3625 cm⁻¹’deki pikin montmorilloniti karakterize eden oktahedral tabakanın O-H gruplarının gerilme titreşimleriyle ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca Özcan [40] çalışmasında 3626 cm⁻¹ dalga sayısında O-H gerilmesini belirlemiştir.

Bu çalışmada belirlenen ikinci pik 1635 cm⁻¹ pikidir ve bu pikin suyun H-O-H titreşimleriyle ilişkili olduğunu söylemek mümkündür. Literatürdeki verilere [30,32] göre 1640 cm⁻¹ dalga sayısındaki piklin, Bandipally [37] ise 1636 cm⁻¹ dalga sayısındaki pikin başlıca O-H ve suyun H-O-H bandından kaynaklandığını belirtilmektedir. Kechouane ve Nechnech [38] 1630 cm⁻¹’deki pikin O-H grubunun gerilme titreşimleriyle ilişkili olduğunu belirtirken, Saeed vd. [39] 1638 cm⁻¹’deki pikin su moleküllerinin H-O-H titreşimleriyle ilişkili olduğunu ifade etmektedirler.

Katkısız kilin FT-IR spektrumunda belirlenen bir diğer pik 1115 cm⁻¹ dalga sayısındaki piktir ve bu pik Si-O gerilme titreşimleriyle ilişkilidir. Bu konuda yapılmış çalışmalarda [27, 38] 1030 cm⁻¹ dalga sayısındaki pikin montmorillonit kil minerallerinin Si-O düzlem içi gerilme titreşimlerine karşılık geldiğini ifade edilmiştir. Ayrıca Tabak vd. [30] ile Saeed vd. [39] 1115 cm⁻¹ dalga sayısında Si-O gerilme titreşimlerini gözlemişlerdir.

Bu çalışmada kil minerallerinin Si-O ve Al-O bantları 912 cm⁻¹ ve 997 cm⁻¹ dalga sayılarında titreşim pikleri vermektedir. Benzer şekilde önceki çalışmalarda 910 cm⁻¹ ve 995 cm⁻¹ dalga sayılarında Si-O ve Al-O bağlarının

titreşim pikleri verdiğini belirlemiştir [37] ve bu değerler bu çalışmada kullanılan bentonit kilinin pikleriyle benzerdir.

Kilin FT-IR spektrumunda 873 cm^{-1} dalga sayısında bir başka pik belirlenmiştir. Bu pikin OH bağlı Fe^{3+} ve Al^{3+} 'nın eğilme titreşimleriyle ilişkili olduğunu söylemek mümkündür ve bu pik değeri literatürle uyumludur. Şöyle ki Etim vd. [27] 882.1 cm^{-1} 'deki pikin AlFeOH deformasyonuna, 909.8 ve 995.2 cm^{-1} 'deki pikin ise AlAlOH deformasyonuna karşılık geldiğini ifade etmişlerdir. Tabak vd. [30] çalışmalarında AlAlOH ve AlFeOH bağlarını 888 cm^{-1} ve 999 cm^{-1} dalga sayılarında, Eisazadeh vd. [32] 885 cm^{-1} ve 913 cm^{-1} dalga sayılarında belirlemişlerdir. Ayrıca Saeed vd. [39] 912 cm^{-1} dalga sayısındaki pikin hidroksil gruplarının OH deformasyonuna karşılık geldiğini belirtmektedirler.

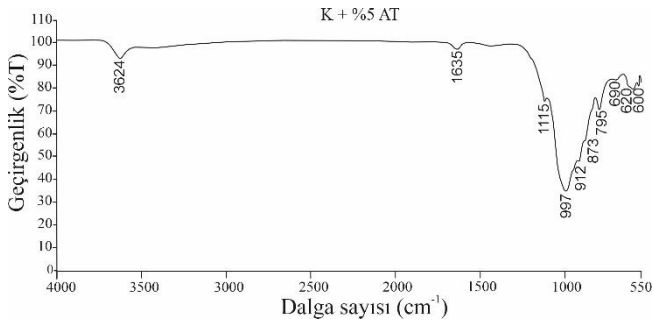
Bu çalışmada belirlenen 795 cm^{-1} dalga sayısındaki pik silis ve kuvarsın Si-O gerilme titreşimleri ile ilişkilidir. Benzer şekilde Etim vd. [27] 749.2 cm^{-1} , Tabak vd. [30] 798 cm^{-1} , Eisazadeh vd. [32] 778 cm^{-1} ve 791 cm^{-1} dalga sayısında, Bandipally [37] 688 ve 795 cm^{-1} , Saeed vd. [39] ise 794 cm^{-1} piklerinde Si-O gerilme titreşimlerini belirlemişlerdir.

Kalsit ve dolomitin düzlem içi Si-O gerilmesine bağlı olarak oluşan titreşim piki, bu çalışmada 708 cm^{-1} dalga sayısında belirlenmiştir. Nitekim Tabak vd. [30] 710 - 715 cm^{-1} aralığındaki dalga sayısındaki pikin, Saeed vd. [39] ise 698 cm^{-1} dalga sayısındaki pikin, kalsit ve dolomitin Si-O gerilmesiyle ilişkili olduğu ifade etmektedirler.

Katkısız kilin FT-IR spektrumunda 600 cm^{-1} ve 620 cm^{-1} dalga sayısında iki farklı pik daha belirlenmiştir. Bu pikler Al-O ve Si-O gerilmesiyle ortaya çıkmıştır. Ayrıca Al-O ve Si-O bağlarını veren titreşim dalga piki Eisazadeh vd. [32] tarafından 620 cm^{-1} olarak belirlenmiştir.

2.4.2. K + %5 AT örneğinin FT-IR analizi değerlendirilmesi

Kile %5 AT katkısı eklendiğinde FT-IR spektrumunda 600 cm^{-1} , 620 cm^{-1} , 690 cm^{-1} , 795 cm^{-1} , 873 cm^{-1} , 912 cm^{-1} , 997 cm^{-1} , 1115 cm^{-1} , 1635 cm^{-1} , 3624 cm^{-1} dalga sayılarında pikler belirlenmiştir (Şekil 2).



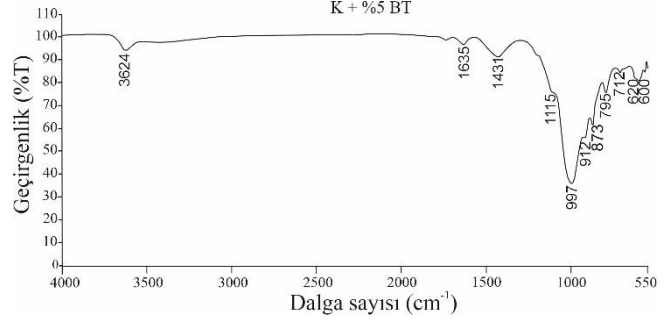
Şekil 2. K + %5 AT örneğine ait FT-IR spektrumu

Bu pikler katkısız kilde belirlenen pikler ile benzerdir ve bu veri %5 oranındaki asidik tüf katkısının kilin yapı bileşenlerinde bir değişim meydana getirmediğini göstermektedir. Bunun nedeni olarak asidik tüfün CaO oranının %0.76 gibi çok düşük bir değerde olması, bu CaO miktarının puzolanik reaksiyon oluşturmada yetersiz kaldığı ve bu nedenle puzolanik reaksiyonun oluşamadığı

şeklinde açıklanabilir. Bu sonuç puzolanik reaksiyonun oluşabilmesi için ilave CaO'ya gereksinim duyulduğunu açık şekilde göstermektedir.

2.4.3. K + %5 BT örneğinin FT-IR analizi değerlendirilmesi

K+%5 BT örneğinde yapılan FT-IR analizi ile 600 cm^{-1} , 620 cm^{-1} , 712 cm^{-1} , 795 cm^{-1} , 873 cm^{-1} , 912 cm^{-1} , 997 cm^{-1} , 1115 cm^{-1} , 1431 cm^{-1} , 1635 cm^{-1} , 3624 cm^{-1} dalga sayılarında pikler belirlenmiştir (Şekil 3).

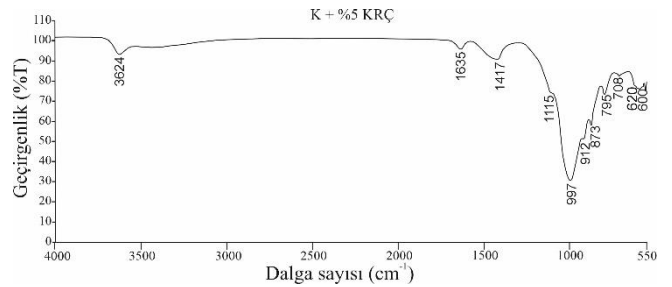


Şekil 3. K + %5 BT örneğine ait FT-IR spektrumu

Bu örnekte katkısız kilden farklı olarak 1431 cm^{-1} dalga sayısında yeni bir pik gözlenmiştir. Bu pik kalsit ve dolomitin CO_3 gerilmesiyle ilişkilidir ve CaO'dan kaynaklanmaktadır. Nitekim bazik tüfün bileşiminde %28.70 oranında CaO bulunmaktadır [45] ve 1431 cm^{-1} dalga sayısında gözlenen pik, CaO değeri yüksek olan bazik tüf katkısıyla puzolanik reaksiyonların geliştiğini göstermektedir.

2.4.4. K + %5 KRÇ örneğinin FT-IR analizi değerlendirilmesi

%5 KRÇ katkılı örneğin FT-IR analiz sonuçları incelendiğinde FT-IR spektrumunda 600 cm^{-1} , 620 cm^{-1} , 708 cm^{-1} , 795 cm^{-1} , 873 cm^{-1} , 912 cm^{-1} , 997 cm^{-1} , 1115 cm^{-1} , 1417 cm^{-1} , 1635 cm^{-1} , 3624 cm^{-1} dalga sayılarında pikler gözlenmiştir (Şekil 4).



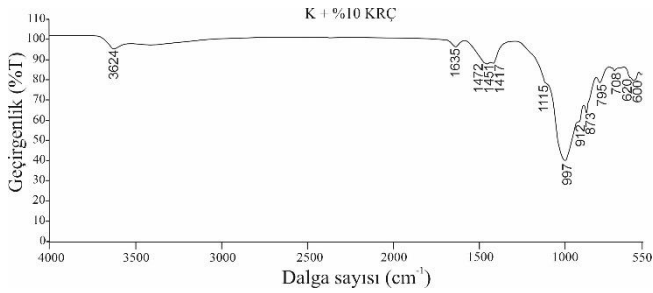
Şekil 4. K + %5 KRÇ örneğine ait FT-IR spektrumu

Tüm pikler katkısız kilde ortaya çıkan pikler ile aynı değerde olup, sadece katkısız kilden farklı olarak kilin spektrumunda bulunmayan 1417 cm^{-1} dalga sayısında yeni bir pik oluşmuştur. Bu dalga sayısı kalsit ve dolomitin CO_3 gerilmesiyle ilişkilidir ve CaO'dan kaynaklanmaktadır. Bu pik kireçteki Ca-O bağlarının özelliğidir. Bu çalışmada 1417 cm^{-1} dalga sayısında oluşan bu yeni pikin literatürle uyumlu olduğu ve puzolanik reaksiyonlar sonucu oluşan C-S-H ve C-A-S-H bileşikleriyle ilişkili olduğu söylenebilir. Nitekim Etim vd. [27] kireç katkısıyla birlikte gözlenen 1420.1 cm^{-1} dalga sayısındaki pikin, kalsiyum silikat hidrat C-S-H ve kalsiyum alüminat silikat hidrat C-A-S-H

bileşikleri formunda kalsit oluşumu ile ilişkili olduğunu belirtmektedirler. Tabak vd. tarafından yapılan çalışmada [30] 1430-1382 cm^{-1} aralığında belirlenen piklerin kalsit ve dolomitin CO_3 gerilmesiyle ilişkili olduğunu belirtilmiştir. Eisazadeh vd. [32] 1420 cm^{-1} dalga sayısındaki pikin kireçteki Ca-OH titreşimiyle ilişkili olduğunu, Bandipally [37] ise 1418 cm^{-1} dalga sayısındaki pikin kireçteki Ca-O bağlarının özelliği olduğunu, belirtmektedir. Madejova ve Komadel [33] tarafından yapılan çalışmada elde edilen 1425 cm^{-1} dalga sayısındaki pikin kalsit varlığına işaret ettiğini ifade edilmektedir.

2.4.5. K + %10 KRÇ örneğinin FT-IR analizi değerlendirilmesi

Kile %10 kireç katkısı eklenerek elde edilen örnekte 600 cm^{-1} , 620 cm^{-1} , 708 cm^{-1} , 795 cm^{-1} , 873 cm^{-1} , 912 cm^{-1} , 997 cm^{-1} , 1115 cm^{-1} , 1417 cm^{-1} , 1451 cm^{-1} , 1472 cm^{-1} , 1635 cm^{-1} , 3624 cm^{-1} pikleri oluşmuştur (Şekil 5).

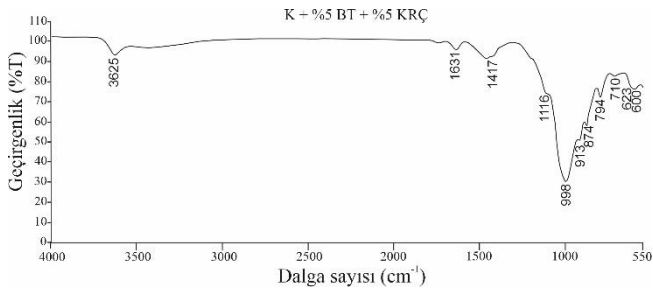


Şekil 5. K + %10 KRÇ örneğine ait FT-IR spektrumu

Bu karışımda katkısız kilden farklı olarak 1417 cm^{-1} , 1451 cm^{-1} , 1472 cm^{-1} dalga sayılarında Ca-O bağlarının titreşim pikleri olan yeni pikler gözlenmiştir. Örneğe eklenen kireç ile birlikte artan CaO miktarı ile birlikte Ca-O bağlarının oluşturduğu pik sayısı da artmıştır. Bu durum, CaO miktarının artmasıyla puzolanik reaksiyonların arttığı ve buna bağlı olarak C-S-H/C-A-S-H bileşiklerinin arttığı şeklinde açıklanabilir.

2.4.6. K + %5 BT + %5 KRÇ örneğinin FT-IR analizi değerlendirilmesi

%5 BT+%5 KRÇ katkılı örnekte gerçekleştirilen FT-IR analizinde 600 cm^{-1} , 623 cm^{-1} , 710 cm^{-1} , 794 cm^{-1} , 874 cm^{-1} , 913 cm^{-1} , 998 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} , 1417 cm^{-1} , 1631 cm^{-1} , 3625 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim pikleri görülmüştür (Şekil 6).



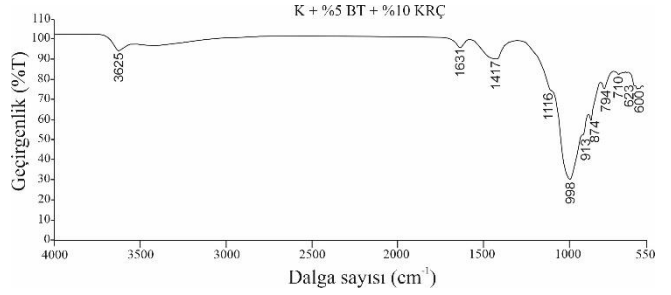
Şekil 6. K + %5 BT + %5 KRÇ örneğine ait FT-IR spektrumu

%5 KRÇ ve %5 BT'nin kullanıldığı katkılı örnekte yapılan FT-IR spektrumundan ortaya çıkan pikler K+%5 BT ve K+%5 KRÇ katkılı örneklerden elde edilen pikler ile çok benzerdir. Bu benzerliğin nedenini, reaktif silika ve alümina

içeriğinin az olmasından dolayı puzolanik reaksiyonların azalması ya da durması veya hem kireçten hem de bazik tüften gelen CaO'nun fazla serbest kireç olarak kalmış olması şeklinde açıklamak mümkündür.

2.4.7. K + %5 BT + %10 KRÇ örneğinin FT-IR analizi değerlendirilmesi

%5 BT + %10 KRÇ katkılı örneğin FT-IR spektrumu incelendiğinde 600 cm^{-1} , 623 cm^{-1} , 710 cm^{-1} , 794 cm^{-1} , 874 cm^{-1} , 913 cm^{-1} , 998 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} , 1417 cm^{-1} , 1631 cm^{-1} , 3625 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim pikleri görülmektedir (Şekil 7).

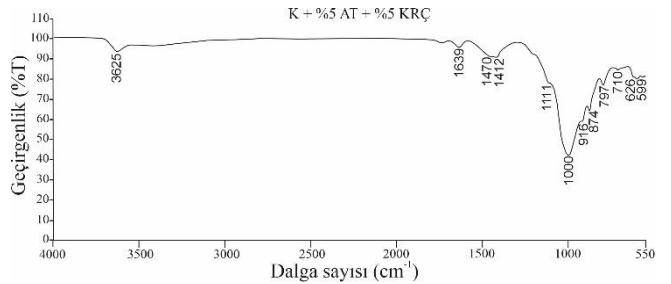


Şekil 7. K + %5 BT + %10 KRÇ örneğine ait FT-IR spektrumu

Bu pikler %5 KRÇ, %5 BT ve %5 KRÇ+%5 BT katkılı örneklerden elde edilen piklerle aynıdır. Kireç katkısının artması zeminde yeni puzolanik reaksiyonlar meydana getirmemiş ve böylece zemin yapı bileşenlerinde herhangi bir değişim oluşturmamıştır. Reaktif silika ve alümina içeriğinin az olması, örneğe eklenen kireç nedeniyle CaO'nun fazla serbest kireç olarak kalmasına neden olmuştur ve bundan dolayı FT-IR spektrumunda herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir.

2.4.8. K + %5 AT + %5 KRÇ örneğinin FT-IR analizi değerlendirilmesi

Kile %5 AT + %5 KRÇ katkısı eklendiğinde 599 cm^{-1} , 626 cm^{-1} , 710 cm^{-1} , 797 cm^{-1} , 874 cm^{-1} , 916 cm^{-1} , 1000 cm^{-1} , 1111 cm^{-1} , 1412 cm^{-1} , 1470 cm^{-1} , 1639 cm^{-1} , 3624 cm^{-1} dalga sayılarında pikler oluşmuştur (Şekil 8).

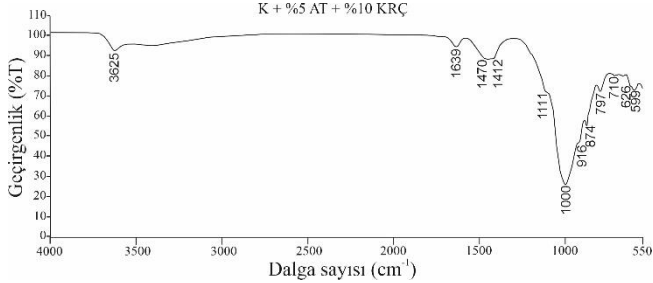


Şekil 8. K + %5 AT + %5 KRÇ örneğine ait FT-IR spektrumu

Bu pik değerleri katkısız kilin FT-IR spektrumuna benzerlik sunmaktadır. Ancak, 1412 ve 1470 cm^{-1} dalga sayılarında kalsit ve dolomitin CO_3 titreşimleri oluşmuştur. Bu durum asidik tüftün bileşimindeki $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının %90.27 gibi oldukça yüksek bir değerde olması ve örneğe eklenen kireç ile birlikte puzolanik reaksiyonların meydana gelerek C-S-H/C-A-S-H bağlarını oluşturduğu şeklinde açıklanabilir.

2.4.9. K + %5 AT + %10 KRÇ örneğinin FT-IR analizi değerlendirilmesi

Kile %5 AT + %10 KRÇ katkısı eklenerek hazırlanan örnekte gerçekleştirilen FT-IR spektrumunda ise 599 cm^{-1} , 626 cm^{-1} , 710 cm^{-1} , 797 cm^{-1} , 874 cm^{-1} , 916 cm^{-1} , 1000 cm^{-1} , 1111 cm^{-1} , 1412 cm^{-1} , 1470 cm^{-1} , 1639 cm^{-1} , 3625 cm^{-1} pikleri meydana gelmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. K + %5 AT + %10 KRÇ örneğine ait FT-IR spektrumu

Bu pikler %5 AT+%5 KRÇ katkılı örnekte yapılan FT-IR analiz sonuçlarıyla aynıdır ve kireç katkı oranının %5'den %10'a çıkarılmış olması yeni değişiklikler oluşturmamış ve FT-IR spektrumunda kayda değer bir değişiklik gözlenmemiştir.

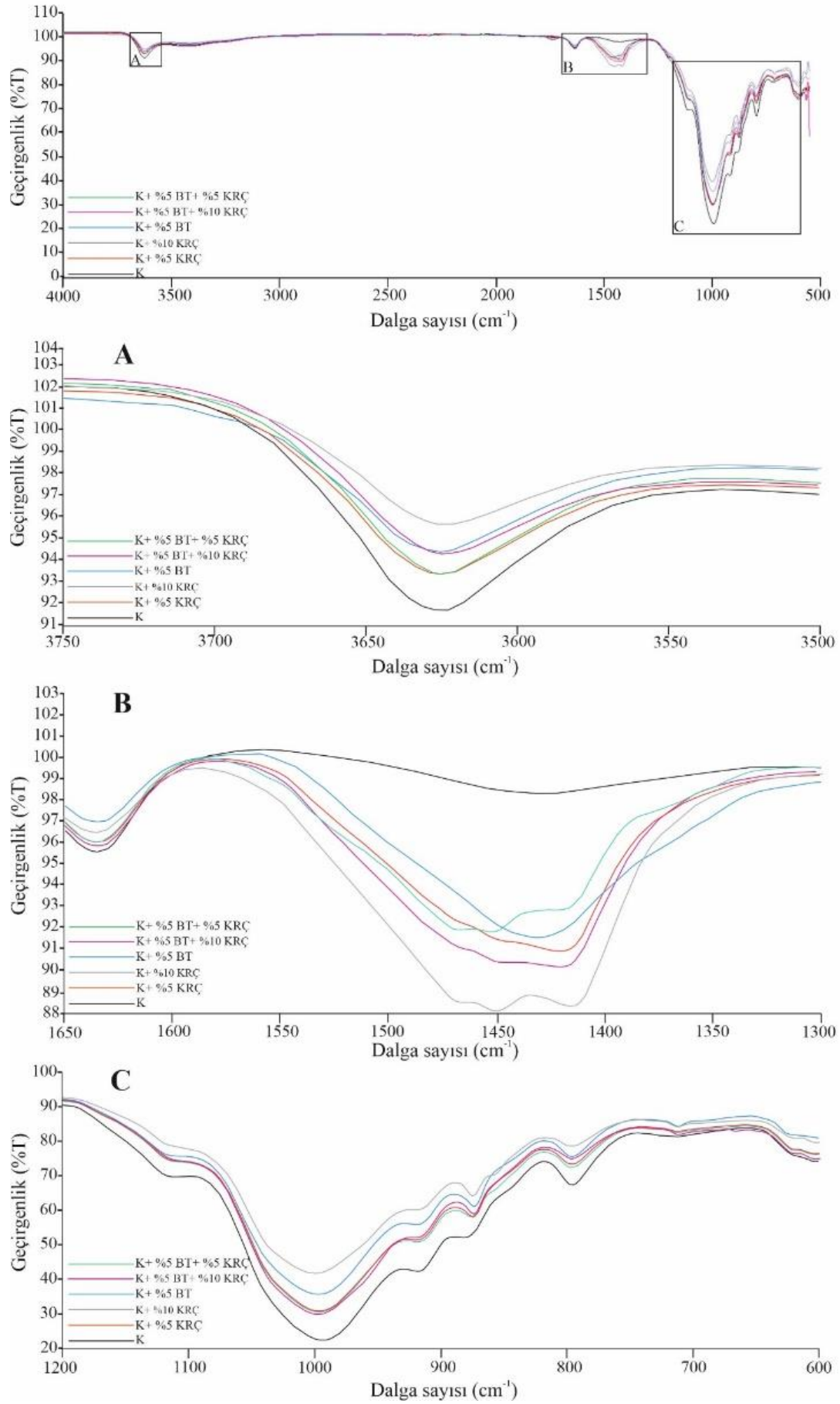
2.4.10. Katkılı örneklerde %T değerlerinin değişimi

FT-IR spektrumu yönteminde geçirgenlik olarak ifade edilen %T değeri, madde üzerinden geçen ışımının şiddetinin (I), madde üzerine gelen ışımının şiddetine (I_0) oranı olarak ifade edilmektedir. Bu çalışma sonucunda elde edilen 3624 cm^{-1} , 3625 cm^{-1} , 1631 cm^{-1} , 1635 cm^{-1} , 1639 cm^{-1} 'deki pikler dikkate alındığında, örneklere katkı eklenmesinin önemli bir pik kaymasına neden olmamasına karşın pikler bir miktar genişlediği, şiddetlerinin azaldığı ve %T değerlerinin arttığı görülmektedir. Tüm katkılı örneklerde %T değerleri birbirlerine çok yakın olmakla birlikte %10 KRÇ katkılı örnekte bu değer daha yüksektir (Şekil 10, 11). Diğer bir ifadeyle kireç ve tuf içeriğinin artmasıyla bu piklerdeki karakteristik absorbanın azaldığı söylenebilir. Bu nedenle, kireç ve tuf ilavesinin neden olduğu IR spektrumundaki nispi değişikliklerin, puzolanik reaksiyonlarla oluşturulan çimentolu ürünlerin hidratasyonu için moleküler ve adsorbe edilmiş su tüketimi ile meydana geldiği varsayılabilir.

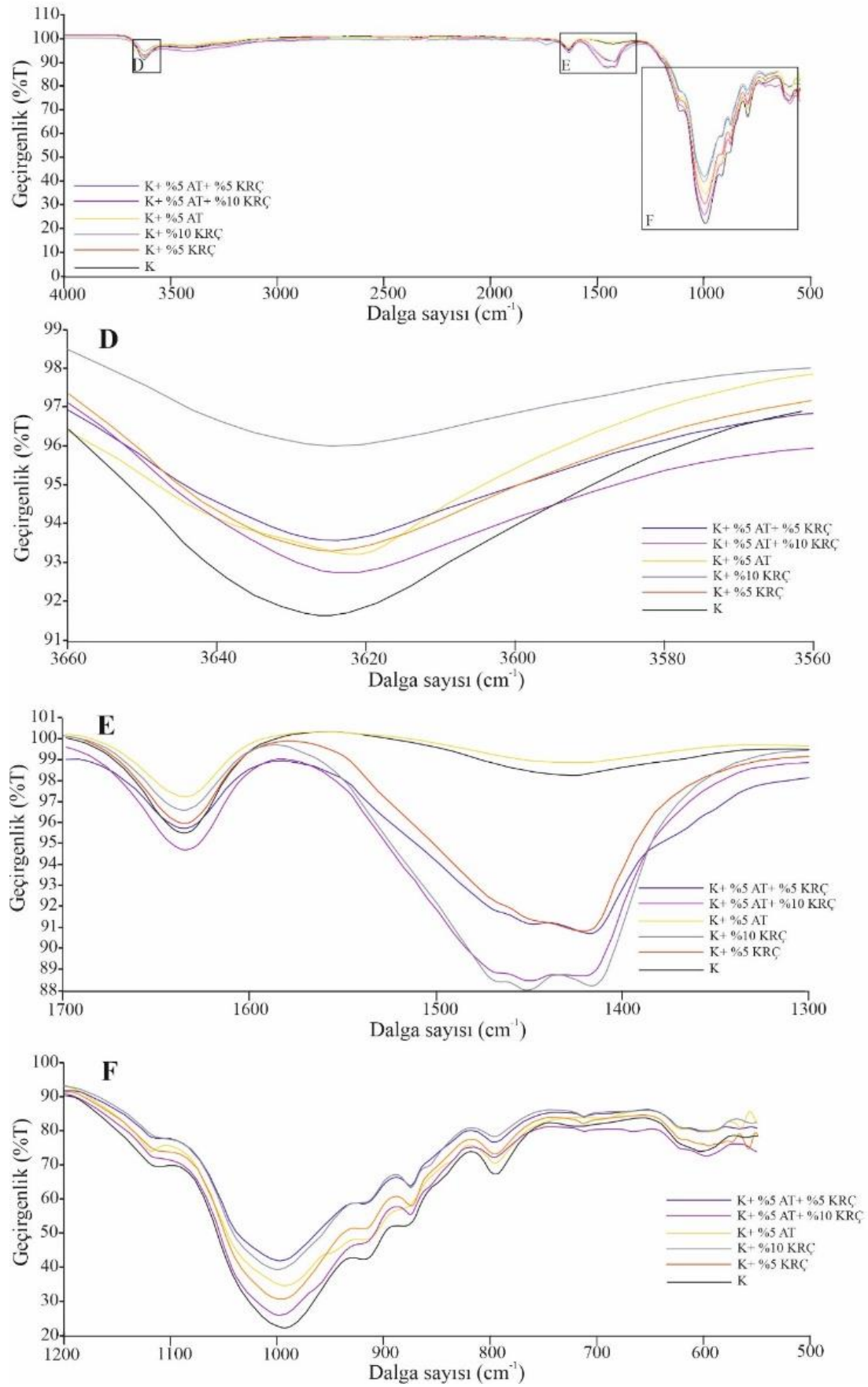
Katkısız kile kireç ve tuf katkıları eklendikçe 1412 cm^{-1} , 1417 cm^{-1} , 1431 cm^{-1} , 1451 cm^{-1} , 1470 cm^{-1} ve 1472 cm^{-1} birbirine çok yakın dalga sayılarında ve katkısız kilin FT-IR spektrumunda bulunmayan yeni pikler belirlenmiştir. Pik şiddetleri ise katkısız kile göre artmıştır. Kireç ve tuf katkılarıyla birlikte geçirgenlik değeri azalmış ve %T değerlerindeki en büyük azalma ise %10 KRÇ katkılı örnekte meydana gelmiştir (Şekil 10, 11).

Katkısız kilin mineral yapısındaki Si-O bağına karşılık gelen $599-1116\text{ cm}^{-1}$ arasındaki pikler, katkıların eklenmesiyle birlikte kademeli olarak azalmıştır. Kireç ve tuf katkılarının eklenmesiyle pikler genişlemiş, şiddetleri azalmış, ancak önemli bir tepe kayması gözlenmemiştir. %T değerlerinde en fazla azalma %10 KRÇ katkılı örnekte olmasına rağmen tüm örneklerdeki değişim birbirine çok yakındır (Şekil 10, 11). Bu durum kil minarelleri ile katkı

maddeleri arasında puzolanik reaksiyonun bir sonucu olarak kil mineralinde Si-O'nun azaldığı ile açıklanabilir. Diğer bir ifadeyle puzolanik reaksiyonun ilerleyişinde alüminosilikatanın lamine yapısı değişmiştir [28]. Kireç ve tuf katkılarının kullanılmasıyla, kil minerallerinin azaldığı, C-S-H bileşiklerinin oluştuğu ifade edilebilir.



Şekil 10. Kireç ve bazık tuf katkılı örneklerin FT-IR spektrumlarının karşılaştırması



Şekil 11. Kireç ve asidik tüf katkılı örneklerin FT-IR spektrumlarının karşılaştırması

Sonuçlar

Katkısız ve katkılı kil örneklerinde meydana gelen mikroyapısal değişimleri belirlemek amacıyla yapılan FT-IR analiz sonuçlarını şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Katkısız kilde Si-O, Al-O, O-H bağlarının özelliği olan pikler gözlenmiştir.
- Katkıların eklenmesiyle birlikte özellikle kireç katkısıyla yeni pikler oluşmuştur. Bu pikler kalsit ve dolomitin CO₃ gerilmesiyle ilişkilidir ve kireçten kaynaklanmaktadır.
- BT, KRÇ, BT + KRÇ katkılarının kullanıldığı örneklerin FT-IR spektrumları birbirine çok benzerdir. Tek başına bazik tuf, bileşimindeki CaO sebebiyle çok az bir puzolanik reaksiyon oluşturmuştur. Ancak reaktif silika ve alümina içeriğinin az olmasından dolayı kireç ile birlikte kullanıldığında yeni puzolanik reaksiyonlar oluşturmamıştır.
- Asidik tufün tek başına kullanıldığı örnekte katkısız kilin FT-IR spektrumuna benzer pikler belirlenmiştir, bunun nedeni asidik tufün bileşiminde puzolanik reaksiyon başlatacak oranda yeterli CaO bulunmamasıdır.
- Asidik tufün kireçle kullanıldığı örneklerde iki yeni pik gözlenmiştir. Bu pikler eklenen kireç ile birlikte puzolanik reaksiyonların meydana gelmesi ve C-S-H/C-S-A-H bağlarının oluşması ile ilişkilidir.
- Reaktif silika ve alümina içeriğinin az olması nedeniyle bazik tufün kireçle kullanıldığı örneklerde kireç oranının artması FT-IR spektrometresinde bir değişim meydana getirmemiştir.
- %T değerleri, kile katkı eklenmesiyle birlikte çok belirgin miktarlarda değişim göstermemiştir. 3624 cm⁻¹, 1631-1639 cm⁻¹, 599-1116 cm⁻¹'deki %T değerlerinin artışı, puzolanik reaksiyon oranlarının artması şeklinde yorumlanabilir.
- %10 kirecin eklenmesiyle kil mineralleri ile katkı maddeleri arasında puzolanik reaksiyonun bir sonucu olarak Si-O azalmıştır.
- Kireç ve tuf katkılarının kullanılmasıyla, kil minerallerinin azaldığı, C-S-H bileşiği formunda kalsit oluşumunun gerçekleştiği söylenebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında katkı malzemesi olarak kireç ile birlikte asidik ve bazik tüflerin kullanılması ile yapılan stabilizasyon sonrasında FT-IR spektrumunda puzolanik reaksiyonlardan dolayı çok belirgin olmayan bazı değişiklikler meydana gelmiştir. Meydana gelen bu değişimlerin literatürde bu konuda yapılan önceki çalışmalara ait sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu konuda farklı katkı türü ve oranı ile yapılacak çalışmalar, FT-IR spektrumu yöntemini kullanılmasının yaygınlaşmasında rol oynayacaktır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Yazar Katkıları

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Zülfü GÜROCAK, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Teşekkür

Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] N.O. Attoh-Okine, “Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 9 no.5, pp. 283-287, 1995, DOI: 10.1016/0950-0618(95)00030-J.
- [2] M.R. Asgari, A.B. Dezfali, M. Bayat, “Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with Cement/lime”, *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 8, no. 3, pp. 1439-1452, 2015, DOI: 10.1007/s12517-013-1173-1.
- [3] A.R. Goodarzi, S.H. Goodarzi, H.R. Akbari, Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste”, *Iranian Journal of Science And Technology-Transactions of Civil Engineering*, vol. 39, no. C2, pp. 333-350, 2015, DOI: 10.22099/IJSTC.2015.3138.
- [4] P. Voottipruex, P. Jamsawang, “Characteristics of expansive soils improved with cement and fly ash in Northern Thailand”, *Geomechanics and Engineering An Int'l Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 437-453, 2014, DOI: 10.12989/gae.2014.6.5.437.
- [5] B. Lin, A.B. Cerato, A.S. Madden, M.E. Elwood Madden, “Effect of fly ash on the behavior of expansive soils: microscopic analysis”, *Environmental Engineering Geosciences*, vol. 19 no. 1, pp. 85-94, 2013, DOI: 10.1007/s10236-013-0185-1.
- [6] A. Mahamedi, M. Khemissa, “Cement stabilization of compacted expansive clay”, *Online J. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 33-38, 2013.
- [7] D. Wang, N.E. Abriak, R. Zentar, W. Chen, “Effect of lime treatment on geotechnical properties of Dunkirk Sediments in France”, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, no. 3, pp. 485-503, 2013, DOI: 10.1080/14680629.2012.755935.

- [8] O. Azadegan, S.H. Jafari, J. Li, "Compaction characteristics and mechanical properties of lime/cement treated granular soils", *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 17, pp. 2275-2284, 2012.
- [9] O. Cuisinier, J.C. Auriol, T. Le Borgne, D. Deneele, "Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil", *Eng. Geol.*, vol. 123, no. 3, pp. 187-193, 2011, DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.07.010.
- [10] K. Harichane, M. Ghrici, W. Khebizi, H. Missoum, "Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux", *Proceedings of 29th meeting of AUGC-Tlemcen, Algeria*, 2011.
- [11] K.M.A. Hossain, L. Mol, "Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes", *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 8, pp. 3495-3501, 2011, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042.
- [12] T. Ramadas, N.D. Kumar, G. Yesuratnam, "Geotechnical characteristics of three expansive soils treated with lime and fly ash", *Int. J. Earth Sci. Eng.*, vol. 4, pp. 46-49, 2011.
- [13] H.S. Aksoy, M. Yılmaz, E.E. Akarsu, "Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu", *Doğu Anadolu Bölgeleri Araştırmaları*, 2008.
- [14] A.A. Al-Rawas, A.W. Hugo, H. Al-Sami, "Effect of lime, cement and artificial pozzolan on the swelling potential of an expansive soil from Oman", *Building & Environment* 40. Elsevier, pp.267-281, 2005, DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.08.028.
- [15] J. Mallela, H.V. Quintus, K.L. Smith, "Consideration of limestabilized layers in mechanistic-empirical pavement design", *The National Lime Association*, Arlington, Virginia, USA, 2004.
- [16] E. Kalkan, S. Akbulut, "The positive effects of silica fume on the permeability swelling pressure and compressive strength of natural clay liners", *Eng. Geol.*, vol. 73, no. (1-2), pp. 145-156, 2004, DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.01.001.
- [17] A.J., Puppala, A.M. Ramakrishna, L.R. Hoyos, "Resilient moduli of treated clays from repeated load triaxial test", *Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board*, pp. 68-74:1821, 2003, DOI: 10.3141/1821-08.
- [18] D.I. Boardman, S. Glendinning, C.D.F. Rogers, "Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes", *Geotechnique*, vol. 51 no. 6 pp.533-543, 2001, DOI: 10.1680/geot.2001.51.6.533.
- [19] D.N. Little T. Scullion, P.B.V.S. Kota, J. Bhuiyan "Guidelines for mixture design and thickness design for stabilized bases and subgrades", Austin, Texas: Texas A and M University, 1995.
- [20] M. Ç. Karakaya, "Kil minerallerinin özellikleri ve tanımlama yöntemleri", Bizim Büro Basımevi, Ankara, 2006, pp. 541-595.
- [21] T. Gündüz, "Enstrümental analiz", Bilge Yayıncılık, Ankara, 1990, 122,123.
- [22] Anonim, <https://www.petkim.com.tr/Userfiles/File/uretim/kalitekontrol-teknikservis/Plastik.pdf>, Erişim Tarihi: 15.06.2022.
- [23] F. Puertas, A. Fernandez-Jimenez, M.T. Blanco-Varela, "Pore solution in alkaliactivated slag cement pastes. relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate", *Cement And Concrete Research*, vol. 34, no. 1, 139-148, 2004.
- [24] C.E.M. Gomes, O.P. Ferreira, "Analyses of microstructural properties of Va/VeoVa copolymer modified cement pastes", *Polimeros: Ciencia E Tecnologia*, vol. 15, no. 3, 2005, pp. 193-198.
- [25] M.J. Varast, M.A. De Buergo and R., Fort, "Natural cement as the precursor of Portland cement: methodology for its identification", *Cement And Concrete Research*, vol. 35 pp. 2055-2065, 2005, DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.10.045, 2005.
- [26] F. Puertas, A. Fernandez-Jimenez, "Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes", *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, pp. 287-292, 2003, DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00059-8, 2003.
- [27] R.K. Etim, I.C. Attah, D.U. Ekpo, I.N. Usanga, "Evaluation on stabilization role of lime and cement in expansive black clay-oyster shell ash composite", *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2021, DOI: 10.1007/s40515-021-00196-1.
- [28] Y. Cheng, S. Wang, J. Li, X. Huang, C. Li, J. Wu, "Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans", *Construction and Building Materials*, vol. 187, pp. 1031-1038, 2018, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.061.
- [29] A. Hajimohammadi, J.L. Provis, J.S.J. Van Deventer, "The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation", *Cement and Concrete Research* vol. 41, no. 3, 210-216, 2011, DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.02.001.
- [30] A. Tabak, B. Afsin, B. Caglar, E. Koksall, "Characterization and pillaring of a Turkish

- bentonite (Resadiye)", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 313, no. 1, pp. 5-11, 2007, DOI: 10.1016/j.jcis.2007.02.086.
- [31] K. Bukka, J.D. Miller, J. Shabtai, "FT-IR Study of deuterated montmorillonites: structural features relevant to pillared clay stability", *Clays and Clay Minerals*, vol. 40, pp. 92-102 1992, DOI: 10.1346/CCMN.1992.0400110 1992.
- [32] A. Eisazadeh, K.A. Kassim, H. Nur, "Solid-state NMR and FTIR studies of lime stabilized montmorillonitic and lateritic clays", *Applied Clay Science*, vol. 67-68, pp. 5-10, 2012, DOI: 10.1016/j.clay.2012.05.006.
- [33] J. Madejova, P. Komadel, "Baseline studies of the clay minerals society source clays: infrared methods". *Clays and Clay Minerals*, vol. 49, no. 5, pp.410-432, 2001.
- [34] H.W.V.D. Marel, H. Beutelspacher, "Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and their Admixtures", *Elsevier Scientific Publishing*, Amsterdam,1976.
- [35] S. Gunasekaran, G. Anbalagan, "Spectroscopic characterization of natural calcite minerals", *Spectrochimica Acta (Part A)* vol. 68, pp. 656-664, 2007, DOI: 10.1016/j.saa.2006.12.043.
- [36] K. Nacamoto, "Infrared Spectra of Inorganic and Coordinated Compounds" Wiley, New York, 1970.
- [37] S. Bandipally, "Characterization of lime-treated soils for assessing short-term strength behavior", Master Thesis, Geotechnical Engineering Division, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, 2017.
- [38] Z. Kechouane, A. Nechnech, "Characterization of an expansive clay treated with lime: Effect of compaction on the swelling pressure", *4th International Congress in Advances in Applied Physics and Materials Science (APMAS 2014)*, pp. 020057-1–020057-8, 2015, DOI: 10.1063/1.4914248.
- [39] K.A.H. Saeed, K.A. Kassim, N.Z.M. Yunus, H. Nur, "Physico-chemical characterization of lime stabilized tropical kaolin clay", *Jurnal Teknologi*, vol. 72, no. 3, 83-90, 2015, DOI: 10.11113/jt.v72.4021.
- [40] A.S. Özcan, "Doğal bentonitin karakterizasyonu ve kurşun(II) iyonlarını adsorpsiyon yeteneği", *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bil. Enst. Dergisi* vol. 12, no. 2, 85-97, 2010.
- [41] C. Bilgiç, Ş. Bilgiç, "Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy to analysis of clays", *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(*IMSMATEC Özel Sayı*), pp. 37-46, 2018, DOI: 10.17100/nevbittek.632788.
- [42] A. Akbulut, "Bentonit", MTA Eğitim Serisi-32, Ankara, 1996.
- [43] Y. Önem, "Sanayi Madenleri", Kozan Ofset, Ankara, 2000.
- [44] S. Genç, "Şişen Zeminler ve Bentonit-kaolin karışımlarının şişme özellikleri", Yüksek Lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [45] Y. Aslan Topçuoğlu, "Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi", Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2020.
- [46] Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, American Society for Testing and Materials ASTM D698- 12e2, 2012.