

TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI

11. ULUSAL BETON KONGRESİ

21. YÜZYILDA BETON

BİLDİRİLER KİTABI

22-23-24 Mayıs 2025

Atatürk Üniversitesi
Nene Hatun Kongre ve Kültür Merkezi
ERZURUM

https://betonkongresi.org/

E-posta: beton2025@imo.org.tr

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
ERZURUM ŞUBESİ
Lalapaşa Mah. Pelit Meydanı Cad. Doğu Apt.
Kat:3 No: 5-6 Yakutiye / Erzurum
Tel: (0-442) 233 47 03
https://erzurum.imo.org.tr

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
İSTANBUL ŞUBESİ
Mumhane Cad. No:21 Karaköy
Beyoğlu - İstanbul
Tel: (0-212) 293 20 00
http://istanbul.imo.org.tr

TÜRK MÜHENDİS VE MİMAR ODALARI BİRLİĞİ
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
İ S T A N B U L Ş U B E S İ

Mumhane Cad. No:21 Karaköy - İSTANBUL
Tel : (0212) 293 20 00 (Pbx)
Faks : (0212) 232 09 12
E-Posta : istanbul@imo.org.tr
Web : http://istanbul.imo.org.tr
http://www.facebook.com/imoistanbulsube
http://www.twitter.com/imoistanbulsube
http://www.youtube.com/user/imoistanbulsube
http://www.instagram.com/imoistanbul
https://www.linkedin.com/company/insaat-muhendisleri-odasi-istanbul-subesi

Oda Yayın No: E /25 /03

ISBN : 978-605-01-1700-4

Baskı Hazırlık:
MAYA BASIN YAYIN MATBAACILIK TİC. LTD. ŞTİ.
Davutpaşa Cad. Güven İş Merkezi No: 83 A Blok No: 56 Topkapı - İSTANBUL
Tel: 0-212 638 64 08 Fax: 0-212 638 64 09
E-Posta: maya@mayadergi.com

DÜZENLEME KURULU

Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA (İTÜ) (Başkan)	**Prof. Dr. Remzi ŞAHİN (ATAÜNİ) (Başkan)**
Evren KORKMAZER	**Sinem KOLGU**
Melih ERMANCIK	**Prof. Dr. Özkan ŞENGÜL**
Prof. Dr. Nilüfer ÖZYURT ZİHNİOĞLU	**Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL**
Prof. Dr. Özgür ÇAKIR	**Prof. Dr. Rıza POLAT**
Prof. Dr. Hasan YILDIRIM	**Doç. Dr. Mahmut KILIÇ**
Doç. Dr. Meral OLTULU	**Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN**
Dr. Öğr. Üyesi Arif Emre SAĞSÖZ	**Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL**
Arş. Gör. Emrah TURAN	**Özer OR**
Coşar YILMAZ	**Elif ERSOY**
Hakan UNUS	**İsmail Hakkı BİLGE**

DANIŞMA KURULU

Nusret SUNA
TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Selçuk ULUATA
TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Mehmet SEKMEN
Erzurum Büyükşehir Belediye Başkanlığı

Prof. Dr. Ahmet HACIMÜFTÜOĞLU
Atatürk Üniversitesi Rektörlüğü

Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK
Erzurum Teknik Üniversitesi Rektörlüğü

Nuran DANIŞMAN
Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Yapı Malzemeleri Daire Başkanlğı

Şenol ALTIOK
T.C Karayolları 1.Bölge Müdürlüğü

Fatih GÜNAYDIN
T.C Karayolları 12.Bölge Müdürlüğü

Oğuzhan YAVUZ
DSİ 8.Bölge Müdürlüğü

Ali LALOĞLU
Erzurum Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü

Yavuz IŞIK
Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB**)**

M. Erdal EREN
Türkiye Müteahhitler Birliği (TMB)

Osman İLGEN
Katkı Üreticileri Birliği (KÜB)

Yüksel İ. TONGUÇ
Türk Müşavir Mühendis ve Mimarlar Birliği (TMMMB)

Ülkü KÜÇÜKKAYALAR
Türkiye Prefabrik Birliği (TPB)

Temel YAZ
Agrega Üreticileri Birliği (AGÜB)

BİLİM KURULU

Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (Başkan)

Prof. Dr. Abdurrahman GÜNER	**Prof. Dr. Fahriye KILINÇKALE**	**Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ**
Prof. Asım YEĞİNOBALI	**Prof. Dr. Fevziye AKÖZ**	**Prof. Dr. Mustafa TOKYAY**
Prof. Dr. Bülent BARADAN	**Prof. Dr. Fikret TÜRKER**	**Prof. Dr. Saim AKYÜZ**
Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR	**Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL**	**Prof. Dr. Turan ÖZTURAN**
Prof. Dr. Erbil ÖZTEKİN		**Prof. Dr. Kambiz RAMYAR**

Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN Gazi Üniversitesi	**Prof. Dr. İlker TEKİN** Karabük Üniversitesi	**Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL** Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Huzeyfe AKÇA Yıldız Teknik Üniversitesi	**Prof. Dr. İlker USTABAŞ** Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Safa NAYİR** Karadeniz Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA Afyon Kocatepe Üniversitesi	**Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY** Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi	**Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL** Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet Onur PEHLİVAN Türk-Amerikan Üniversitesi	**Doç. Dr. İsmail KILIÇ** Kırklareli Üniversitesi	**Doç. Dr. Serdar GÖKTEPE** Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ahsanollah BEGLARIGALE İstanbul Okan Üniversitesi	**Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN** Orta Doğu Teknik Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Serhan ULUKAYA** Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Ali MARDANİ Uludağ Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi İsmail YILDIZ** Atatürk Üniversitesi	**Prof. Dr. Serkan SUBAŞI** Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Ali ÖZ Atatürk Üniversitesi	**Prof. Dr. Lutfullah TURANLI** Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	**Prof. Dr. Sinan Turhan ERDOĞAN** Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Anıl NİŞ İstanbul Gelişim Üniversitesi	**Doç. Dr. M. Yasin DURGUN** Bartın Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Bahadır KESKİN** Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
Prof. Dr. Atila Gürhan ÇELİK Giresun Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Alper ÇANKAYA** İzmir Katip Çelebi Üniversitesi	**Doç. Dr. Süleyman İPEK** Bingöl Üniversitesi
Prof. Dr. Burcu AKÇAY **Kocaeli Üniversitesi**	**Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ** İnönü Üniversitesi	**Doç. Dr. Süleyman Kamil AKIN** KTO Karatay Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Büşra AKTÜRK İstanbul Bilgi Üniversitesi	**Doç. Dr. Mehmet KAYA** Yozgat Bozok Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ÖZEN** Bursa Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Cemal KARAASLAN Iğdır Üniversitesi	**Doç. Dr. Mehmet Timur CİHAN** Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi	**Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU** Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Cenk KARAKURT Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi	**Dr. Muhammet ATASEVER** Abdullah Gül Üniversitesi	**Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN** Süleyman Demirel Üniversitesi
Doç. Dr. Çağla Meral AKGÜL Orta Doğu Teknik Üniversitesi	**Doç. Dr. Murat ÇAVUŞ** Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi	**Prof. Dr. Şemsi YAZICI** Ege Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Didem OKTAY Yıldız Teknik Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DAYI** Düzce Üniversitesi	**Doç. Dr. Şirin KURBETCİ** Karadeniz Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emrah YILMAZ Düzce Üniversitesi	**Prof. Dr. Nabi YÜZER** Yıldız Teknik Üniversitesi	**Doç. Dr. Tahir GÖNEN** Uşak Üniversitesi
Doç. Dr. F. Tuğçe ŞENBERBER DUMANLI İstanbul Nişantaşı Üniversitesi	**Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL** Akdeniz Üniversitesi	**Prof. Dr. Turhan BİLİR** İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL Yozgat Bozok Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER** Karadeniz Teknik Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL** Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE İzmir Demokrasi Üniversitesi	**Doç. Dr. Nusret BOZKURT** Bitlis Eren Üniversitesi	**Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM** İskenderun Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hadaan PEHLİVAN Kilis 7 Aralık Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Oğuz GÜNEŞ** İstanbul Teknik Üniversitesi	**Doç. Dr. Ümit YURT** Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Prof. Dr. Hakan Nuri ATAHAN İstanbul Teknik Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Onur ÖZTÜRK** Kocaeli Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Ünal Anıl DOĞAN** İstanbul Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Halit Alperen BULUT Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi	**Prof. Dr. Özge ANDİÇ ÇAKIR** Ege Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Yeşim TARHAN** Ardahan Üniversitesi
Prof. Dr. Halit YAZICI Dokuz Eylül Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Özgür EKİNCİ** İstanbul Teknik Üniversitesi	**Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ** Yıldız Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ULUGÖL Ankara Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Özlem KASAP KESKİN** Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi	**Doç. Dr. Zeynep Başaran BUNDUR** Özyeğin Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN İnönü Üniversitesi	**Prof. Dr. Rüstem GÜL** Iğdır Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Zinnur ÇELİK** Atatürk Üniversitesi
Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	**Dr. Öğr. Üyesi Saadet Gökçe GÖK** Kırklareli Üniversitesi	

SEKRETERYA

Dr. Öğr. Üyesi Arif Emre SAĞSÖZ	**Rezan BULUT**
Hasan ÜNAL	**Yasin KALKAN**
Murat CAF	**Ahmet Tuğrul YILDIZ**

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
İSTANBUL ŞUBESİ
Kemankeş Mah. Mumhane Cad. No: 21 Karaköy,
Beyoğlu / İstanbul
istanbul.imo.org.tr **/** istanbul@imo.org.tr
+90 212 293 20 00

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
ERZURUM ŞUBESİ
Lalapaşa Mah. Pelit Meydanı Cad. Doğu Apt. Kat:3 No: 5-6
Yakutiye / Erzurum
erzurum.imo.org.tr / imoerzurum@imo.org.tr
+90 442 233 47 03

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... **XI**

SUNUŞ - TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI İSTANBUL ŞUBE BAŞKANI ..... **XIII**

SUNUŞ - TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ERZURUM ŞUBE BAŞKANI ..... **XIII**

LİF DONATILI BETONLARIN EVRİMİ **15**
Mehmet Ali TAŞDEMİR, Burcu AKÇAY

DEPREMDE YIKILMIŞ BETONARME BİR BİNADAN BETON VE DONATI NUMUNESİ ALINMASI **33**
Levent Mazılıgüney, İsmail Özgür Yaman

İNŞAAT SEKTÖRÜNDE DÖNGÜSEL EKONOMİ: ATIKLARDAN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇÖZÜMLER **57**
Utku BELENDİR, Emircan ÖZÇELİKCİ, Mustafa ŞAHMARAN

HAZIR BETON BASINÇ DAYANIMININ YAPAY ZEKA TABANLI ALGORİTMALAR İLE ERKEN TESPİT EDİLMESİ **67**
Mehmet Kızıldağ, Ceren Ulus, Mehmet Fatih Akay, Hasan Hüseyin Yurdagül, Muhammet Gökhan Altun, Fatih Özer, Emre Örtemiz, Muhittin Tarhan

TEKSTİL DONATILI KABUK ELEMANLARIN YAPISAL ŞEKİL OPTİMİZASYONU VE PROTOTİP ÜRETİMİ **79**
Bedirhan Enes Kelek, Thomas Henzel, Muhammed Maraşlı, Beni Kohen, Esat Selim Kocaman, Nilüfer Özyurt

YÜKSEK SICAKLIĞA MARUZ KALAN BETON YÜZEYLERDEKİ ÇATLAKLARIN DERİN ÖĞRENME ALGORİTMALARI İLE GERÇEK ZAMANLI TESPİTİ **89**
Yılmaz YILMAZ, Safa NAYIR, Şakir ERDOĞDU

3B BASKI TEKNOLOJİLERİ İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR HARÇ GELİŞTİRİLMESİ: İNŞAAT YIKINTI ATIKLARI VE GERİ DÖNÜŞÜM SUYUNUN ETKİLERİ **101**
Sami Berat Tever, Senem Bilici, Shaghayegh Sadeghzadeh Benam, Muhittin Tarhan, İsmail Gökalp, Zeynep Başaran Bundur

MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI MODELLER KULLANILARAK ÜRETİM SÜREÇLERİNDEN ELDE EDİLEN VERİLERLE BETON DAYANIMININ TAHMİNİ: VEKONOPTİMİX **115**
Yusuf Akgündüz, Berkay Özgen, Fatih Akgündüz, Coşkun Sarıkayaoğlu, Fatoş Karavelioğlu, Yiğitcan Demir, Tarık Ömür, Nihat Kabay

BETON BASINÇ DAYANIMI KABUL KRİTERLERİNE UYGUNSUZLUK SEBEPLERİNİN İNCELENMESİ **123**
Halis Bahadır KASİL

TEMEL BETONU DÖKÜMÜNDE KALIPTAKİ SUYUN SERTLEŞMİŞ BETONUN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ **131**
Emre IŞIK, Mehmet GÜNDOĞAN, Ahmet Raif BOĞA

BETON BASINÇ DAYANIMI TAYİNİNDE SİLİNDİR/KÜP ŞEKİLLİ NUMUNE KULLANIMININ SONUÇLAR AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI, SONUÇLAR, DÖNÜŞÜM KATSAYILARI VE ÇELİŞKİLERİN İRDELENMESİ, ÇÖZÜM ÖNERİLERİ **143**
İrfan KADİROĞLU

MEVCUT KOLONLARIN BETON DAYANIMININ BATMA DİRENCİ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ **157**
Mehmet KOLTAŞ, Mücip TAPAN, Levent SELÇUK, İsmail AKKAYA, Ali ÖZVAN

PETG FİLAMENT KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMİŞ KÖPÜK BETONUN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ **167**
Özge ZOR AVCAN, Sadık Alper YILDIZEL, Ülkü Sultan KESKİN

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN BÜZÜLME PARAMETRELERINE TEK DUVARLI KARBON NANOTÜP'ÜN (SWCNT) ETKISI 177
Muhammet SEİS, Muhammed Maraşlı, Serkan Subaşı, Volkan ÖZDAL

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON İLE ATMOSFERİK KIŞ KOŞULLARINDA BETON VE BETONARME İMALATIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ 193
Sefa Talay, Ahmet Ferhat Bingöl, Dilek Okuyucu, Burak Gedik, Muhammet Şahin

YÜKSEK DAYANIMLI KARMA LİFLİ BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIK PERFORMANSI ÜZERİNE ÇİMENTO TÜRÜ VE LİF KOMBİNASYONUNUN ETKİSİ 207
Zeynep ŞAHİN, Remzi ŞAHİN

PİGMENT KATKISININ TERRAZZO'NUN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ¶ 221
Nazife ÖZER, Mustafa Erkan KARAGÜLER

ÇİMENTONUN HIDRATASYON ISISININ TAYİNİNDE KULLANILAN METOTLARIN KARŞILAŞTIRILMASI 227
Çağatay Alp ARSLAN, Makbule Tansu BAYDAŞ, Hülya AKTAŞ, Mustafa DAYI, Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

MEKANİK VE TERMAL OLARAK AKTİVE EDİLMİŞ KİL KULLANIMININ KİREÇTAŞI KALSİNE KİL ÇİMENTOSU BETONUNUN TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ 237
Muhammet Atasever, Sinan Turhan Erdoğan

DÜŞÜK KLİNKERLİ ÇİMENTOLAR: TÜRKİYE'DEKİ MEVCUT DURUM, POTANSİYEL VE ZORLUKLAR 245
Doğukan Demir, Abdurrahman Atlıhan, Yasin Engin

MİKROSİLİKA, NANOSİLİKA VE KARBON NANOTÜP ARASINDAKİ SİNERJİK ETKİNİN HARÇLARIN BASINÇ VE KAPİLARİTE ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ 259
Sidar Nihat BIÇAKÇI, Mahsa Farshbaf MAHERIAN, Hakan Nuri ATAHAN

KARIŞIM SUYU OLARAK KULLANILAN FARKLI SULARIN ÇİMENTO HARÇLARININ BAZI ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI 269
Mustafa DAYI, Makbule Tansu BAYDAŞ, Hülya AKTAŞ, Çağatay Alp ARSLAN, Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

SÖĞÜT/BİLECİK BÖLGESİNDEN ELDE EDİLEN DÜŞÜK KALİTELİ KİL İLE GELİŞTİRİLEN KİREÇTAŞI KALSİNE KİL ÇİMENTO (LC^3) HARÇLARININ TAZE VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ 277
İmirza Okay Altuntaş, Aslıhan Kallıoğulları Öztürk, Oğuzhan Öztürk, Gurkan Yıldırım

İZOLATÖR ATIĞI KATKILI ALKALI AKTİF HARÇLARDA FISTIK KABUĞUNUN PERLİT İLE AGREGA OLARAK İKAMESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ 289
Merve ŞAHİN YÖN, Selim CEMALGİL

YANMIŞ KÖMÜR ATIKLARININ GEOPOLİMER BRİKET ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI 299
Batuhan HACIMUSTAFAOGLU, Talip ÇAKMAK, Zafer KURT, İlker USTABAŞ

BAZALT LİFİ İÇEREN GEOPOLİMER HAFİF BETONUN BAZI MEKANİK ÖZELLİKLERİ İTİBARİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ 309
Sümeyye KARAHÜSEYİN, Şakir ERDOĞDU

İÇSEL KENDİLİĞİNDEN ALGILAYAN HARÇ GELİŞTİRİLMESİ: MATRİS REZİSTİVİTESİNİN OPTİMİZASYONU 323
Ahsanollah BEGLARİGALE

MİKROKAPSÜLLÜ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİ İÇEREN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN EKSENEL ÇEKME DAYANIMI VE FRAKTAL ANALİZİ 333
Pınar YILDIRIM, Savaş ERDEM, Mücteba UYSAL

SÜRDÜRÜLEBİLİR 3D BASKILANABİLİR BETON KARIŞIMLARININ MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ 349
Berrin ATALAY, Yeşim TARHAN, İsmail Hakkı TARHAN

BETONUN YÜKSEK SICAKLIK PERFORMANSINA KALSİNE KOLEMANIT ATIĞININ ETKİSİ 357
Emrah TURAN, Meral OLTULU

FARKLI SÜRE VE SICAKLIKLARDA ETÜV KÜRÜ UYGULANAN GEOPOLİMER HARÇ VE BETONUN ÖZELLİKLERİ 365
Saeid MOGHIMI, Gökhan GÜRBÜZ, Kerem ŞENÇAMLAR, Özge ANDİÇ ÇAKIR

FARKLI ORANLARDA NANO-ALÜMİNYUM (AL_2O_3) KULLANIMININ ALKALİ-AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ 375
Hazar İbrahim CULHACIOĞLU, Hamit ÖZTÜRK, Ezgi GÜRBÜZ, Anıl NİŞ, Savaş ERDEM

JEOTERMAL SULARIN YÜKSEK FIRIN CÜRUF KATKILI HARÇLARIN KALICILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ 385
Arif Emre SAĞSÖZ, Ahmet Tuğrul YILDIZ, Murat CAF, Rıza POLAT

FARKLI ÇİMENTO CİNSLERİNİN BETONUN BASINÇ DAYANIM SINIFLARINA GÖRE KARBON AYAK İZİNE ETKİSİ 401
Dr. İrfan Coşkun, A. Doğukan Demir, Can Otuzbir, Kadir Akyüz, Yasin Engin

YEŞİL ÇİMENTOLAR VE PROJELERDE ÇİMENTO SEÇİMİ 411
Selim Yücel

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ GEOPOLİMER AGREGALARIN GEOPOLİMER BETONUN SU EMME VE KILCAL SU EMME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ 421
Kadriye ERYILMAZ, Rıza POLAT, Bahar DİKİCİOĞLU, Yavuz YEGİN

ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE TÜRKİYE'NİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ 431
Nazım Çağatay Demiral, Cenk Karakurt

ÇİMENTOLU MALZEMELERİN AKTİF REOLOJİ KONTROLÜ KONUSUNDAKİ GELİŞMELER 445
Mert Yücel YARDIMCI, Geert De SCHUTTER, Metwally EZZAT, Dengwu JIAO

ATIKLARIN DEĞERLENDİRİLMESİNE YÖNELIK ÖRNEK ARAŞTIRMALAR 461
Nabi YÜZER

DÜŞÜK KARBONLU BETON VE TÜRKİYE'DEKİ MEVCUT DURUM 483
Yasin Engin, Reşat Sönmez, Aslı Özbora, Koray Saçlıtüre

ALÜMİNOTERMİT KAYNAK ATIĞININ YÜKSEK PERFORMANSLI BETON ÜRETİMİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ 497
Enes Burak ALBAYRAK, Nabi YÜZER, Burcu DİNÇ ŞENGÖNÜL

İNŞAAT YIKINTI ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON TOZUNUN ÇİMENTO İKAMESİNDE KULLANILMASI 505
Senem BİLİCİ, Kadircan VARAN, Elif ORMANCI ÇİL, İsmail GÖKALP, Muhittin TARHAN, Özgür ÇAKIR

BOR MİNERALLERİ İÇEREN GEOPOLİMER HARÇLARIN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ: ÇİMENTO BAZLI HARÇLARA ALTERNATİF BİR YAKLAŞIM 515
Ezgi Örklemez, Serhan İlkentapar, Uğur Durak, Okan Karahan, Cengiz Duran Atiş

FARKLI ORANLARDA NANO SELÜLOZ LİF İLAVESİNİN ÇİMENTO ESASLI SİSTEMLERE ETKİSİ 525
İrem YEŞİLYURT, Ömer Can ÖZEN, Didem OKTAY

ÇİMENTO HARÇ ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE FARKLI ODUN KÜLLERININ ETKİSİ 535
Hülya AKTAŞ, Makbule Tansu BAYDAŞ, Çağatay Alp ARSLAN, Mustafa DAYI, Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

ODUN KÜLÜ TABANLI ALKALI AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARDA MİNERAL KATKILARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ 545
Mehmet KAYA

DÜŞÜK KARBONLU YENİ BİR YAPISAL BAĞLAYICI GELİŞTİRİLMESİ: MAGNEZYUM OKSALAT ÇİMENTOSU 553
Loai Abdulaal, B. Aykut Bilginer, Sinan T. Erdoğan

ÇELİK LİFLİ POLİMER BETONLARIN BASINÇ DAYANIMI ÜZERİNE ATIK ARAÇ LASTİĞİ AGREGASI VE LİFİNİN BİRLEŞİK ETKİSİ 561
Furkan GÖKBAŞİ, Remzi ŞAHİN

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI TEK BİLEŞENLİ GEOPOLİMERLERİN FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİNE KİREÇ VE ALÇI İKAMESİNİN ETKİSİ 573
Ali ÖZ, Burak BODUR, Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR, Gökhan KAPLAN

KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOSUNUN ORTAM KÜRÜNDE ÜRETİLEN HİBRİT GEOPOLİMER HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ 585
Esin Eylül ÇELİK, İsmail İsa ATABEY

TANE SIKIŞMA YOĞUNLUĞU METODU İLE GELİŞTİRİLEN BAZALT LİF VE HİNDİSTAN CEVİZİ KABUĞU AGREGALI HAFİF BETON ÜRETİMİ 597
M. Talha ÜNAL, H. Süleyman GÖKÇE, Huzaifa HASHIM

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALI UÇUCU KÜL ESASLI GEOPOLİMER BETONLARIN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI 607
Memduh NAS, Şirin KURBETCİ

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA KOLEMANİTİN TAZE BETON ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI 615
Betül İŞBİLİR KULA, Serkan SUBAŞI, Muhammed MARAŞLI

KOLEMANİT KONSANTRATÖR ATIKLARININ FARKLI ÇİMENTO TİPLERİ İLE KULLANIMININ KURUMA-BÜZÜLMESİ DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ 627
Erdem ARIK, Muhammed Yasin DURGUN, Ahmet Hayrullah SEVİNÇ

ÇEVRESEL KOŞULLARIN ÇİMENTOLU KOMPOZİTLERİN ELEKTRİKSEL İLETKENLİK PERFORMANSINA ETKİLERİ¶ 637
Damla Nur ÇELİK , Mustafa ŞAHMARAN

BORLU ÇEVRECİ KOROZYON İNHİBİTÖRLÜ ÇİMENTOLU HARÇLARIN $MgSO_4$ DAYANIKLILIĞI 655
İlker Bekir Topçu, İlkay Kara

KRİSTALİZE SU GEÇİRİMSİZLİK KATKILARININ BETON BOŞLUK YAPISI VE SU GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ 665
Bartu ASLAN, Saeid MOGHIMI, Bimen KADİROĞLU, Mert Yücel YARDIMCI

TAHRİBATSIZ TEST YÖNTEMLERİNİN YAPILARDA DEPREM HASARI TESPİTİNDE KULLANIMI 675
Sena TAYFUR, Ninel ALVER

ATMOSFERİK KIŞ KOŞULLARINDA İMAL EDİLMİŞ BETON NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR İNCELEME 687
Dilek OKUYUCU, Ahmet Ferhat BİNGÖL, İlker KAZAZ, Burak GEDİK, Muhammet ŞAHİN ve Burak ŞAHİN

RAP İÇERİKLİ BETON HARÇLARIN RÖTRE ÖZELLİKLERİ 699
Sefa GÜNDOĞDU, Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ABUT

KOROZYON İNHİBİTÖRLERİNİN BETONARME YAPILARDA KULLANILMASI: YENİ İNOVATİF YAKLAŞIMLAR 709
Hüsnü Gerengi, Muhammed Maraşlı, Serkan Subaşı

HATALI BETON ÜRETİMİ/KULLANIMI NEDENİYLE OLUŞACAK RİSKİN TRANSFER YÖNTEMLERİNDEN BİRİSİ OLARAK "ÜRÜN SORUMLULUK SİGORTASI" 723
Oktay GÜLAĞACI

ÇELİK LİF UÇ GEOMETRISININ BETON ÖZELLIKLERINE ETKISI 731
Uğur ALPARSLAN, Özkan ŞENGÜL

KALSİT SAFSIZLIKLARININ MEKANİK OLARAK AKTİFLEŞTİRİLMİŞ KAOLİNİT YAPISINA VE KİREÇTAŞI KALSİNE KİL ÇİMENTO (LC^3) SİSTEMİNDEKİ PERFORMANSINA ETKİSİ 741
Vahiddin Alperen Baki, Memduh Nas, Kia Alalea

NANO SELÜLOZ LİF KATKISININ ÇİMENTO ESASLI MALZEMELERİN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ 749
Ümran AKARSU, İrem YEŞİLYURT, Büşra AKTÜRK, Didem OKTAY

ÇELİK TEL DONATILI HAFİF TAŞIYICI BETONLARIN KIRILMA PARAMETRELERİNİN YÜK-SEHİM VE YÜK-ÇAAD EĞRİLERİ İLE İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI 761
Hüseyin Okan ANADUT, Fuat KÖKSAL

HARÇ DAYANIMININ NANO GRAFEN PLAKA KULLANIM ORANINA ETKİSİ 777
Yaren Şahin, Nurullah Öksüzer, Hacı Süleyman Gökçe

ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE MAKRO SENTETİK LİF KULLANIMININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ 789
Begüm PEKER, Turhan BİLİR, Ezgi GÜRBÜZ

SÜPER AKIŞKANLAŞTIRICI KATKI İÇEREN BETONDA KÜR KOŞULLARININ BASINÇ DAYANIMI VE ELASTİK MODÜLÜNE ETKİSİ **807**
Fatih ÖZER, Emre ÖRTEMİZ, Muhittin TARHAN, Saeid MOGHIMI, Gökhan GÜRBÜZ, Kambiz RAMYAR

SIVILARA TEMAS EDEN MEVCUT YAPILARIN BETON ÇATLAK GENİŞLİKLERİNİN SINIRLANDIRILMASI VE GÜÇLENDİRİLMESİ **819**
Samet KILIÇ

ÇOKLU BÜNYESEL DİRENÇ (ÇBD) KAVRAMI İLE GELİŞTİRİLEN PATLAMA ETKİLERİNE KARŞI DİRENİMLİ DUVAR TASARIMI **831**
Niyazi Özgür BEZGİN

KIŞIN DUVAR İMALATINDA KULLANILMAK ÜZERE TASARLANMIŞ YENİ BİR ÜRÜN TAKDİMİ: HARÇ HASIRI **841**
Dilek OKUYUCU, Burak GEDİK, Sena REFAYELİ

TAŞ YÜNÜ SARGISI İLE KALIP KORUMASI UYGULAMASININ BETONUN OLGUNLUK İNDEKSİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNE DAİR DENEYSEL BİR İNCELEME **853**
Burak GEDİK, İbrahim ŞAHUD, Büşra ŞENBAKAR, Kurtuluş YILMAZ, Dilek OKUYUCU

BETONARME YAPILARIN HİZMET ÖMRÜNE GÖRE TASARIMI **867**
Yılmaz Akkaya

ÖNSÖZ

“21. yüzyılda beton” temasıyla düzenlenen 11. Ulusal Beton Kongresi, ülkemizin mühendislik gündemine beton teknolojisindeki yeni gelişmeleri getirmiş, sektörün teknolojik yeniliklerle uyum içinde ilerlemesine devam edebilmesi için teknik, çevresel ve ekonomik konuları ele almıştır. Karbon ayak izinin azaltılması, döngüsel ekonomi, dijitalleşme ve kalite güvence sistemleri gibi konular bu çerçevede ortaya konmuştur.

Kongre bildiri sunumları bilinenleri aktarmanın ötesinde, yeni teknolojilerin ve yöntemlerin uygulamada hangi kanıtla, hangi hızda ve hangi maliyet/yarar dengesinde ilerleyebileceği sorusuna yanıt üretmeye çalışmıştır. Kongre programın kurgusu da bu beklentiyi taşıyan eksenler üzerinde yükselmiştir. Düşük klinkerli bağlayıcılar (LC3 ve benzeri), geopolimerler, 3B basılabilir karışımlar, tahribatsız testlerin hasar tespitinde kullanımı, dayanıklılık ve hizmet ömrü odaklı tasarım, yapay zekâ ile nitelik kontrolü, karma lifli, yüksek performanslı, kendiliğinden yerleşen betonlar gibi özel sistemler bunlardan başlıcaları olmuştur. Eğitim oturumlarının çatlak yönetimi ve servis ömrüne göre tasarım gibi uygulama odaklı başlıklara ayrılması ise araştırma–uygulama köprüsünü doğrudan güçlendirmeyi amaçlamıştır.

Deprem etkileri ve zorlu çevresel koşullar gibi Türkiye gerçekleri, ülkemizdeki betonarme yapıların hizmet ömrünün öncelenmesini gerektirmektedir. Dürabilite parametrelerinin hızlandırılmış yöntemlerle güvenilir biçimde ilişkilendirilmesi, korozyon önleyiciler, su geçirimsizlik katkıları ve erken yaş hacimsel değişkenliklerin analizi ile mevcut yapı stokunda tahribatsız testlerin kullanımı bu kongrede masaya yatırılmıştır.

Diğer taraftan, küresel bağlam; sürdürülebilir gelişme ve 2050 net sıfır hedefleriyle uyumu, malzeme bilimi ile tedarik zinciri yönetimini, iş güvenliği kültürünü ve veri temelli denetimi aynı denklemde buluşturmaktadır. Beton sektöründe daha az karbon salınımına sahip çimentolarla ve geri dönüştürülmüş agregalarla üretilen betonların daha düşük dayanım ve dayanıklılığa sahip olması kabul edilemeyecek bir durumdur. Bu nedenle ülkemizde yapılacak çalışmaların, yeni geliştirilecek malzeme, tasarım ve sistemlerin, laboratuvar ve saha verileriyle test edilerek standartlarımıza ve şartnamelerimize entegre edilmesi gerekmektedir. Bu kongrede yer alan çalışmaların önemli bir kısmı, düşük karbonlu bağlayıcıların ve geri kazanımlı bileşenlerin mekanik ve durabilite performansı ile taze haldeki davranışını birlikte ele alarak konuya ilişkin bütüncül bir bakış açısı sunmaktadır.

Dijitalleşme başlığında, üretim verisiyle erken yaş basınç dayanımı tahmini, yüksek sıcaklıkta çatlakların gerçek zamanlı tespiti, sensör izleyicili kompozitler ve veri analitiği tabanlı kalite kontrol yaklaşımları ön plana çıkmaktadır. Ancak burada da ihtiyat payı şarttır: yapay zekâ modellerinin kalibrasyonu, veri mahremiyeti, ölçüm belirsizliği ve sahaya aktarımda sorumluluk paylaşımı net olarak tanımlanmadıkça, dijital araçlar karar desteği olmaktan çıkıp birer kara kutuya dönüşebilir. Bu nedenle, veri şeffaflığı, izlenebilirlik ve bağımsız doğrulama mekanizmaları sektörün ortak sorumluluğudur.

Kongremiz, öğrencilerden belediyelere, bakanlık birimlerinden yüklenici ve tedarikçilere uzanan geniş bir paydaş yelpazesini buluşturmuştur. Teknik gezi programı ise baraj ve doğal miras alanlarındaki gözlemlerle tasarım–uygulama–çevre etkileşimini yerinde tartıştırma fırsatı sunmuştur. Bu çeşitlilik, iyi uygulama örneklerini, hatalardan çıkarılan dersleri, tecrübelerin paylaşımını ve saha şartlarında yapılabilirlik sınırlarını da konuşmamızı mümkün kılmıştır.

Bu bildiriler kitabıyla, standartlara yansıyacak kanıt üretme kültürünün beslemesini, şartname diline çevrilebilecek performans kriterlerini, açık veri ve açık bilim anlayışını teşvik etmesini amaçlıyoruz. Önümüzdeki süreçte bu kitaptaki çalışmaların ve önerilerin sahaya aktarımını, bir sonraki kongrede de bu çalışmalarda yer alan bilgi ve iddiaların gerçekten değer ürettiğinin doğrulanmasını ümit ediyoruz.

Kitap, yalnızca akademisyenlere değil; mühendislik uygulayıcılarına, sektörel karar vericilere ve öğrencilere de faydalı bir kaynak olma amacını taşımaktadır.

Düzenleme, danışma ve bilim kurullarına, bildiri sahiplerine, oturum başkanlarına, davetli konuşmacılara ve emeği geçen tüm paydaşlara teşekkür ederiz. Ayrıca, çalışmalarını paylaşarak kongrenin bilimsel zenginliğini artıran tüm araştırmacılara ve ülkemizin farklı bölgelerinden katılım sağlayan meslektaşlarımıza şükranlarımızı ifade ederiz.

Bu kitabın, 21. yüzyılda betonun yalnızca daha yüksek dayanımlı bir yapı malzemesi değil, daha güvenli bir mühendislik uygulaması olarak konumlanmasına katkı sunmasını dileriz.

Düzenleme Kurulu Başkanları

Prof. Dr. Remzi Şahin
Prof. Dr. Yılmaz Akkaya

MEKANİK VE TERMAL OLARAK AKTİVE EDİLMİŞ KİL KULLANIMININ KİREÇTAŞI KALSİNE KİL ÇİMENTOSU BETONUNUN TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Muhammet Atasever[1] **Sinan Turhan Erdoğan**[2]
[1]Dr., Abdullah Gül Üniversitesi, muhammet.atasever@agu.edu.tr
[2]Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, sinante@metu.edu.tr

ÖZET

Kireçtaşı kalsine kil çimentosu (LC^3), çimento fabrikalarında halihazırda portland çimentosu üretiminde kullanılan ekipmanlarla üretilebilmesi, portland çimentosu üretiminde CO_2 salımını % 30 oranında azaltma potansiyeline sahip olması ve kil ile kireçtaşı rezervlerinin diğer mineral katkılara göre daha bol bulunması gibi avantajları nedeniyle, portland çimentosuna alternatif olabilecek en önemli adaylardan biridir. Tipik bir LC^3, % 55 portland çimentosu, % 30 kalsine kil ve % 15 kireçtaşı içerir. Kaolinitik kil, 1:1 tabaka yapısı ve termal aktivasyonla yüksek reaktivite göstermesi nedeniyle LC^3 üretiminde tercih edilmektedir. Kristal yapıya sahip kaolinitik kil, termal aktivasyonla amorf yapıya geçiş yaparak reaktivitesini artırırken, mekanik aktivasyon tanecik boyutunu küçülterek özgül yüzey alanını artırmaktadır. Bu çalışmada, mekanik ve termal olarak aktive edilen kaolinitik kil ile üretilen LC^3 betonun taze ve sertleşmiş hal özellikleri değerlendirilmiştir. Çökme testi taze beton üzerinde gerçekleştirilmiş; basınç dayanımı 1, 3, 7 ve 28 günlük su kürü uygulanmış numunelerde, ultrasonik hız, su emme ve gözeneklilik testleri ise 1 ve 28 günlük numunelerde uygulanmıştır. Her iki metotla aktive edilen kil kullanılarak üretilen LC^3 betonlarının çökme değerleri, tasarlanan 150-175 mm aralığının altında ölçülmüş olup, bu durum her iki karışımda kullanılan kireçtaşı ve aktive edilmiş kilin ince taneli yapısıyla ilişkilendirilmiştir. Termal olarak aktive edilmiş kaolinitik kil ile üretilen LC^3'ün, mekanik olarak aktive edilmiş kaolinitik kil içeren LC^3'e kıyasla, 28 gün sonunda daha düşük gözeneklilik ve daha yüksek dayanıma sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kaolinitik kilin aktivasyon yönteminin hidratasyon derecesi ve buna bağlı mikro yapı gelişimi üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Kireçtaşı Kalsine Kil Çimentosu, Kaolinit, Mekanik Aktivasyon, Termal Aktivasyon

ABSTRACT

Limestone calcined clay cement (LC^3) is a promising alternative to portland cement due to its compatibility with existing cement production equipment, its potential to reduce CO_2 emissions by up to 30 %, and the abundance of limestone and clay reserves compared to other mineral additives. Typical LC^3 consists of 55 % portland cement, 30 % calcined clay, and 15 % limestone. Kaolinitic clay is preferred in LC^3 production for its 1:1 layered structure and high reactivity after thermal activation, upon which its crystalline structure becomes amorphous, enhancing reactivity. Also, mechanical activation reduces particle size and increases the specific surface area, further improving its reactivity. This study evaluates the fresh and hardened properties of LC^3 concrete made with mechanically and thermally activated kaolinitic clay. The slump test was conducted on fresh concrete, while compressive strength was assessed at 1, 3, 7, and 28 d on water-cured specimens. Ultrasonic pulse velocity, water absorption, and porosity tests were performed on 1- and 28-d-old specimens. Slump of LC^3 concretes incorporating clays activated with either method was measured to be below the designed range of 150-175 mm. This might be attributed to the fine particle size of the limestone and clay in both mixes. Furthermore, LC^3 with thermally activated kaolinitic clay exhibited lower porosity and higher compressive strength at 28 d compared to LC^3 containing mechanically activated kaolinitic clay. These findings highlight the influence of the activation method on the hydration degree and subsequent microstructural development of LC^3.

Keywords: Limestone Calcined Clay Cement, Kaolinite, Mechanical Activation, Thermal Activation

1.GİRİŞ

Klinker, öğütülmüş kireçtaşı ve kalsine kil ile birlikte kullanılarak üretilen kireçtaşı kalsine kil çimentosu (LC3), geleneksel portland çimentosuna (PÇ) güçlü bir alternatiftir. LC3, PÇ'ye benzer basınç dayanımı sunar. Ayrıca, üretiminde kullanılan kireçtaşı ve kalsine kil dünya genelinde bolca bulunur ve bu hammaddeler daha az enerji yoğun işlemlerle üretilebilir. LC3'ün bir diğer önemli avantajı ise, PÇ'ye kıyasla % 30 ila % 40 oranında daha düşük CO_2 salımı sağlamasıdır [1, 2]. Tipik bir LC^3, % 55 PÇ, % 30 kalsine kil ve % 15 kireçtaşından oluşmaktadır [3-6]. LC^3 üretiminde genellikle kaolinitik kil kullanılmaktadır. Bu kilin çimentoda bağlayıcılık kazanabilmesi için aktivasyon yoluyla reaktif hâle getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla iki temel yöntem kullanılmaktadır: termal ve mekanik aktivasyon. Mekanik aktivasyon, kaolinitin yüksek enerjili öğütme gibi fiziksel işlemlerle parçalanmasını, böylece yapısal bozulma yoluyla reaktivitesinin artmasını hedefler. Buna karşılık, termal aktivasyon kristal yapılı kaolinit fazını, kristal kafes yapısındaki bozulmalar sonucunda düzensiz bir faza dönüştürür. Kaolinitin termal aktivasyonu sırasında, yüzeydeki iki hidroksil grubu birleşerek bir su molekülü oluşturur; geride kalan oksijen ise süperoksit anyonu hâlinde kalır. Oluşan anyon dengesizliği, kristal yapının çökmesine neden olur ve böylece metastabil, susuz alüminyum silikatlar meydana gelir. Kaolinitin dehidroksilasyonu ve düzensizleşmesi, puzolanik aktiviteye sahip, yani su varlığında kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat, stratlingit, tetrakalsiyum alüminat hidrat ve bağlayıcı özelliklere sahip diğer bileşikler oluşturabilen reaktif bir malzemenin oluşumuna yol açar. Kalsine kaolinitik kilin puzolanik aktivitesi, hammaddedeki kil minerallerinin türü ve miktarı, termal aktivasyon koşulları, orijinal kaolinitin kristalinliği ve kalsine kaolinitik kilin ortalama tane boyutu gibi bir dizi faktöre bağlıdır [7, 8]. Termal aktivasyon kullanılarak üretilen tipik bir LC^3'te, kilin kalsinasyon işlemi tipik bir LC^3'ün üretim maliyetinin % 20'sini ve CO_2 salımının % 11'ini oluşturmaktadır [9]. Bu nedenle, her iki aktivasyon yönteminin LC^3 çimentosunun performansına olan etkilerinin incelenmesi, hem çevresel hem de mühendislik uygulamaları açısından büyük bir öneme sahiptir. Nitekim, son yıllarda yapılan çalışmalar, kaolinin mekanik aktivasyonunun yapısal değişimlere yol açtığını, bu süreçte kaolinit bağlarının kırıldığını, yüzey hidroksillerinin kaybolduğunu ve yerlerine koordineli veya adsorbe olmuş suyun geçtiğini, bunun sonucunda ise daha yüksek özgül yüzey alanına, farklı katyon değişim kapasitesine ve artırılmış gözenekliliğe sahip bir malzeme oluştuğunu ortaya koymuştur [10-12]. Kaolinitik kilin termal ve mekanik aktivasyonu sonrasında LC^3 beton üretilerek karşılaştırılmasına ilişkin bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu araştırmanın temel amacı, kaolinin termal ve mekanik aktivasyonu sonrasında LC^3 betonun taze hal özellikleri ile sertleşmiş hal özellikleri (basınç dayanımı, ultrasonik hız testi (UPV), su emme testi ve gözeneklilik testi) üzerindeki etkilerini karşılaştırmaktır.

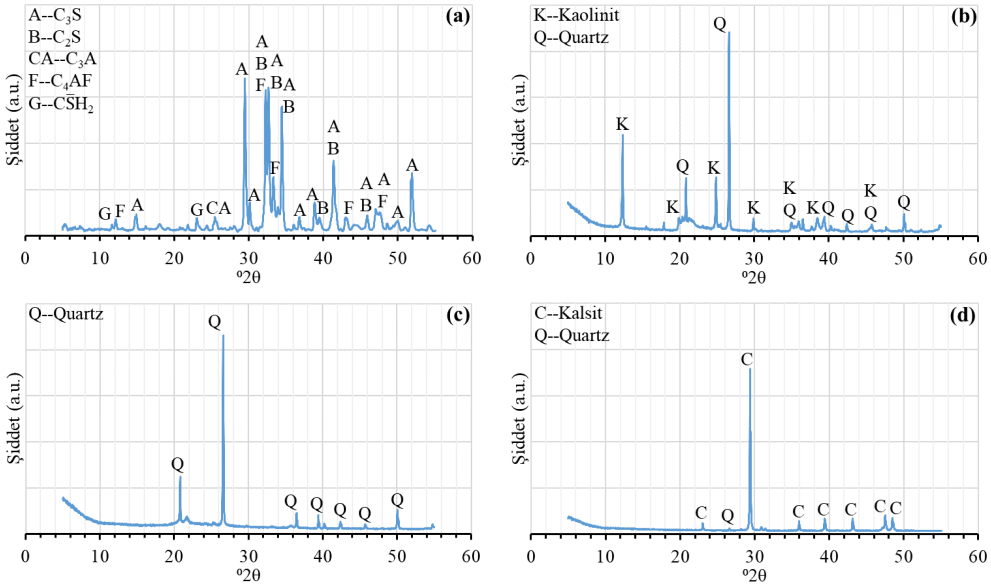
2.MALZEME VE YÖNTEM

2.1.Materyal

Bu çalışmada beton üretimi için normal CEM I 42.5 R portland çimentosu (PÇ), kireçtaşı (KT), Termal olarak aktive edilmiş kil (TK) ve mekanik olarak aktivite edilmiş kil (UK) kullanılmıştır. Portland çimentosu ve kireçtaşı Ferçim Çimento (Kayseri), ham kil ise Zafer Madencilik'ten (Balıkesir) temin edilmiştir. Malzemelerin kimyasal özellikleri Tablo 1'de, x-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemiyle belirlenen mineralojik yapıları ise Şekil 1'de sunulmuştur.

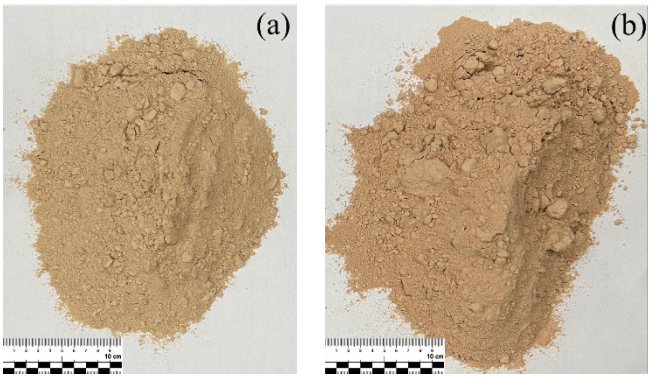
Tablo 1. Malzemelerin kimyasal bileşenleri

Oksit (%)	PÇ	UK	TK	KT
CaO	59.0	0.1	0.1	52.2
SiO_2	20.2	61.4	68.9	1.7
Al_2O_3	5.1	22.7	24.6	1.0
Fe_2O_3	2.9	2.1	2.0	0.4
MgO	3.0	0.1	0.1	1.2
K_2O	0.8	0.6	0.7	0.2
SO_3	3.3	1.6	1.2	0.1
Na_2O	0.8	0.2	0.1	-
Kızdırma kaybı	5.0	11.2	2.3	43.3



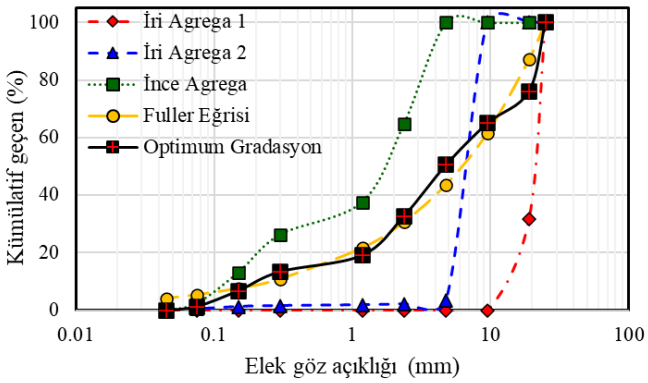
Şekil 1. XRD profil (a) PÇ (b) UK (c) TK (d) KT

Ham halde temin edilen kil, bilyalı değirmende öğütülüp elek göz açıklığı 150 µm olan bir elekten elendikten sonra iki senaryo için değerlendirilmiştir. İlk senaryoda, kil herhangi bir ısıl işlem uygulanmadan doğrudan LC^3 üretiminde kullanılmıştır. İkinci senaryoda, optimum kalsinasyon sıcaklığını belirlemek amacıyla kil, 500-800 °C arasında, her 100 °C artışla, 7 °C/dakika hızında kalsine edilmiş, 3 saat hedef sıcaklıkta tutulmuş ve ardından fırında kontrollü bir şekilde soğutulmuştur. Her sıcaklık aralığı için ASTM C311'e göre Dayanım Aktivite İndeksi belirlenerek, optimum kalsinasyon sıcaklığı 700 °C olarak belirlenmiştir. Bu süreç sonunda elde edilen mekanik ve termal olarak aktive edilmiş kil Şekil 2'de gösterilmiştir. Termal aktivasyon kilin rengini hafif koyulaştırmıştır.



Şekil 2. (a) Mekanik olarak aktive edilmiş kil ve (b) termal olarak aktive edilmiş kil

Kırma agrega miktarları, Fuller ideal eğrisine göre ağırlıkça % 50 ince agrega (0-4.75 mm), % 15 iri agrega (4.75-9.5 mm) ve % 35 iri agrega (9.5-25 mm) olarak hesaplanmıştır. Agrega tane boyu dağılımları Şekil 3'de gösterilmiştir. Fiziksel özellikler ise ASTM C127 [13] ve ASTM C128 [14]'e göre belirlenmiştir. İnce ve iri agregaların doygun yüzey kuru özgül ağırlıkları ve su emme oranları sırasıyla, 0-4.75 mm boyutlarındaki ince agrega için 2.62 ve % 2.34, 4.75-9.5 mm boyutlarındaki iri agrega için 2.64 ve % 1.48, 9.5-25 mm boyutlarındaki iri agrega için ise 2.68 ve % 0.72 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. Agregaların tane büyüklüğü dağılımı

2.2. Beton Üretimi ve Karışım Tasarımı

Beton üretimi, maksimum 125 L kapasiteli UTC-0790 mikseri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve literatürde belirtilen bir prosedür [15] temel alınmıştır. Bağlayıcı malzemeler (portland çimentosu, kalsine veya kalsine edilmemiş kil ve kireçtaşı), miksere eklenmeden önce ayrı bir kapta tamamen homojen bir karışım elde edilene kadar kuru şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra, agregalar mikser içine eklenmiş ve 3 dakika boyunca kuru şekilde karıştırılmıştır. Ardından, homojen şekilde karıştırılmış bağlayıcılar mikser içerisine ilave edilmiş ve kuru karıştırma işlemi 2 dakika daha sürdürülmüştür. Suyun yarısı eklenerek 2 dakika karıştırılmış, ardından mikser durdurulup paletlere yapışan malzemeler sıyrıldıktan sonra kalan su eklenerek karıştırma işlemi 3 dakika daha devam ettirilmiştir. Her üretimde, boyutları 150×150×150 mm (~3.4 dm^3) olan 6 adet numune üretilmiştir. Geleneksel C35 dayanım sınıfı hedeflenerek üretilen beton karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan beton karışım oranları (kg/m^3)

Numune kodu	PÇ	TK	UK	KT	İri agrega 1	İri agrega 2	İnce agrega	Su/bağlayıcı
LC^3-TK	236	129	-	64	616	221	877	0.45
LC^3-UK	236	-	129	64	616	221	877	0.45

2.3.Test Metotları

Betonun işlenebilirliği, ASTM C143'e [16] göre çökme testi ile ölçülmüştür. Çökme konisi düz bir yüzeye yerleştirilmiş, homojen beton karışımı üç katman halinde koninin içine doldurulmuş ve her katman 25 kez sıkıştırılmıştır. Daha sonra koni dikkatlice kaldırılarak yükseklik farkı ölçülmüş, çökme değeri belirlenmiştir. Tüm işlemler ~2 dakika içinde tamamlanmıştır. Beton küp numuneleri (150×150×150 mm), test gününe kadar (20±2 °C) kür havuzunda bekletilmiş ve 1, 3, 7 ve 28. günlerde TS EN 12390-3'e [17] uygun olarak basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. UPV ölçümleri, 1. ve 28. günlerde, 54 kHz frekansında çalışan PUNDIT cihazı ile üç numunenin merkezinde, beton döküm yönüne dik doğrultuda ve ASTM C597'e [18] uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 1 ve 28 günlük 3 adet beton küp numuneye, ASTM C642 [19] esas alınarak birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk, gözeneklilik ve su emme oranı değerleri belirlenmiş olup, bu hesaplamalar sırasıyla Denklem 1, Denklem 2, Denklem 3 ve Denklem 4'te verilmiştir.

$$g_1 = \frac{A}{(C-D)} \text{x } \rho \quad (1)$$

$$g_2 = \frac{A}{(A-D)} \text{x } \rho \quad (2)$$

$$\text{Gözeneklilik } (\%) = \frac{(g_2 - g_1)}{g_2} \text{x } 100 \quad (3)$$

$$\text{Su emme } (\%) = \frac{(B-A)}{A} \text{x } 100 \quad (4)$$

Bu denklemlerde, A: 105 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulan numunenin kuru ağırlığını, B: numunenin suya ~24 saat daldırıldıktan sonra DKY durumundaki ağırlığını (g), C: numunenin ~5 saat boyunca kaynatılıp soğutulduktan sonra DKY durumundaki ağırlığını (g), D: numunenin suya tamamen batırılmasıyla taşan suyun ağırlığını (g), ρ: suyun yoğunluğunu (genellikle 1000 kg/m³), g_1: birim hacim ağırlığı (kg/m³) ve g_2: görünür yoğunluğu (kg/m³) ifade etmektedir.

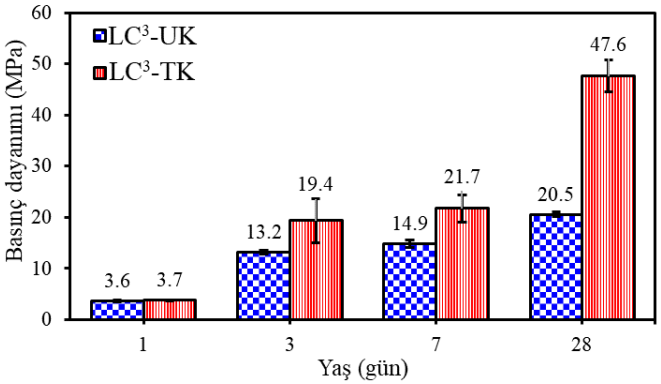
3.BULGULAR VE TARTIŞMA

LC^3-TK ve LC^3-UK betonları için elde edilen deney sonuçları Tablo 3'te sunulmaktadır. Beton karışım tasarımı yapılırken çökme değerinin 150-175 mm olarak hesaplanmasına rağmen, LC^3-TK ve LC^3-UK çökme değerleri ~75 mm olarak ölçülmüştür. Bu durum, her iki karışımda ağırlıkça % 45 oranında kullanılan kireçtaşı ve aktive edilmiş kilin ince taneli yapısıyla ilişkili olabilir. Erken yaşlarda, LC^3-UK ve LC^3-TK'nın gözeneklilik, birim hacim ağırlığı, görünür yoğunluk ve ultrasonik hız değerlerindeki benzerlik, bu iki betonun mikro yapıları arasında belirgin bir fark olmadığını ortaya koymaktadır. Buna karşın, ileri yaşlarda LC^3-TK'nin daha yüksek birim hacim ağırlığı ve görünür yoğunluk ile daha düşük gözeneklilik sergilemesi, mikro yapısının zamanla daha sıkı bir hale geldiğini göstermektedir. Bu bulgular, kilin aktivasyon yönteminin LC^3'ün mikro yapı özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, LC^3-TK betonunun LC^3-UK'ya kıyasla daha düşük su emme oranına sahip olmasının nedeni, kalsine kilin daha yüksek puzolanik reaktivite göstermesi ve bu sayede daha yoğun bir mikro yapı oluşturması olabilir. Öte yandan, mekanik olarak aktive edilen kilin bağlayıcı sistemde sınırlı bir reaksiyon göstermesi, daha yüksek kapiler boşluk hacmine sahip bir yapı oluşmasına ve dolayısıyla su emme oranının artmasına neden olmuş olabilir. Bu bulgu, literatürde bildirilen önceki çalışmalarla da uyumludur [20, 21].

Tablo 3. Erken ve ileri yaşlarda LC^3-UK ve LC^3-TK'nın fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırması

Özellik	LC^3-UK				LC^3-TK			
	1 gün		28 gün		1 gün		28 gün	
	Ort.	Std. Sap.	Ort.	Std. Sap.	Ort.	Std. Sap.	Ort.	Std. Sap.
Birim hacim ağırlık (kg/m³)	1827.3	7.4	1835.2	2.2	1838.4	2.8	1887.3	2.1
Görünür yoğunluk (kg/m³)	1901.9	5.0	1899.2	2.0	1899.8	6.9	1916.8	1.6
Su emme (%)	2.60	0.02	2.31	0.02	1.40	0.26	1.01	0.03
Gözeneklilik (%)	3.92	0.64	3.37	0.02	3.23	0.52	1.54	0.03
Ultrasonik hız (km/s)	1.25	0.10	4.20	0.06	1.40	0.03	4.98	0.21

LC^3-TK ve LC^3-UK'nin dayanım gelişimi Şekil 4'te gösterilmiştir. LC^3-TK, tüm yaşlarda LC^3-UK'ye kıyasla bütün yaşlarda daha yüksek dayanım göstermiş ve iki karışım arasındaki fark zamanla artmıştır. İlk 7 günde LC^3-TK ve LC^3-UK'nin dayanımları arasındaki fark doğrusal olarak artış göstermiş, 7-28 gün arasında ise bu fark belirgin şekilde artmıştır. Bu durum, LC^3-TK'nin gözeneklilik değerinin 28 gün sonunda LC^3-UK'ye kıyasla daha düşük olması ve mikro yapısının zamanla daha sıkı hale geldiğini gösteren önceki bulgularla tutarlıdır. Gözeneklilikteki bu azalma, LC^3-TK'de oluşan hidratasyon ürünlerinin mikro yapıdaki boşlukları daha etkili bir şekilde doldurduğunu göstermektedir. Bu bulgular, her iki karışımda da kullanılan kaolinitik kilin aktivasyon yönteminin mikro yapı oluşumu ve dayanım gelişimi üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır. Oysa literatürde, mekanik aktivasyonun erken yaşta hızlı dayanım artışı sağladığı ancak 28 gün sonunda farkın azaldığı raporlanmıştır [22]. Bu farklılık, mekanik aktivasyonla elde edilen kilin daha ince taneli olmasına rağmen, yüzey alanının topaklanma nedeniyle etkili kullanılamamasından kaynaklanıyor olabilir.



Şekil 4. LC^3-UK ve LC^3-TK'nın basınç dayanım gelişimi

4.SONUÇ

Bu çalışmada, mekanik ve termal olarak aktive edilen kaolinitik kil kullanılarak üretilen LC^3 betonların taze ve sertleşmiş hal özellikleri değerlendirilmiş; aktivasyon yönteminin hidratasyon derecesi, mikro yapı oluşumu ve mekanik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

• Kullanılan beton tasarımında 150-175 mm çökme hedeflenmiş olmasına rağmen, termal ve mekanik olarak aktive edilmiş kil kullanılarak üretilen LC^3 betonlarının çökme değeri yaklaşık 75 mm olarak ölçülmüştür. Bu durum, kullanılan kireçtaşı ve aktive edilmiş kilin ince taneli yapısıyla ilişkilendirilmiştir.

• Erken yaşlarda, termal ve mekanik olarak aktive edilmiş kil kullanılarak üretilen LC^3 betonlarının birim hacim ağırlığı, görünür yoğunluk ve gözeneklilik gibi fiziksel özellikleri benzer bulunmuştur. İleri yaşlarda, termal olarak aktive edilmiş kil ile üretilen beton, hem daha yüksek birim hacim ağırlığa hem de daha yüksek görünür yoğunluğa sahip olup daha düşük gözeneklilik göstermiştir.

• Termal olarak aktive edilmiş kil içeren LC^3, 28 gün sonunda daha sıkı bir mikro yapı oluşturarak yüksek dayanım kazanmıştır. Aktivasyon yöntemi, LC^3 betonunun mikro yapı ve dayanım gelişimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

Kaynaklar

[1] Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., Maity, S., 2018. Calcined clay limestone cements (LC^3). Cem. Concr. Res., 114, 49-56.
[2] Ijaz, N., Ye, W. M., Rehman, Z. U., Ijaz, Z., Junaid, M. F., 2024. Global insights into micro-macro mechanisms and environmental implications of limestone calcined clay cement (LC^3) for sustainable construction applications. Sci. Total Environ., 907, 167794.
[3] Scrivener, K., Avet, F., Maraghechi, H., Zunino, F., Ston, J., Hanpongpun, W., Favier, A., 2018. Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC^3). Green Mater., 7 (1), 3-14.
[4] Atasever, M., Erdoğan, S. T., 2024. Effects of clay type and component fineness on the hydration and properties of limestone calcined clay cement. Mater. Struct., 57 (8), 183.
[5] Cardinaud, G., Rozière, E., Martinage, O., Loukili, A., Barnes-Davin, L., Paris, M., Deneele, D., 2021. Calcined clay – Limestone cements: Hydration processes with high and low-grade kaolinite clays. Constr. Build. Mater., 277, 122271.
[6] Lin, R. S., Oh, S., Du, W., Wang, X. Y., 2022. Strengthening the performance of limestone-calcined clay cement (LC^3) using nano silica. Constr. Build. Mater., 340, 127723.
[7] Tokyay, M., 2016. Cement and Concrete Mineral Admixtures, CRC Press, Boca Raton.
[8] Ilić, B., Radonjanin, V., Malešev, M., Zdujić, M., Mitrović, A., 2016. Effects of mechanical and thermal activation on pozzolanic activity of kaolin containing mica. Appl. Clay Sci., 123, 173-181.
[9] Atasever, M., Erdoğan, S. T., 2024. Characterization of limestone calcined clay cement made with calcium sulfoaluminate clinker. Int. J. Civ. Eng., 22 (12), 2407-2419.

[10] Mañosa, J., Rosa, J. C. L., Silvello, A., Maldonado-Alameda, A., Chimenos, J. M., 2023. Kaolinite structural modifications induced by mechanical activation. Appl. Clay Sci., 238, 106918.
[11] Tole, I., Habermehl-Cwirzen, K., Cwirzen, A., 2019. Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders – review. Mineral. Petrol., 113 (4), 449-462.
[12] Hamzaoui, R., Muslim, F., Guessasma, S., Bennabi, A., Guillin, J., 2015. Structural and thermal behavior of proclay kaolinite using high energy ball milling process. Powder Technol., 271, 228-237.
[13] ASTM C127-22. 2022. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. annual book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
[14] ASTM C128-22. 2023. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. annual book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
[15] Luo, X., Xing, G., Qiao, L., Miao, P., Yu, X., Ma, K., 2023. Multi-objective optimization of the mix proportion for dune sand concrete based on response surface methodology. Constr. Build. Mater., 366, 129928.
[16] ASTM C143/C143M-12. 2015. Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. annual book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
[17] TS EN 12390-3. 2010. Beton - sertleşmiş beton deneyleri - bölüm 3 : deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
[18] ASTM C597-22. 2023. Standard test method for ultrasonic pulse velocity through concrete. annual book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
[19] ASTM C642-21. 2022. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. annual book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
[20] Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., Pillai, R.G., 2018. Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). Cem. Concr. Res., 107, 136–151.
[21] Abdulqader, M., Alhassan, H., Alshalif, A.F., Almutairi, M., Alenezi, M., Tayeh, B.A., 2023. Physicochemical properties of limestone calcined clay cement (LC3) concrete made using Saudi clays. J. Mater. Res. Technol., 25, 2769–2783.
[22] Mañosa, J., Huete-Hernández, S., Alvarez-Coscojuela, A., Maldonado-Alameda, A., Chimenos, J.M., 2024. Comparative study of limestone calcined clay cement produced with mechanically activated kaolin and calcined kaolin. J. Build. Eng., 97, 110748.