

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜR ŞEKLİNİN YÜKSEK PERFORMANSLI
BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

Engin DENİZ

Ocak, 2011

İZMİR

**KÜR ŞEKLİNİN YÜKSEK PERFORMANSLI
BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı

Engin DENİZ

Ocak, 2011

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ENGİN DENİZ, tarafından PROF. DR. BÜLENT BARADAN yönetiminde hazırlanan “KÜR ŞEKLİNİN YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Bülent BARADAN

Danışman

.....
.....
Jüri Üyesi

.....
.....
Jüri Üyesi

.....
Prof.Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince araştırma konularının belirlenmesinde, deney programlarının oluşturulmasında ve bilgilendirici desteklerinden dolayı danışman hocam Prof. Dr. Bülent BARADAN'a, teşekkürü bir borç bilirim.

Literatür araştırması, danışmanlığı ve yönlendirici bilgilerinden dolayı Sn. Doç. Dr. Halit Yazıcı'ya, deneylerin gerçekleştirilmesi sırasındaki yardımlarından dolayı Sn. Dr. Hüseyin Yiğiter'e ve Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi İnş. Yük. Müh. Çağlar Yalçinkaya'ya; teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm çalışmam süresince bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek şevkle çalışmamı sağlayan, her daim yanımda olan Candan ACET'e, değerli ailem; Annem Filiz DENİZ, babam Ergün DENİZ, kardeşlerim Erhan DENİZ ve Defne DENİZ'e, sonsuz teşekkürler.

Engin DENİZ

Ocak 2011 – İZMİR

KÜR ŞEKLİNİN YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZ

Ultra yüksek performanslı beton olarak da bilinen Reaktif Pudra Betonu (RPB), yalnızca yüksek basınç dayanımına sahip bir beton olmayıp, diğer mekanik özellikleri ve dayanıklılığı ile de ön plana çıkan ve kullanımı gün geçtikçe artan bir malzemedir. Reaktif pudra betonu liflerle güçlendirilmiş, çok düşük su/çimento oranında, çimento ve silis dumanı karışımının yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kullanılarak ince öğütölmüş kuvars tozuyla karıştırılması sonucu elde edilen yüksek dayanımlı kompozit bir malzemedir.

Yüksek performanslı çelik tel donatılı çimento esaslı kompozitler mükemmel darbe dayanımı özellikleri ile askeri yapılarda, depreme karşı stratejik yapılarda, nükleer santrallerde, nükleer atıkların depolanması için inşa edilen depolarda ve betonarme yapıların güçlendirilmesinde, ayrıca küçük ve orta büyüklükte prefabrike elemanların üretilmesinde kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada, 250 MPa'a varan basınç dayanımıyla, iki tip çelik lif kullanılarak, 4 farklı tipte reaktif pudra betonları üretilip, 16 saat nemli ortamda beklettikten sonra; otoklavda 1 MPa, 2 MPa ve 3 MPa basınç altında; 4, 6, 8, 10, 12 ve 24 saat boyunca kür yapılmıştır. Şahit numuneler ise, 7, 14, 21 ve 28 günlük standart su kürüne tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelere eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri uygulanmıştır. Çıkan sonuçlar değerlendirilerek optimum kür süresi belirlenmiş ve optimum sürede kür yapılmış örneklerin kırılma enerjileri belirlenmiştir ve seçilen örneklerin mikro yapısı incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Reaktif pudra betonu, otoklav kürü, yüksek dayanımlı beton

THE EFFECT OF CURING SYSTEM ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE CONCRETES

ABSTRACT

A type of high cement based concrete, known as Reactive Powder Concrete (RPC), is a distinguished composite with its high, mechanical properties and durability properties. Reactive powder concrete; has very low water/cement ratio and reinforced with steel fibers, is usually produced by mixing hyperplasticizers with cement, silica fume and quartz sand. The quartz, used in the mixture is very fine which leads to minimization of micro spaces in the system.

Ultra high performance concretes are generally used in military structures, strategic structures, nuclear power plants, storage areas for nuclear wastes, strengthening of reinforced concrete structures due to their superior properties. They are also promising composites for prefabrication of small and medium size high quality precast elements.

Four different types of RPC's, that have compressive strength values up to 250 MPa, have been produced by using 2 types of steel fiber and silica fume within the scope of this study. These specimens were kept in a humid environment for 16 hours after casting. After demolding, these specimens were placed in an autoclave and cured in 1 MPa, 2 MPa and 3 MPa pressure for 4, 6, 8, 10, 12 and 24 hours. Arbitration specimens cured in 7, 14, 21 and 28 days in standard water curing. After the curing procedure, flexural and compressive strength of all composites were determined. Optimum curing pressure and period are chosen based on test data. The fracture energies of some composites produced within optimum conditions were computed. Also, microstructures of these RPC's were investigated.

Keywords: Reactive powder concrete, autoclaving, high performance concrete

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM 1 – GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 – BETON TÜRLERİ VE BİLEŞENLERİ.....	5
2.1 Geleneksel Betonlar.....	5
2.2 Özel Betonlar.....	5
2.2.1 Yüksek Performanslı Betonlar.....	6
2.2.2 Çok Yüksek Performanslı Betonlar.....	7
2.2.2.1 Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lifli Beton (SIFCON).....	7
2.2.2.2 Yoğunlaştırılmış Çimentolu ve Ultra İnce Tane Esaslı Malzemeler (DSP).....	8
2.2.2.3 Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurlar (MDF).....	9
2.2.2.4 Karma Lif Donatılı Betonlar.....	9
2.2.2.5 Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar (UYDB).....	10
BÖLÜM 3 – REAKTİF PUDRA BETONLARI.....	11
3.1 Reaktif Pudra Betonlarının Tanımı.....	11
3.2 Reaktif Pudra Betonlarının Kullanım Alanları.....	13
3.3 Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Özellikleri.....	15
3.3.1 Basınç Dayanımı.....	15
3.3.2 Eğilme Dayanımı.....	15
3.3.3 Kırılma Enerjisi.....	16

3.4 Reaktif Pudra Betonunun Özelliklerini Etkileyen Faktörler.....	17
3.4.1 Çimento Tipinin Etkisi.....	17
3.4.2 Su/Bağlayıcı Oranının Etkisi.....	18
3.4.3 Granülometrinin Etkisi.....	20
3.4.4 Mineral Katkıların Etkisi.....	22
3.4.4.1 Silis Dumanı.....	23
3.4.5 Süperakışkanlaştırıcı Katkıların Etkisi.....	25
3.4.6 Çelik Lif Etkisi.....	27
3.4.6.1 Lif Tipinin Etkisi.....	30
3.4.6.2 Çelik Lif Miktarı.....	33
3.4.6.3 Çelik Lif Narinliği.....	34
3.4.6.4 Çelik Lif Geometrisi.....	36
3.4.6.5 Çelik Lif Dayanımının Etkisi.....	38
BÖLÜM 4 – KÜR TEKNİKLERİ.....	40
4.1 Kürün Genel Tanımı.....	40
4.2 Isıl İşlem Kürleri.....	41
4.2.1 Betonun Yerleştirilmeden Önce Isıtılması.....	42
4.2.2 Betonun Yerleştirilmeden Sonra Isıtılması.....	42
4.2.2.1 İç Isıtma (Elektrikle Isıtma).....	43
4.2.2.2 Dış Isıtma.....	44
4.2.2.2.1 Yüksek Basıncılı Buhar Kürü (Otoklav).....	44
4.2.2.2.2 Atmosfer Basıncında Buhar Kürü.....	46
BÖLÜM 5 – DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
5.1 Deneysel Program.....	49
5.2 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	50
5.2.1 Çimento.....	51
5.2.2 Agrega.....	52
5.2.3 Kimyasal Katkı.....	52

5.2.4 Mineral Katkı.....	53
5.2.5 Lif.....	54
5.3 Deneysel Tasarım.....	54
5.3.1 Karışım Dizaynları.....	56
5.4 Deneysel Yöntemler.....	57
5.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	59
5.5.1 Eğilme ve Basınç Deneyleri.....	59
5.5.2 Kırılma Enerjisi Deneyleri.....	61
BÖLÜM 6 – RPB KARIŞIMLARININ EĞİLME DAYANIMLARININ İNCELENMESİ.....	62
6.1 Eğilme Dayanımı Bağlı Grafikleri.....	68
BÖLÜM 7 – RPB KARIŞIMLARININ BASINÇ DAYANIMLARININ İNCELENMESİ.....	80
7.1 Basınç Dayanımı Bağlı Grafikleri.....	86
BÖLÜM 8 – FARKLI LİF KULLANIMININ İNCELENMESİ.....	98
8.1 Farklı Liflerin Eğilme Dayanımlarının Karşılaştırılması.....	98
8.2 Farklı Liflerin Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması	101
BÖLÜM 9 – RPB KARIŞIMLARININ KIRILMA ENERJİLERİNİN İNCELENMESİ.....	104
9.1 Kırılma Enerjisinin Hesaplanması.....	104
9.2 Kırılma Enerjilerinin Değerlendirilmesi.....	105
BÖLÜM 10 – İÇYAPI İNCELENMESİ.....	108

10.1 SEM Analizleri.....	108
10.1.1 Bağlayıcı Olarak Sadece Çimento İçeren Serilerin SEM Analizleri.....	108
10.1.2Bağlayıcı Olarak Sadece Çimento İçeren Lif Katkılı Serilerin SEM Analizleri.....	117
10.1.3Silis Dumanı Katkılı Serilerin SEM Analizleri.....	132
10.1.4 Silis Dumanı ve Lif Katkılı Serilerin SEM Analizleri.....	140
10.2 Parlak Yüzey İncelemesi.....	154
10.2.1 Bağlayıcı Olarak Sadece Çimento İçeren Serilerin SEM Analizleri.....	154
10.2.2 Silis Dumanı Katkılı Serilerin SEM Analizleri.....	160
10.2.3 Bağlayıcı Olarak Sadece Çimento İçeren Lif Katkılı Serilerin SEM Analizleri.....	165
BÖLÜM 11 – SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	168
KAYNAKLAR.....	172

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Yapı malzemesi olarak beton, üretiminin kolaylığı, istenilen şeklin verilebilmesi, yüksek basınç dayanımı ve ekonomik olması nedeniyle; vazgeçilmez bir yapı malzemesi konumundadır.

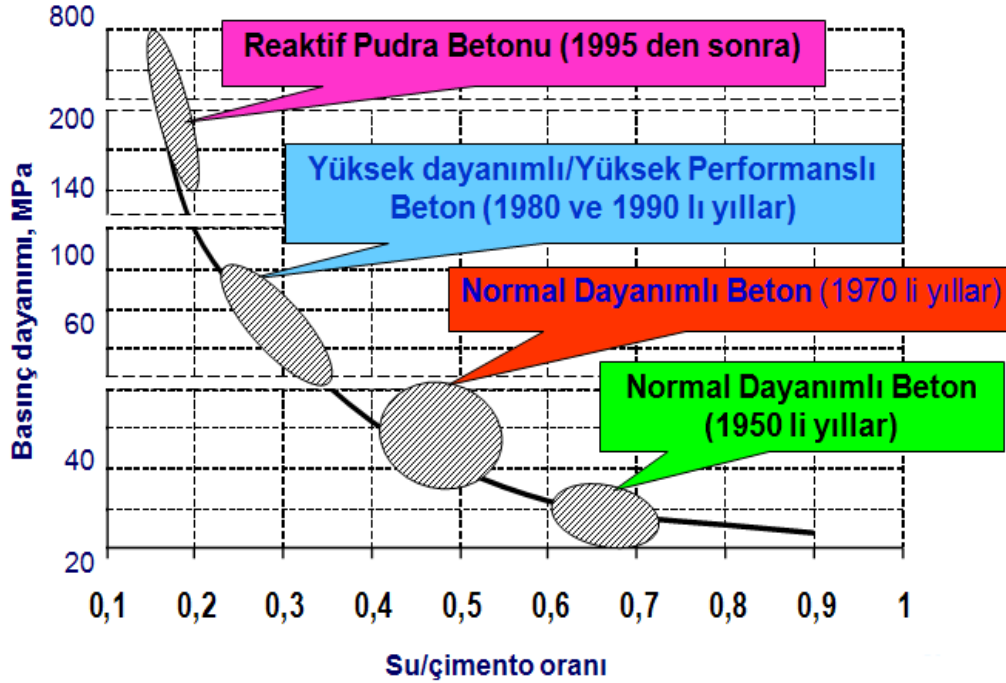
Günümüzde beton teknolojisinde çok büyük gelişmeler kaydedilmektedir. Gerek yeni nesil malzemeler, gerekse yapım teknolojisindeki gelişmeler, betonun inşaat sektöründeki yerini gitgide güçlendirmektedir.

Günümüzde özel yapılarda kullanılan, ileri beton teknolojisi ürünü yüksek performanslı betonların dayanımları, 50 MPa ila 120 MPa arasında değişmektedir. Dayanımdaki bu artış, silis dumanı gibi ultra incelikte mineral katkı, yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı ve çok düşük su/çimento oranı ile sağlanmaktadır. Genellikle yüksek dayanımlı betonlarda normal dayanımlı betonlara göre çimento dozajı yüksek, en büyük agrega tane çapı ise düşüktür (Bonneau ve diğer., 1997).

Son teknoloji ürünü olan reaktif pudra betonları, ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Reaktif pudra betonlarının üretiminde boşluksuz ve homojen bir yapı elde etmek için, iri agrega kullanılmamakta, ince malzemelerin tane çapı dağılımları optimize edilmektedir. Sıcak kür işlemleri ve hidrasyon sırasında ve öncesinde uygulanan basınç ile çok yüksek dayanımlı betonlar elde edilebilmektedir. Reaktif pudra betonu; hamur fazı yoğun, yüksek miktarda silis dumanı ve düşük miktarda su içeren harç olarak nitelendirilebilir (Lachemi ve diğer., 1997).

Beton teknolojisi sürekli bir gelişim içerisinde. Şekil 1.1'den de görüldüğü üzere 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15 – 25 MPa civarında iken, 1970'li yıllarda yüksek katlı yapılarda kolon yüklerinin temele taşıtılabilmesi için 40 – 50 MPa beton basınç dayanımlarına ulaşılmıştır.

Zaman içerisinde dayanımları artan bu betonlara, yüksek performanslı beton adı verilmiş ve yol, köprü, liman yapısı vb. uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır (Aitcin 2000).



Şekil 1.1 Beton basınç dayanımının yıllara bağlı gelişim süreci

Reaktif Pudra Betonları (RPB), basınç dayanımları 20 – 60 MPa olan geleneksel betonlar, sonrasında 60 – 115 MPa olan yüksek dayanımlı betonlar ve sonrasında 200 MPa aşan değerleri ile beton sınıflandırmasında yeni bir yeri oluşturmaktadır (Taşdemir, 2005).

Ultra yüksek performanslı betonlar yüksek dayanım, durabilite ve süneklik özellikleriyle tanımlanabilen malzemelerdir. Normal betondan farklı olarak, yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar, ince agrega, silis dumanı ve çelik lif kullanımıyla elde edilirler. Yüksek dayanımlı betonlardan ayrılmalarını sağlayan en önemli etken ise sünek davranış göstermeleridir.

Yüksek dayanımlı betonların en büyük problemi gevrekliktir. Reaktif pudra betonlarında, betona kısa kesilmiş çelik lif katılması ile yüksek dayanımın yanı sıra

yüksek süneklik de elde edilebilir. Bu betonlarda, lif içeriğine ve lif narınlığına bağlı olarak çok yüksek kırılma enerjisine ve yüksek sünekliğe (şekil değiştirme yeteneği) erişilmektedir. Süneklikle birlikte darbe dayanımının ve enerji yutma kapasitesinin artması askeri yapılar, endüstriyel zeminler, ağır trafiğin söz konusu olduğu özel durumlarda reaktif pudra betonlarını cazip hale getirmektedir (Bayramov ve diğer., 2004).

Taşıyıcı yapı malzemeleri tasarlanırken dayanımın yanı sıra süneklik, uzun süreli performans, üretim kolaylığı, çevre ile uyumluluk ve ekonomi de önem kazanmaktadır. Özellikle zaman içerisinde ekonomik olmayı da sağlayan uzun süreli performans kavramı, durabilite ile yakından ilgilidir. Betonda durabilite; su/çimento oranı ve agrega ile çimento hamuru arasındaki temas yüzeyi özelliklerine bağlıdır. Düşük su/çimento oranı ve yoğun tane dizilisi ile reaktif pudra betonları yüksek dayanımın yanı sıra üstün fiziksel özelliklere sahiptirler ve geçirimsizlikleri çok düşüktür (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Reaktif pudra betonlarında yüksek mekanik dayanımların ve fiziksel özelliklerin sağlanması için üretim aşamasında; akışkanlaştırıcı katkılar, çelik lifler ve mineral katkıları gibi malzemelere ihtiyaç duyulması sebebiyle, üretiminde iyi bir kalite kontrolü ve üretim ilkelerine uymak gerekmektedir.

Reaktif Pudra Betonun üretiminde ana ilkeler şu şekildedir:

- İri agreganın elimine edilerek homojenliğin artırılması,
- Tane çapının optimize edilmesi ve kalıba yerleştirme sırasında iyi bir sıkıştırma uygulanması
- Karışımda kısa çelik lifler kullanılarak duktilitenin artırılması,
- Silis dumanı gibi güçlü puzolanik özelliklere sahip mineral katkıların kullanılmasıdır.
- Priz sonrasında ısıtılarak mikroyapının güçlendirilmesi,

Beton sertleşmesinin hızlandırılmasında ısıtılarak mikroyapının güçlendirilmesi, 1880'lerde Michaelis'e kadar uzanır. İlk defa o basınçlı buhar kürünü uygulamıştır. 1927'lerde

Fransa da Freyssinet, 80°C – 100°C’lik ısıtma işlemleri elektrik direği ve büyük boru üretiminde uygulamıştır. 1931’lerde ilk uygulamalarına İsveç’te başlanan elektrikli yöntemler, kısa zamanda Sovyetler Birliği’nde ve Sibiryada geniş çapta uygulama alanı bulmuştur. Isıtma işlem teknolojisinde kızıl ötesi ışınlar 1940’larda, elektrik endüksiyon yöntemi ise 1948’lerde başlamıştır (ACI Journal, 1980). Günümüze kadar gelişerek ve çeşitlenerek gelen ısıtma işlemler bugün; küçük kiriş, kolon eleman üretiminden büyük kesitli köprü elemanları üretimine kadar her dalda betonarme ve tüm yapı elemanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hızlandırılmış kür yöntemleri kullanılarak kısa sürede elde edilen basınç dayanım değeri, prefabrikasyonda betonun kalıptan alışı dayanımı, hazır beton sektöründe beton üretiminde kullanılan çimentonun kalitesini belirleme gibi parametrelerin belirlenmesinde son derece faydalıdır.

Sunulan bu tez kapsamında; dört farklı karışım türü üretilmiştir ve iki farklı tipte çelik lif kullanılmıştır. Karışımlardaki çelik lif miktarı hacimce % 2’dir. Karışımlar üretildikten sonra, 16 saat nemli ortamda bekletilmiştir ve daha sonra belirlenen basınçlarda ve sürelerde kür uygulanmıştır. Çıkan sonuçlar değerlendirilerek, en yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip karışım türü belirlenmiş ve bu karışım türünün, otoklav küründe maksimum basınç ve eğilme dayanımını kazanması için gereken süre tespit edilmiştir. Maksimum basınç ve eğilme dayanımına sahip olan karışım türünün, belirlenen kür koşulları altındaki kırılma enerjisi belirlenmiştir.

BÖLÜM İKİ

BETON TÜRLERİ VE BİLEŞENLERİ

Beton; çimento, agrega, su ve gerekiyorsa kimyasal katkıının belirli esaslara göre hesaplanan oranlarda karıştırılması ile üretilen, uygun kür koşullarında saklanarak, sınıfı basınç dayanımına bağlı olarak ifade edilen kompozit bir malzemedir.

Mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından betonlar genel olarak iki sınıfa ayrılabilir.

1. Normal Betonlar

2. Özel Betonlar

2.1 Geleneksel Betonlar

Normal betonlar, basınç dayanımları 20MPa-60MPa, kırılma enerjileri 100 J/m² - 120 J/m² civarında olan, agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesi kullanılarak üretilen ekonomik malzemelerdir (Taşdemir, Bayramov, 2002).

Normal betonların kırılma enerjileri, ultra yüksek dayanımlı betonların % 0,3'ü, basınç dayanımları ise % 8'i civarındadır. Bu sebeple çok özel yapılarda normal betonlar yerini ultra yüksek dayanımlı betonlara bırakmaktadır. Normal betonlar bina, yol, sanat yapıları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İlerleyen beton teknolojisine rağmen normal betonlar günümüzde en çok kullanılan beton türüdür (Taşdemir, Bayramov, 2002).

2.2 Özel Betonlar

Özel beton, üretim süreci ve özellikleri normal betonlardan farklı olan betonlara verilen genel addır. Üretim sürecinin farklı olması üretim tekniğinin geliştirilmesinin yanı sıra, belirli özellikte beton üretimine de olanak sağlar (Akman, 1987). Bunlara örnek olarak; yüksek dayanımlı betonlar, reaktif pudra betonları, mineral katkı

betonlar, geciktiricili veya hızlandırıcılı betonlar, kendiliğinden yerleşen betonlar, hafif betonlar, polipropilen ve çelik lifli betonlar, püskürtme betonlar verilebilir.

2.2.1 Yüksek Performanslı Betonlar

Yüksek dayanımlı beton, yüksek kalitede agrega ve çimento ile silis dumanı kullanılarak üretilen, su/çimento oranı düşürülerek ($\sim 0,20$) süperakışkanlaştırıcı katkı ile yüksek işlenebilirlik ve pompalanabilirlik elde edilebilen özel bir beton türüdür. Yüksek dayanımlı betonlarda basınç dayanımı yaklaşık olarak 100 N/mm^2 mertebelerine kadar çıkabilmektedir (Kocataşkın, 1991).

Yüksek dayanımlı betonlarda dayanım, çimento hamurunun boşluk yapısına, agreganın özelliklerine, agrega-çimento hamuru geçiş bölgesine bağlıdır. Çimento hamuru ve ara yüzey geçiş bölgesinin özellikleri, su/çimento oranı düşürülerek ve maksimum agrega çapı küçültülerek iyileştirilebilir. Ancak bu iki yaklaşımda da belirli bir üst sınır vardır. Bu sınırı aşmak için betonda çimento hidratasyonu sonucu oluşan ve $1 - 2 \text{ MPa}$ mertebesinde düşük dayanıma sahip Ca(OH)_2 (Kalsiyum Hidroksit) kristallerinin, silis dumanının puzolanik etkisi ile bağlayıcı C - S - H (Kalsiyum Silikat Hidrate) jellerine dönüşmesi gerekir. Özellikle agrega-çimento hamuru arayüzeyindeki C-S-H fazının oluşması ile arayüzey iyileştirilerek aderans artırılır. Dolayısıyla durabilitesi ve dayanımı yüksek olan beton elde edilmiş olur (Kocataşkın, 1991).

Yüksek dayanımlı betonlarda yapı kesitlerinin küçülmesi, ölü yükün azalması ile uzun açıklıkların geçilmesini ve yapılarda kullanılabilir alanın artmasını sağlar. Yapı kütlelerinin azalması, depreme dayanıklı binaların ekonomik tasarımı için önem teşkil eder (Wafa, Ashour, 1992). Yüksek dayanımlı beton kullanımı ile % 68 kesit azalması gerçekleştirilebilir (Kmita, 2000).

Yüksek dayanımlı betonların en önemli kusurları gevrek kırılma, otojen rötre ve yangına karşı dayanıksızlıktır. Günümüzde bu kusurlar çeşitli önlemlerle giderilerek yüksek performanslı betonlar üretilmektedir (Taşdemir ve diğer., 2005).

2.2.2 Çok Yüksek Performanslı Betonlar

1930'larda Eugéne Freyssinet yerleştirme sırasında betona basınç uygulanmasının beton dayanımını arttıracakını belirtmiştir. 1960'larda ise beton ve harç numuneleri üzerine doygun atmosfer koşullarında sıcak kür ve basınç uygulanmıştır (Richard ve Cheyrezy, 1995). Uzun süren çalışmalar sonucunda, yüksek dayanımlı ileri çimento esaslı malzemeler elde edilmiştir. Bu beton türleri;

- Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lifli Betonlar,
- Yoğunlaştırılmış Çimentolu ve Ultra ince Tane Esaslı Malzemeler,
- Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurlar,
- Karma Lif Donatılı Betonlar,
- Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar'dır.

2.2.2.1 Çimento Hamuru enjekte edilmiş lifli beton (SIFCON)

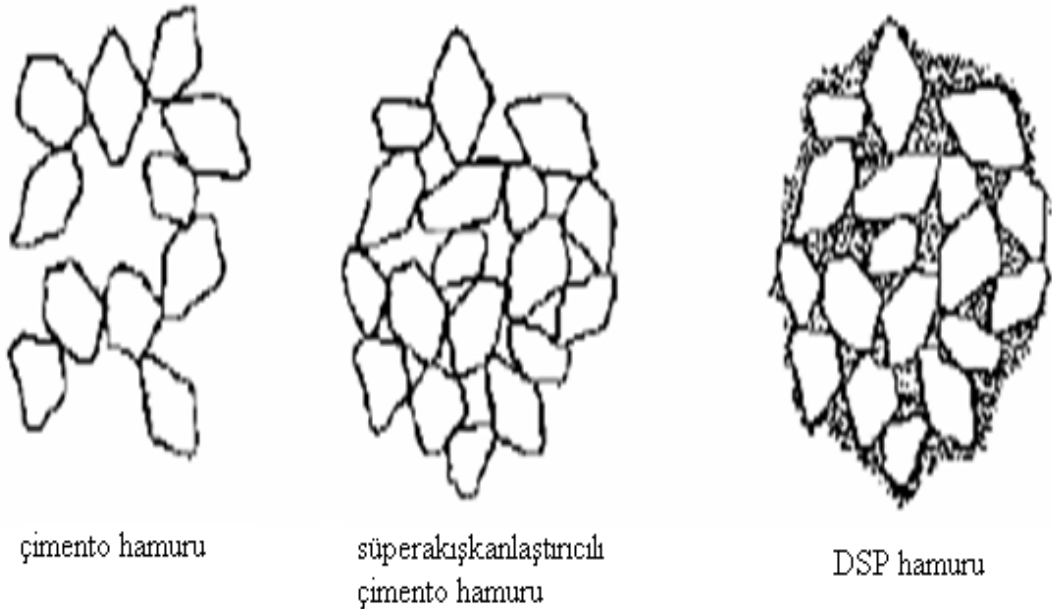
Çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON), çok yüksek dayanımlı betonların özel bir çeşidi olup, kullanılan lif hacmi % 20'ye kadar ulaşmaktadır. Lif oranının yüksek olması yerleştirme problemlerine neden olacağından, SIFCON'un üretiminde özel bir teknik geliştirilmiştir. SIFCON, çelik liflerin hazırlanan kalıba yerleştirilmesinden sonra, akıcı harç bulamacının liflerin içine enjekte edilmesi ile üretilir.

Kullanılan lif hacmi; lif narinlik oranına, lif geometrisine, yerleştirme tekniğine bağlı olarak değişir. SIFCON matrisi bileşimini; çimento – uçucu kül, çimento-silis dumanı, çimento-kum-uçucu kül veya çimento – kum – silis dumanı oluşturmaktadır, iri taneli agrega bileşimde kullanılmaz. Karışımlarda bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılacaksa çimento miktarının % 20'si kadar, silis dumanı kullanılacaksa çimento miktarının %10'u kadar katılmaları tavsiye edilir. SIFCON'un üretiminde lifin harç içerisinde yönelme doğrultusu büyük önem taşır.

SIFCON köprülerin ve kaldırımların onarılmasında, patlayıcı malzeme saklanan, yangına karşı koruma gerektiren yerlerin inşasında, prekast ürünlerde kullanılmaktadır (Balaguru ve Shah, 1992).

2.2.2.2 Yoğunlaştırılmış Çimentolu ve Ultra İnce Tane Esaslı Malzemeler (DSP)

Bu malzemeler yüksek süperakışkanlaştırıcı ve silis dumanı içeriğine sahip olup, yüksek sertlikli agreganın (granit, kalsine boksit) kullanılması ile üretilirler (Richard ve Cheyrezy, 1995). DSP malzemeler 150 – 400 MPa arasında değişen basınç dayanımına sahiptirler (Rossi, 2000). Silis dumanı çimento taneleri arasındaki boşluklarda homojen olarak dağılarak çok yoğun bir yapı meydana getirir ve bu yoğun yapıda meydana gelebilecek topaklanmaları önlemek amacıyla süperakışkanlaştırıcılar kullanılır (Karihaloo ve diğer., 2004). Tane çaplarının birbirine oranının 30 olduğu iki malzemenin birleştirilmesi ile optimum tane dizilisi elde edilerek, boşluk miktarı minimuma indirilebilir (Özyurt, 2000).



Şekil 2.1 Ultra ince taneli yoğunlaştırılmış sistemler

2.2.2.3 Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurlar (MDF)

MDF çimentolu malzemeler Portland veya yüksek alüminli çimentoların yüksek moleküler kütleli suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Burada polimerin görevi düşük su/katı oranında karışımın viskozitesini arttırmak, çimento tanelerinin topaklanmasını önlemektir (Taşdemir ve diğer., 2004). Sertleşmiş malzeme polimer, çimento tanelerine sağlam bir şekilde bağlanarak, malzemenin porozitesini hacminin % 1'ine kadar düşürür (Özyurt, 2000).

MDF çimento hamurları çok özel üretim koşullarında elde edilmektedir. Bu hamurlar yüksek kayma mikseri ile karıştırılmakta ve yerleştirmenin iyi yapılabilmesi için karışım birçok kez hadde işlemine tabi tutulmaktadır. Ayrıca, MDF'nin suya karşı duyarlı olması, malzemenin sünme miktarını artırır. MDF çimento hamurları çok gevrek – kırılğan malzemelerdir. Sünekliği arttırmak için kullanılacak çelik teller viskozitesi yüksek olan MDF hamurunda yerleştirme problemine sebep olmaktadır (Rossi, 2000).

2.2.2.4 Karma Lif Donatılı Betonlar

Karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler betonda farklı tip ve boyutta lif kullanılması ile üretilir ve burada amaç çatlakların mikro düzeyden itibaren kontrol edilmesidir. Mikro ve makro düzeyde çelik teller kullanılarak, bu düzeydeki çatlaklar kontrol altına alınmaktadır. Mikro lifler mikro çatlakların, makro lifler makro çatlakların oluşumunu ve gelişimini kontrol eder.

Mikro lifler, çatlakları makro düzeye gelmeden durdurarak, elastik bölgedeki davranışı iyileştirir. Makro lifler ise, makro düzeydeki çatlakları kontrol ederek, maksimum yük sonrası davranışı iyileştirirler. Dolayısı ile malzemenin çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve sünekliği artar.

Mikro lifler mikro çatlakları köprü görevi görerek durdururken, lifler arası mesafe büyük olduğu için, makro lifler çatlak başlangıcında etkili olmayıp, maksimum yük sonrası davranışı iyileştirirler. Bu durumda mikro lifler çimento hamurunun, makro lifler ise betonun güçlenmesinde etkili rol oynarlar (Kocatürk ve diğer., 2004).

2.2.2.5 Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar (UYDB)

Ultra-Yüksek-Performanslı Beton (UYPB), 150 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımı ve üstün durabilite özellikleriyle çimento esaslı kompozitlerin yeni bir tipidir. Basınç dayanımı 200 MPa ile 800 MPa aralığında olan ultra yüksek performanslı betonlar, reaktif pudra betonları (RPB) olarak da bilinir. Beton özelliklerin iyileştirilmesi için temel ilke, agrega – matris ara yüzeyinde iyi bir yapışma ve mümkün olan en yoğun matrisin elde edilmesidir. Kendiliğinden yerleşen UYPB ile basınç dayanımı 155 MPa olan bir silindir, sıcak kür veya başka hiçbir özel işlem yapılmadan üretilebilir (Richard ve Cheyrezy, 1995).

BÖLÜM ÜÇ

REAKTİF PUDRA BETONLARI

3.1 Reaktif Pudra Betonlarının Tanımı

Gelişen dünyada yüksek performanslı betonlara olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda, teknolojinin gelişmesiyle beraber, betondan istenen dayanım artmaktadır. TS EN 206 – 1, C100’e kadar beton sınıfını hedeflemektedir. Avrupa’da Almanya’nın öncülüğünde C60 – C100 arasındaki beton sınıfları için yeni tasarım ilkeleri ve hesap yöntemleri geliştirilmektedir.

Günümüzdeki büyük gelişmelerin sonucu olarak, hem üretim teknolojisi hem de deneysel tekniklerdeki gelişmeler beton dayanımının gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Özellikle betonun içyapısı ve mekanik davranışlarının birlikte incelenmesi ve değerlendirilmesi, araştırmalara yeni boyutlar kazandırmıştır.

Günümüz teknolojiyle birlikte beton davranışının daha iyi kavranacağı ve bulunduğumuz çağın gereği olarak, mühendislik yapılarının projelendirilmesinde daha gerçekçi ilkelerin ve daha gelişmiş yöntemlerin kullanılması beklenmektedir. Bu yüzden betonun daha etkin bir biçimde ve yerinde kullanılması oldukça önemlidir. Yüksek dayanımlı betonların; reaktörler, açık deniz yapıları, savunma amaçlı depolama binaları gibi uzun servis ömrü istenen yapılarda kullanması artan bir ilginin oluşmasına neden olmaktadır (Malthota, 1992; Taşdemir 1995).

RPB ileri mekanik özelliklere, üstün fiziksel karakteristiklere, mükemmel sünekliğe ve çok düşük geçirimsizliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir (Walraven, 1999; Matte ve Moranville, 1999).

Reaktif pudra betonları ile ilgili ilk çalışmalar Richard ve Cheyrezy tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda RPC 200 ve RPC 800 olmak üzere esasta aynı fakat üretiminde ve ısıt işlemlerinde bazı farklılıklar bulunan, iki tür betonun tasarımı

yapılmış ve bu betonların üretimi ile mekanik özellikleri açıklanmıştır (Richard ve Cheyrezy, 1995).

Reaktif pudra betonu üretiminin amaçları şu şekilde özetlenebilir:

1. Yüksek Performanslı Betonlara iyi bir alternatiftir ve yapısal olarak çelikle yarışacak bir potansiyele sahiptir.
2. Üstün basınç dayanımı, yüksek kesme dayanımı kapasitesiyle birleşerek önemli ölçüde ölü yük azalmasına ve çok sayıda narin prefabrik üretimine olanak verir.
3. Daha hafif elemanlarla, azalan kesit alanlarıyla daha büyük sehim ve daha yüksek enerji yutmayı sağlayarak depreme dayanıklılıkta gelişim sağlar.
4. Düşük ve birbirine bağlı olmayan kılcal boşlukları, porozite yapısını önemli oranda geliştirir. Bu da durabilitesi yüksek bir malzeme özelliği olduğunu göstermektedir.
5. Düktil çekme kırılması mekanizması ile RPB doğrudan ana çekme gerilmeleri dışındaki çekme gerilmelerine karşı yeterli dayanıklılıktadır. Bu durum ilave kesme donatısını ve diğer ek donatı ihtiyacını ortadan kaldırır.
6. Yüksek kırılma enerjisi, daha tok ve daha fazla oranda enerji yutabilen yapısal elemanların üretilebilmesine olanak sağlar.

Reaktif pudra betonlarının içyapısı daha sıkı tane düzenine sahip olup, mikro yapısı yüksek performanslı betonlara kıyasla en kuvvetli çimentolu hidrate ürünlerin varlığı ile güçlendirilmektedir (Walraven, 1999; Richard ve Cheyrezy, 1995).

Bu üstün özelliklere şu aşamalarla erişilmektedir:

1. Optimum yoğunluktaki matrise varmak için karışımdaki tanelerin dağılımının hassas bir biçimde ayarlanması,
2. Betonun homojenliği için agrega tanelerinin maksimum boyutunun azaltılması,
3. Betondaki su miktarının azaltılması,
4. Yüksek inceliğe sahip silis dumanın puzolanik özelliklerinin yoğun bir biçimde kullanılması,

5. Bütün bileşenlerin optimum miktarları,
6. Sünekliği sağlamak için kısa kesilmiş çelik liflerin kullanılması,
7. Çok yüksek dayanımlara erişmek için, basınç altında ve yüksek sıcaklık koşullarında kür edilmesi (Walraven, 1999; Richard ve Cheyrezy, 1995).

3.2 Reaktif Pudra Betonlarının Kullanım Alanları

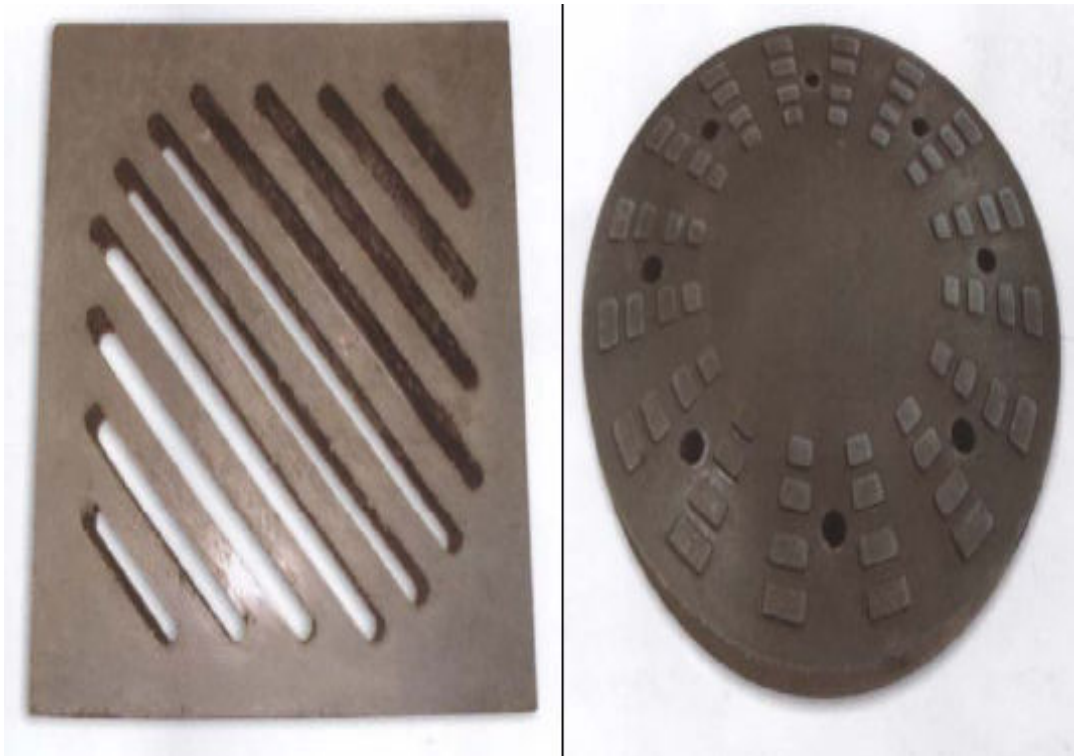
RPB, çok üstün mikro yapı özelliklerinden dolayı nükleer atıkların depolanmasında kullanılabilir (Matte ve diğer., 1998). Günümüzde, Avrupa'da birçok projede RPB izolasyon ve nükleer atıkların depolanmasında kullanılmaktadır. Konvansiyonel yapılara kıyasla, nükleer atık yapılarının servis ömürlerinin 250 yıl gibi uzun bir süre olması istenir. Bu yapıların servis ömürleri boyunca dışarıdan gelecek tüm fiziksel, kimyasal, biyolojik etkilere karşı yüksek dayanım ve dayanıklılık göstermesi istenir. Bu yüzden, bu tip özel üretimler için gelecekte RPB, yeni ve verimli çözümler sunacaktır (Blais ve Couture, 1999).



Şekil 3.1 Reaktif pudra betonu ile yapılmış Sherbrooke köprüsü

Yurtdışında RPB uygulaması Kanada'daki Sherbrooke şehrindeki yaya köprüsüdür. Köprü, RPB 200 betondan yapılmıştır ve yapıda kullanılan beton, 200 MPa basınç dayanımı, 40 MPa eğilme dayanımı ve 50GPa'lık elastisite modülüne herhangi bir çelik donatı kullanılmadan erişmektedir..uzay kafes şeklindedir. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere köprü, 60 m uzunluğunda ve 3,3 m genişliğinde olup, uzay kafes sisteminde tasarlanmıştır ve her birinin boyu 10 m olan 6 adet prefabrik elemanın montajı ile inşa edilmiştir. Alt ve üst başlıklarda RPB'dan yapılmış elemanlar kullanılırken diagonal ve örgü çubuklarında çelik kullanılmıştır (Blais ve Couture, 1999).

Ülkemizde reaktif pudra betonuna yönelik ilk çalışma İTÜ ortak çalışması sonucu İston firması tarafından üretilen yağmur suyu ızgarası ve rögar kapaklarıdır (Şekil 3.2). Üretilen bu prefabrike elemanların deney sonucu bulunan zımbalama yükü değerlerinin ortalaması 46 ton'dur. İston firmasında üretilen rögar kapağının zımbalama yükü ise ortalama 57,8 ton'dur (Taşdemir ve diğer., 2005).



Şekil 3.2 Reaktif pudra betonu ile üretilmiş rögar kapağı ve yağmur suyu ızgarası

3.3 Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Özellikleri

3.3.1 Basınç Dayanımı

Reaktif pudra betonları, yüksek eğilme dayanımına ve oldukça yüksek süneklığe sahiptirler. Süneklilikleri normal betona kıyasla 300 kat daha fazladır (Richard ve Cheyrezy, 1995; Dugat. 1996; Bonneau, 1997). Düşük porozite değerleri, bu betonlara önemli durabilite ve düşük geçirimsizlik özellikleri kazandırır. Bunlar çeşitli iklim koşullarının etkisindeki bazı özel yapılar için potansiyel olarak uygun bir malzeme niteliği sağlar (Feylessoufi 1996; Matte ve Moranville, 1999).

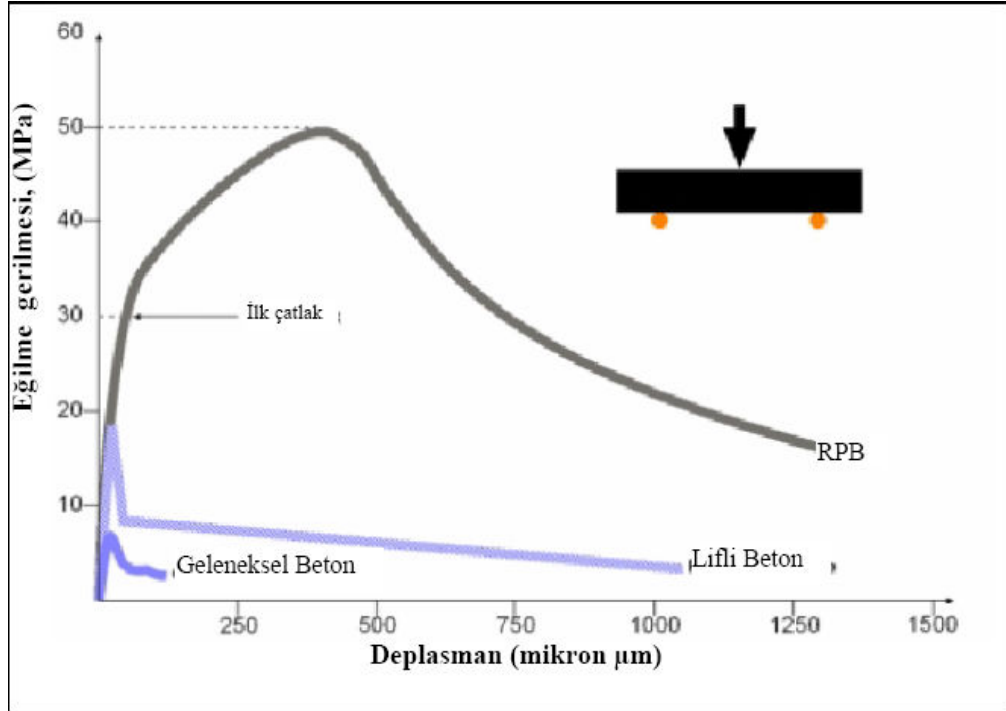
Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri, Pierre Richard ve Marcel Cheyrezy tarafından hazırlanan ‘Composition of Reactive Powder Concretes’ çalışmasında normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik özellikleri ile karşılaştırılmıştır ve Tablo 3.1’de şu şekilde özetlenmiştir.

Tablo3.1 Reaktif pudra betonu (RPB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve normal betonun (NB) mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

Mekanik Özellikler	RPB	YDB	NB
Basınç dayanımı (MPa)	200 – 800	60 – 115	20 – 60
Elastisite modülü (GPa)	60 – 75	35 – 40	20 – 30
Eğilme dayanımı (MPa)	50 – 140	6 – 10	4 – 8
Kırılma enerjisi (J/m²)	1200 – 40000	100 – 130	100 – 120

3.3.2 Eğilme Dayanımı

Reaktif pudra betonunun basınç dayanımı 200 – 800 MPa, kırılma enerjisi 1200 – 40000 J/m² arasında değerler alırken, nihai çekme birim deformasyonu % 1 mertebelerine kadar çıkartılabilir (Feylessoufi, 2001). Şekil 3.3’te görüldüğü gibi, çelik liflerinde kullanımı ile çok yüksek eğilme dayanımları elde edilebilir. Yüksek oranda enerji yutabilmesi ile duktilite açısından metallere yakın değerler göstermektedir (Cheyrezy, 1998).

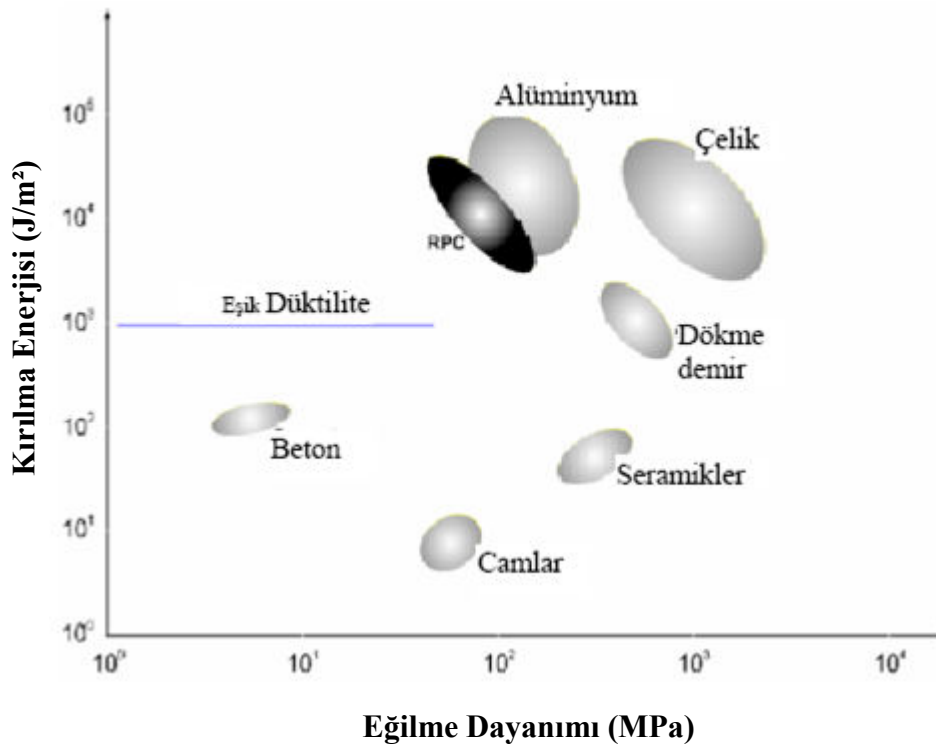


Şekil 3.3 Reaktif pudra betonunun eğilme gerilmesi – deplasman grafiği

Şekil 3.3'de geleneksel beton ve RPB 200'ün (Basınç dayanımı 200 MPa) basit kiriş halindeki mekanik davranışını göstermektedir. Reaktif pudra betonunun büyük bir şekil değiştirme sertleşmesi gösterdiği görülmektedir. Eğilme dayanımı, ilk çatlama gerilmesinin yaklaşık iki katı kadar yüksektir. Maksimum gerilmedeki deplasman, ilk çatlaktaki deplasmandan yaklaşık 10 kat daha büyüktür (Richard ve Cheyrezy, 1995).

3.3.3 Kırılma Enerjisi

Kırılma enerjisi, "gerilme-açıklığın ortasındaki sehim" eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Tablo 3.1'den anlaşılacağı üzere, kırılma enerjisi RPB için 1250 μm 'ye kadar sehimde 30000 J/m^2 'dir. Bu değer normal harç için ise toplam 110 J/m^2 'dir. Böylece, reaktif pudra betonunun kırılma enerjisinin normal harcınınin yaklaşık 300 katı kadar olduğu sonucuna varılabilir (Taşdemir ve diğer., 2005).



Şekil 3.4 Çeşitli maddelerin eğilme dayanımı – kırılma enerjisi grafiği

3.4 Reaktif Pudra Betonunun Özelliklerini Etkileyen Faktörler

3.4.1 Çimento Tipinin Etkisi

Yüksek dayanım elde etmek için, karışımın su ihtiyacı ve işlenebilirliği açısından çimento tipi oldukça önemli bir parametredir. Çimento seçimi yapılırken, üretim ve kalite programını tam olarak uygulayan standartlara uygun üretim yapan bir firma aranmalıdır. Çimento; fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler bakımından üstün nitelikte olmalı ve kalitesi fazla değişken olmamalıdır. Kullanılmadan önce gereken kontroller uygun biçimde yapılmalıdır.

Karışım için öncelikle C₃A içeriği ve tane dağılımı başlıca kontrol etkenleridir. Karma oksit bileşimi çimento inceliği ve azaltılmış hidrasyon ısı erken ve nihai dayanımı yönlendiren karakteristiklerdir. İnceliğin yüksek olması su ihtiyacını arttıracaktır. Bu yüzden çok daha ince çimento tipi kullanmak su bağlayıcı oranını arttıracığından iyi sonuçlar vermeyebilir. Kimyasal kompozisyonunda düşük C₃A

içeriği olan çimentolar dayanım değerlerinde daha iyi sonuçlar vermektedir (Richard ve Cheyrezy, 1995).

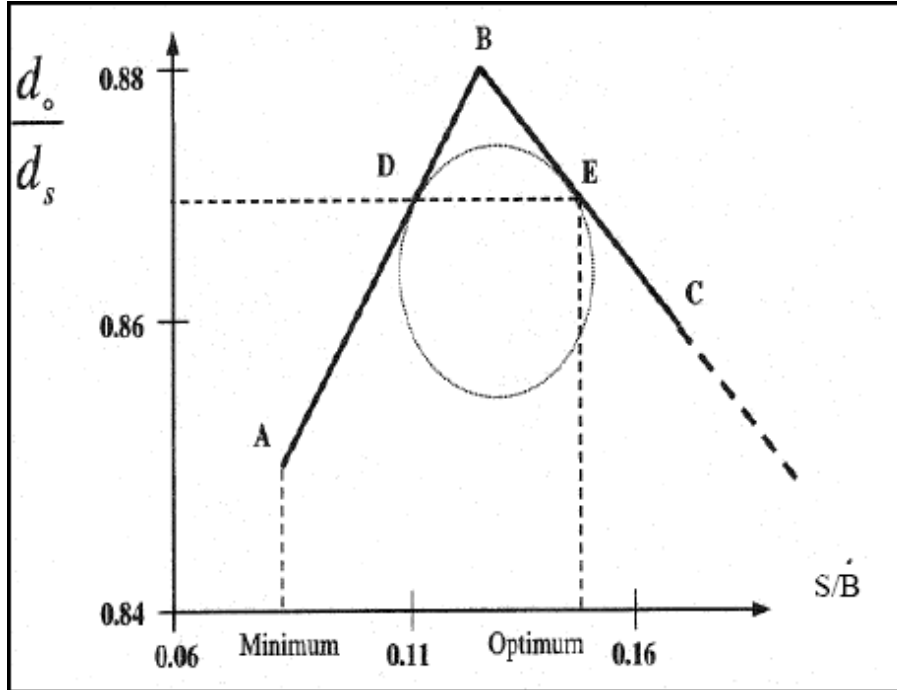
Portland çimentosunun hidratasyonu sırasında çok miktarda kalsiyum hidroksit Ca(OH)_2 oluşur. Bu kalsiyum hidroksitin betonun dayanım gelişimine hiçbir katkısı yoktur. Aksine, geniş kalsiyum hidroksit kristalleri sadece agrega – çimento hamuru etkileşiminde ve çimento hamurunun kümeleşme evresinde zayıflıkların oluşmasına neden olurlar. Kalsiyum hidroksit; uçucu kül veya silis dumanı gibi mineral katkıların katılımıyla, puzolanik reaksiyon sırasında dayanıma katkıda bulunan bir kalsiyum silikat hidrat yapıya dönüşür.

3.4.2 Su/Bağlayıcı Oranının Etkisi

Reaktif pudra betonunda, granüler matrisin performansını ve kalitesini belirlemedeki ana parametrelerinden biri de su içeriğinin, işlenebilirliğini sağlayan en düşük oranının belirlenmesidir. En düşük su / bağlayıcı oranı (bağlayıcı olarak çimento ve mikro silika malzemeleri) yoğun RPB karışımlarında 0,08 olarak belirlenmiştir (Richard ve Cheyrezy 1995).

Reaktif pudra betonlarında bağıl yoğunluğun artırılması, yüksek dayanım ve yüksek performans için zorunlu koşuldur. Bağıl yoğunluğun yüksek olması; boşluk oranı az, geçirimsiz, dayanımı yüksek ve kusurları minimum seviyeye indirilmiş beton demektir. Reaktif pudra betonlarında bağıl yoğunluk, granülometrinin hassas biçimde ayarlanması, su/çimento oranının düşürülmesi, silis dumanının boşluk doldurma özelliğinden faydalanılarak arttırılmaktadır.

Reaktif pudra betonlarında su/çimento oranı çok düşük olup, 0,15 civarlarındadır. Su/çimento oranının düşük olması, tüm çimento tanelerinin hidrate olmasını engeller. Hidrate olmayan çimento taneleri, RPB’da kullanılan agrega boyutuna yakın olduğundan beton dayanımına katkıda bulunurlar. Su/çimento oranının azalması ile çimento hamurundaki ortalama boşluk çapı küçülür, toplam boşluk miktarı azalır (Taşdemir ve Bayramov, 2002).



Şekil 3.5 Bağlı yoğunluk – su/bağlayıcı ilişkisi

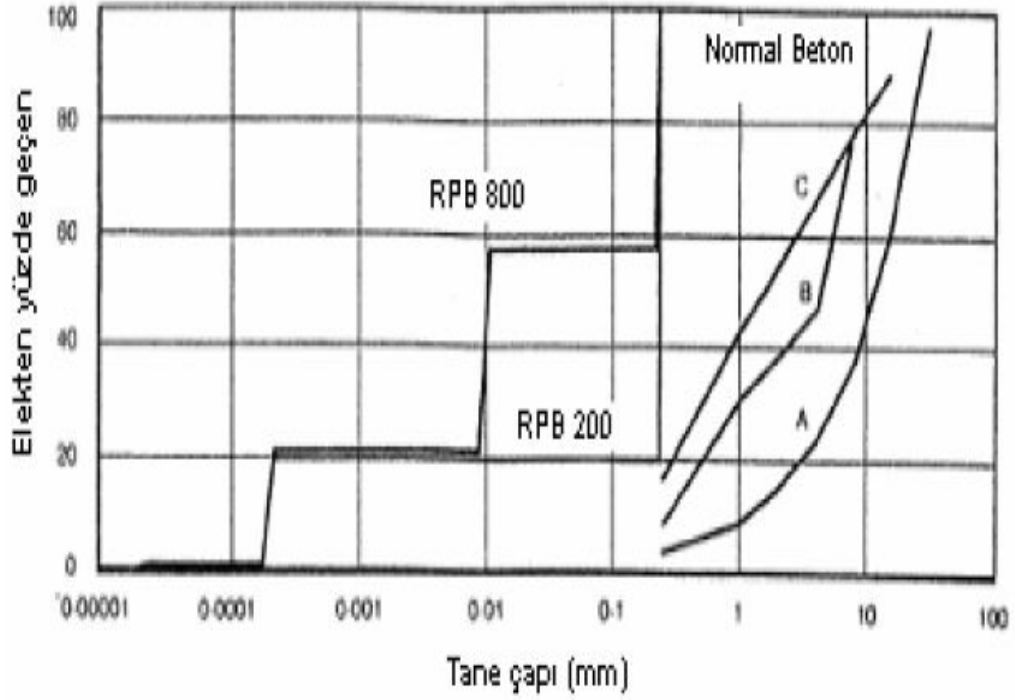
Reaktif Pudra Betonunda maksimum yoğunluğu elde etmek için, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi optimum su/bağlayıcı oranı belirlenmelidir. Optimum su içeriği bağlı yoğunluk parametresi (d_o/d_s) ile elde edilir. ' d_s ' sıkıştırılmış olduğu varsayılan taneli karışımın katı yoğunluğunu, ' d_o ' ise kalıp alınması aşamasındaki beton yoğunluğunu göstermektedir.

A noktası su/bağlayıcı oranının minimum olduğu değerdeki bağlı yoğunluğu göstermektedir. Su/bağlayıcı oranı arttıkça ilave su, boşluklardaki hava ile yer değiştirir. B noktasında, malzemedeki hava boşluklarının tamamı su ile dolmuş durumdadır. Bu noktadan itibaren, su miktarının artması ile malzeme hacmi de artacağından bağlı yoğunluk düşmektedir. Şekil 3.5'ten anlaşılacağı üzere, aynı bağlı yoğunluğu sağlayan iki farklı su/bağlayıcı oranı bulunmaktadır. E ve D noktası optimum sonuçlar veren noktalar olup, E noktası D noktasına göre daha iyi bir mekanik performansa sahiptir; çünkü E noktasında, numune daha az hava, ancak hidrasyon sonrası kısmen katı faz ile entegre olacak olan daha fazla su içermektedir. Ayrıca E noktasında, su/çimento oranının fazla olması nedeniyle işlenebilirlik artmakta ve daha iyi reolojik özellikler elde edilmektedir (Richard ve Cheyrezy, 1995).

3.4.3 Granülometrinin Etkisi

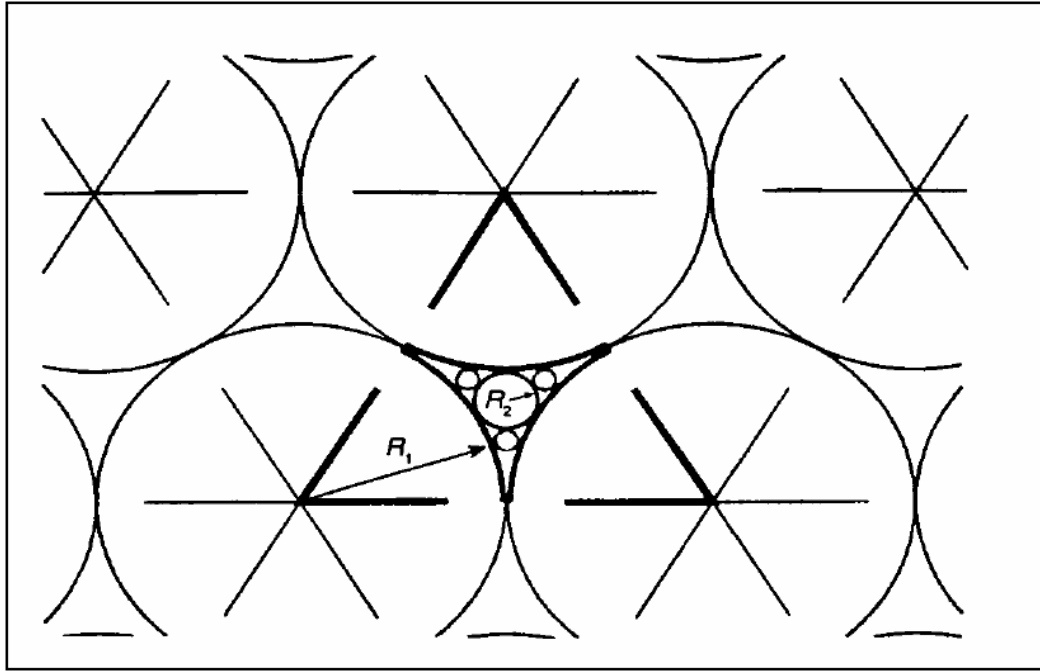
Reaktif pudra betonlarının mikro yapısında maksimum yoğunluğu sağlamak için, karışımdaki tüm tanelerin boyut dağılımı hassas biçimde optimize edilmesi gerekir. Bunun için, RPB'nin granülometri eğrisi süreksiz olmalıdır (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Şekil 3.6'da; reaktif pudra betonu ve normal dayanımlı (A,B,C eğrileri) betonların granülometri eğrileri görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, RPB'nin granülometri eğrisi süreksizdir (Walraven, 1999).



Şekil 3.6 Reaktif pudra betonunun ve normal betonun granülometri eğrileri

Yapılan çalışmalar sonucunda, reaktif pudra betonunda kullanılan agregaların birbirine teğet tane çapları oranı 7 olduğunda, maksimum bağıl yoğunluğa erişildiği tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Reaktif pudra betonunun teorik olarak maksimum yoğunluğu

Reaktif pudra betonlarının üretiminde iyi nitelikli, temiz, sert ve sağlam agregaların seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Yaklaşık olarak 40 MPa'lık bir basınç dayanımına kadar agreganın yüksek dayanımlı olması birinci derece öneme sahip değildir. Betonda kırılma esnasında çatlak oluşumu önce agrega-matris temas yüzeyinde başlar, sonra matris çatlar ve yayılma matriste gelişir. Yüksek dayanımlı betonda ise kırılma süreci çatlakların agrega içinden geçmesiyle olur. Diğer bir deyişle, normal betondaki gibi çatlak, temas yüzeyinde başlayıp agrega etrafında tur atarak yayılmaz, doğrudan agreganın içinden geçer. Dolayısıyla dayanımı yüksek agrega kullanılmasıyla daha yüksek dayanıma sahip betonlar elde edilebilir (Mindess, 1986).

Agrega içeriği açısından kuvars agregasının tercih edilmesinin asıl sebebi çok sert bir madde olması, mükemmel hamur/agrega ara yüzeyi, hazır bulunabilmesi ve ucuz fiyatı ve ASR açısından aktif silis içermemesidir. Büyük çimento taneleri (80 – 100 μm) ile girişimi sağlamak için maksimum 600 μm , minimum 200 μm tane boyutlu agregalar kullanılmaktadır (Richard ve Cheyrezy, 1995).

3.4.4 Mineral Katkıların Etkisi

Betonda mineral katkı kullanımı, taze ve sertleşmiş haldeki betonun özelliklerini geliştirmekte ve ekonomik açıdan fayda sağlamaktadır. Reaktif pudra betonu içerisinde toz halde beton katkı malzemesi kullanımı; yoğunluk, dayanıklılık ve en önemlisi kıvamı arttırmak için kullanılır.

Reaktif pudra betonlarında yüksek miktarlarda bağlayıcı kullanılması, mineral katkıların beton özelliklerine etkilerinin tespit edilmesinin önemini arttırmaktadır. Beton üretiminde kullanılan mineral katkıların çeşitli özelliklere sahip olmaları, katkı türünün seçimini önemli hale getirmektedir. Örneğin, doğal puzolanların ve uçucu külün reaksiyonları, çimento hidrasyonundan daha yavaş oldukları için, bu katkıların kullanımı erken yaşlardaki dayanım kazanma hızını azaltmakta ve gerekli olan kür süresini uzatmaktadır. Silis dumanı ise, yüksek inceliğinden dolayı hızlı reaksiyona girmekte ancak hem su ihtiyacını arttırabilmekte hem de maliyeti yükseltmektedir.

Mineral katkıları; aktif silikon dioksit içermektedir. Böylece, betonun sertleşme süreci boyunca, beton içinde hidrate olmuş çimento tanelerinin oranını, işlenebilirlik süresini ve durabiliteyi de arttırabilmektedir. Özellikle su, klor ve zararlı gaz geçirimsizliğini, donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığı arttırmaktadır (Yıldırım, 2002).

Mineral katkıların getirebileceği bazı olumsuz etkilerin, katkıların yanında bir başka çeşit mineral katkı kullanılarak telafi edilmesi mümkündür. Örneğin; uçucu külün yavaş gelişen reaksiyonları sonucu erken yaşlardaki dayanım kaybı, hızlı reaksiyon gösteren silis dumanının da aynı betonda kullanılmasıyla giderilebilir. Silis dumanının yol açtığı su ihtiyacındaki artma da uçucu külün küresel şekilli taneleri ile azaltılabilir (Mehta, 1982).

Diğer bir deyişle, betonda çimentoya ek olarak iki tip katkı kullanımı, yani üçlü bağlayıcı içeren sistemler kullanımı, betonda sinerjik etki oluşturmaktadır. Üçlü

bağlayıcı kullanımı, ikili veya tek bağlayıcı kullanımına göre basınç dayanımını, boşluk dağılımını (Mehta, 1982), çekme dayanımını (Shannag, 2000), klor geçirgenliğini, alkali – silika reaksiyonlarına direncini (Özyıldırım, 1994), sülfat ve asitlere karşı olan direncini geliştirmektedir.

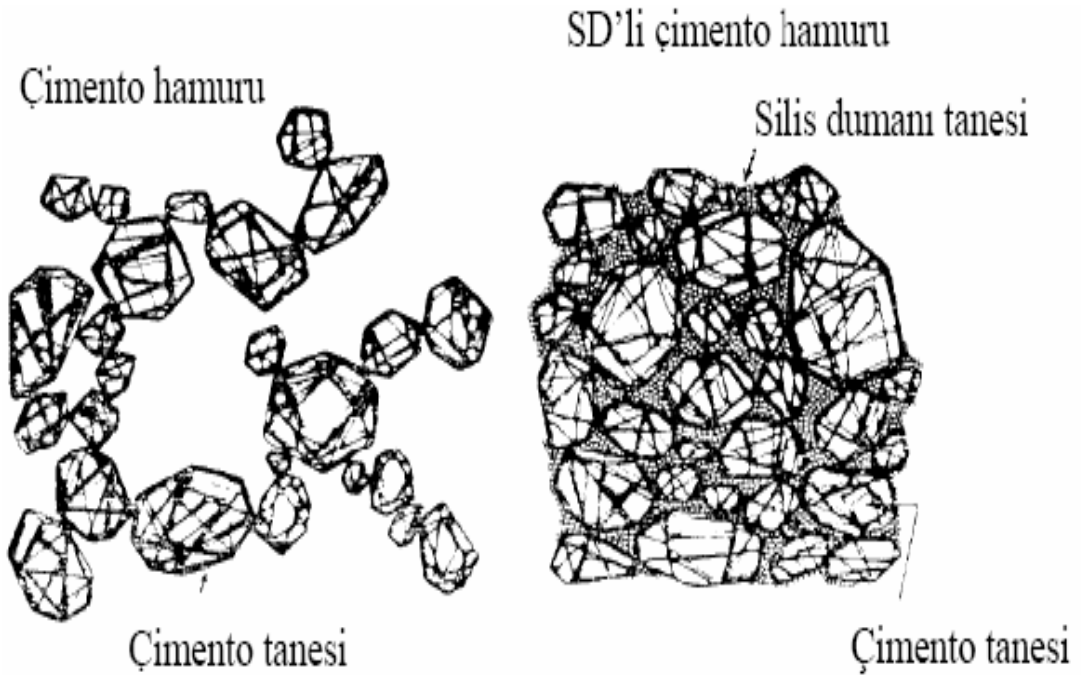
3.4.4.1 Silis Dumanı

Çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi, betonda en zayıf halkadır. Silis dumanı gibi ultra incelikte tanelerin kullanımı ile yoğunluğun artması sonucu, boşluklar azaltılır, bu yüzden taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için oldukça önemlidir. Böylece durabilite iyileşir ve dayanım artar.

Silis dumanı veya diğer adıyla mikro silika, silis ve ferro silis endüstrilerinin bir yan ürünüdür. 1950'lerden bu yana, betonun özelliklerinin iyileştirilmesi için beton üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tanelerin etkili olabilmesi için beton içerisinde iyi bir dağılım oluşturması gerekmektedir. Bu dağılımı da bir süper akışkanlaştırıcı ile sağlamak olasıdır (Taşdemir, ve diğer., 2005).

RPB üretiminde kullanılan silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek boşlukları doldururlar ve çimentonun birincil hidratasyonundan oluşan Ca(OH)_2 ile puzolanik reaksiyona girerek C – S – H (Kalsiyum Silikat Hidrate) oluştururlar. Malzeme daha yoğun ve dolayısıyla daha mukavemetli bir hale dönüşür. Böylece mikro yapıda puzolanik malzemenin ikincil hidratasyonu ile matris iskeleti biraz daha güçlenecektir (Taşdemir ve diğer., 2005).

Puzolanik etkisi ile çimento hamurunda daha yoğun bir yapı meydana getiren silis dumanı betonların en zayıf fazı olan çimento hamuru-agrega ara yüzeyindeki boşlukları doldurmakta ve hamur ile agrega taneleri arasındaki aderansı arttırmaktadır (Taşdemir ve Bayramov, 2002). Bu olay şematik olarak Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Silis dumanının boşluklar üzerindeki etkisi

Yüksek inceliğe sahip silis dumanı içeren çimento hamurunun da silis dumanı çok etkindir ve sıkı bir diziliş sağlar. Portland çimentosunun çok ince silis dumanı ile birleşmesi sonucu, mikro silika içeren yüksek dayanımlı betonlarda mükemmel bir diziliş elde edilir. Mikro silika taneleri, çimento taneleri arasında dolgu etkisi yaratarak daha yoğun bir iç düzenin oluşmasını sağlamaktadırlar (Hijorth, 1983).

Aşağıda verilen yüzey alanlarının büyüklükleri, taneciklerin inceliği konusunda daha detaylı bir fikir verebilir.

- Portland çimentosu : 300 – 400 m²/kg
- Silis dumanı : 20000 m²/kg
- Uçucu kül : 400-700 m²/kg

Silis dumanı içeren betonların özellikleri göz önüne alarak silis dumanını iki şekilde kullanıldığını akılda tutmak gerekir:

1. Durabilitenin geliştirilmesi ve hidrasyon hızının azalması gibi nedenlerle çimento miktarında bir miktar azaltma yaparak çimento ile yer değiştiren bir malzeme olarak kullanılması.

2. Hem taze hem de sertleşmiş haldeki beton özelliklerini geliştirmek için bir mineral katkı olarak kullanılmasıdır (Telford, 1988).

Silis dumanı yüksek performanslı beton ve harçların önemli bir bileşeni olup işlenebilirliği artırır. Kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek, çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı da artırır ve bunun sonucunda, betonun dayanımı ve durabilitesi artar. Ancak silis dumanının beton üretiminde tercih sebebini etkileyen en önemli problem, fiyatının yüksek olmasıdır. Fiyatı çimento fiyatının yaklaşık beş katıdır ve temin edilmesi oldukça güçtür. Diğer taraftan bazı stratejik yapılarda kullanılacak yüksek performanslı beton ve harçların, henüz uzun süreli performansları tam olarak belirlenememiştir (Massaza, 2000; Goldman ve Bentur, 1992).

3.4.5 Süperakışkanlaştırıcı Katkılarının Etkisi

Gelişen beton teknolojisi sayesinde betonun mekanik özellikleri de her geçen gün iyileşmektedir. Bu iyileşmedeki en önemli faktörlerden birisi de betonda kullanılan kimyasal katkılardır. Kimyasal katkıları, taze veya sertleşmiş beton veya harç özelliklerini değiştiren, betonun nihai özelliklerine zararlı etki oluşturmayan malzemelerdir (Uyan ve Yıldırım, 1991). Betondan istenilen özelliklere göre tasarlanmış birçok katkı tipi mevcuttur. Bunları en bilinen şekilleriyle; hava sürükleyici katkıları, su azaltıcı katkıları, akışkanlaştırıcı katkıları, priz hızlandırıcı katkıları, priz geciktirici katkıları, geçirimsizlik katkıları vb. olarak sınıflandırabiliriz.

Katkılar her ne kadar betonun özelliklerini iyileştirse de betonda kullanım oranları belirli bir limite kadardır. Belirlenen limit aşıldığında betonda çeşitli problemler ortaya çıkar. Örneğin çok uzun süre sonunda dahi priz almama gibi. Genellikle betonlarda izin verilen katkı üst limiti, katkı/bağlayıcı oranının % 5' i aşmamasıdır (Özyurt, 2000).

Özellikle yüksek dayanımlı betonlarda, iri agrega yerine konulacak olan ince agregaların ve mikro yapının güçlendirilmesi adına ilave edilecek mikro silis gibi ince malzemelerin özgül yüzeylerinin fazlalığı sebebiyle su ihtiyacı artmaktadır. Bu tür betonlarda su/çimento oranı çok düşük olduğundan (% 15 civarı), işlenebilme problemlerini ortadan kaldırmak için süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri sayesinde, karışım suyu büyük oranda azaltılarak dayanım ve dayanıklılığı yüksek betonlar üretilmektedir (Uyan ve Yıldırım, 1991). Normal akışkanlaştırıcılar ve süperakışkanlaştırıcılardan sonra yeni kuşak katkılar olan hiperakışkanlaştırıcı katkılar sayesinde katkısız betona oranla % 60 oranına varan su azalma sağlanabilmektedir.

Süperakışkanlaştırıcı katkılar, karışım içerisindeki suyun yüzey gerilmesini düşürerek matris içerisinde partiküller ile suyun homojen şekilde temasını ve daha fazla sayıda çimento tanelerinin ıslatılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, çimento tanelerinin yüzeylerine yapışarak, meydana getirdikleri elektrostatik etki ile çimento tanelerinin bir araya gelip, folükül yapı oluşturmasını önlemektedir. Birbirinden uzaklaşan çimento taneleri daha fazla ıslanma alanı kazanıp daha süratli bir şekilde hidratasyona uğrarlar. Ayrıca karışıma sağladıkları akışkan kıvam sayesinde kalıba yerleştirilmesinde kolaylık sağlar (Feylessoufi ve diğer., 2000).

Akışkanlaştırıcı katkıların etki mekanizması katkının çimento taneleri tarafından adsorbe edilmesi ile başlar. Adsorbe edilen katkı çimento yüzeyini kuşatır ve (-) yükü yüklenen çimento taneleri birbirlerini itmeye başlarlar. Bu şekilde tanelerin birbiri ile topaklanması önlenirken, tanelerin birbiri üzerinde kaymaları kolaylaşır (Uyan ve Yıldırım, 1991). Süperakışkanlaştırıcı katkının dağılma etkisi ile katkı maddesinin molekülleri, çimento partikülleri tarafından çekilir ve karıştırma esnasında çimento etrafına yapışır. Bu oluşum, çimento partiküllerinin yüzeydeki negatif yüklerini artırır ve elektrostatik itmeye neden olur. Bunun sonucunda, çimento tanelerinin çok miktarda dağılımı sağlanmış olur. Bu durum, su içeriğinin azlığına rağmen betonun işlenebilirliğinin önemli ölçüde artmasını sağlar (Duyar, 2006).

3.4.6 Çelik Lif Etkisi

Betonda lif kullanımı, 1898 yılında Hatschek işleminin bulunmasından sonra, asbest liflerinin çimento hamuru ile birlikte kullanılmasıyla yaygınlaşmaya başlamıştır. Daha sonraları asbest liflerinin insan sağlığına zararlı olduğunun ortaya çıkmasıyla birlikte, 1960'lı ve 1970'li yıllarda alternatif lif çeşitleri piyasaya sürülmüştür. 1960'ların ilk yıllarında, Amerika'da çelik liflerin betonda donatı malzemesi olarak kullanımına başlanmıştır (ACI Committee, 1997).

20. yüzyılın sonlarına doğru, lifli betonlar üzerinde birçok çalışma yapılmış ve bu konuda önemli bir mesafe kat edilmiştir. İlk çalışmalar 1963 yıllarında gerçekleşmiş ve betonda cam lifi kullanılarak yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalarda ise farklı lif tiplerinin ve etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda; şekil 3.9'da görüldüğü üzere, beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağınık olarak bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımlarını arttırdığı görülmüştür (Köksal ve diğer., 2003; Shah ve Ranga, 1971).

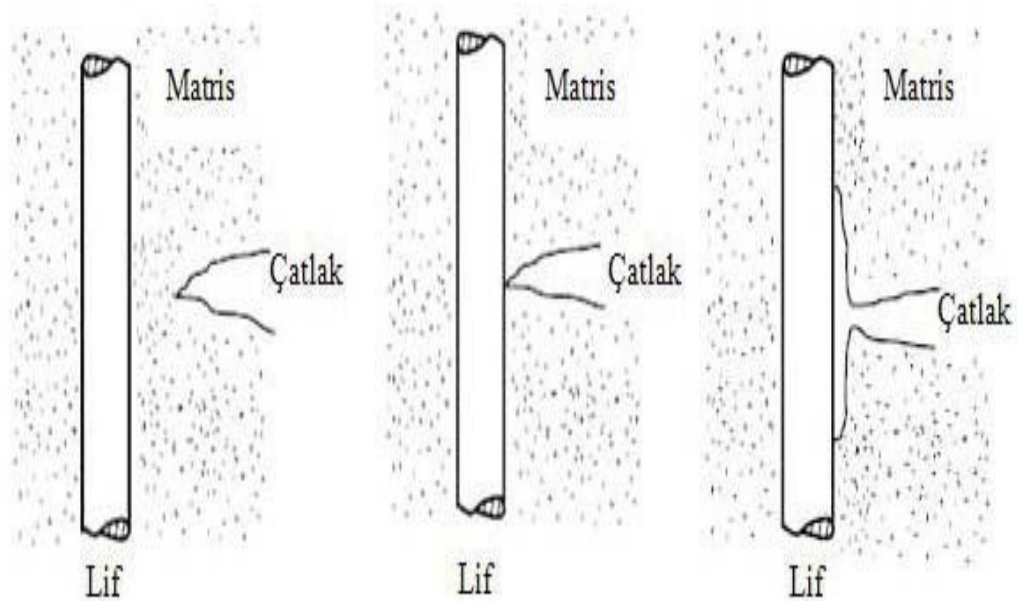


Şekil 3.9 Çelik liflerin betonda süreksiz dağılımı

Çelik tellerin betonlar üzerinde yaptığı olumlu etkileri belirleyen en önemli faktörler ise; telin narinliği (tel boyu/tel çapı), kullanılan telin miktarı, telin matristen sıyrılma dayanımı, telin hamur içerisinde yönlendiği ve telin kopma dayanımıdır (Köksal ve diğer., 2003; Shah ve Rangan, 1971).

Çelik lif takviyesinin beton üzerindeki olumlu etkileri sıralanmıştır;

- ✓ Yüksek elastik mukavemet ve çekme gerilme mukavemeti
- ✓ Çatlamaya karşı yüksek dayanım ve çatlakları kontrol altına almak
- ✓ Rijitliği arttırmak,
- ✓ Çok yüksek enerji yutma kapasitesi,
- ✓ Sünmeyi arttırmak,
- ✓ Yorulma ve kesme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım,
- ✓ Eğilme momenti kapasitesini arttırmak,
- ✓ Yüksek plastik deformasyon derecelerinde yük taşıyabilme kapasitesi,
- ✓ Elemanın yapısal bütünlüğünü koruyarak normal betonarme ile yapılmış kirişteki kırılma yüklerini aşmasını sağlamak,
- ✓ Lineer ve elastik davranış gösteren RPB matrislerinin düktilitesini arttırmak amacıyla mutlaka lifler kullanılmalıdır. 13 mm uzunluğunda ve 0,15 mm çapında düz çelik lifleri karışıma hacimce %1,5–3 oranlarında katılması yeterli olmaktadır (Richard ve Cheyrezy, 1995).



Şekil 3.10 Liflerin betonda gerilme aktarımı

Matristeki çatlaklar mikro düzeyde başlar. Büyük boyutlu lifler arasındaki mesafe fazla olduğu için bu lifler mikro çatlaklar için etkili olamaz. Büyük boyutlu lifler ancak çatlaklar gelişip makro düzeye geldiği zaman etkili olur. Buna rağmen; mikro lifler, çatlaklar mikro düzeyde iken arada köprü görevi görerek çatlakları durdurur.

Mikro lifler matrisin neredeyse her bölgesine dağılabilecek kadar küçük oldukları için, makro liflerin bulunmadığı ara bölgelerdeki küçük çatlakların başlamasını ve gelişimini kontrol edebilir. Mikro lifler mikro çatlakları kritik çatlak haline gelmeden durdururlar (Mobasher ve Yu, 1996). Şekil 3.9'da, mikro ve makro düzeydeki liflerin yine mikro ve makro düzeydeki çatlaklar arasında köprü oluşturması gösterilmektedir.

Mikro lifler;

- a) Boyutları nedeniyle matris içinde daha sık bir lif dağılımı oluşturur,
- b) Elastik bölgedeki davranışı iyileştirir,
- c) Çatlakları makro düzeye gelmeden durdurur.

Makro lifler;

- a) Maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirir,
- b) Elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını artırır,
- c) Makro düzeydeki çatlakları kontrol eder.

Çelik lif takviyesinin beton üzerindeki olumsuz etkisi ise işlenebilirlik üzerinedir. Günümüze değin yapılan çalışmalarda, betona lif ilave edilmesiyle birlikte işlenebilirlikte önemli azalmalar belirlenmiştir.

Lifli betonun işlenebilirliğini etkileyen parametreler şunlardır:

- ❖ Lif hacmi ve tipi,
- ❖ S/Ç oranı,
- ❖ Lif görünüm oranı,
- ❖ Tane dağılımı,
- ❖ Maksimum tane çapı,
- ❖ Hava miktarı,

İşlenebilirliği azaltan en önemli üç faktör ise;

- ❖ Karışımdaki lif hacmi,
- ❖ Lif görünüm oranı (uzunluk/çap),
- ❖ Lif tipi'dir.

Yapılan çalışmalar neticesinde, şu sonuçlara varılmıştır:

- Lif hacminin artmasıyla işlenebilirlik güçleşmektedir.
- Lif görünüm oranının artmasıyla işlenebilirlikte azalma görülmüştür.
- Lif tipine göre işlenebilirlik su sırayla azalmaktadır: Kıvrımlı, düz, çift kenarlı, çengelli.

3.4.6.1 Lif Tipinin Etkisi

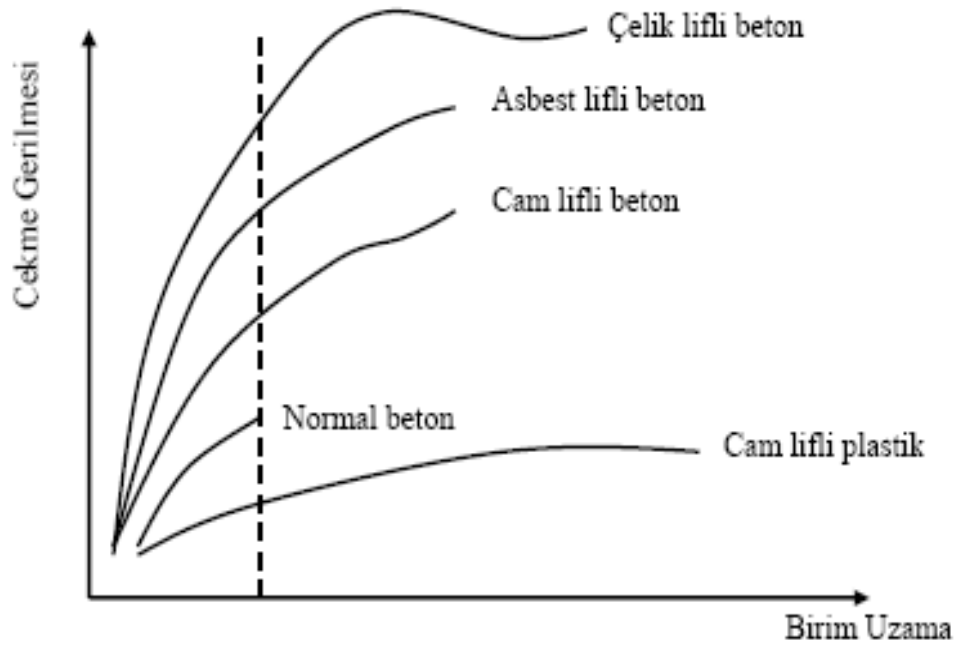
Farklı özellikleri ve kullanım alanları olan birçok lif çeşidi vardır. Bunlar en genel şekliyle ve bazı mekanik özellikleriyle birlikte Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Lif tipleri ve mekanik özellikleri

Lif tipi	Çap (μm)	Özgül ağırlık (gr/cm^3)	Elastisite modülü (kN/mm^2)	Çekme dayanımı (kN/mm^2)	Kopma uzama oranı (%)
Çelik	5 – 500	7.84	200	0.5 – 2	0.5 – 3.5
Cam	9 – 15	2.60	70 – 80	2 – 4	2 – 3.5
Polipropilen	20 – 200	0.90	5 – 77	0.5 – 0.75	8
Naylon	-	1.10	4	0.9	13 – 15
Karbon	9	1.90	230	2.6	1
Krokidolit	0.02 – 0.4	3.40	196	3.5	2 – 3
Krositol	0.02 – 0.4	2.60	164	3.1	2 – 3
Selüloz	-	1.20	10	0.3 – 0.5	-
Ahşap lif	-	1.50	71	0.9	-
Akrilik	18	1.18	14 – 19.5	0.4 – 1	3
Çimento matrisi	-	2.50	10 – 45	3.7×10^{-3}	0.02

Lifli beton üretim aşamasında; cam, çelik, asbest, karbon, plastik, gibi birçok çeşit malzeme lif olarak kullanılabilir. Donatı malzemesi olarak kullanılan bu lifler, birçok farklı tip ve boyutlarda üretilmektedirler. Kullanılacak lif malzemesini belirleyici ana kriter; lifin tipi, çapı ve lifin boy/çap oranı olarak adlandırılan görünüm oranıdır (Bentur ve Mindness, 1990).

Daha önce yapılan çalışmalarda, bu lif türleriyle üretilen betonların çekme gerilmesi – birim uzaması belirlenmiştir ve şekil 3.11’deki grafikte gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere en yüksek performans çelik lifli betondadır.

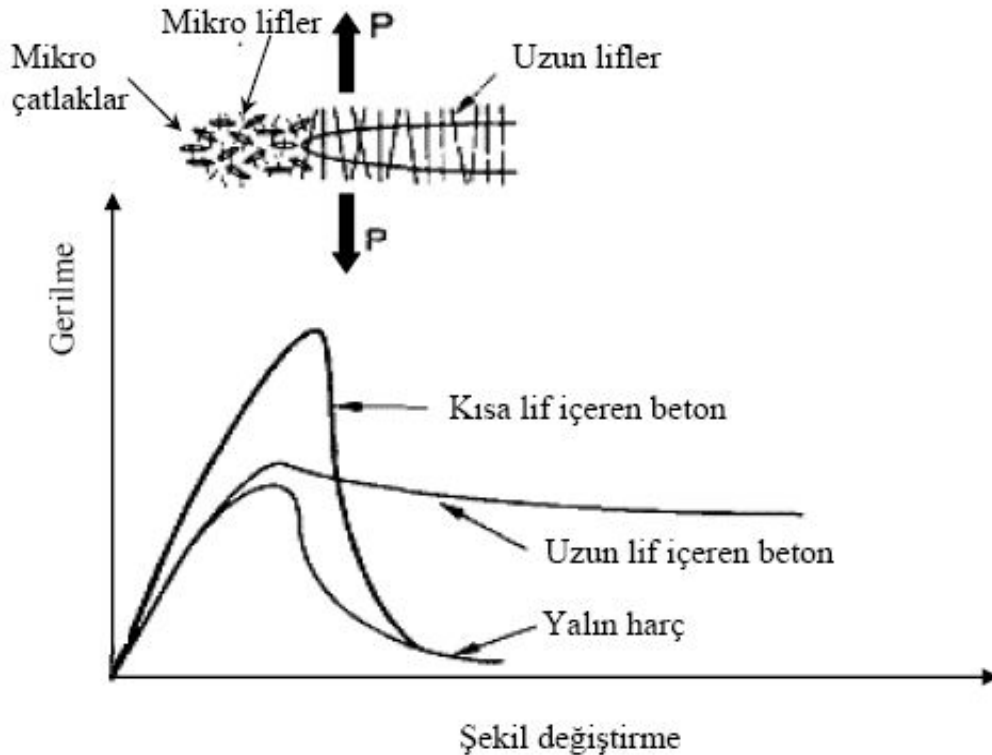


Şekil 3.11 Farklı lif türleriyle üretilmiş betonların çekme gerilmesi – birim uzama grafiği

Betonun performansına etki eden sadece lif türü değildir, aynı zamanda betona ilave edilen liflerin görünüm oranları ve miktarları da betonun performansını etkilemektedir. Teorik olarak liflerin görünüm oranı ve miktarı ne kadar büyükse, betonun darbe etkilerine karşı dayanıklılığı, tokluğu ve düktilitesi gibi teknik özellikleri de o derece büyüktür. Ancak lif görünüm oranı ve miktarının yüksek olması, karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma aşamalarında zorluk çıkarmaktadır. Bu

yüzden çelik lifli betonlarda kullanılabilen lif miktarının sınır değerleri standartlarda belirtilmiştir (Düzgün, 2001).

Lifli betonların istenilen performansı gösterebilmesi için, liflerin matris içerisinde homojen dağılım göstermesi gerekmektedir. Bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için, boy / çap oranının en az 10 olması ($l/d > 10$), lifin en büyük genişliğinin 0.25 mm'den ve en büyük kesit alanının da 0.05 mm²'den daha küçük olması gibi sınırlamalar getirilmektedir. Lifi tanımlayan en uygun sayısal parametre lifin narinlik oranıdır. Lif boyunun, eşdeğer lif çapına bölünmesiyle bulunan bu oran, boyları 0.60 ile 7.62 cm arasında olan lifler için 30 ile 150 arasında değişmektedir (Ersoy, 2001).



Şekil 3.12 Farklı lif tiplerinin çatlak köprülenmesine etkisi (Betterman, Shah ve Ouyang, 1995)

Şekil 3.12'dekine benzer biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler (kısa kesilmiş çelik teller) harç fazını ve uzun çelik teller ise betonu güçlendirmektedir.

Bundan dolayı betonda kırılma enerjisinin artırılmasında uzun çelik tellerin narinliğinin de önemli katkısı vardır (Taşdemir ve diğer., 2005).

3.4.6.2 Çelik Lif Miktarı

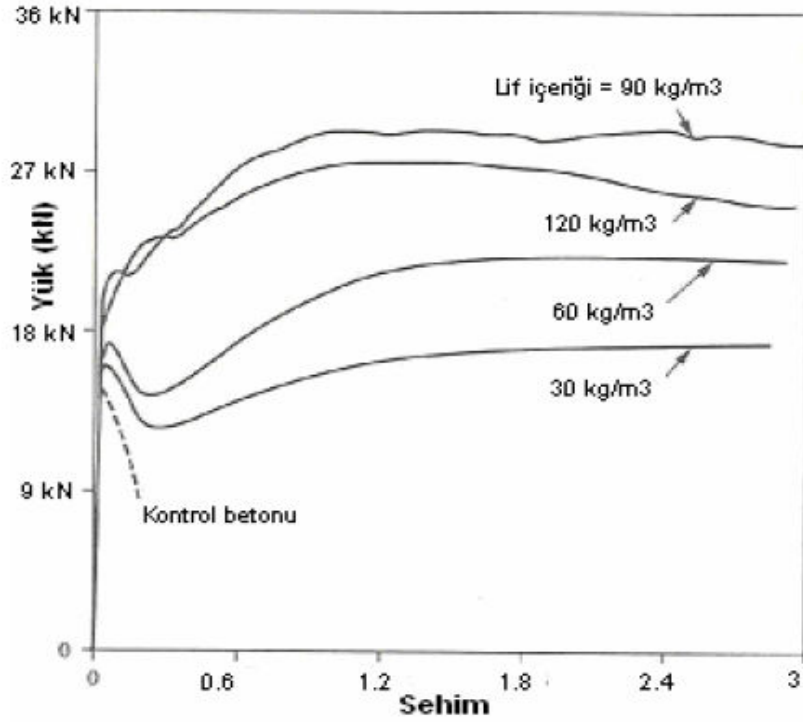
Üretimde kullanılan lif içeriği optimum seviyede tutulmalıdır. Lif içeriğinin yüksek olması durumunda karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma problemleri ortaya çıkar. Karışım içinde dağılamayan lif topaklanır ve bu topaklanmalar matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olur. Karışımında iri taneli agrega kullanılmaması, liflerin karışıma kuru katılması ve süperakışkanlaştırıcı kullanılması ile liflerin matris içerisinde homojen dağılması sağlanabilir (Özyurt, 2000).

Dugat, Roux ve Bernier; yaptıkları çalışmada, farklı lif içeriklerinin kırılma enerjisine olan etkilerini araştırmak üzere, lif boyutları $D = 0,15$ mm, $L = 13$ mm, lif içeriği % 0, % 2, % 2,5 ve % 4 olan karışımların kırılma enerjilerini karşılaştırmışlar ve optimum lif içeriğinin % 2 ~ % 3 arasında olduğunu saptamışlardır. Çalışma sonucunda yüksek oranlarda kullanılan lifin kırılma enerjisini düşürdüğü ortaya çıkmıştır. (Dugat, Roux ve Bernier, 1996)

Özyurt, deneysel çalışmalarında lif içeriği % 1,5, % 3, % 4,5 olan karışımlarda $D = 0,15$ ve $L = 6$ mm olan lifler kullanmış ve lif oranının % 3'ü geçmesi durumunda kırılma enerjisinin arttığını fakat artış hızının azaldığını gözlemlemiştir. Bu çalışmada, % 1,5 oranında çelik tel içeren numunelerin basınç dayanımlarının, lif içermeyen numunelere göre daha düşük olduğunu gözlemlemiştir. Bu durumun sebebi, az miktarda kullanılan liflerin betonda kusur etkisi yaratarak dayanımı düşürmesi olarak bilinmektedir. Ortaya çıkan deney sonuçlarına göre, çelik lif miktarının artmasının basınç dayanımını ve elastisite modülünü fazla etkilemediği gözlemlenmiştir (Özyurt, 2000).

Silis dumanı içeren kompozit malzemeler hariç lif oranının % 2'den az olması eğilme dayanımını fazla arttırmaz. Fakat her durumda eğilme dayanımındaki artış

basınç dayanımı ve yarma – çekme dayanımı artışından daha fazladır (Balaguru ve Shah, 1992).



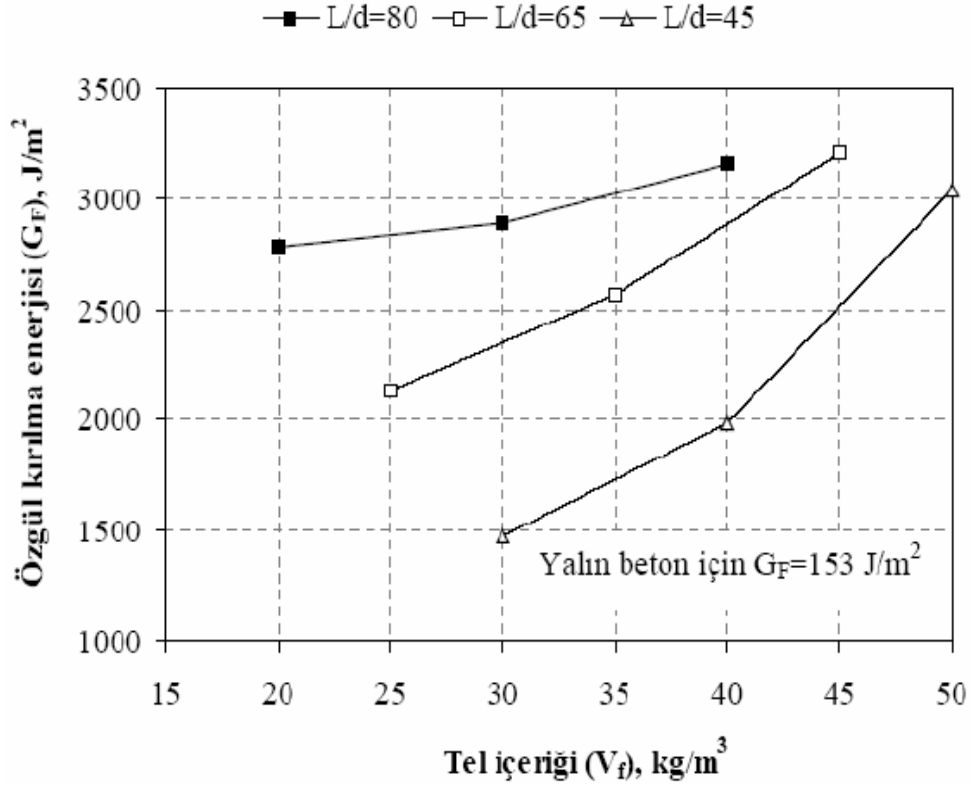
Şekil 3.13 Lif miktarının etkisi

Şekil 3.13'de, lif miktarının artmasıyla enerji yutma kapasiteleri arasındaki değişimler gösterilmektedir. Lif kullanılmayan kontrol betonu ile 30 kg/m³ lif kullanılan kompozit malzemenin enerji yutma kapasiteleri arasındaki fark çok fazladır. Lif hacmi oranı 30 kg/m³ ve 60 kg/m³ olan kompozitlerde, ilk çatlaktan sonra maksimum eğilme gerilmesinde düşüş görülmektedir. Bu durumun, lif miktarının artması ile azaldığı görülmektedir. Ancak, lif içeriğinin 90 kg/m³ ve 120 kg/m³ olduğu durumlarda ilk çatlak sonrasında da yük artışı devam eder ve bu durum malzemenin eğilme dayanımını artırır (Balaguru ve Shah, 1992).

3.4.6.3 Çelik Lif Narinliği

Düz liflerin performansının belirlenmesinde narinliğinin etkisi çok önemlidir. Beton iyi karıştırıldığı takdirde narinlik arttıkça süneklik artar. Narinlik, deforme

olmuş liflerde, düz liflere kıyasla daha az olmakla birlikte, kompozit malzemenin sünekliğini olumlu yönde etkiler (Balaguru ve Shah, 1992).



Şekil 3.14 Farklı narinlikte liflere sahip betonların kırılma enerjisi değişimleri

Şekil 3.14'ten de anlaşılacağı üzere, lif narinliği ve lif miktarındaki artış, özgül kırılma enerjisinde de artışa sebep olur. Bu durum; kırılma esnasında liflerin betondan sıyrılmaması, çok sayıda lifin ise çatlak köprülenmesinde aktif rol oynaması ile açıklanır. Böylece kırılma çok sayıda çatlak oluşuktan sonra gerçekleşir. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi lif narinliği ve lif miktarı istenilen performansa göre seçilebilir (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Bayramov, Aydemir, İlki ve Taşdemir'in 2004 yılında gerçekleştirdikleri bir çalışmaya göre; aynı lif hacmine sahip betonların lif narinliği arttıkça, eğilme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Lif hacminin, % 0'dan % 0,64'e çıkarılması $l/d = 55$ kullanılan betonlarda eğilme dayanımında % 33'lük bir artışa sebep olurken, $l/d = 65$ ve $l/d = 80$ kullanılan betonlarda eğilme dayanımlarında sırası ile % 56,5 ve %

100 oranlarında artış görülmüştür. Bu durum, matris çatladıktan sonra yüklerin lifler tarafından taşınması ile açıklanabilir. Lif narinliği bağ kuvvetini, dolayısıyla eğilme dayanımını büyük ölçüde etkiler. Yarma – çekme testi sonrasında $l/d = 65$ kullanılan betonlarda liflerin sıyrıldığı, $l/d = 80$ kullanılan betonlarda ise liflerin kırıldığı gözlemlenmiştir. Bu davranış $l/d = 65$ olan liflerin kesit alanlarının $l/d = 80$ olan liflere göre daha fazla olması, dolayısıyla daha az çekme gerilmesine maruz kalması ile açıklanmaktadır (Bayramov, Aydemir, İlki ve Taşdemir, 2004).

Kullanılan çelik tellerin maliyeti uygulama açısından önemli bir parametredir. Narinlik ve çelik lifin türü, maliyeti önemli ölçüde etkileyen faktörlerdir. Bu nedenle, karışımın maliyetini minimum seviyeye indirmek için, karışımda kullanılan çelik lif hacminin azaltılması fakat aynı zamanda yeterli sünekliğin sağlanması gerekir.

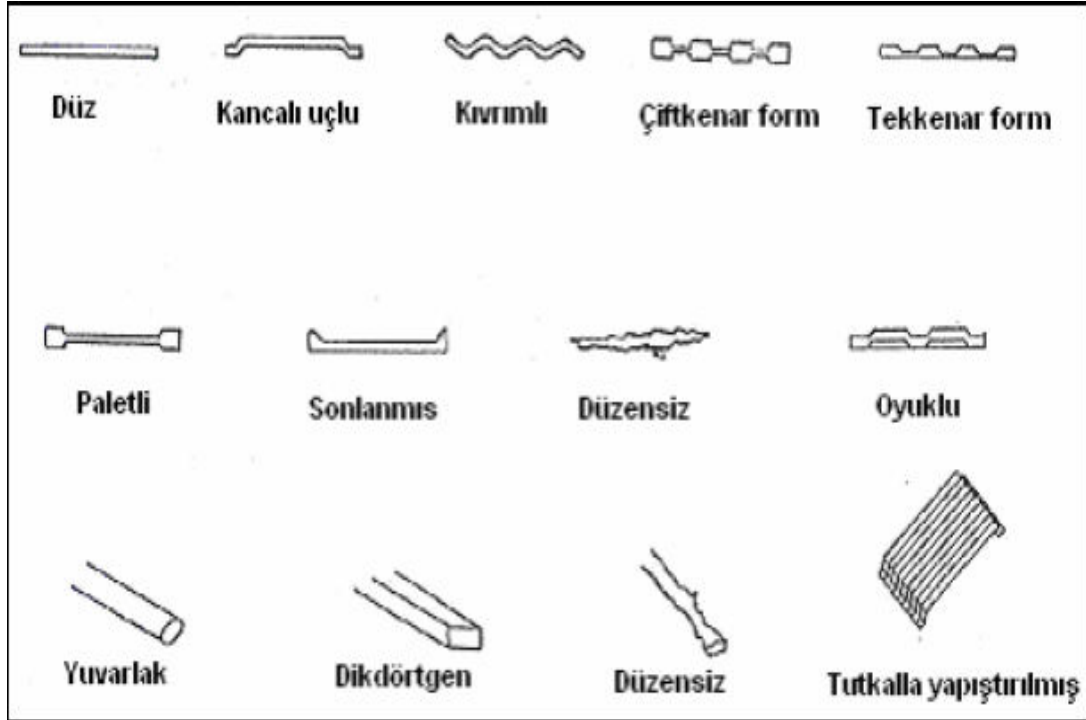
Bayramov'un 2004 tarihli çalışmasında bu ilke göz önünde bulundurulmuştur ve minimum maliyetli ve yeterli sünekliğe sahip beton üretimi için, lif narinliği ve hacmi belirlenmiştir. Sayısal optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada, minimum maliyet ve maksimum sünekliği veren optimum tel içeriği $46,1 \text{ kg/m}^3$, narinlik ise $75,87$ olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan lif narinlikleri sınırlı olduğu için, minimum maliyet, sünekliğin maksimum olacağı $l/d = 80$ için lif hacmi $44,3 \text{ kg/m}^3$ olduğunda, $l/d = 55$ ve $l/d = 65$ için ise lif hacimleri sırasıyla, $45,5 \text{ kg/m}^3$, $44,1 \text{ kg/m}^3$ olduğunda elde edilmiştir.

3.4.6.4 Çelik Lif Geometrisi

Çelik lif geometrisi betonun göçme sonrası davranışına etki eden en önemli parametredir. Çelik lif tipleri ve enkesitleri şekil 3.14'te verilmektedir.

Çelik lifler, TS 10513'de geometrik yapılarına göre üç sınıfa ayrılırlar.

- Düz, pürüzsüz yüzeyli teller
- Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller (üzerinde çentikler açılmış teller, kıvrımlı teller, ay biçimli dalgalı teller)
- Sonu kancalı teller (iki ucu kıvrılmış teller, bir ucu kıvrılmış teller)



Şekil 3.15 Çelik lif tipleri ve enkesitleri

Şekil 3.15'te çelik lif tiplerinin boykesit ve enkesit örnekleri gösterilmiştir. Çelik lifler boykesitlerine göre; düz, çengelli, kıvrımlı, çiftkenar form, tekkenar form, paletli, sonlanmış, oyuklu vb. gibi sınıflandırılabilir.

Çelik lifler enkesitlerine göre üç sınıfa ayrılırlar;

- Yuvarlak
- Dikdörtgen
- Düzensiz

Çelik liflerin en önemli özellikleri olan yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama davranışları sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur (Aslan ve Aydın, 1999).

Çelik liflerin çapları 0.25 – 1.00 mm arasında, boyları 12.7 – 63.5 mm arasında, görünüm oranları ise 20–100 arasında değişmektedir (ACI Committee, 1993).

TS 10513'e göre betonda kullanılacak çelik liflerin yüzeylerinin kir, pas ve yağdan arındırılmış olması, her bir lifin çekme dayanımının 310 N/mm²'den az olmaması ve 16 °C' lik bir ortamda 3.18 mm çaplı silindir çevresinde 90° kırılmadan kıvrılır olması istenmektedir. Bu özellikler çelik liflerin daha sünek ve daha yüksek mukavemetle davranabilmesine imkân sağlaması bakımından gereklidir (Akkaya, Peled ve Shah, 2000).

Naaman ve Najm'in 1991'de yaptıkları çalışmada, düz lif, çengelli lif, deforme olmuş lif olmak üzere 3 farklı tipteki çelik liflerin aderans – kayma mekanizmasını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, uçları çengelli lifler ve deforme olmuş lifler (yüzeysel işlem görmüş) düz liflere göre daha yüksek sıyrılma dayanımı göstermişlerdir. Yüksek kayma değerlerinde, deforme lifler sıyrılmaya karşı direnç gösterirken çengelli liflerin kanca uçlarında açılma görülmüştür. Bu durum çengelli liflerde sıyrılmanın daha kolay gerçekleşmesine neden olmuştur. Düz liflerde ise sıyrılma hızı çengelli liflere göre çok daha fazladır. Bu durum çengelli liflerin enerji yutma kapasitelerinin daha fazla olduğunu göstermektedir (Naaman ve Najm, 1991).

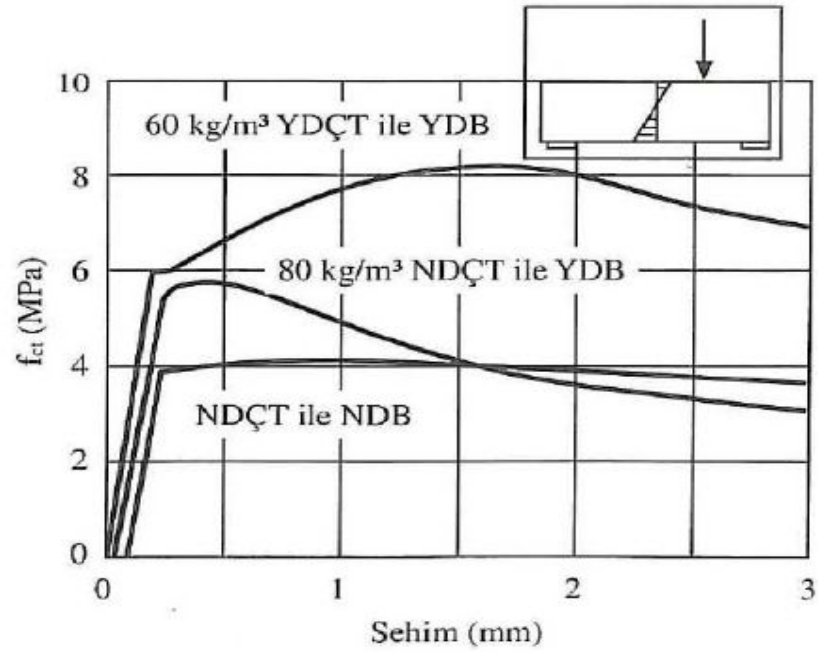
3.4.6.5 Çelik Lif Dayanımının Etkisi

Yüksek dayanımlı betonun mekanik davranışına çelik lif dayanımının etkisini belirlemek için yapılan çalışmada;

- i) 60 kg/m³ yüksek dayanımlı çelik lif (lif kopma dayanımı 2000 MPa) içeren yüksek dayanımlı betonun,
- ii) 80 kg/m³ normal dayanımlı çelik lif (çekme-kopma dayanımı 1200 MPa) içeren yüksek dayanımlı betonun,
- iii) Normal dayanımlı çelik lif (çekme-kopma dayanımı 1200 MPa) içeren normal dayanımlı betonun mekanik davranışı incelenmiştir.

Şekil 3.16'da görüldüğü üzere, kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı bakımından en iyi sonucu, yüksek dayanımlı betonda yüksek dayanımlı çelik lif kullanılan örnekler vermiştir. (Taşdemir ve diğer. 2005). Bu durum, lif ile matrisin aderansının yüksek

olması sonucunda, çelik liflerin kapasitelerine ulaşarak yüksek performans elde edilmesi ile açıklanabilir. Lif hacminin fazla olmasına rağmen, yüksek dayanımlı betonda, normal dayanımlı çelik lif kullanılması neticesinde, maksimum yük sonrası davranış istenilen performans seviyesinin altında kalmaktadır. Bu durum, yüksek dayanımlı betonda aderansın kuvvetli olması ve çelik lifin dayanımının yetersiz kalması ile betondan koparak ayrılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.16 Farklı dayanıma sahip çelik liflerle üretilmiş betonların yük – sehim eğrileri

BÖLÜM DÖRT

KÜR TEKNİKLERİ

4.1. Kürün Genel Tanımı

Beton üretiminin en önemli aşamalarından birisi de betonun kür edilmesi sürecidir. Kür; betonun mukavemet kazanması için çimento hidratasyonunu ilerletmek amacıyla kullanılan yöntem ve yapılan uygulamalara verilen isimdir. Teknik olarak bu olay, taze çimento hamuru üzerindeki su ile dolu boşlukların, çimento hidratasyonu sonucu meydana gelen ürünler ile en yüksek düzeyde doldurulmasıdır.

Çağımız teknolojisiyle betonarme elemanlar, zaman ve işçilikten tasarruf etmek amacı ile prefabrikasyon adı verilen üretim yöntemiyle fabrikalarda seri olarak üretilmektedir. Yapılan bu üretim, betonun kısa zamanda kür edilmesi ilkesine dayanır. Uygulanan değişik kür yöntemleriyle betona nihai dayanımının bütününe yakın bir kısmı çok kısa bir sürede kazandırılır (Uğurlu, 1994).

Bu sayede prefabrikasyonda;

- Üretilen betonun kalite kontrolünün daha kısa sürede yapılmasına imkân sağlanmaktadır.
- Kalıpların olabildiğince kısa sürelerde, yeniden üretime girebilecek şekilde boşaltılabilmesi ve bunun sonucu olarak da belirli üretim kapasitesi için daha az kalıp kullanma olanağı sağlayarak ekonomi sağlanmaktadır.
- Ön gerilmeli betonlarda ön gerilmenin daha çabuk uygulanması sağlanmaktadır.
- Üretilen yapı elemanlarını kısa sürede kullanıma hazır duruma getirip sevk etmek ve böylece stok alanları ayırma gereğinden kurtulmak; depolarda bekleme süresini kısaltarak daha küçük depolama alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Prefabrike yapı elemanlarının üretiminde kullanılan betonun, normal koşullarda erken yaşlardaki dayanım artış hızı prefabrikasyonun gerektirdiği hızın gerisinde kalır. Betonun erken yaşlardaki mukavemet gelişimini hızlandırmada kullanılan yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılanı, ısıtma işlemidir.

4.2 Isıtma İşlem Türleri

Prizini alan betonun, standart su kürünün dışında, farklı kür yöntemleriyle de daha kısa sürede dayanım kazanması sağlanabilir. Betonun kısa sürede dayanım kazanmasını sağlayan bu tür kürlere ısıtma işlemleri adı verilir.

1927'de Fransa'da Freyssinet 80°C – 100°C'lik ısıtma işlemleri elektrik direği ve büyük boru üretimine uygulamıştır. 1931 yılında ilk uygulamalarına İsveç'te başlanan elektrikli yöntemler kısa zamanda yayılmış ve kullanılmaya başlanmıştır. Isıtma işlem teknolojisinde kızıl ötesi ışınlar 1940 yılında, elektrik endüksiyon yöntemi 1948 yılında başlamıştır (Alabaş, 2002).

Günümüze kadar gelişerek ve çeşitlenerek gelen ısıtma işlemleri bugün kaldırım taşı üretiminden iki boyutlu pano, üç boyutlu hacim elemanı üretimine; küçük kiriş, kolon eleman üretiminden büyük kesitli kutu köprü elemanları üretimine kadar her dalda beton, betonarme ve öngerilmeli beton tüm yapı elemanlarda yaygın uygulama bulmaktadır (Öztek, 1980).

Isıtma işlemleri uygulama prensiplerine göre şu şekillerde sınıflandırılabilir;

1. Betonun yerleştirilmeden önce ısıtılması
 - a) Betonun oluşturan malzemelerin ısıtılması (Karma suyu, agrega)
 - b) Taze betonun ısıtılması (Karıştırıcı içinde, Taşıma sonunda özel kapta)
2. Betonun yerleştirilmesinden sonra ısıtılması
 - a) İç ısıtma (Elektrikle ısıtma, Mikrodalgalar vb.)
 - b) Dış ısıtma (Atmosfer basıncı altında buhar kürü, Basınçlı buhar kürü)

Yukarıdaki ısıtım türlerinde, basınçlı buhar kürü dışında kalan bütün ısıtım işlemler 100°C ' nin altında yapılmaktadır. Basınçlı buhar küründe ise, sıcaklık 140°C – 220°C aralığında istenen bir değere getirilebilir. Bu yöntemde elde edilen hidratasyon ürünleri, sıcaklığın 100°C' nin altında kaldığı ısıtım yöntemlerinden farklıdır.

Basınç altında buhar kürü uygulaması dışındaki yöntemlerin arasındaki teknolojik farklar, uygulama alanlarını ve ekonomik verimliliklerini etkiler, ancak ısıtım işlemlerinin çimento hidratasyon reaksiyonlarını ve beton özelliklerini etkilemede farklılık yaratmadığı için bu yöntemlerden "Isıtım İşlemi" terimi kullanılarak bahsedilmektedir (Uyan, 1982).

4.2.1 Betonun Yerleştirilmeden Önce Isıtılması

Kalıba konulmadan önce yapılan ısıtım işlemler genellikle betonu oluşturan malzemelerin ısıtılmasından ibarettir. İlk olarak ısıtım işlemi uygulanan malzeme sudur. Betona karıştırılacak suyun sıcaklık derecesi 50°C – 60°C arasında olmalıdır. Suyun 50°C lik bir sıcaklığa sahip olması betonun sıcaklığını 10°C artırabilir. Gerekirse agregada ısıtılabilir fakat çimentonun hiç bir şekilde ısıtılmamasına dikkat edilmelidir. Çünkü çimentonun ısıtılmasına hidratasyon ısısının da eklenmesiyle sıcaklık aniden büyük bir yükseliş gösterir ve bu durum da betonda çatlakların oluşmasına yol açar. Ayrıca taze betonun ısıtılması (Karıştırıcı içinde, taşıma sonunda özel kapta) uygulamada görülen yöntemlerdir (Postacıoğlu, 1986).

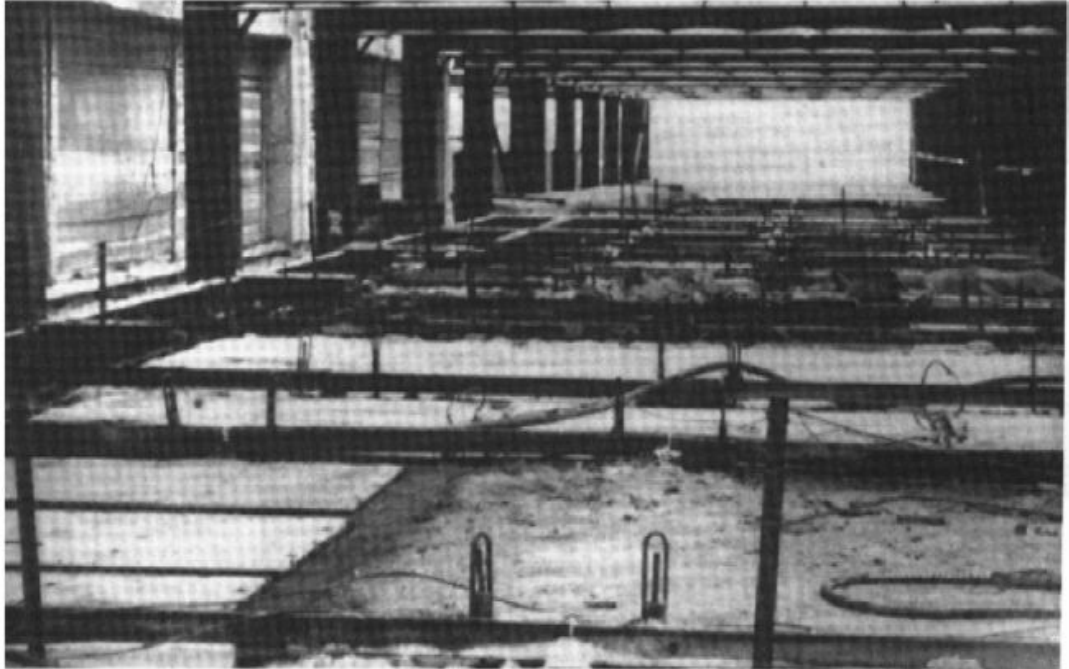
4.2.2 Betonun Yerleştirilmesinden Sonra Isıtılması

Daha öncede bahsedildiği gibi, bu yöntem; iç ısıtım ve dış ısıtım olarak ikiye ayrılır. İç ısıtım uygulamasında, en yaygın olarak kullanılan yöntemin elektrikle ısıtım yöntemi olduğu bilinmektedir. Dış ısıtım uygulamasında ise en yaygın olarak kullanılan yöntemler, basınçlı buhar kürü ve atmosfer basıncında buhar kürüdür.

4.2.2.1 İç Isıtma (Elektrikle Isıtma)

İç ısıtmada en yaygın olarak kullanılan yöntem elektrikle ısıtma yöntemidir. Bu yöntem, elektrik enerjisinin termal enerjiye dönüştürülmesi ile gerçekleşir. Bu şekilde ısıtma sonunda, soğuk havalarda 2,5 gün ile 4 gün arasında kalıbın alınması sağlanır.

İç ısıtma tekniğinde şu yöntem izlenmektedir. Betonun içine çelik çubuklar veya küçük levhalar konularak bunlara elektrik akımı verilir. Bu levhalar veya çubuklar uniform bir sıcaklığın elde edilmesini sağlayacak şekilde yerleştirilir. Genellikle sıcaklık artışı başlangıçta saate 5°C 'dir. 24 saat sonunda sıcaklık 50°C ye ulaştıktan sonra sıcaklık artış hızı birinci devredekinin iki katına çıkarılır. Bu şekilde 71°C civarında bir sıcaklık elde edildikten sonra, bu sıcaklık altında işleme önceden belirlenen süre boyunca devam edilir. Süre sonunda elektrik akımı kesilerek, beton soğumaya bırakılır. Şekil 4.1'de elektrikle ısıtma yöntemi uygulamasının bir örneği gösterilmektedir (Postacıoğlu, 1986).



Şekil 4.1 Elektrikle ısıtma yöntemi

4.2.2.2 Dış Isıtma

4.2.2.2.1 Yüksek Basınçlı Buhar Kürü (Otoklav)

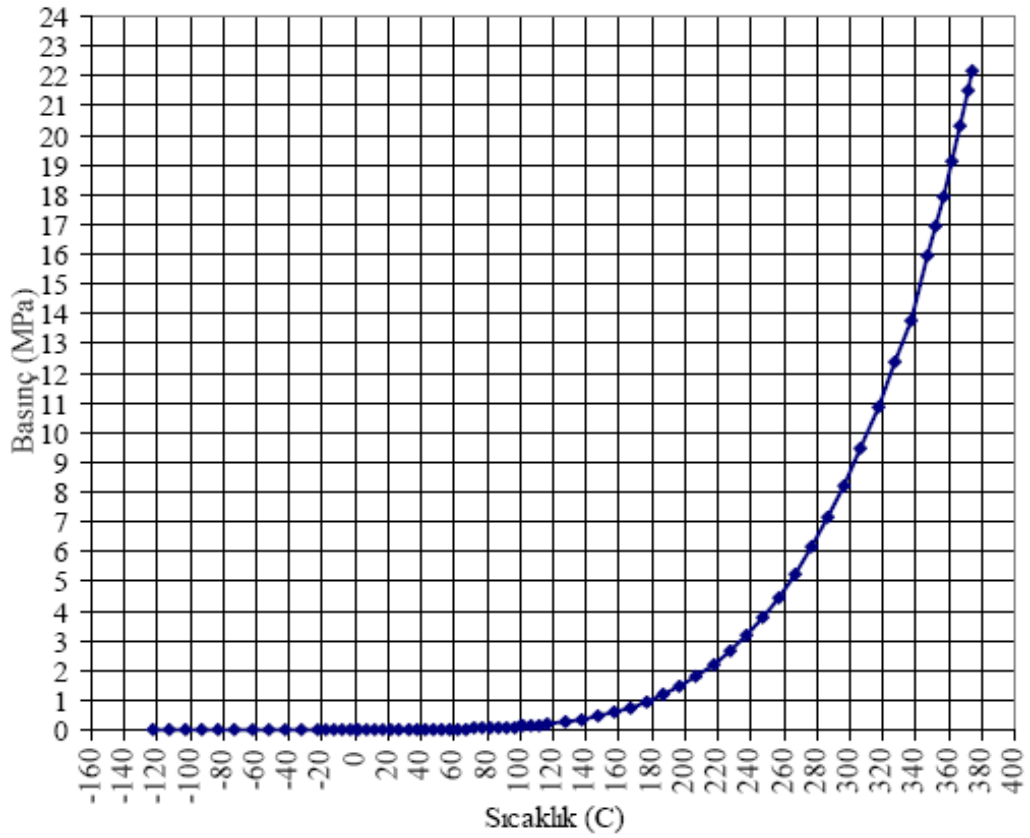
Uygulama açısından bu yöntem atmosfer basıncındaki buhar küründen çok daha farklıdır. Atmosfer basıncı altında yapılan buhar kürü uygulamasında, sıcaklığın artmasıyla betonda hedeflenen dayanım azalır. Bu olumsuz etkinin üzerinden gelebilmek için, buharın betona belli değerlerde basınçla verilmesi gerekir. Bu işlemlere “Yüksek Basınçlı Buhar Kürü” denilmektedir (Hanson, 1963). Genel olarak otoklav adı verilen basınçlı buhar makinesinin kullanıldığı bu yönteme “otoklavlama” da denilmektedir.

100°C üzerinde sıcaklıklarda gerçekleşen ve doygun buhar basıncıyla elemanın yüzeylerine uygulayarak dayanım artışı hızlandıran bir yöntemdir. Kür sıcaklıkları 160°C – 210°C aralığında olup, istenilen basınçta uygulanabilir. Bu şartlarda hidrasyonun kimyası değişerek oluşan ürünler 100°C'nin altında yapılan buhar kürü uygulamasındakilerden farklıdır (Mindess ve Young, 1991).

Yüksek basınçta buhar kürü uygulanan ürünlerde şu değişimler gerçekleşir;

- Çok erken kazanılan dayanım: Bu teknikle, betonun 28 günlük dayanıma 24 saatte ulaşılabilir.
- Yüksek dayanıklılık: Yüksek basınçlı buhar kürü, sülfatlara ve diğer zararlı kimyasal etkilere karşı betonun dayanıklılığını artırır. Ayrıca donma – çözülme ve aşınmaya karşı betonu dirençli kılar (Mindess ve Young, 1991).

Yüksek sıcaklıklarda çimento hidrasyonu sonucunda Ca(OH)_2 'in meydana gelmesi birincil reaksiyondur. Oluşan Ca(OH)_2 ince silika parçacıklarıyla (agrega içindeki) reaksiyona girerek güçlü ve kararlı bir yapı oluşturur. Ortamdaki Ca(OH)_2 'in azalmasına bağlı olarak “Çiçeklenme” olayı minimize edilir. Bu sıcaklıklarda kalsiyum silikatlar ve trikalsiyum alüminatın reaksiyonu sonucu sülfata dayanıklı bir yapı oluşur (Hanson, 1963).



Şekil 4.2 Basınç dayanımı – sıcaklık ilişkisi

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, sıcaklığın artmasıyla basınç dayanımında da artış gözlemlenmiştir. Çok yüksek sıcaklıklar donatılı betonlar için uygun değildir. Yüksek basınçta buhar kürü % 50 oranında aderansı azalttığı için donatılı elemanlarda uygulanması olumsuz durumlar yaratır.

Eğer ürünler yalnız Portland çimentosu kullanılarak üretilmiş ise otoklav kürü sonunda görülen dayanımlar düşüktür. İstenilen sonuçlar, karışımlara reaktif silis malzemesinin belirli oranlarda eklenmesiyle görülür (Mindess ve Young, 1991).

Sisteme pahalı bir reaktif silis kaynağı olan mikro silis koymak yerine, bağlayıcı yerine ikame edilecek mineral katkılarla sistemdeki reaktif silis oranı arttırılabilir. Böylelikle ikame edilen atık malzemeler ile (doğal puzolanlar, uçucu kül) sistemin silika ihtiyacı karşılanarak mikro silis oranı azaltıp daha ekonomik karışımlar oluşturulabilir (Mindess ve Young 1991).

4.2.2.2 Atmosfer Basıncında Buhar Kürü

Betonda dayanım artışının fazla olması için sıcaklık artışının yanında ortamın yeterince neme doymuş olması da gereklidir. Ortamı ısıtmak için gerekli ısı, buhar kürü ile de sağlanabilir. Bu süreç 100°C'nin altında ve atmosferik basınçta gerçekleşirse nem kürlenmesinin özel bir durumu olarak sayılabilir (Neville, 1997).

"Atmosferik basınç altında buhar kürü" 100°C'nin altında, atmosferik basınç altında ve doymuş buhar ortamında yapılan kür çeşididir (ACI 517,1970). Betonun atmosferik basınçta buhar kürlenmesinin, beton çevre koşulları, nem yönünden doymaya yakın olduğundan diğer yöntemlerin üstünde bir avantajı vardır. Isıl işlem sırasında betondan suyun buharlaşması en az olmaktadır.

Buhar kürü uygulanmasını etkileyen parametreler şunlardır;

1. Malzeme özellikleri,
 - a. Beton bileşimi (Çimento türü, dozajı, s/ç, katkı maddeleri vb.),
 - b. Betonu yerleştirme ve sıkıştırma olanakları,
2. Yapı elemanının geometrik özellikleri (Boyut, biçim, yüzey/hacim oranı),
3. Buhar kürü çevrimi,
4. Teknolojik veriler (Ortam nemi, ısı geçiş katsayıları, kalıp türü, uniformluk vb.),
5. Saklama koşulları (Kür sonrası sıcaklık ve nem).

Yukarıdaki faktörlerin her biri buhar kürü uygulamasının başarı ve ekonomik verimlilik derecesi üzerinde etkili olmakla beraber, içlerinden en önemlileri buhar kürü çevrimi ve çimentodur (Öztekin, 1980).

Buhar kürü yönteminin beton üzerindeki etkisini iki şekilde ele almak gerekir:

1. Sertleşmiş çimento hamuru yapısında, yüksek sıcaklıkta hidrasyon sonucu oluşan kaçınılmaz yapısal bozukluk (Hidrasyon ürünlerinin heterojen dağılımı, artan kristalleşme ve porozite),

2. Aşırı genleşme, ısı gerilmeler ve su kaybı sonucu oluşan kaçınılmaz fiziksel bozukluk (kalıcı hacim artışı, mikro ve makro çatlaklar, aşırı su kaybı ve kuru saklama koşulları nedeniyle tamamlanamayan hidrasyon).

Burada göz önüne alınması gerekli olan özelliklerden biri de, ısı işlemi olumsuz yönde etkileyen işlem parametrelerinin, (kısa ön bekleme süresi gibi) yapı elemanlarının üretim hızını olumlu yönde etkileyerek, bir çelişki yaratmasıdır. Bu yüzden ısı işlem uygulamaları, yapı elemanlarından beklenen özelliklere göre büyük çeşitlilik göstermektedir. Örneğin, öngerilmeli beton elemanlarda yapı güvenliği nedeniyle yumuşak çevrimler yeğlenirken, beton duvar elemanlarında maliyet nedeniyle daha sert çevrimler uygulanabilir. Diğer bir deyişle, tüm elemanlar için optimum bir çevrimden söz etmek mümkün değildir (Alabaş, 2002).

Beton parçaların biçim ve büyüklükleri, kullanılan malzeme cinsi ve oranları, erken dayanım ihtiyacı, donma ve çözölmeye dayanıklılık gibi nitelikler uygulanan buhar kürü devrelerinde süreler ve metotlar açısından önemli değişiklikler yapılmasına neden olabilir (Neville, 1997).

Pratikte uygulanan ısı işlem çevrimlerini üç grupta toplamak mümkündür (Öztek, 1980).

1. *Hızlı (sert) buhar kürü çevrimleri:* Isıl işlem sıcaklığı 80°C – 90°C olan ve toplam çevrim süresi ise 6 – 7 saat süren çevrimlerdir. Hızlı çevrimlerde ön dinlendirme süresi 1 saat veya daha az, sıcaklık yükseltme ve soğutma hızı ise 30 °C/saat civarındadır.
2. *Orta (ılımlı) buhar kürü çevrimleri:* İşlem sıcaklığı 70°C civarında olan ve toplam çevrim süresi 9 – 11 saat süren ısı işlem çevrimleridir. Bu çevrimde ön dinlendirme süresi 2 – 3 saat olup ısıtma ve soğutma hızları 15 – 20 °C/saat civarındadır. Kürden çıkan beton eleman sıcaklığı 30°C – 40°C iken kalıp alınabilir.

3. *Yavaş (yumuşak) buhar kürü çevrimleri:* İşlem sıcaklığı 55°C – 60°C'yi aşmayan ve toplam süresi 20 – 22 saat olan çevrimlerdir. Ön dinlendirme süresi 4 saat olup sıcaklık yükseltme ve soğutma hızları ise 10°C/saat dolayındadır.

Buhar kürü uygulanacak çimentoların aşağıda belirlenen özelliklere sahip olması istenilen hedefler için faydalı olmaktadır;

- ✓ C₃S miktarı % (55 – 60) arasında olmalı,
- ✓ C₃S / C₂S oranı (3) den büyük olmalı,
- ✓ C₃A miktarı % 10'u geçmemeli,
- ✓ C₄AF miktarı % (5 -15) arasında kalmalı,
- ✓ SO₃ miktarı % 3 den küçük olmalı,
- ✓ Blaine özgül alanı 3500 cm²/g den büyük olmalıdır (Postacıoğlu, 1986).

Standart kür dışında yukarıda anlatılan hızlandırılmış kür yöntemlerinden buhar kürü, ısı ve nemin beton elemanlarda özel donanımlar gerektirmeden en ekonomik ve etkin şekilde temin edildiği bir yöntem olduğu için yaygın bir uygulamadır. Diğer yandan otoklav küründe kısa sürede kazanılan erken dayanım avantajının yanında, ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, otoklav kürünün ancak özel uygulamalarda kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde yüksek performanslı betonların üretiminde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri, basınç dayanımının, eğilme dayanımının ve kırılma enerjisinin tayinine yönelik yapılan deneyler verilmiştir.

5.1 Deneysel Program

Basınçlı buhar kürü yönteminin, RPB'nin basınç dayanımına etkisini incelemek üzere yapılan deneysel çalışmalarda; mineral katkı ve katkısız olmak üzere, iki farklı lif tipi içeren numuneler kullanılmıştır. Üç farklı otoklav basıncı altında ve altı farklı sürede kür uygulanmış numunelerin, otoklav küründe eğilme ve basınç dayanım değerleri ve 7, 14, 21 ve 28 günlük standart su küründe eğilme ve basınç dayanım değerleri incelenmesi yapılmıştır.

Bu çalışmada üretilen altı farklı karışıma, çeşitli basınçlarda ve sürelerde basınçlı buhar kürü uygulanarak beton basınç dayanımının gelişiminin incelenmesi hedeflenmiştir. Bunun içinde, 6 farklı karışım türü (silis dumansız, silis dumanlı, silis dumansız kısa lifli, silis dumansız uzun lifli, silis dumanlı kısa lifli ve silis dumanlı uzun lifli) olmak üzere, toplam 112 adet döküm yapılmış ve her dökümde üçer adet 4x4x16 cm ebatlarında prizma numuneler üretilmiştir.

Üretilen bu karışımlar, 3 farklı basınç altında (1,2 ve 3 MPa), 6 farklı kür süresine (4, 6, 8, 10, 12 ve 24 saat) tabi tutulmuş ve şahit RPB numuneler (7, 14, 21 ve 28 günlük su kürü) ile birlikte, basınç ve eğilme deneylerine tabi tutulmuştur.

Karışımlar kuru olarak ve gerekli nem düzeltmeleri yapıp hazırlandıktan sonra mikser yardımıyla karıştırılıp üretilmiştir. Her bir karışım türünün ayrı olarak üretildiği beton numuneler, kalıplarına yerleştirildikten sonra basınçlı buhar kürüne konulmadan önce laboratuvar da, 16 saat nemli ortamda bekletilerek gerekli dayanımı

kazanması sağlanmıştır. Bu sürenin sonunda, numuneler kalıptan çıkarılarak, belirlenen basınç ve sürelerde kür edilmek üzere otoklav cihazına konulmuştur. Bu süre sonunda kalıptan alınan şahit numuneler ise, su kürünün etkisini gözlemlemek üzere kirece doymun, sabit sıcaklıktaki ($21\pm 2^{\circ}\text{C}$) su içerisinde, 7, 14, 21 ve 28 gün bekletildikten sonra, eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır.

Tablo 5.1’de, deneylerde çalışılan karışımlar ve bu karışımlara uygulanan kür tipleri gösterilmektedir.

Tablo 5.1 Karışımlar ve uygulanan kür tipleri

Kod	Bağlayıcı türü içeriği	Lif türü	Uygulanan basınç	Otoklav kür süresi
N	Çimento	Yok	1, 2, 3	4, 6, 8, 10, 12, 24
NKL	Çimento	Kısa	1, 2, 3	4, 6, 8, 10, 12, 24
NUL	Çimento	Uzun	1, 2	4, 8, 12, 24
SD	Çimento + silis dumanı	Yok	1, 2, 3	4, 6, 8, 10, 12, 24
SDKL	Çimento + silis dumanı	Kısa	1, 2, 3	4, 6, 8, 10, 12, 24
SDUL	Çimento + silis dumanı	Uzun	1, 2	4, 8, 12, 24

Tablo 5.1’de görüldüğü üzere, bağlayıcı türü olarak sadece çimento bağlayıcılı ve silis dumanı ikameli iki ana matris ve bu matrislere iki farklı çelik lif tipiyle; lifsiz, kısa çelik lifli ve uzun çelik lifli olmak üzere toplamda altı çeşit matris dizayn edilmiştir. Tüm karışımlarda çelik lif oranı hacimce % 2’dir. Tablo 5.1’de görüldüğü üzere uzun liflerde uygulanan otoklav basıncı 1 ve 2 MPa ve kür süreleri ise dört çeşittir. Böylece bazı noktalarda kısa lif ile uzun lif arasında kıyaslama yapılmıştır.

5.2 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Dokuz Eylül Üniversitesi yapı malzemesi laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve bu malzemelere ait özellikler, malzemelerin üretildiği fabrikalardan alınarak bu kısımda açıklanmıştır.

5.2.1 Çimento

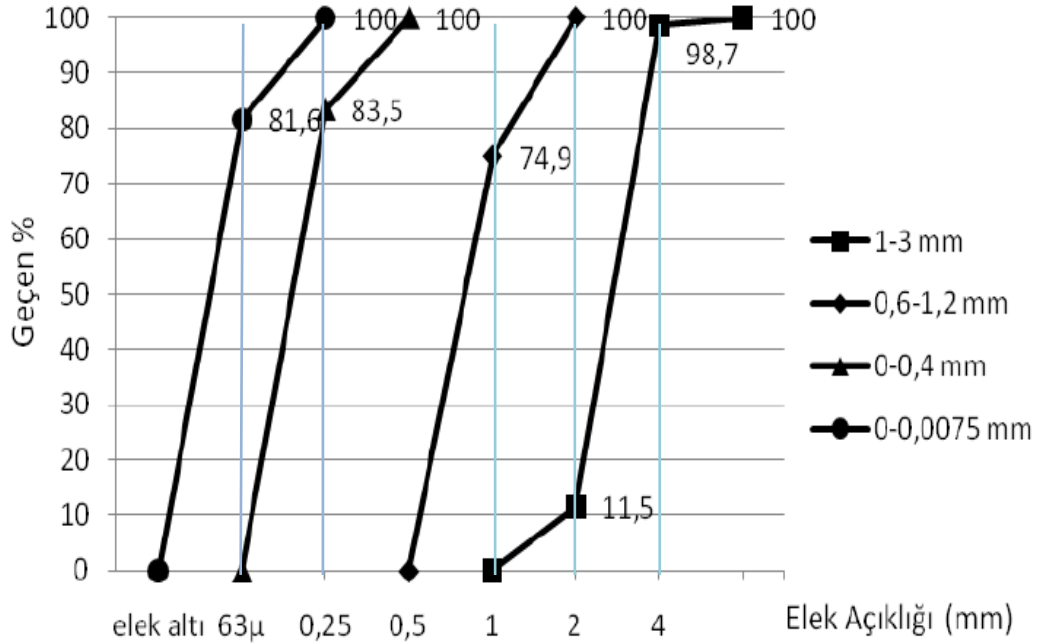
Yapılan çalışmalarda, ‘Denizli Çimento’ ticari markasına ait CEM-I 42,5 R tipi hızlı dayanım kazanan normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun özellikleri Tablo 5.2’de detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Çimentonun özellikleri

Özellik	Birim	Çimento
SiO ₂	%	19,1
Al ₂ O ₃	%	4,4
Fe ₂ O ₃	%	3,96
CaO	%	61,85
MgO	%	2,05
Na ₂ O	%	0,27
K ₂ O	%	0,7
SO ₃	%	3,72
Cl	%	0,0004
Kızdırma Kaybı	%	1,82
Özgül Yüzey (Blaine)	m ² /kg	369
Priz Başlangıcı	Dakika	110
Priz Sonu	Dakika	166
Hacim Genleşmesi	mm	1,00
Basınç Dayanımları		
2 Gün	MPa	27,1
7 Gün	MPa	43,3
28 Gün	MPa	56,0

5.2.2 Agrega

Deneysel çalışmalarda, 4 farklı granülometride (0 – 75 µm; 0 – 400 µm; 0,60 mm – 1,2 mm; 1 mm – 3 mm) paketlenmiş kuvars agregası kullanılmıştır. Yapılan elek analizi sonucu elde edilen granülometri değerleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Elek analizi

5.2.3 Kimyasal Katkı

Deneysel çalışmalarda, BASF firmasının süper akışkanlaştırıcı katkısı Glenium ACE30 kullanılmıştır. Kullanılan katkı polikarboksilik esaslı süper akışkanlaştırıcıdır. Özel molekül konfigürasyonu, çimento hidrasyonunu hızlandırmaktadır. Katkı maddesinin, çimento tanesi üzerine hızlı absorpsiyonu, etkili bir dispersiyon etkiyle birlikte, çimento taneciklerinin yüzeyini genişleterek karışım suyuyla olan reaksiyonunda yardımcı olmaktadır. Üretici firmadan temin edilen süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin teknik özellikleri Tablo 5.3’de gösterilmiştir.

Tablo 5.3 ACE30 süperakışkanlaştırıcı katkıının özellikleri

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,045 – 1,085 kg/litre
Klor içeriği %(EN480-10)	< 0,1
Alkali içeriği %(EN 480-12)	< 3

5.2.4 Mineral Katkı

DeneySEL çalışmalarında mineral katkı olarak BASF firmasından temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. Kullanılan silis dumanının kimyasal kompozisyonu Tablo 5.4’de gösterilmiştir.

Tablo 5.4 Silis dumanının kimyasal bileşimi

Özellik	Birim	Silis Dumanı
SiO ₂	%	92,26
Al ₂ O ₃	%	0,89
Fe ₂ O ₃	%	1,97
CaO	%	0,49
MgO	%	0,96
Na ₂ O	%	0,42
K ₂ O	%	1,31
SO ₃	%	0,33
Cl	%	0,09
Özgül Yüzey	m ² /kg	20000
Puzolanik aktivite indeksi ASTM C311 (28 gün)	%	115

5.2.5 Lif

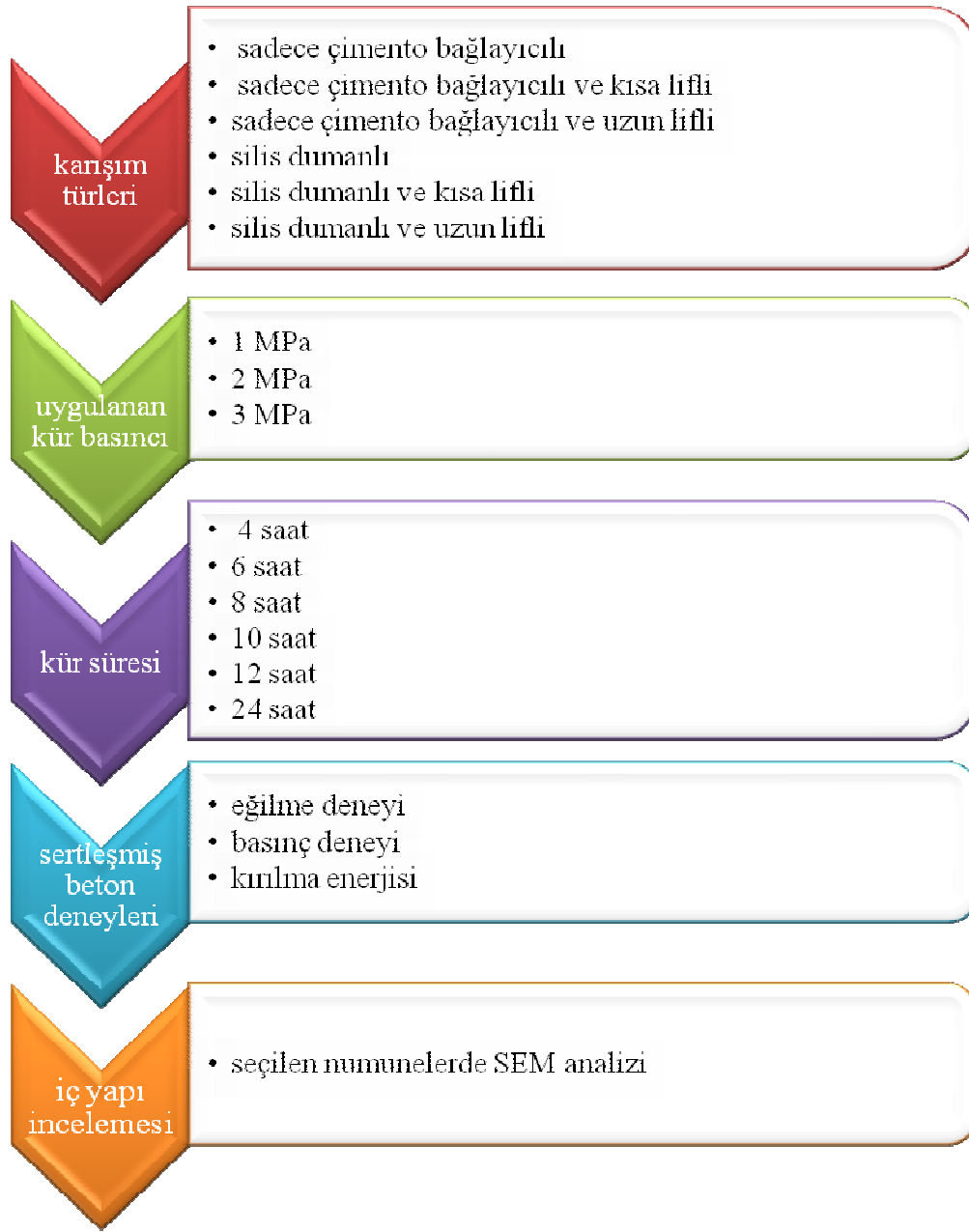
Deneylerde kullanılan çelik lifler BEKSA A.Ş'den temin edilmiştir. Pirinç kaplı, yüksek dayanımlı çelik lifler kullanılmıştır. Liflerin özellikleri Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5 Çelik lif özellikleri

BEKSA A.Ş.	Uzunluk	Çap	Narinlik	Çekme Dayanımı	Özgül Ağırlık	Geometri
	mm	d	l/d	Mpa		
Micro OL 6/16	6	0,16	37,5	2250	7,17	—
Macro OL 13/16	13	0,16	81,25	2250	7,17	—
Çelik lifler pirinç kaplı ve yüksek dayanımlı liflerdir.						

5.3 Deneysel Tasarım

Altı çeşit reaktif pudra betonu karışım serisi hazırlanmıştır. Bu karışımlar 3 çeşit basınçta ve 6 çeşit sürede otoklav cihazında küre tabi tutulmuştur. Şahit numunelerin ise, kalıp çıkış dayanımları, su küründe 7, 14, 21 ve 28 günlük dayanımları belirlenmiştir. Kırılan parçalardan alınan numuneler içyapı incelemesi için ayrılmıştır. Deney programının şematik gösterimi Şekil 5.2'de verilmiştir.



şekil 5.2 Deney programının şematik gösterimi

5.3.1 Karışım Dizaynları

Tüm karışımlarda su/çimento oranı 0,18 olarak sabit tutulmuştur. Karışım türlerinin sınıflandırılarak, kullanılan malzeme dozajları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6'da görüldüğü üzere silis dumanı içeren karışımlarda çimento sabit tutulmuş, hacim dengesi agrega miktarı değiştirilerek sağlanmıştır. Benzer şekilde lif katılması ile değişen hacim, agrega miktarında yapılan azaltma ile dengelenmiştir.

Tablo 5.6 Karışım dizayn parametreleri

Malzeme	Nitelik	Dozajlar (kg/m ³)			
		I	II	III	IV
Su	Şebeke suyu	138	138	138	138
Çimento	CEM I 42,5 R	772	772	771	771
Puzolanik Filler	Silika dumanı	0	0	179	179
İnce Agrega	1-3 mm quartz	736	709	622	596
	0,6 - 1,2 mm quartz	294	284	249	238
	0-0,4 mm quartz	294	284	249	238
	0-0,075 mm quartz	147	142	124	119
Kimyasal Katkı	ACE 30	29	29	35	35
Lif Türü	Çelik Lif (Mikro ve Makro)	0	143,5	0	143,5
Su / Çimento		0,18	0,18	0,18	0,18
Su / Bağlayıcı		0,18	0,18	0,15	0,15
*Su / Çimento (su = su + 0,5 kimyasal katkı)		0,2	0,2	0,2	0,2
*Su / Bağlayıcı (su = su + 0,5 kimyasal katkı)		0,2	0,2	0,16	0,16

Tip I : Silis dumansız lifsiz karışım (N)

Tip II : Silis dumansız lifli karışım (NL)

Tip III : Silis dumanlı lifsiz karışım (SD)

Tip IV : Silis dumanlı lifli karışım (SDL)

5.4 Deneysel Yöntemler

Beton numunelerin karışımları, yüksek hızlı karıştırıcı (440rpm) kullanılarak yapılmıştır (Şekil 5.4). Homojen bir karışım elde etmek amacıyla, agrega ve bağlayıcılar kuru olarak 3 dakika düşük devirde karıştırılmıştır. Karışım suyunun $\frac{3}{4}$ 'ü ve akışkanlaştırıcının $\frac{1}{4}$ 'ünün ilavesinin ardından 3 dakika orta devirde karıştırılarak karışımın ıslanması sağlanmıştır. Daha sonra kalan karışım suyunun ve kimyasal katkının ilavesinin ardından, 15 dakika yüksek devirde karıştırma yapılarak karışım yapılmıştır. Karışımın iyice karışması için, her 3 dakikada bir mikser durdurularak kovadaki karışım alt üst edilmiş ve homojen bir karışım elde edilmiştir (Şekil 5.4). Hazırlanan karışımlar, 40x40x160 mm boyutlu prizma kalıplara 3 tabaka halinde sarsma tablasında sarsılarak ve aynı zamanda tokmak darbesi ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir (Şekil 5.5) ve yeterli dayanımı kazanması için 16 saat nemli ortamda kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 5.3 Malzemelerin tartılması



Şekil 5.4 Karıştırma işleminde kullanılan mikser ve homojen bir karışım elde etmek için kovada kalan karışımın alt üst edilmesi



Şekil 5.5 Deneyde kullanılan kalıp ve sarsma tablası, beton karışımının karıştırılması sırasında sarsılması ve tokmaktanması



Şekil 5.6 Deneyde kullanılan otoklav cihazı

16 saat nemli ortamda yeterli dayanımı kazanan numuneler kalıplardan sökülerek, otoklav cihazına yerleştirilmiş (Şekil 5.6) ve belirlenen basınçlarda ve sürelerde kür edilmiştir. Şekil 5.6'daki otoklav cihazının ısınma hızı $1^{\circ}\text{C}/\text{dakika}$, soğuma hızı ise $0,5^{\circ}\text{C}/\text{dakika}$ 'dır. Kür süresi bittikten sonra numuneler otoklav içinde soğumaya bırakılır bunun sebebi betonda oluşabilecek termal şoku engellemek içindir.

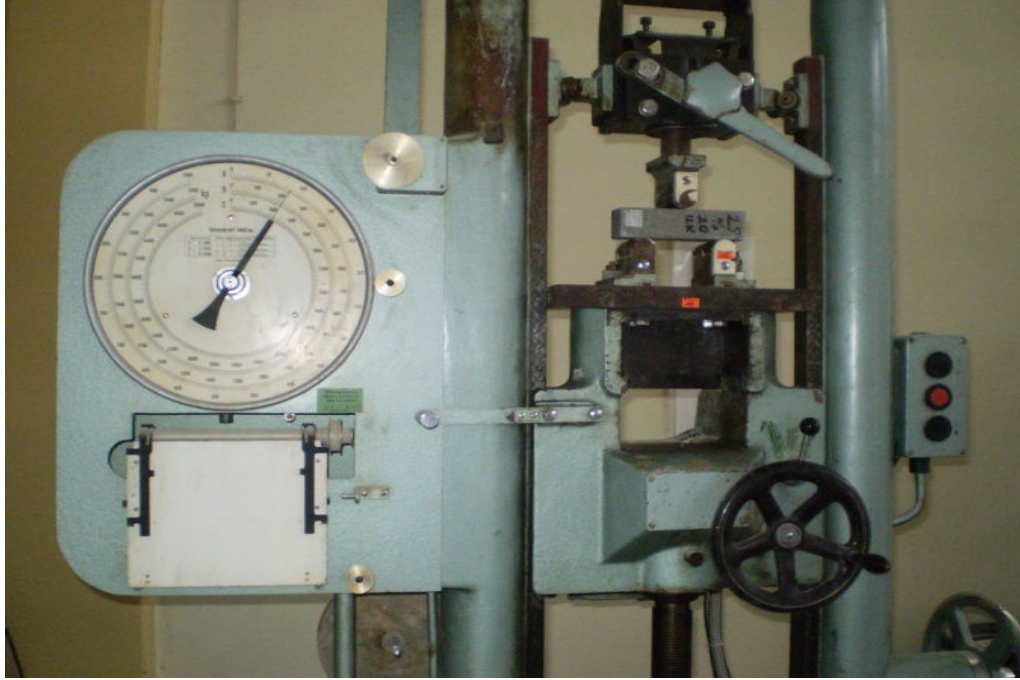
5.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Otoklav küründen alınan numunelere eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve kırılma enerjisi deneyleri uygulanmıştır.

5.5.1 Eğilme ve basınç deneyleri

Üç noktalı eğilme deneyinde numuneler $5\text{ mm}/\text{dk}$ deplasman hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.7). $40 \times 40 \times 160\text{ mm}$ prizmatik numunelere 130 mm

mesnet açıklığında eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanım deneyleri, eğilme sonrası çıkan parçalara 240 kgf/s yükleme hızında uygulanmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.7 Eğilme deneyinde kullanılan cihaz



Şekil 5.8 Basınç deneyinde kullanılan cihaz

Eğilme dayanımları 3 numunenin, basınç dayanımları ise bölünen parçalardan alınan 5 numunenin ortalamasıyla hesaplanmıştır ve artan 1 numune ise içyapı için saklanmıştır.

5.5.2 Kırılma enerjisi deneyleri

Kırılma enerjisi deneyleri, ideal kür koşullarında (1 Mpa kür basıncı altında 10 saat süreyle) kür edilen 4 farklı karışım için gerçekleştirilmiştir. Kırılma enerjileri, üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen (kapalı devre servo kontrol eğilme presi ile) yük – sehim eğrilerinin alt alanlarının ve numune sehiminin yaptığı işin eğilmeye çalışan aktif kesit alanına bölünmesiyle bulunmuştur.



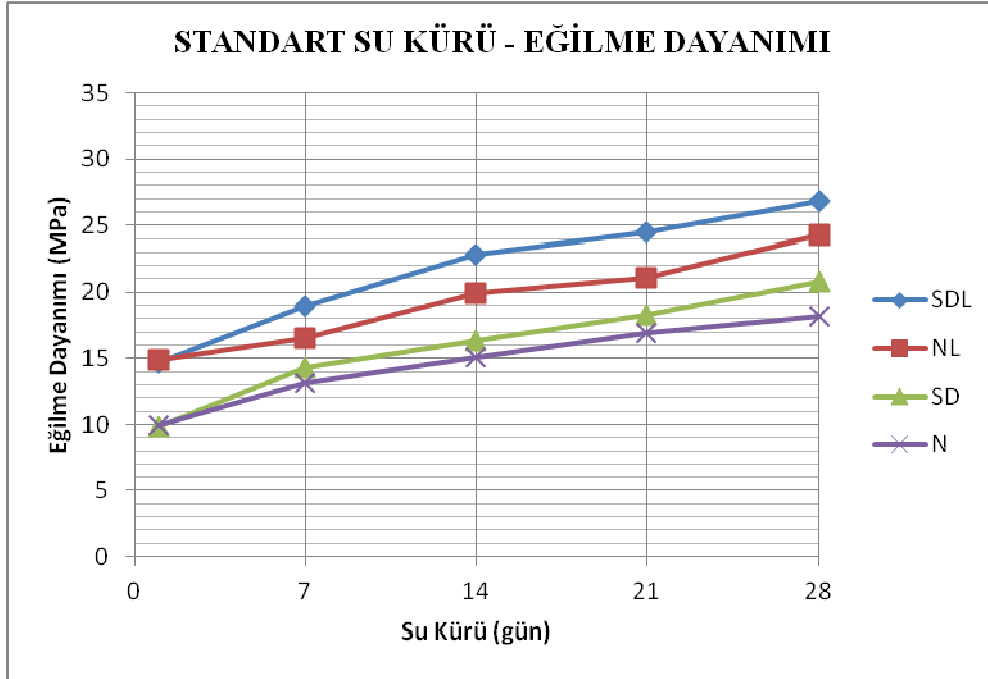
Şekil 5.9 Kırılma enerjisi deney cihazı

BÖLÜM ALTI
RPB KARIŞIMLARININ EĞİLME DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

Bu bölümde, RPB'lerin eğilme dayanımları incelenmiştir. Numunelere uygulanan tüm kür koşullarındaki eğilme dayanımları Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Eğilme dayanımı tablosu

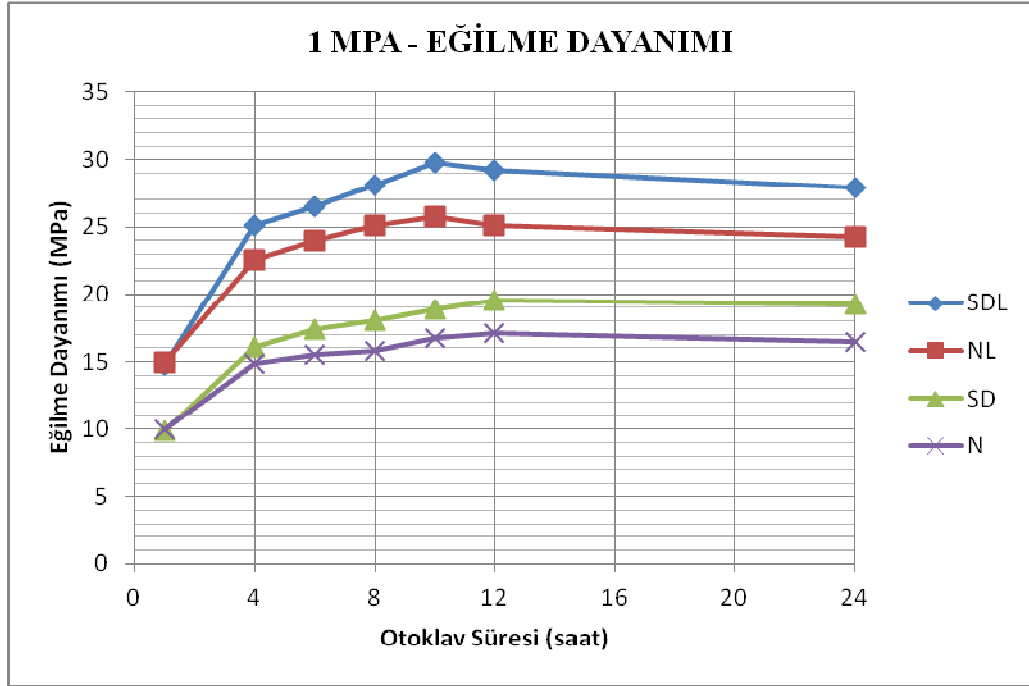
Tip	Kür Süresi (saat)	EĞİLME DAYANIMLARI (MPa)						
		OTOKLAV KÜRÜ (MPa)			SU KÜRÜ (Gün)			
		1	2	3	7	14	21	28
N	0	9,97	9,97	9,97	13,14	15,09	16,92	18,14
	4	14,89	16,25	15,17				
	6	15,54	16,84	15,44				
	8	15,78	17,45	16,57				
	10	16,74	17,92	17,90				
	12	17,14	18,14	17,39				
	24	16,49	17,69	15,80				
NL	0	14,91	14,91	14,91	16,53	19,98	21,07	24,32
	4	22,60	23,26	22,45				
	6	24,02	24,73	23,61				
	8	25,14	25,49	24,02				
	10	25,80	26,86	25,49				
	12	25,09	26,10	24,48				
	24	24,22	24,93	23,71				
SD	0	9,87	9,87	9,87	14,30	16,37	18,30	20,82
	4	16,11	17,02	15,54				
	6	17,43	18,04	16,62				
	8	18,02	18,77	18,55				
	10	18,93	20,01	19,46				
	12	19,60	21,49	19,03				
	24	19,26	20,73	18,78				
SDL	0	14,73	14,73	14,73	18,97	22,80	24,53	26,86
	4	25,09	26,05	25,34				
	6	26,51	27,37	26,36				
	8	28,08	28,18	27,12				
	10	29,81	29,86	27,88				
	12	29,20	29,30	28,18				
	24	27,88	28,57	28,10				



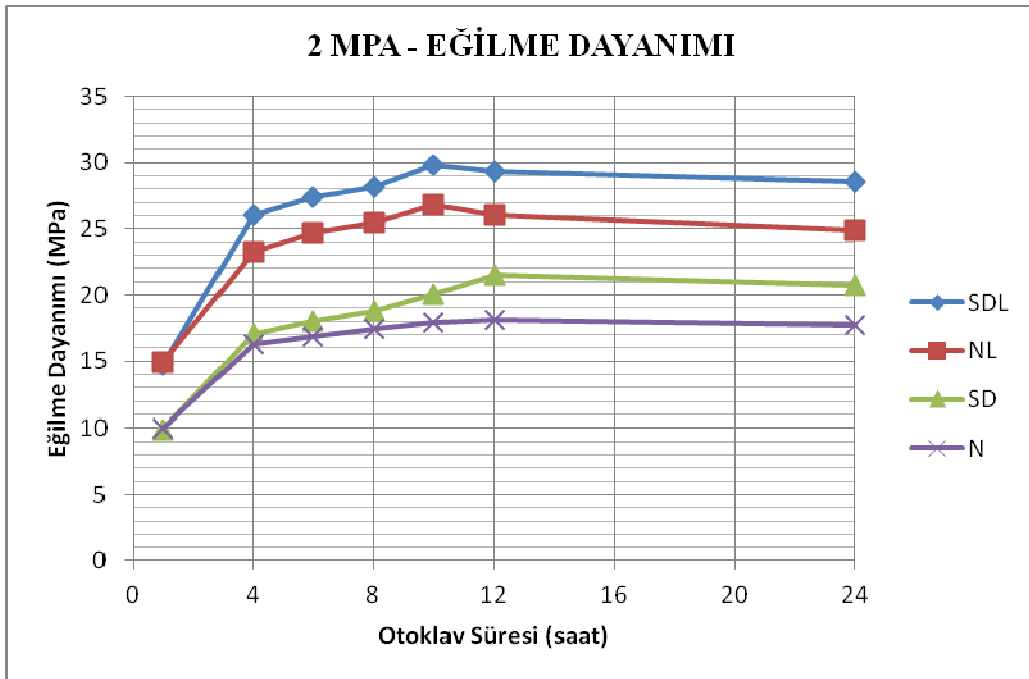
Şekil 6.1 Standart su kürüne tabi tutulan numunelerin eğilme dayanımı – zaman ilişkisi

Su kürüne tabi tutulan örneklerin 7, 14, 21 ve 28'inci günlerdeki eğilme dayanımları Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Şekil 6.1'den görüldüğü üzere, kalıptan alınan örneklerin eğilme dayanımı 28 günlük su kürüyle birlikte çok yüksek mertebelere taşınmıştır. Silis dumanı ve çelik lif katkılı örneklerin kalıp çıkışı eğilme dayanımları 15 MPa dolaylarındayken, 28 günlük su kürü sonucu eğilme dayanımı 27 MPa dolaylarına yükselmiştir. Aynı şekilde sadece çimento bağlayıcılı serilerde kalıp çıkışı eğilme dayanımı 10 MPa dolaylarında iken, 28 günlük su kürü sonucu bu değer 19 MPa dolaylarına yükselmiştir. Su kürünün silis dumanı içeren serilerde daha etkin olduğu Şekil 6.1'den anlaşılmaktadır.

Otoklav cihazında 1 MPa basınç altında 180°C'de kür edilen numunelerin eğilme dayanımının zamana bağlı değişimi Şekil 6.2'de verilmiştir. Otoklav kürünün kısa sürede ne kadar etkili olduğu, kalıp çıkışı numunelerine kazandırdığı eğilme dayanımıyla görülmektedir.



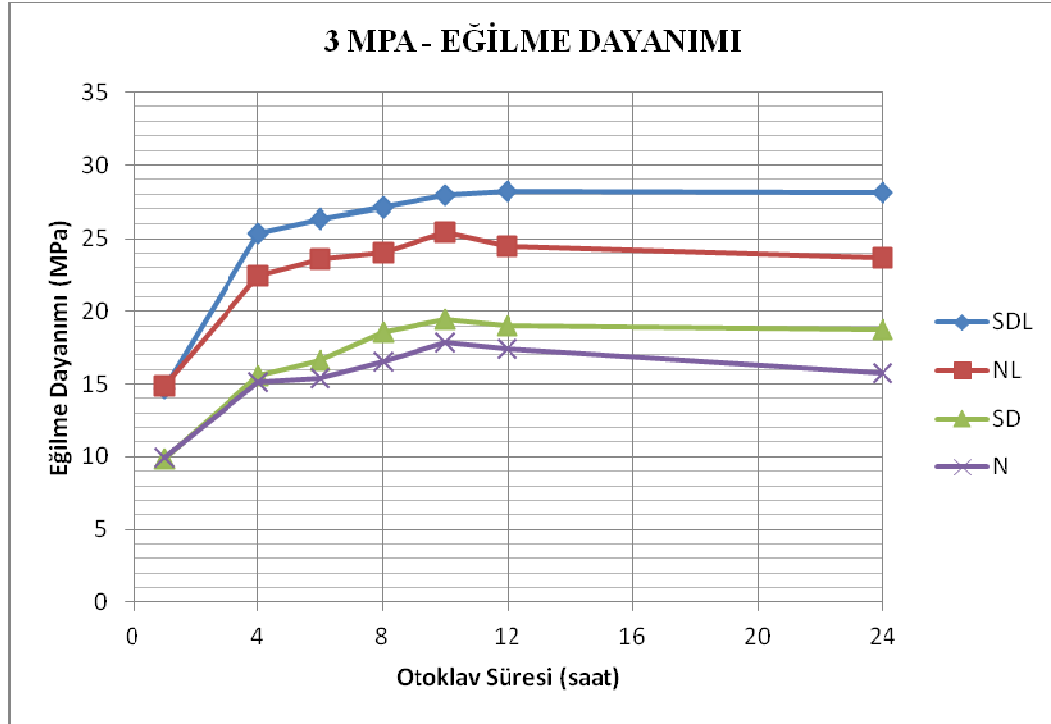
Şekil 6.2 Otoklavda 1 MPa basınç altındaki serilerin kür süresine bağlı eğilme dayanımı grafiği



Şekil 6.3 Otoklavda 2 MPa basınç altındaki serilerin kür süresine bağlı eğilme dayanımı grafiği

Şekil 6.3'te 2 MPa basınç altında 210°C'de kür edilen numunelerin ve Şekil 6.4'te 3 MPa basınç altında 240°C'de kür edilen numunelerin eğilme dayanımları grafiği gösterilmektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere, eğilme dayanımı

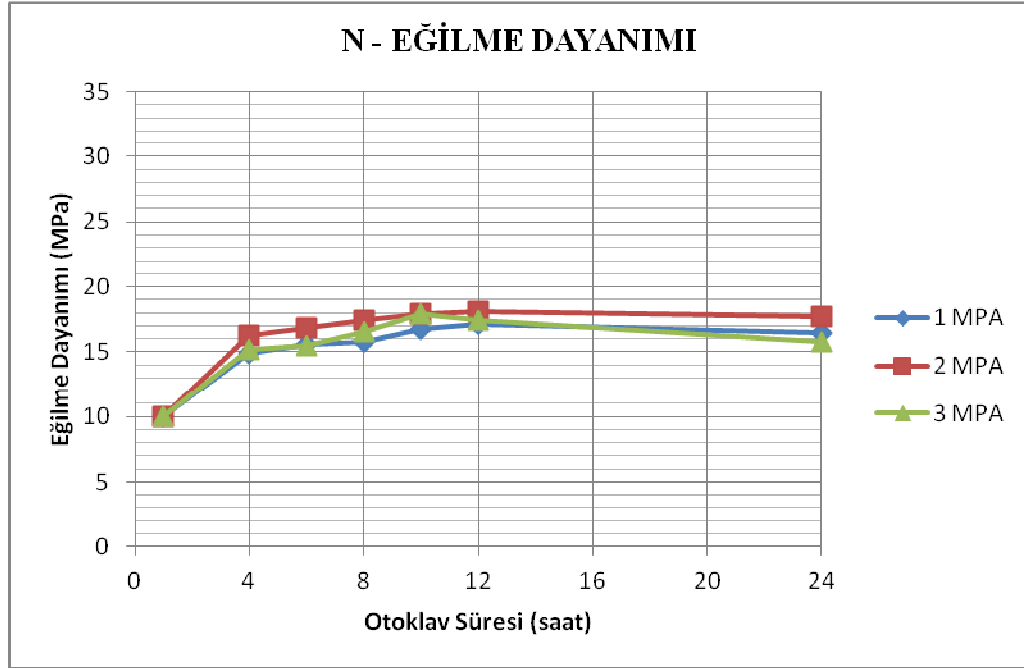
zamanla artan bir davranış göstermiştir. Ancak belli bir süreden sonra eğilme dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Uzun süreli yapılan kür, tüm basınçlarda olumsuz etki yaratmaktadır. Uygulanan kür süreleri arasındaki en verimli süre, eğilme dayanımı için yaklaşık olarak 10 saat olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.4 Otoklavda 3 MPa basınç altındaki serilerin kür süresine bağlı eğilme dayanımı grafiği

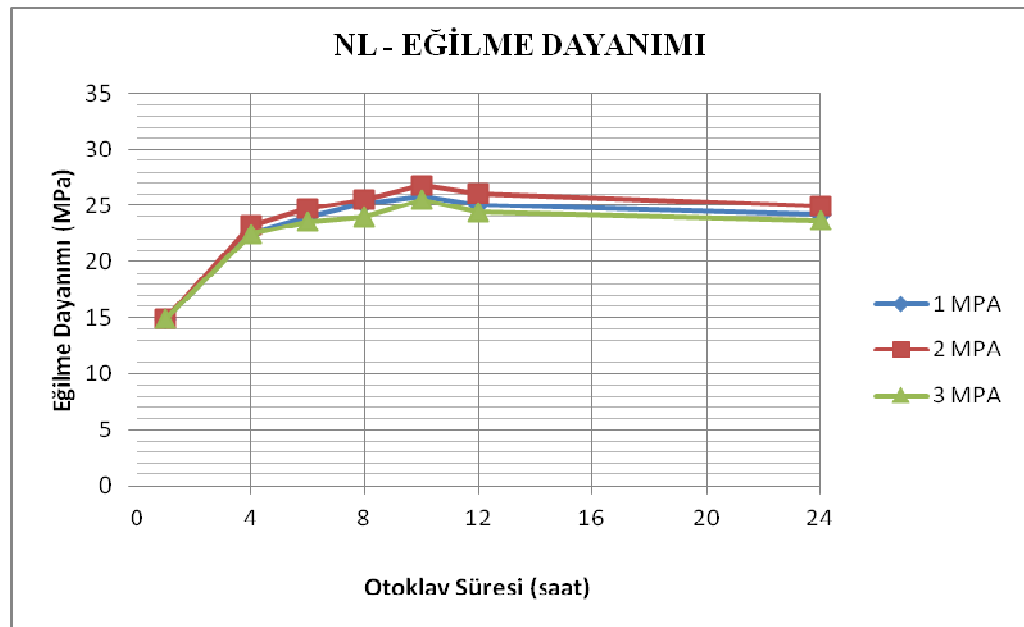
Eğilme dayanımı, 2 MPa basınçta kür edilen örneklerde en yüksek sonuçları vermiştir. 3 MPa'da kür edilen örneklerin eğilme dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 6.4). Bunun nedeni, 3 MPa kür basıncında sıcaklığın 240°C gibi çok yüksek değerlere çıkması ve bu sıcaklıktan sonra örneklerde gözle görülemeyen mikro çatlaklar oluşması olduğu düşünülmektedir. Mikro çatlakların eğilme dayanımında düşümlere sebep olduğu bilinmektedir. Ayrıca, içyapıdaki aşırı kristalleşmenin bu sonuçta etkisi olduğu söylenebilir.

Serilerin değişik basınç kürlerinde verdiği sonuçlar aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



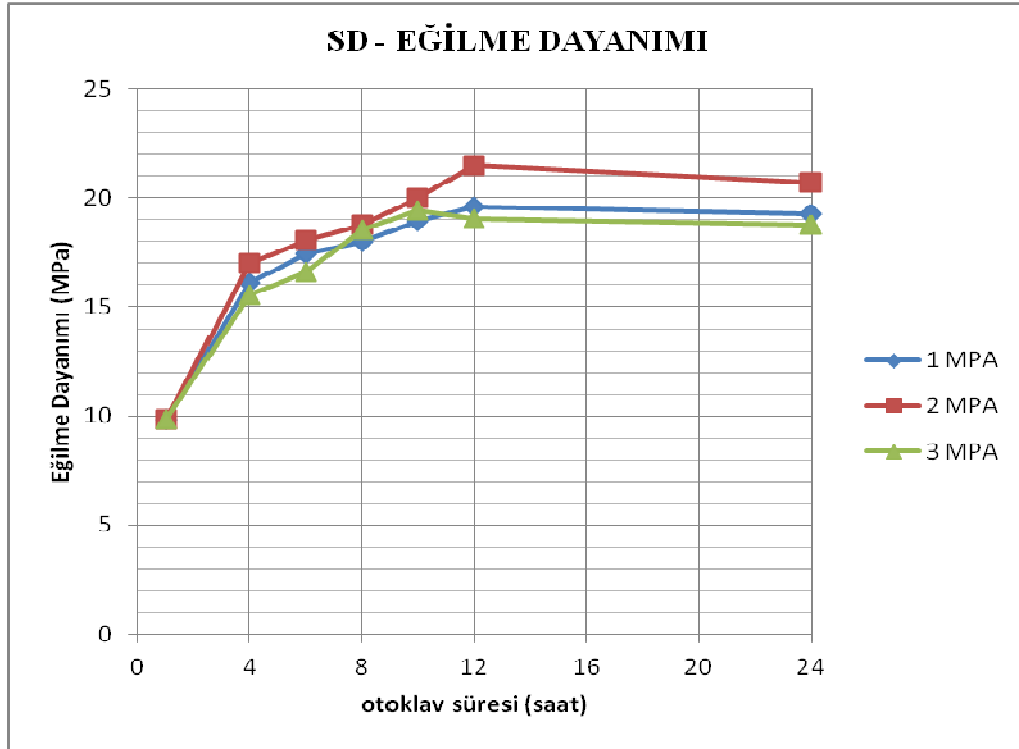
Şekil 6.5 N kodlu serilerin farklı kür basınçlarında eğilme dayanımı – kür süresi ilişkisi

Şekil 6.5’den görüldüğü üzere, bağlayıcı olarak sadece çimento içeren serilerin en verimli kür süresindeki eğilme dayanımı 18 MPa mertebelerindeyken, bu karışımlara lif ilave edilmesiyle, eğilme dayanımlarının 27 MPa dolaylarına çıktığı görülmüştür (Şekil 6.6). Eğilme dayanımları açısından kür basıncı olarak en uygun değer 2 MPA olarak saptanmıştır.



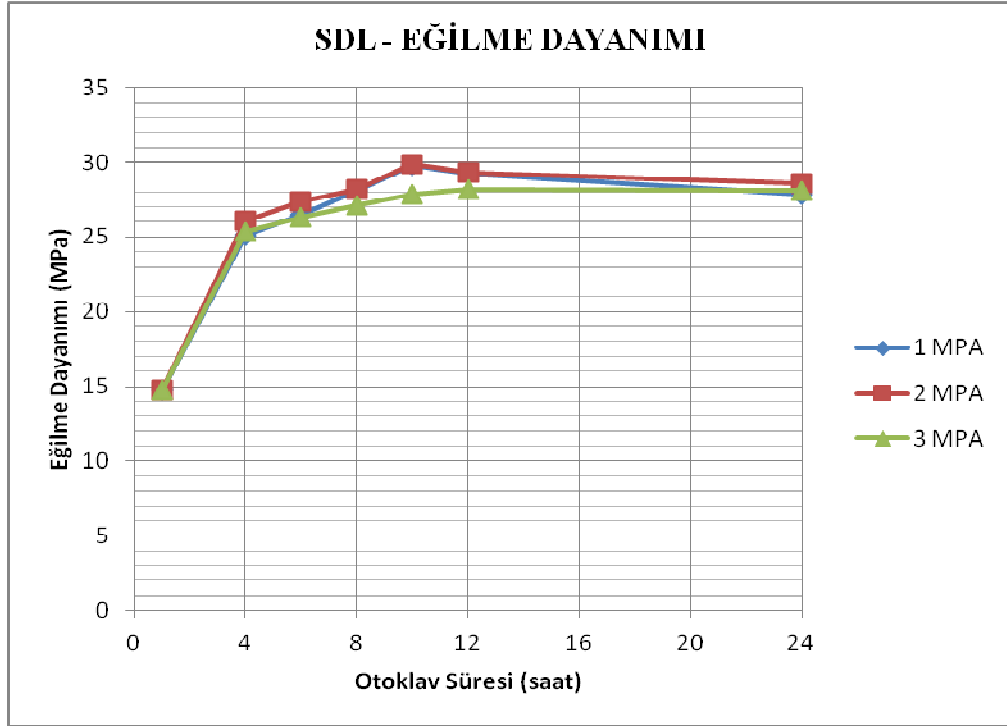
Şekil 6.6 NL kodlu serilerin farklı kür basınçlarında eğilme dayanımı – kür süresi ilişkisi

Şekil 6.7’de farklı basınç ve sürelerde kür edilmiş silis dumanı katkıli reaktif pudra betonlarının eğilme dayanımı grafiği verilmiştir. Silis dumanı katkıli numuneler de en yüksek değeri 2 MPa basınç altındaki kürde ve 10 saat kür süresinde vermiştir.



Şekil 6.7 SD kodlu serilerin farklı kür basınçlarında eğilme dayanımı – kür süresi ilişkisi

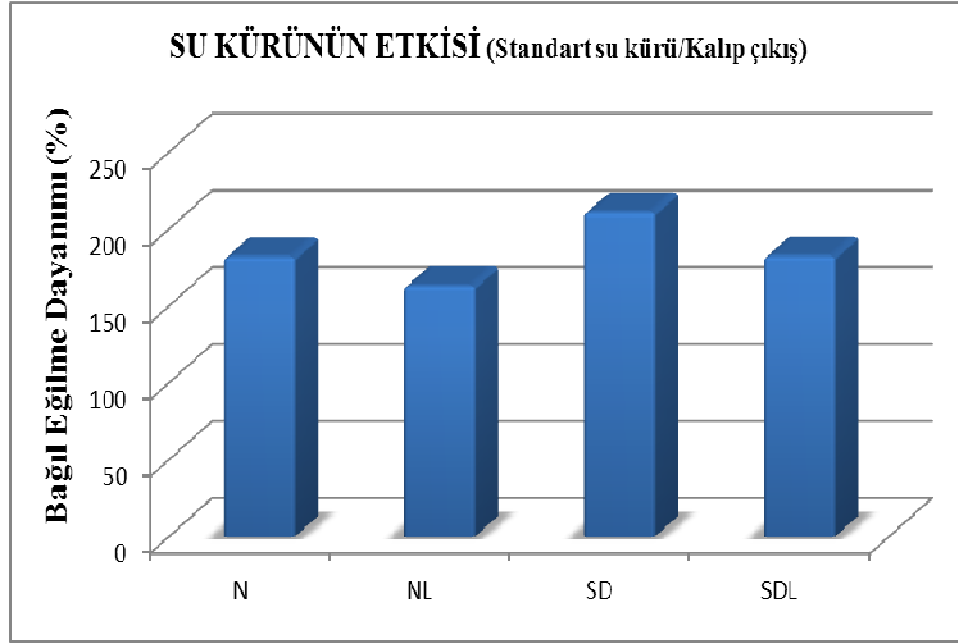
Şekil 6.8’de ise silis dumanı katkıli karışımlara, lif ilave edilmesiyle oluşan reaktif pudra betonlarının eğilme dayanımı grafiği verilmiştir. Karışımlar arasında en yüksek eğilme dayanımı değerlerini, silis dumanı ve çelik lif katkıli numuneler vermiştir.



Şekil 6.8 SDL kodlu serilerin farklı kür basınçlarında eğilme dayanımı – kür süresi ilişkisi

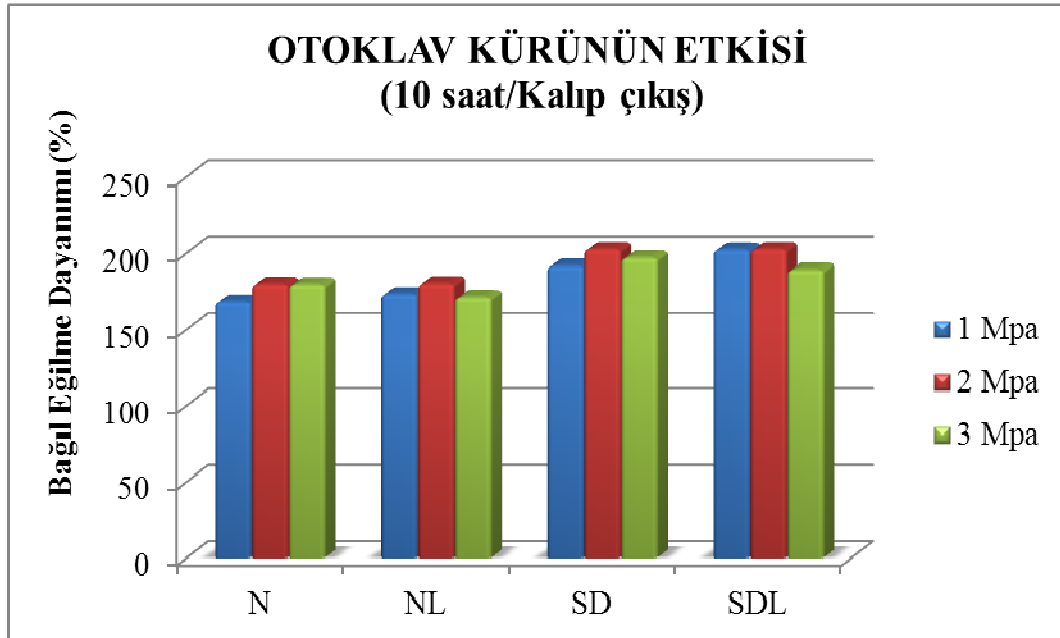
6.1 Eğilme Dayanımı Bağlı Grafikleri

Şekil 6.9’da su kürünün etkisini görmek amacıyla, su kürü eğilme dayanımlarının, kalıp çıkış eğilme dayanımlarına bölünmesiyle elde edilen bağlı dayanım grafiği verilmiştir. 28 günlük su kürü, örneklere % 50 ile % 100 aralığında, eğilme dayanımı artışı sağlamıştır.



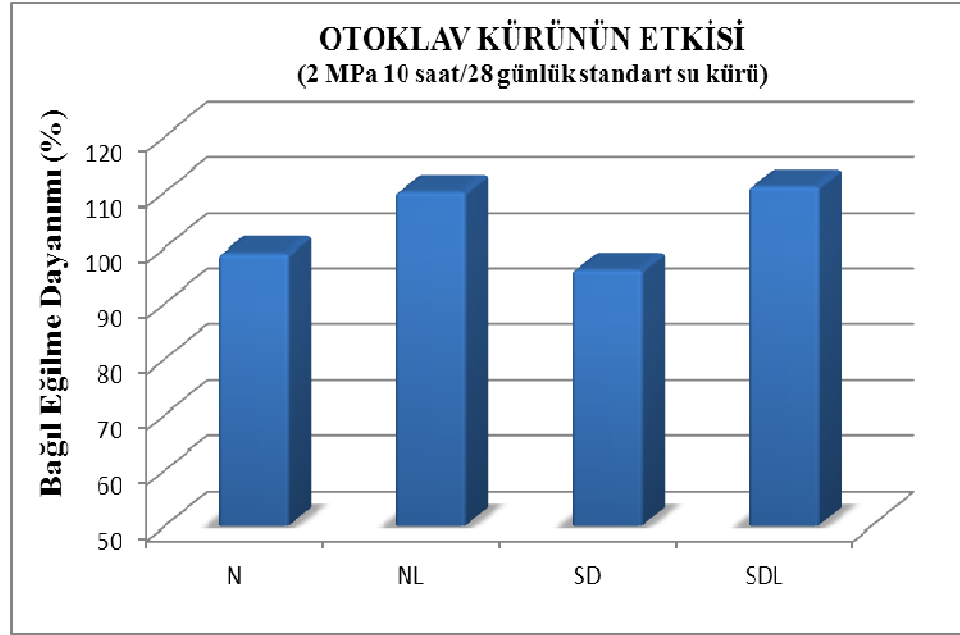
Şekil 6.9 Standart su kürünün kalıp çıkış dayanımına göre bağıl grafiği

Şekil 6.10'da, otoklavda en verimli kür süresinin kalıp çıkış dayanımlarına bölünmesiyle elde edilmiş otoklav kürü etkisinin şekli görülmektedir. Otoklav kürü serilere, % 68 ile % 102 arasında eğilme dayanımı artışı sağlamıştır.

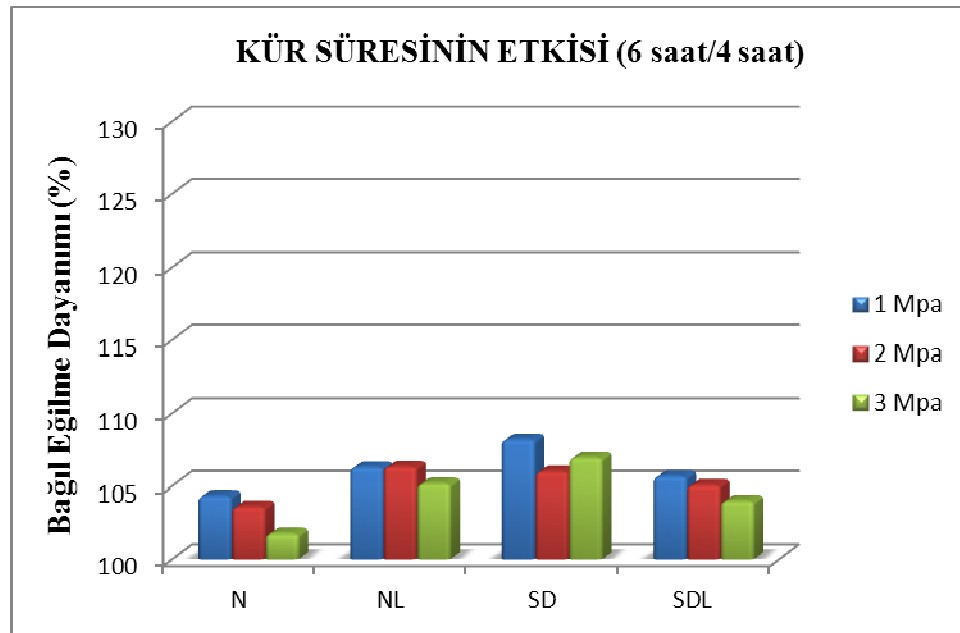


Şekil 6.10 Optimum otoklav süresinin (10 saat) kalıp çıkış dayanımına göre bağıl grafiği

Şekil 6.11’de 2 MPa kür basıncı altında 10 saat süreyle küre tabi tutulan numunelerin eğilme dayanımlarının, 28 günlük su kürüne tabi tutulan numunelerin eğilme dayanımıyla kıyaslanması görülmektedir. En verimli otoklav küründe su kürüyle kazanılan eğilme dayanımlarına erişilebildiği, ancak lifsiz numunelerde su kürüyle kazanılan eğilme dayanımlarına erişilemediği görülmüştür. Özellikle lifli karışımlarda, otoklav kürü ile su kürüne kıyasla % 8 - % 10 artış sağlanmıştır.

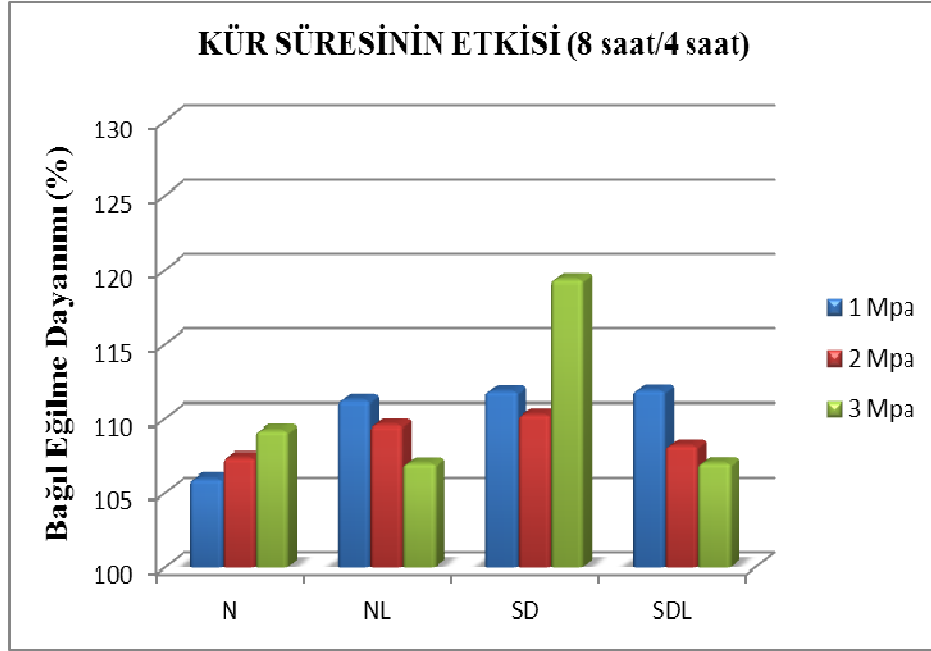


Şekil 6.11 Optimum otoklav kürünün (2 MPa – 10 saat) su kürüyle kıyaslanması

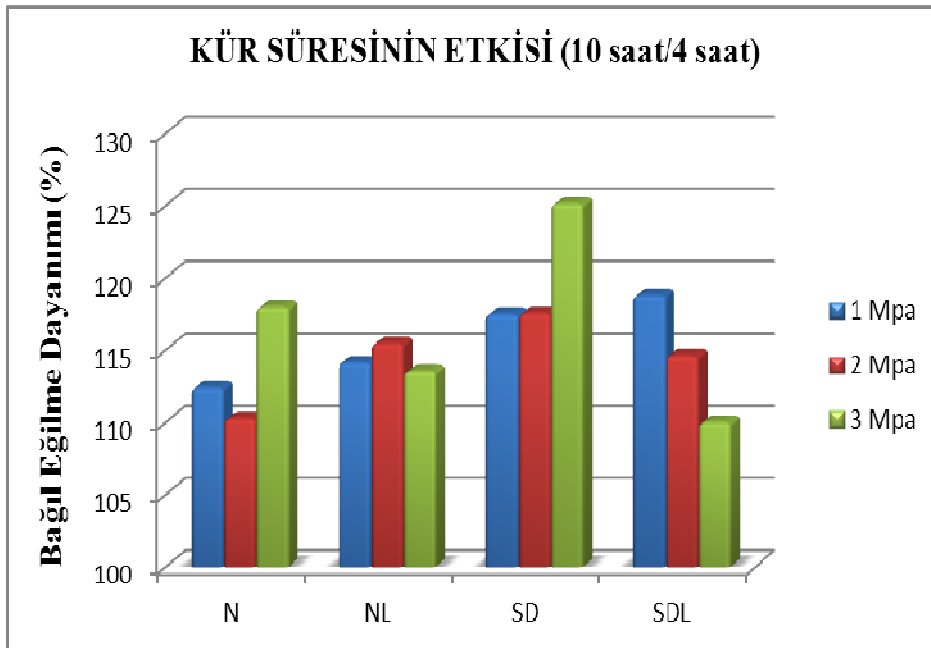


Şekil 6.12 Otoklavda 6 saatlik kür için bağlı dayanım grafiği

Kür süresinin etkisini gözlemek amacıyla, minimum kür süresi olan 4 saat baz alınarak, bağıl grafikler çizilmiştir. Şekil 6.12’de 6 saat küre tabi tutulan örneklerin eğilme dayanımları, 4 saatlik örneklerin eğilme dayanımlarına bölünerek elde edilmiş değerler gösterilmektedir. Şekil 6.12’de görüldüğü üzere, 6 saatlik kür 4 saatlik küre kıyasla eğilme dayanımlarında % 2 ile % 8 arasında artış sağlamıştır.

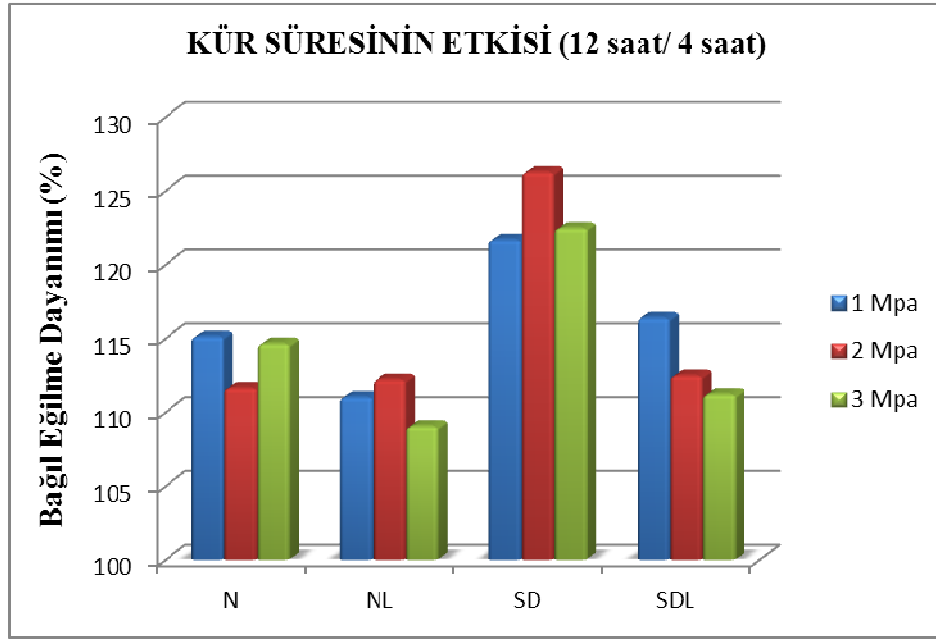


Şekil 6.13 Otoklavda 8 saatlik kür için bağıl dayanım grafiği

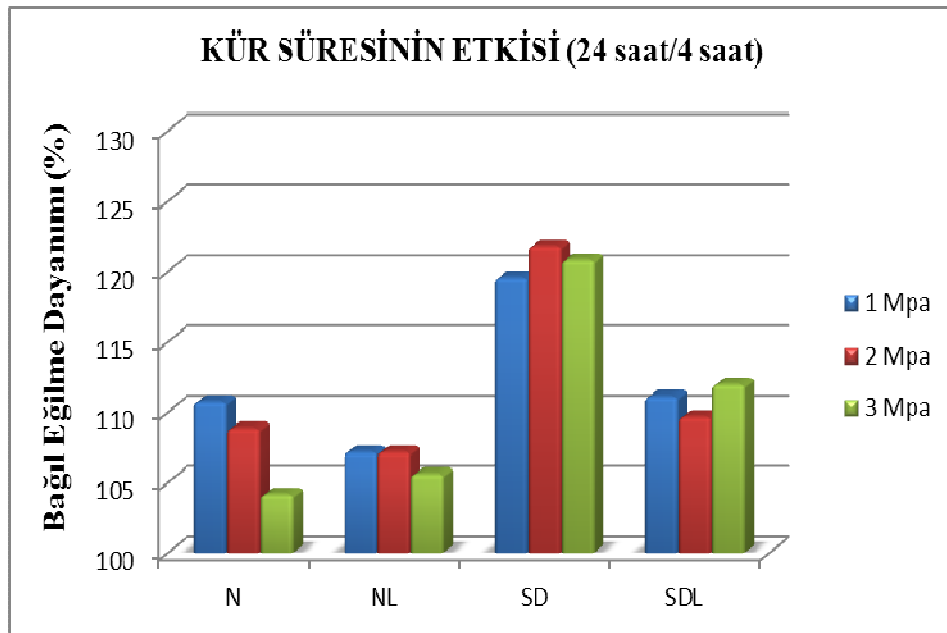


Şekil 6.14 Otoklavda 10 saatlik kür için bağıl dayanım grafiği

Şekil 6.13’de 8 saat kür edilmiş örneklerin 4 saat kür edilmiş örneklere göre bağıl değerleri görülmektedir. Bu kür eğilme dayanımlarında, % 6 ile % 19 arasında artış sağlamıştır. Şekil 6.14’de 10 saat kür edilmiş numunelerin eğilme dayanımındaki katkısı % 10 ile % 25 arasındadır. Şekil 6.15’de 12 saat kür edilmiş numunelerin eğilme dayanımındaki katkısı % 9 ile % 26 arasındadır.



Şekil 6.15 Otoklavda 12 saatlik kür için bağıl dayanım grafiği



Şekil 6.16 Otoklavda 24 saatlik kür için bağıl dayanım grafiği

Şekil 6.16'da 24 saat kür edilmiş numunelerin 4 saat kür edilmiş numunelere kıyasla eğilme dayanımında sağladığı artış % 4 ile % 22 arasındadır.

Şekil 6.17'de görüldüğü üzere farklı basınç ve kür sürelerindeki serilerin eğilme dayanımı genel tablosu verilmiştir. Genel tablodan da anlaşılacağı üzere 10 saatten fazla yapılan kür, eğilme dayanımında olumsuz etki yaratmaktadır. Ayrıca eğilme dayanımındaki en iyi performansı 2 MPa basınçta kür edilen örnekler vermiştir.

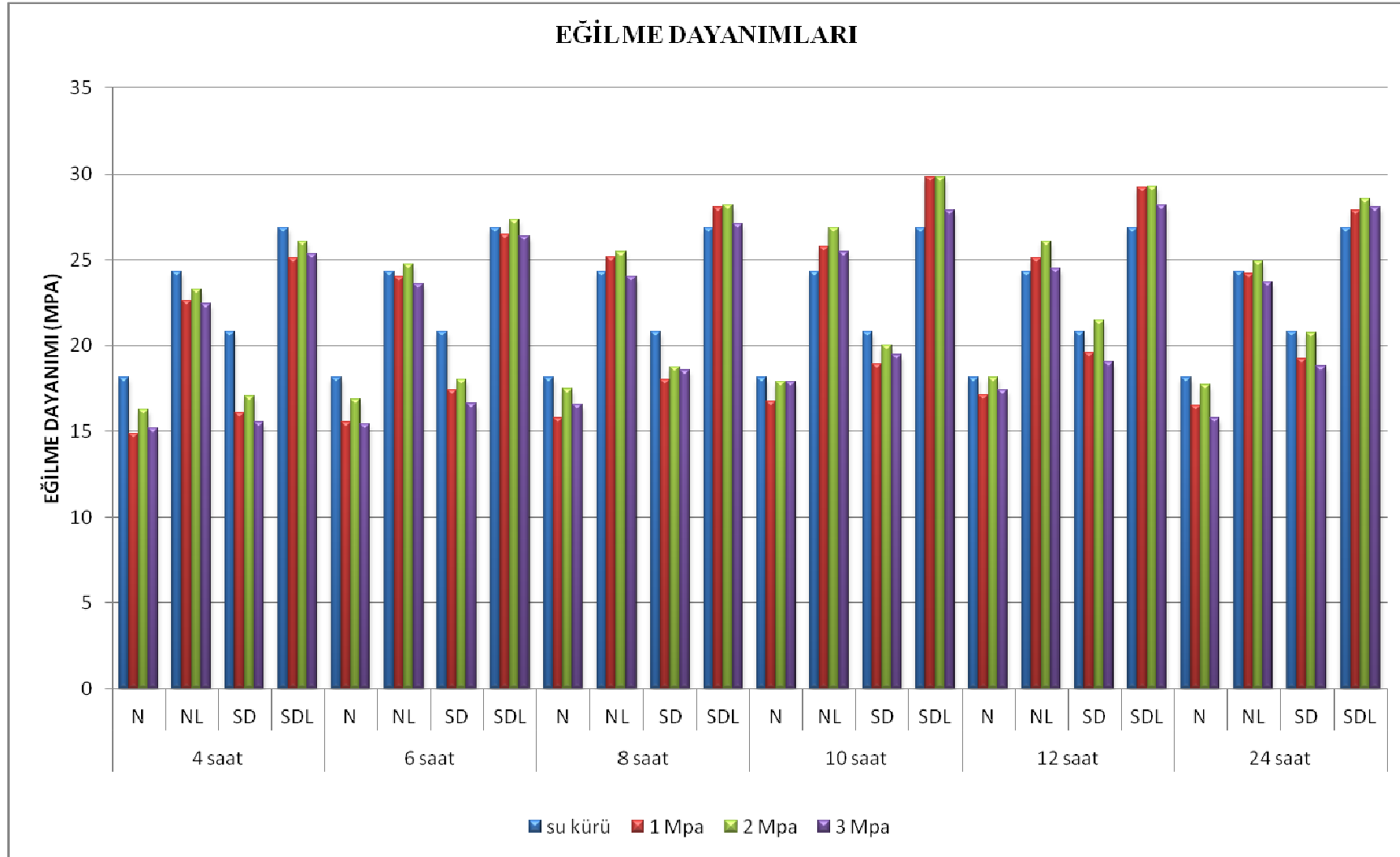
Şekil 6.18'de ise bu örneklerin kalıp çıkış örneklerine göre bağlı grafiği verilmektedir. Bu sonuçlar, kür süreleri sonunda eğilme deneyi ile elde edilen sonuçların, dökümden 16 saat sonra kalıptan alınan numunelerin eğilme dayanımına bölünmesiyle elde edilir. Şekil 6.17'den anlaşılacağı üzere, otoklav kürü örneklerle ortalama olarak % 49 - % 118 arasında, eğilme dayanımında artış sağlamıştır.

Şekil 6.19'da ise farklı basınç ve kür sürelerindeki numunelerin, 7 gün su kürüne tabi tutulmuş numunelere kıyasla bağlı grafiği verilmiştir. Otoklav kürüne tabi tutulan numuneler, 7 gün su kürüne tabi tutulmuş numunelere kıyasla, ortalama olarak 1 MPa için % 12 - % 56, 2 MPa için % 19 - % 62 ve 3 MPa için % 9 - % 54 aralığında, daha fazla eğilme dayanımı kazanmıştır.

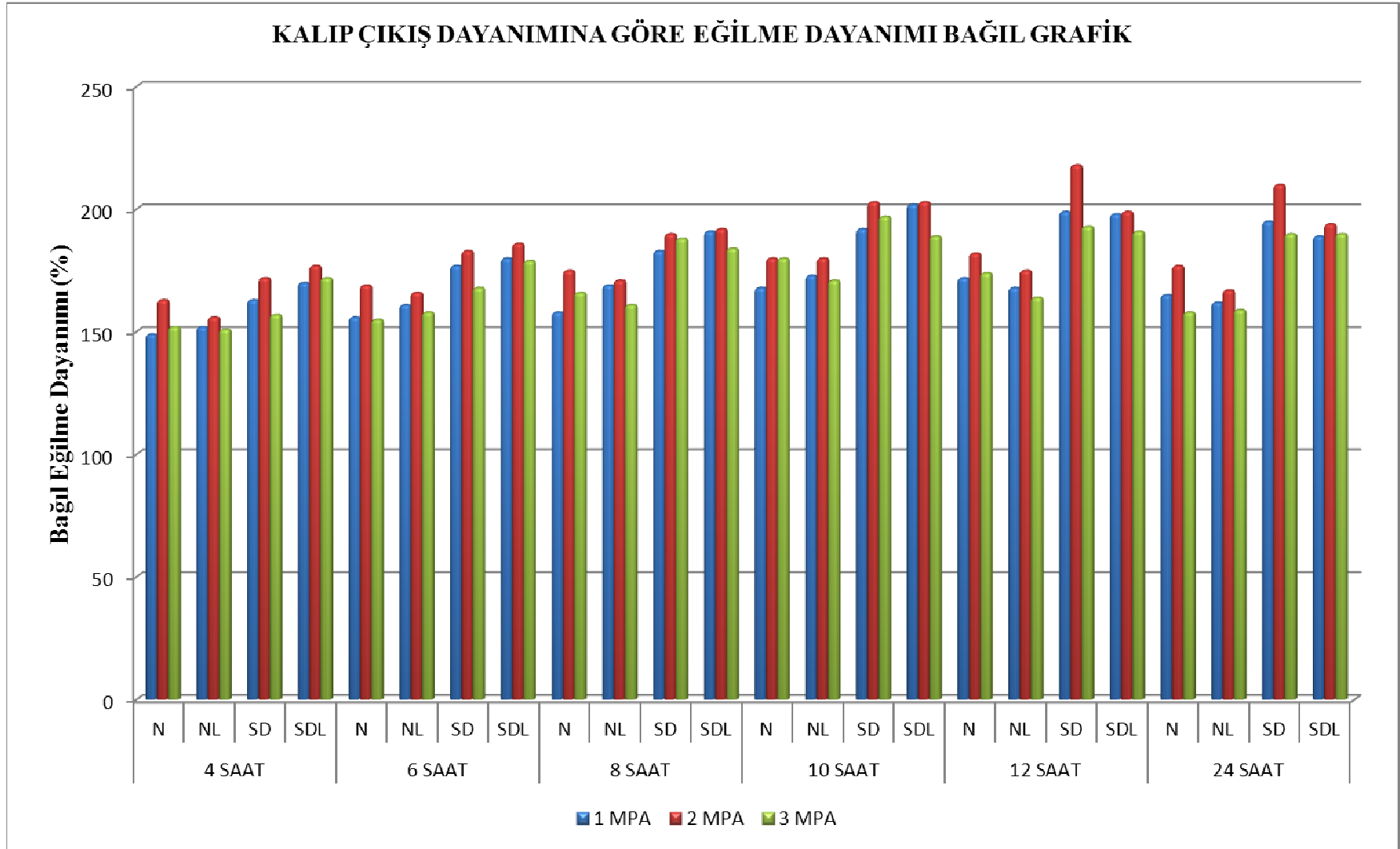
Şekil 6.20'de ise farklı basınç ve kür sürelerindeki örneklerin, 28 günlük su kürüne tabi tutulmuş örneklere kıyasla bağlı grafiği verilmiştir. Otoklav kürüne tabi tutulmuş örnekler, 28 gün su kürüne tabi tutulmuş örneklere kıyasla, yaklaşık olarak aynı eğilme dayanımına sahiptir. Su kürünün, eğilme dayanımı üzerine etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 6.21'de, karışıma silis dumanı eklenmiş serilerin eklenmemiş serilerle kıyaslandığı görülmektedir. Silis dumanı katkısı, örneklere % 2 ile % 19 arasında eğilme dayanımı katkısı sağlamıştır.

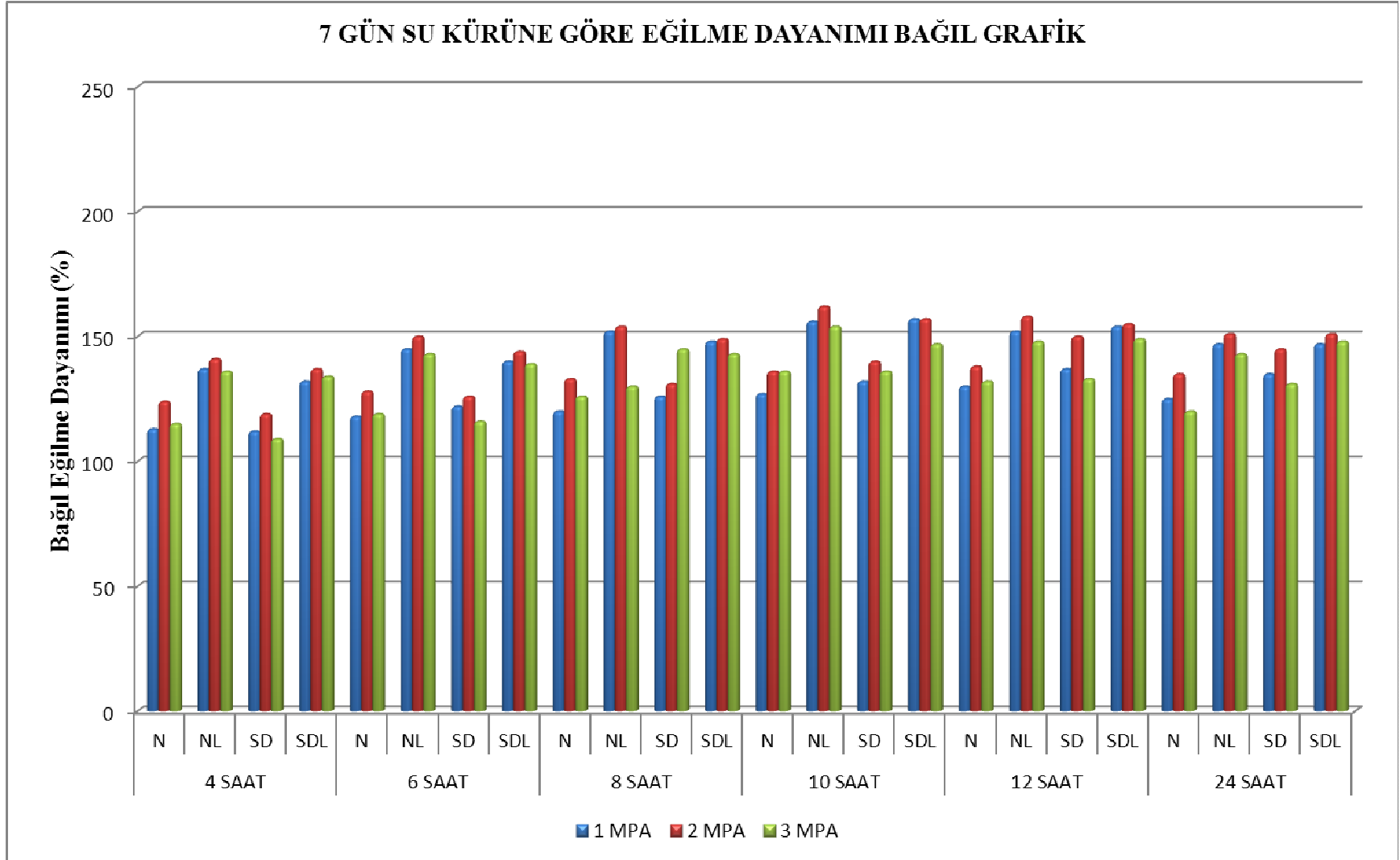
Şekil 6.22'de çelik lif katkısının etkisi görülmektedir. Çelik lifin eğilme dayanımına katkısı % 29 - % 63 arasındadır.



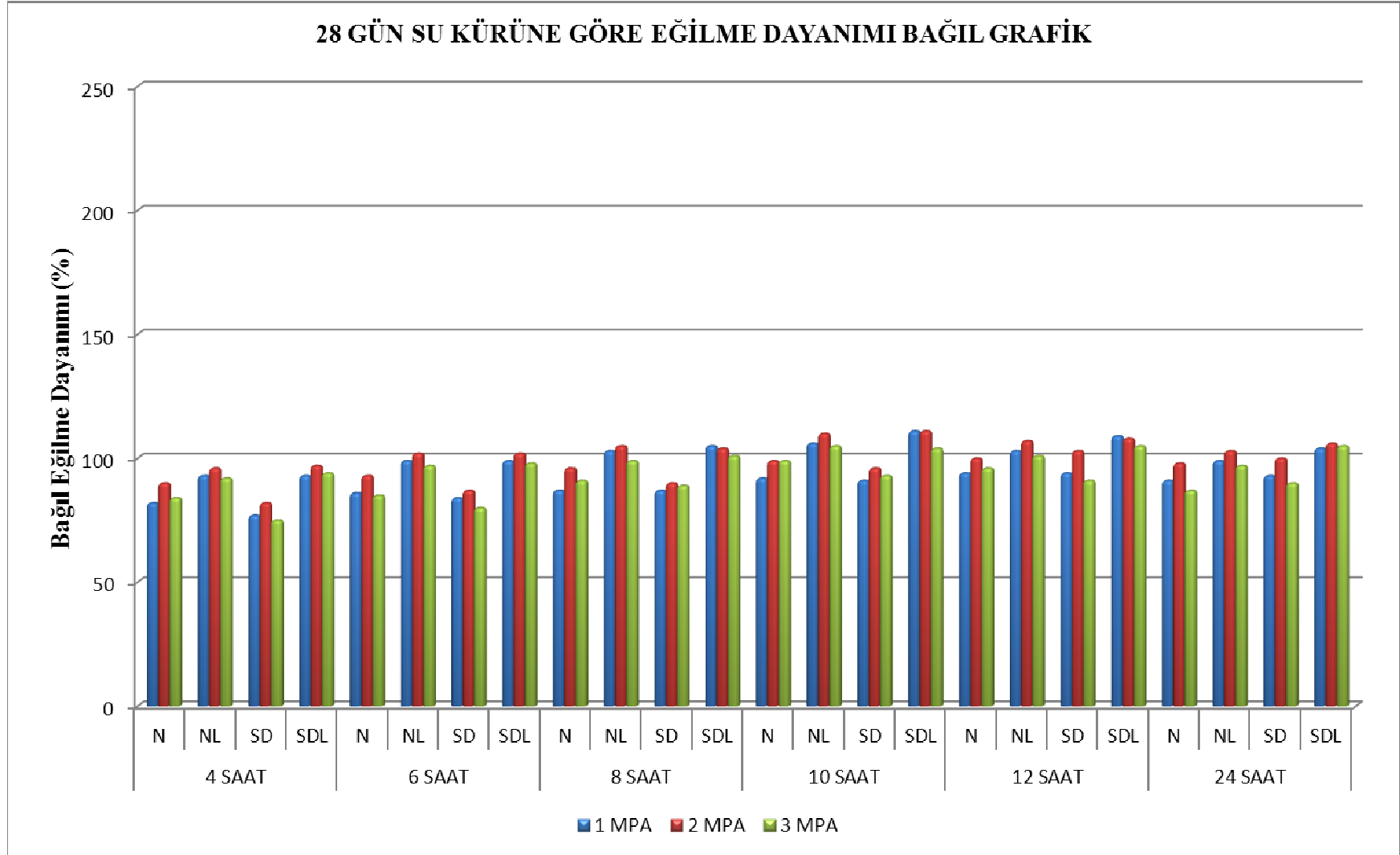
Şekil 6.17 Eğilme dayanımları genel grafik



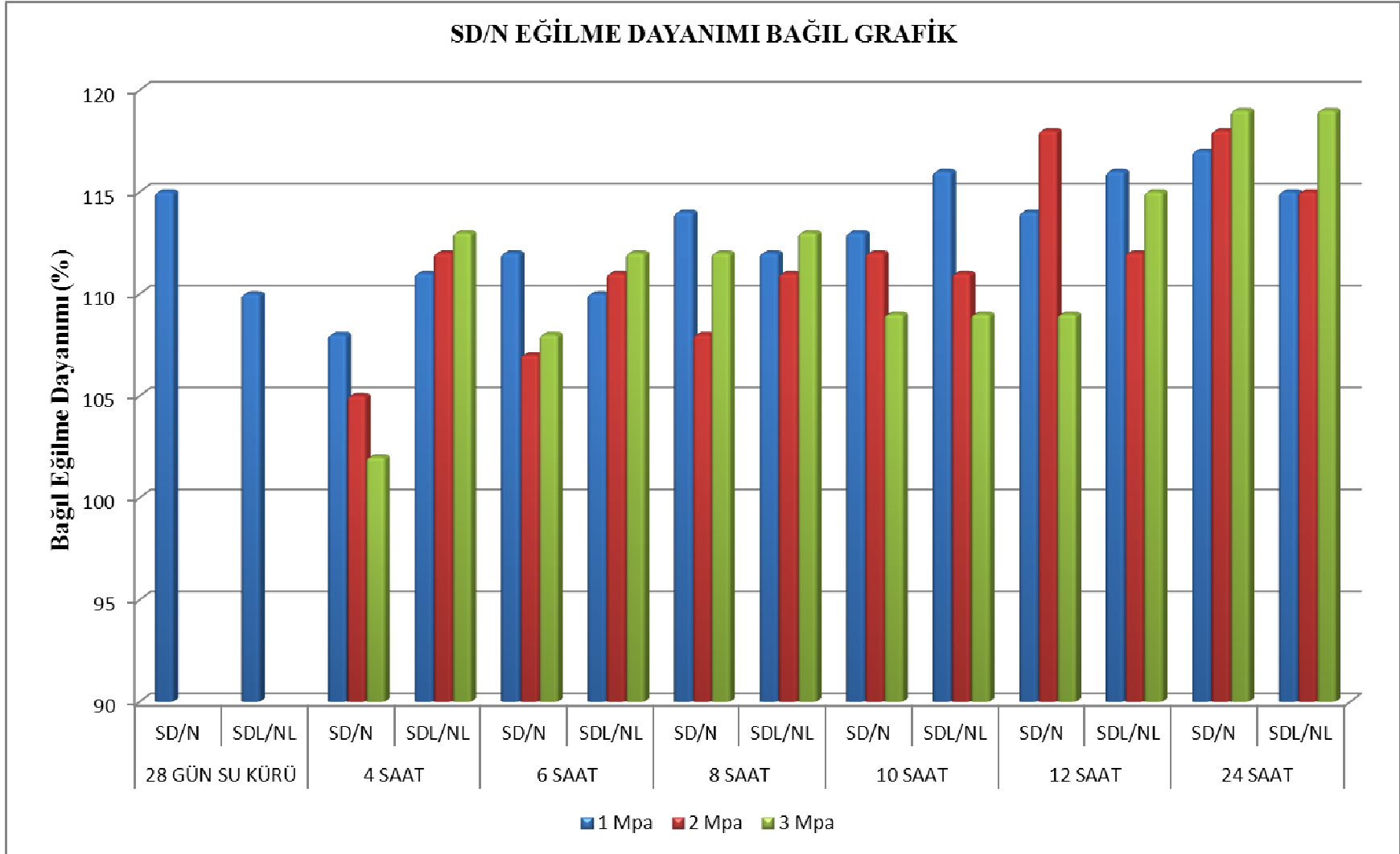
Şekil 6.18 Kalıp çıkış dayanımına göre bağıl dayanım grafiği



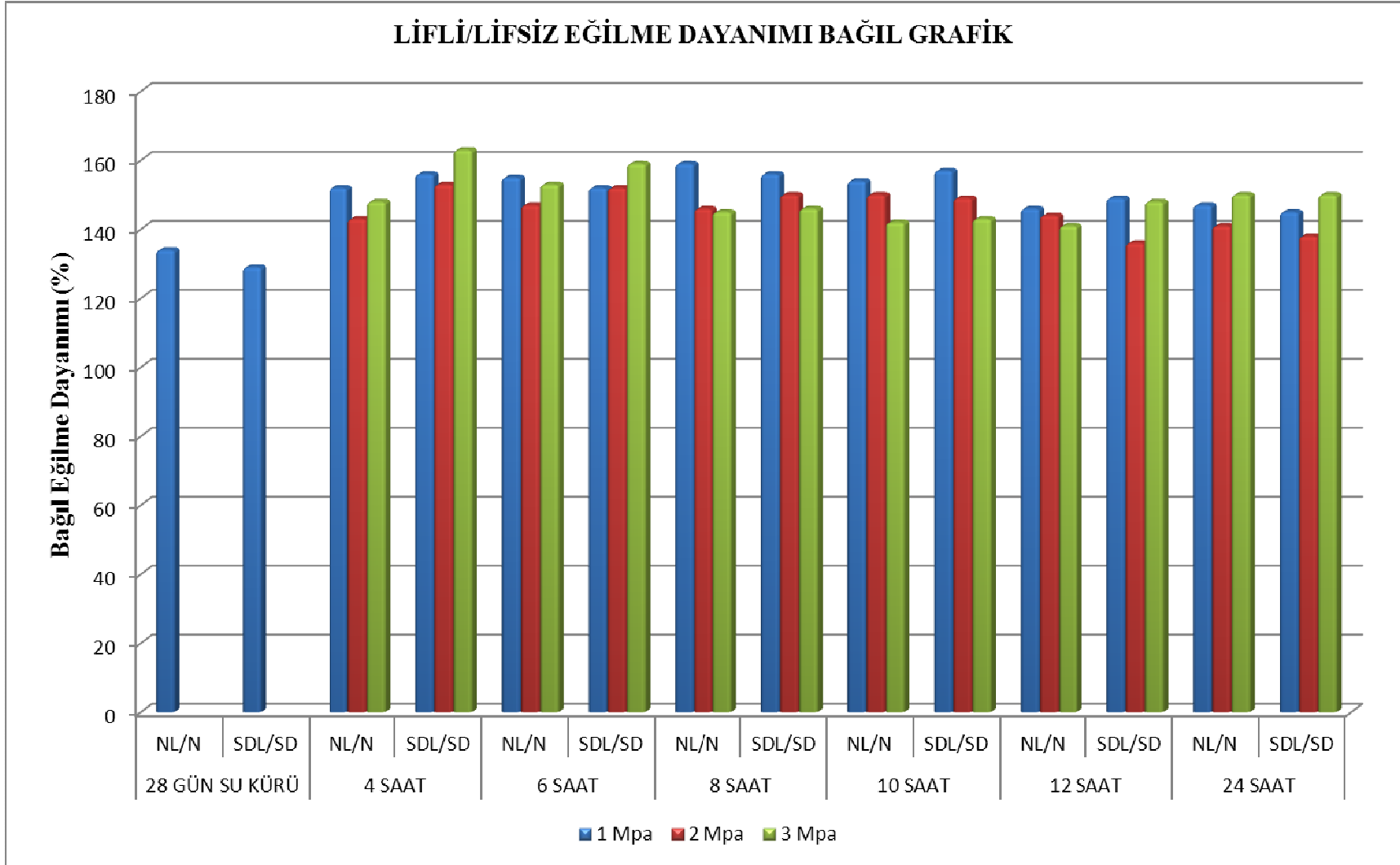
Şekil 6.19 Standart 7 günlük su kürüne göre bağıl dayanım grafiği



Şekil 6.20 Standart 28 günlük su kürüne göre bağıl dayanım grafiği



Şekil 6.21 Silis dumanı içeren numunelerin içermeyen numunelere göre bağıl dayanımı



Şekil 6.22 Çelik lif içeren numunelerin içermeyen numunelere göre bağıl dayanımı

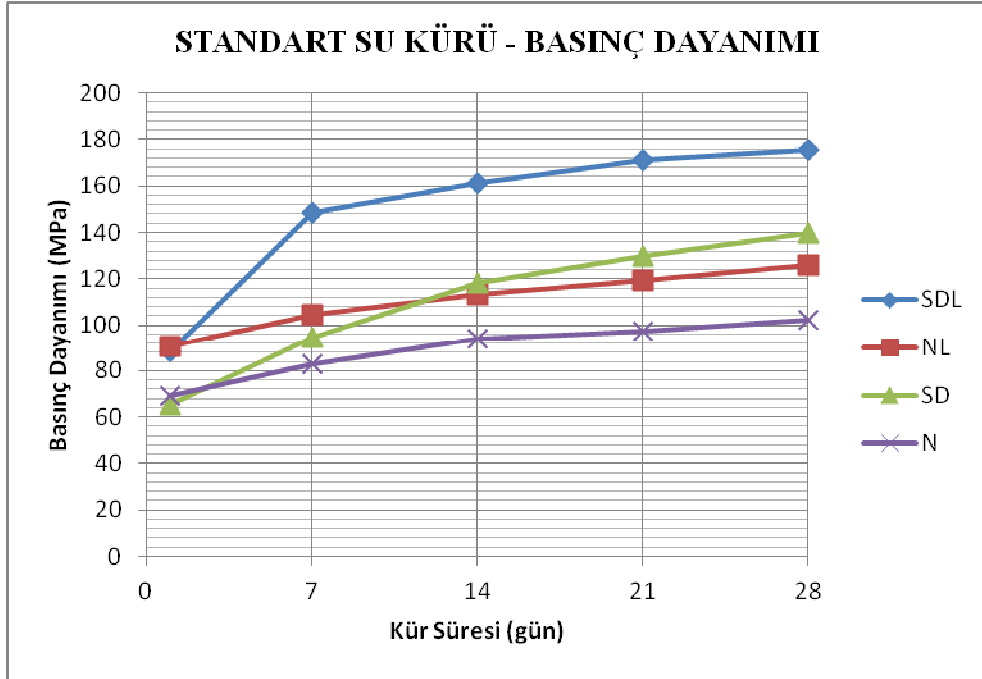
BÖLÜM YEDİ

RPB KARIŞIMLARININ BASINÇ DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

Bu bölümde, RPB'lerin basınç dayanımları incelenmiştir. Numunelere uygulanan tüm kür koşullarındaki basınç dayanımları Tablo 7.1'de gösterilmiştir.

Tablo 7.1 Basınç dayanım değerleri tablosu

Tip	Kür Süresi (saat)	BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)						
		OTOKLAV KÜRÜ (MPa)			SU KÜRÜ (Gün)			
		1	2	3	7	14	21	28
N	0	69,1	69,1	69,1	82,90	93,80	97,42	102,12
	4	133,4	138,7	142,5				
	6	138,76	141,66	145,58				
	8	140,36	145,76	147,38				
	10	142,74	148,3	149,78				
	12	135,72	141,78	143,96				
	24	128,46	135,04	138,92				
NL	0	90,44	90,44	90,44	104,48	113,38	119,38	125,72
	4	186,02	194,36	198,8				
	6	189,88	196,38	201,3				
	8	192,52	201,5	204,98				
	10	196,94	203,44	208,4				
	12	192,4	199,42	203,54				
	24	182,84	188,44	189,4				
SD	0	65,56	65,56	65,56	94,74	118,38	129,82	139,86
	4	159,52	165,92	171,34				
	6	164,9	170,44	174,94				
	8	167,78	174,92	179,08				
	10	169,92	178,16	183,76				
	12	161,96	171,22	173,9				
	24	152,1	163,86	164,06				
SDL	0	88,38	88,38	88,38	148,28	161,44	170,92	175,46
	4	230,56	244,48	252,22				
	6	235,96	247,88	256,46				
	8	239,84	250,6	261,86				
	10	244,2	256,64	265,74				
	12	238,66	248,26	256,32				
	24	227,22	238,46	245,02				

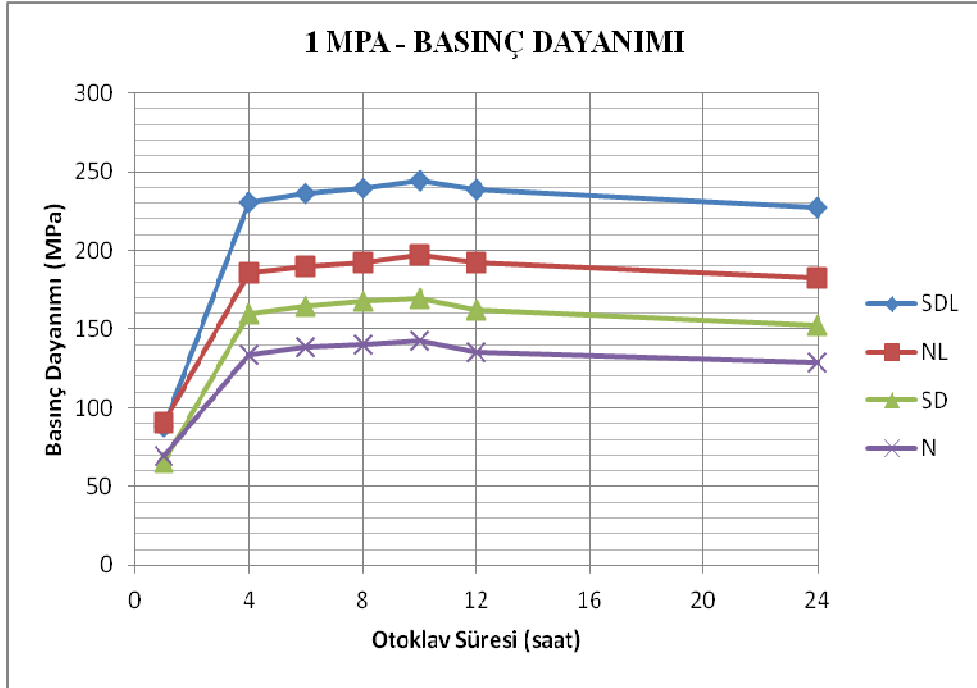


Şekil 7.1 Standart su kürüne tabi tutulan serilerin basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi

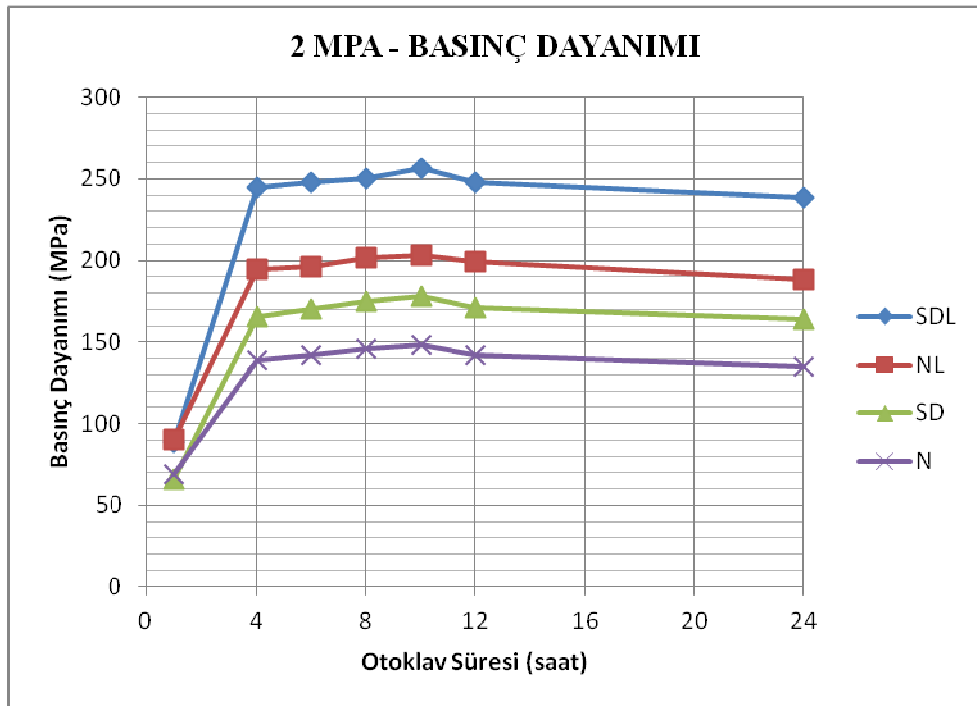
Su kürüne tabi tutulan örneklerin 7, 14, 21 ve 28'inci günlerdeki basınç dayanımları Şekil 7.1'de gösterilmiştir.

Şekil 7.1'de görüldüğü üzere, kalıptan alınan örneklerin basınç dayanımı 28 günlük su kürüyle birlikte çok yüksek mertebelere taşınmıştır. Silis dumanı ve çelik lif katkılı örneklerin kalıp çıkışı basınç dayanımları 89 MPa dolaylarındayken, 28 günlük su kürü sonucu basınç dayanımı 176 MPa dolaylarına yükselmiştir. Aynı şekilde sadece çimento bağlayıcılı serilerde kalıp çıkışı basınç dayanımı 69 MPa dolaylarında iken, 28 günlük su kürü sonucu bu değer 102 MPa dolaylarına yükselmiştir. Su kürünün silis dumanı içeren serilerde daha etkin olduğu Şekil 7.1'den anlaşılmaktadır.

Otoklav cihazında 1 MPa basınç altında 180°C'de kür edilen serilerin basınç dayanımının zamana bağlı değişimi Şekil 7.2'de verilmiştir. Otoklav kürünün kısa sürede ne kadar etkili olduğu, kalıp çıkışı numunelerine kazandırdığı basınç dayanımıyla görülmektedir.



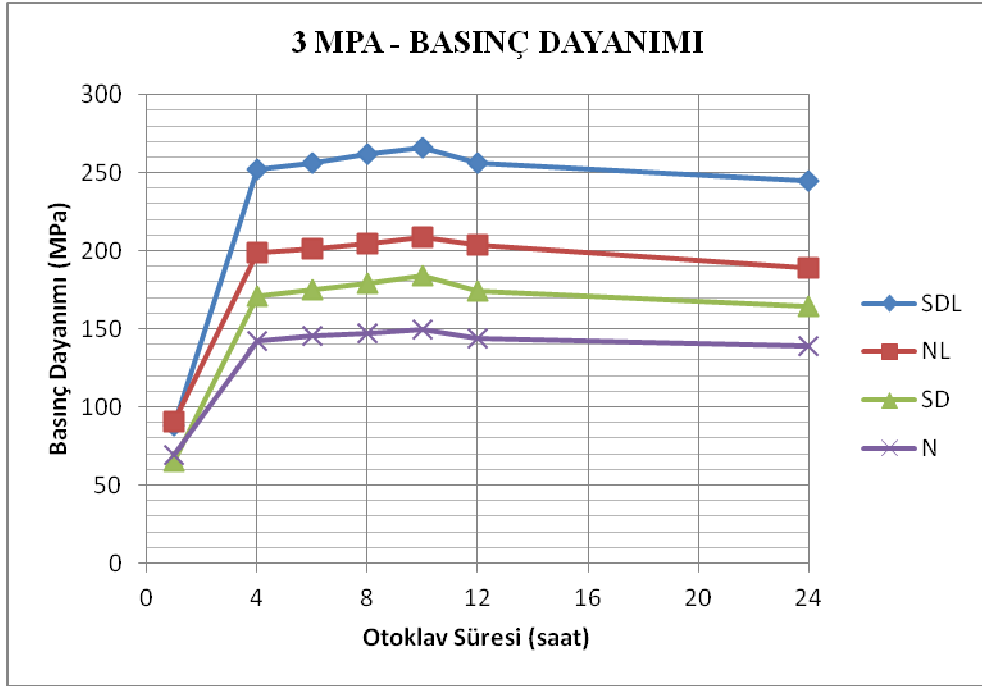
Şekil 7.2 Otoklavda 1 MPa basınçtaki serilerin basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi



Şekil 7.3 Otoklavda 2 MPa basınçtaki serilerin basınç dayanımı- kür süresi ilişkisi

Şekil 7.3'te 2 MPa basınçta ve 210°C'de kür edilen numunelerin basınç dayanımları ve Şekil 7.4'te, 3 MPa basınç altında ve 240°C'de kür edilen

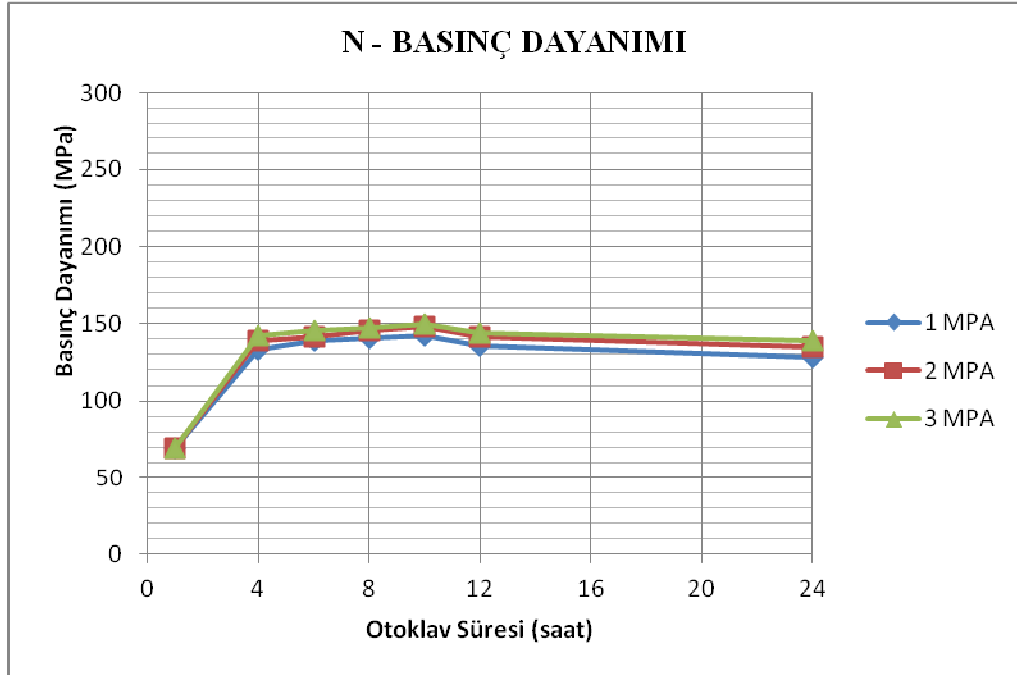
numunelerin basınç dayanım grafikleri verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere, basınç dayanımı zamanla artan bir grafik göstermiştir. Ancak belli bir süreden sonra basınç dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Bu süreden sonra uygulanan kür, tüm kür basınçlarında olumsuz etki yaratmaktadır. Uygulanan kür süreleri arasındaki en verimli sürenin, basınç dayanımında otoklav kürü için 10 saat olduğu belirlenmiştir. Kür basıncı arttıkça basınç dayanımında da artış gözlemlenmiştir.



Şekil 7.4 Otoklavda 3 MPa basınçtaki serilerin basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi

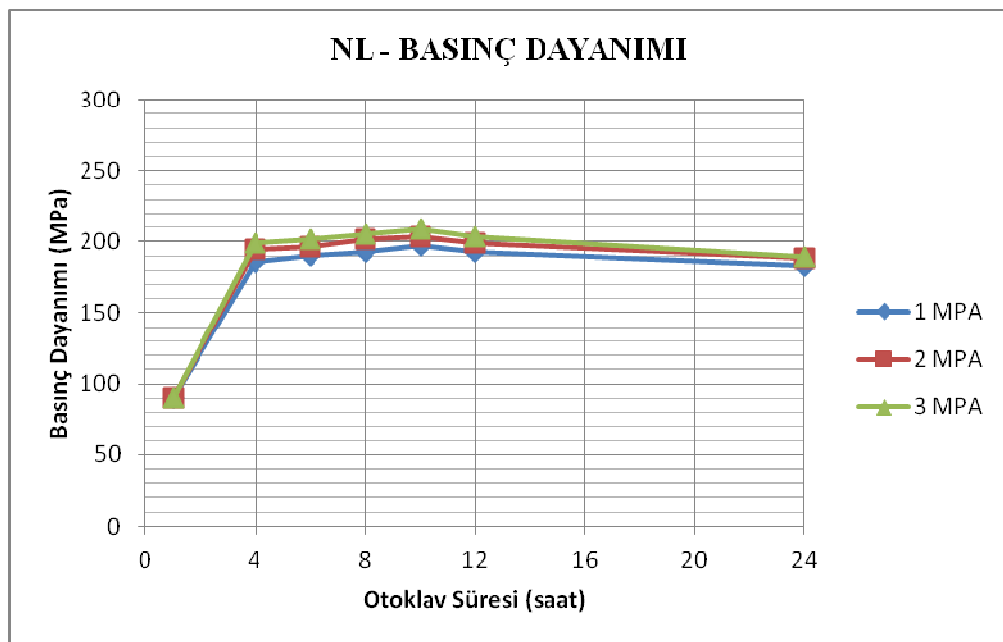
Otoklav küründe, 3 MPa en yüksek basınç dayanımı değerlerini, 2 MPa daha düşük basınç dayanımı değerlerini ve 1 MPa ise en düşük basınç dayanımı değerlerini vermiştir (Şekil 7.4). Eğilme dayanımında görülen sonuçların aksine, basınç dayanımlarında 3 MPa kür basıncında kür edilen numunelerin en yüksek dayanımı verdiği görülmüştür.

Karışımların farklı kür basınçlarındaki basınç dayanımları aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

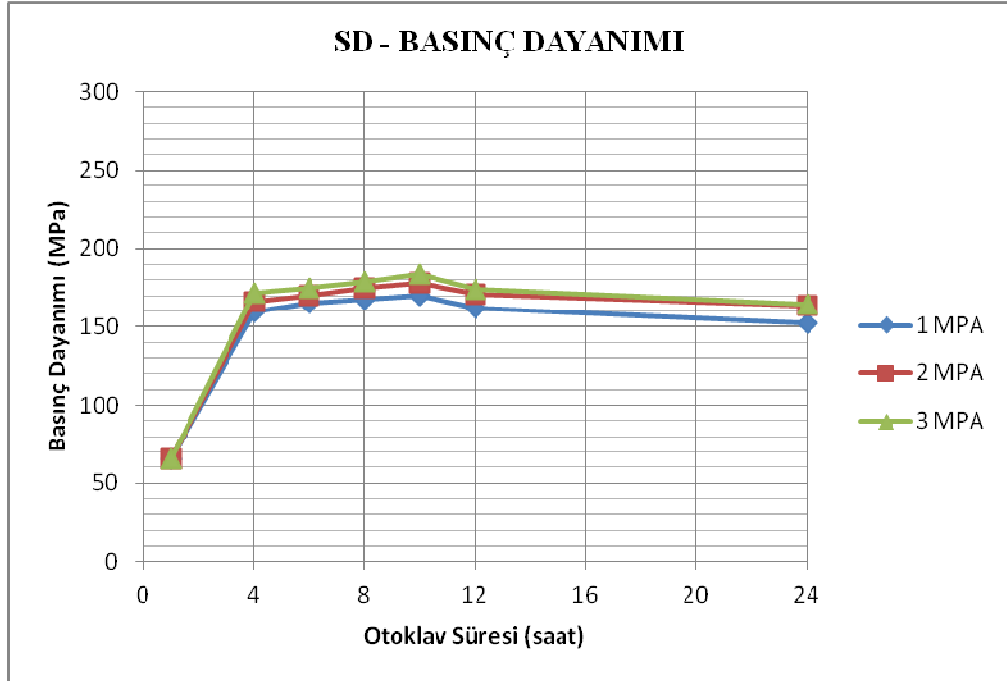


Şekil 7.5 N kodlu serilerin farklı kür basınçlarındaki basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi

Şekil 7.5’den görüldüğü üzere, bağlayıcı olarak sadece çimento içeren serilerin en verimli kür koşullarındaki basınç dayanımı 150 MPa mertebelerindeyken, bu karışımlara lif ilave edilmesiyle, basınç dayanımlarının 210 MPa dolaylarına çıktığı görülmüştür (Şekil 7.6).

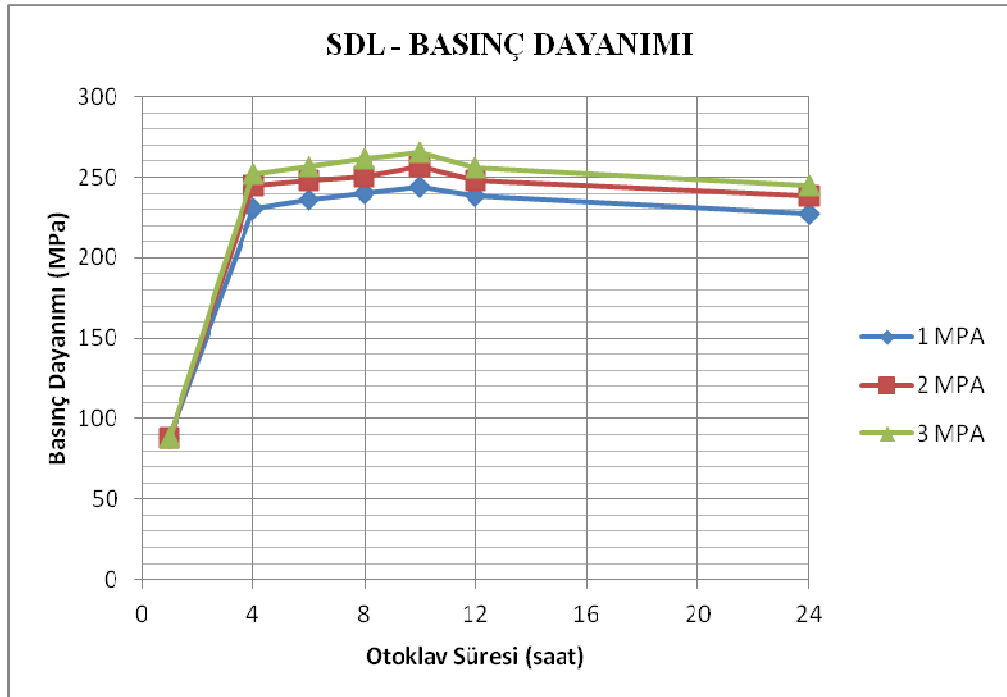


Şekil 7.6 NL kodlu serilerin farklı kür basınçlarındaki basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi



Şekil 7.7 SD kodlu serilerin farklı kür basınçlarındaki basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi

Şekil 7.7’de farklı basınç ve sürelerde kür edilmiş silis dumanı katkılı RPB’nin basınç dayanımı grafiği verilmiştir. Silis dumanı katkılı numuneler de en yüksek değeri 3 MPa basınç altındaki kürde optimum sürede (10 saat) vermiştir.

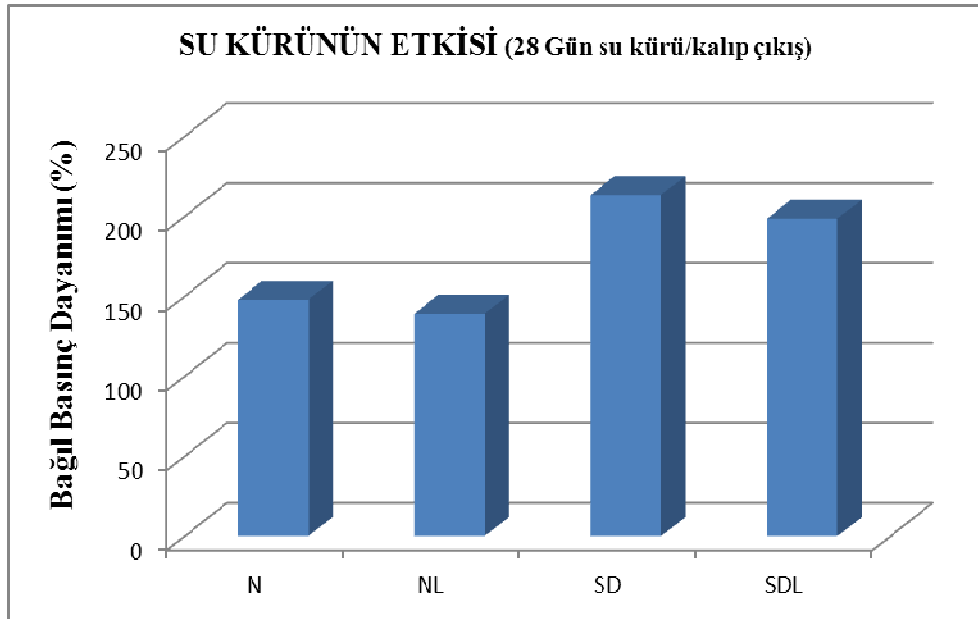


Şekil 7.8 SDL kodlu serilerin farklı kür basınçlarındaki basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi

Şekil 7.8’de silis dumanı katkılı karışımlara lif ilave edilmesiyle oluşan reaktif pudra betonlarının basınç dayanımı grafiği verilmiştir. Karışımlar arasında en yüksek basınç dayanımı değerlerini silis dumanı ve çelik lif katkılı seriler (SDL) vermiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri, 3 MPa kür altında 10 saatlik kür sonucu elde edilmiştir.

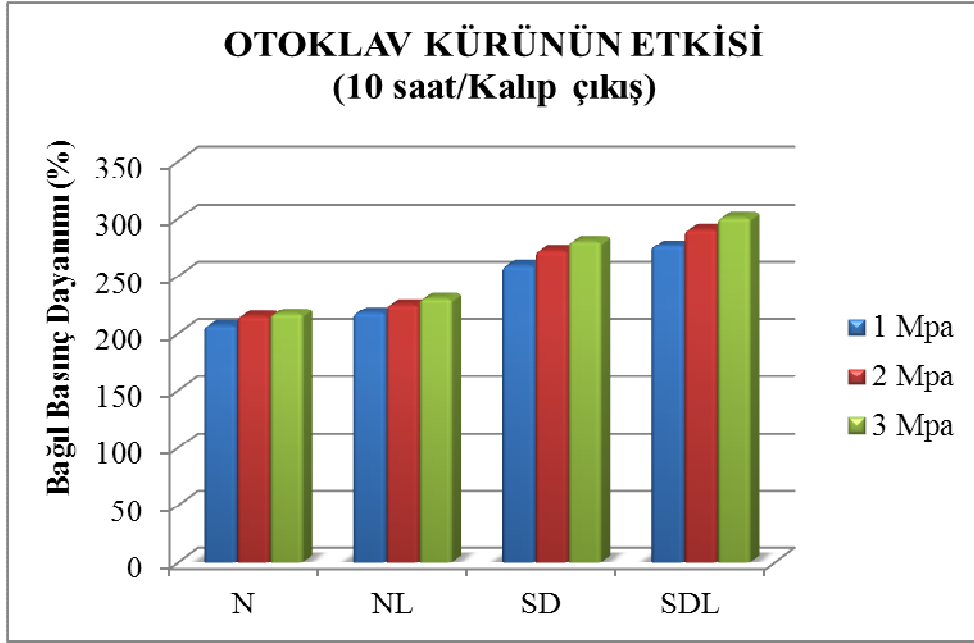
7.1 Basınç Dayanımı Bağlı Grafikleri

Şekil 7.9’da su kürünün etkisini görmek amacıyla, su kürü basınç dayanımlarının, kalıp çıkış basınç dayanımlarına bölünmesiyle elde edilen bağlı dayanım grafiği verilmiştir. Kalıp çıkış dayanımları, döküldükten 16 saat sonra kalıptan alınan örneklerin basınç dayanımlarıdır. Şekil 7.9’dan görüldüğü üzere 28 günlük su kürü örneklere % 39 ile % 113 arasında dayanım artışı sağlamıştır.



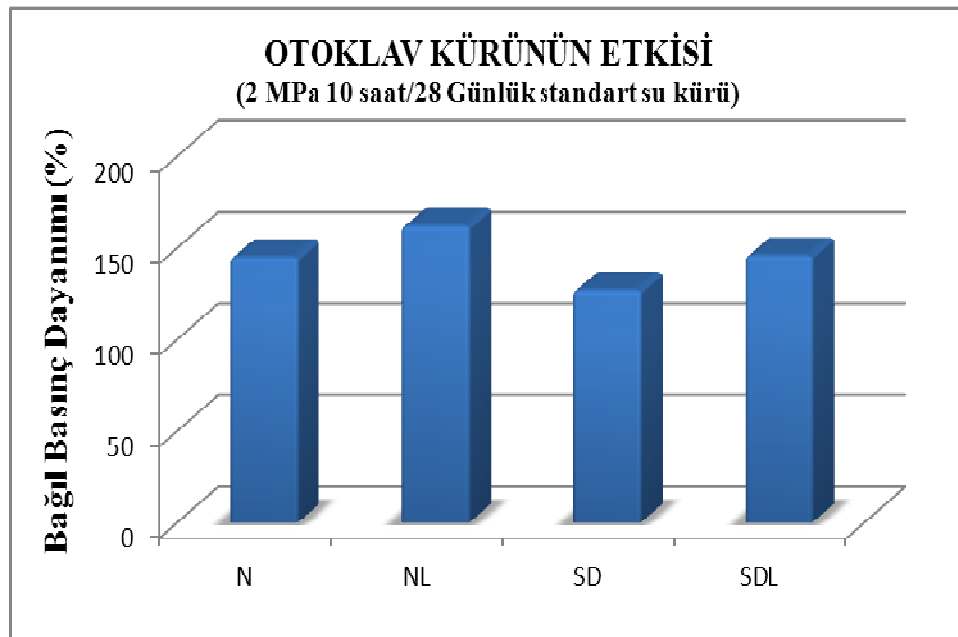
Şekil 7.9 Standart su kürü dayanımının kalıp çıkış dayanımına göre bağlı grafiği

Şekil 7.10’da, otoklavda en verimli kür süresinin kalıp çıkış dayanımlarına bölünmesiyle elde edilmiş otoklav kürü etkisinin şekli görülmektedir. Otoklav kürü serilere, % 107 ile % 201 arasında basınç dayanımı artışı sağlamıştır.



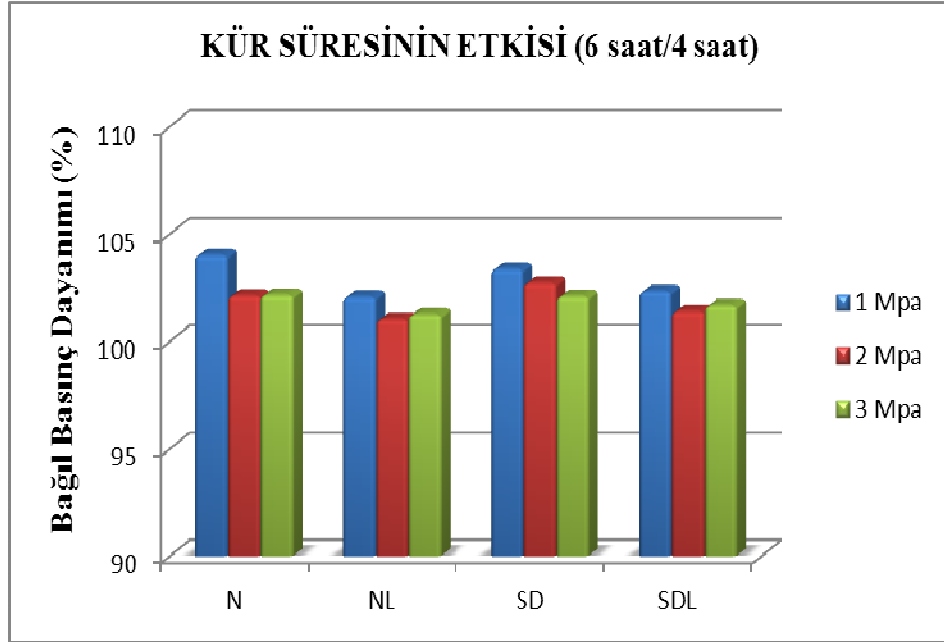
Şekil 7.10 Optimum otoklav süresinin (10 saat) kalıp çıkış dayanımına göre bağlı grafiği

Şekil 7.11’de ise, otoklavda 2 MPa kür basıncı altında 10 saat süreyle küre tabi tutulan örneklerin basınç dayanımlarının, 28 günlük su kürüne tabi tutulan örneklerin basınç dayanımıyla kıyaslanması görülmektedir. Eğilme dayanımlarının aksine, en verimli otoklav küründe, su kürüyle kazanılan basınç dayanımlarına kıyasla ortalama olarak % 27 ile % 62 arasında artış vardır. Otoklav kürünün su kürüne kıyasla basınç dayanımlarında daha etkili olduğu görülmektedir.

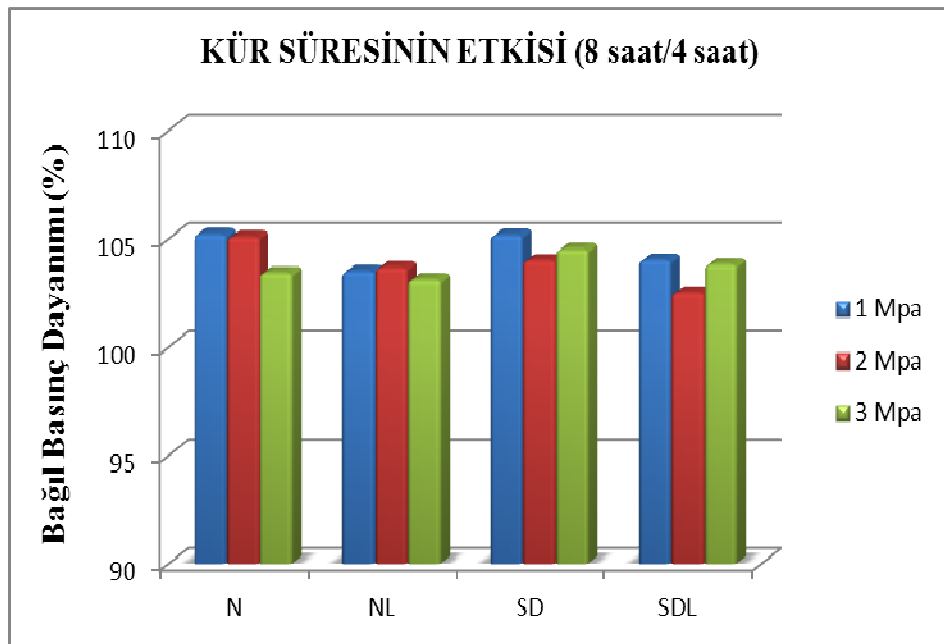


Şekil 7.11 Optimum otoklav kürünün (2 MPa – 10 saat) su kürüyle kıyaslanması

Kür süresinin etkisini gözlemlemek amacıyla, minimum kür süresi olan 4 saat baz alınarak, bağıl grafikler çizilmiştir. Şekil 7.12’de 6 saat kür tabii tutulan örneklerin basınç dayanımları, 4 saatlik örneklerin basınç dayanımlarına bölünerek elde edilen değerler gösterilmektedir. 6 saatlik kür, 4 saate kıyasla basınç dayanımında % 1 ile % 4 arasında bir artış sağlamıştır.

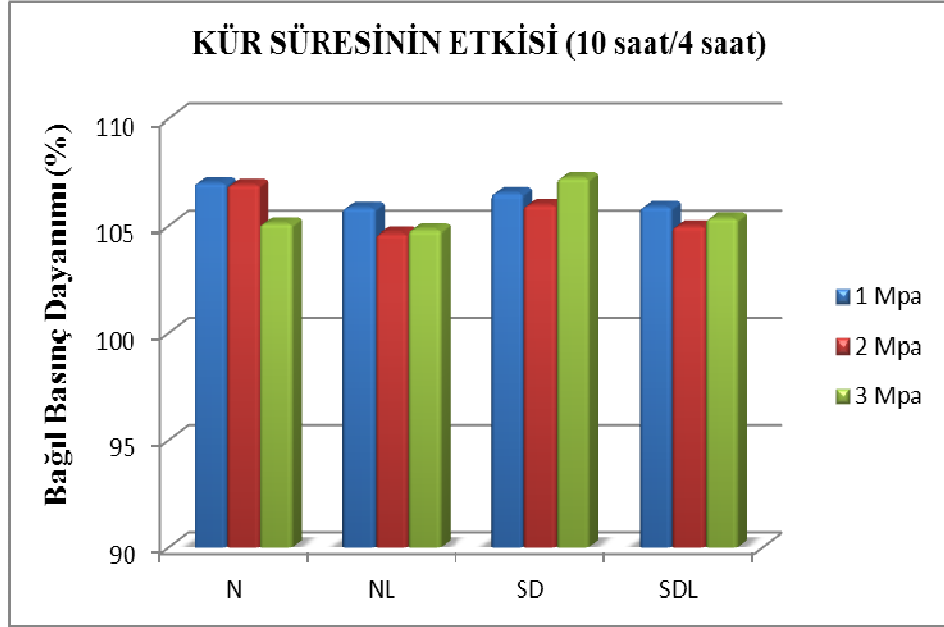


Şekil 7.12 Otoklavda 6 saatlik kür için bağıl dayanım grafiği



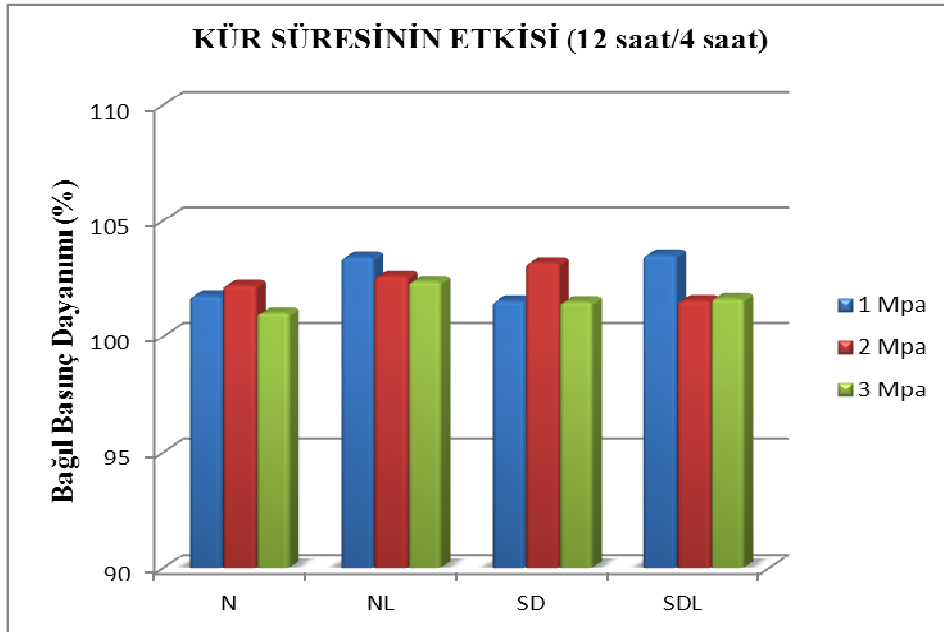
Şekil 7.13 Otoklavda 8 saatlik kür için bağıl dayanım grafiği

Şekil 7.13’de ise 8 saat kür edilmiş örneklerin 4 saat kür edilmiş örneklere göre bağıl değerleri görülmektedir. 8 saatlik kür, 4 saate kıyasla basınç dayanımında % 3 - % 5 arasında artış sağlamıştır.



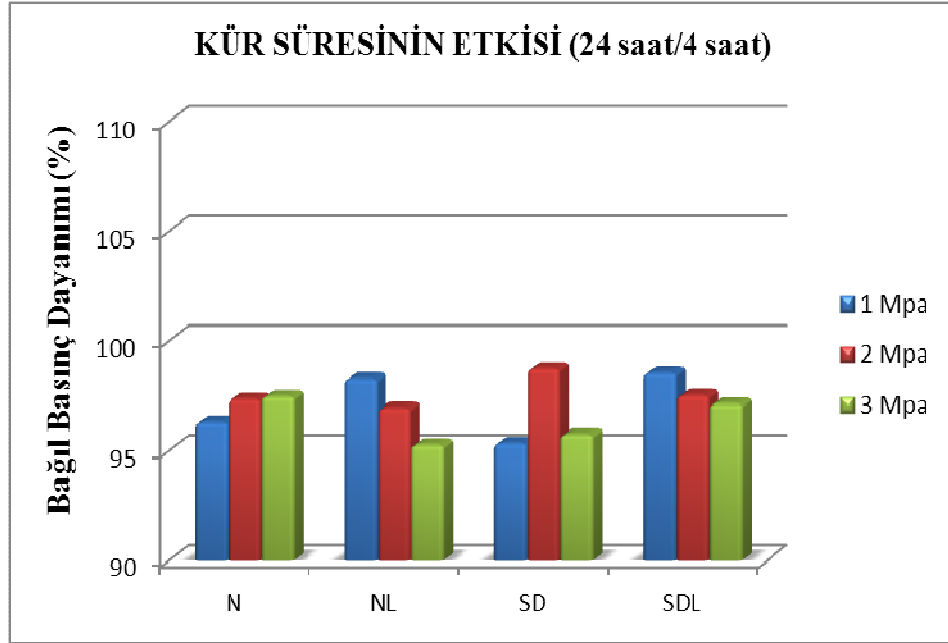
Şekil 7.14 Otoklavda 10 saat kür için bağıl dayanım grafiği

Şekil 7.14’den görüldüğü üzere, 10 saatlik kür süresinin 4 saatlik küre oranla basınç dayanımlarında % 5 - % 8 oranında artış sağlamıştır.



Şekil 7.15 Otoklavda 12 saat kür için bağıl dayanım grafiği

Şekil 7.15'deki grafikten 12 saatlik kür süresinin 4 saatlik küre kıyasla % 1 - % 4 arasında artış sağladığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.16'da ise 24 saatlik kür süresinin 4 saatlik kür süresine kıyasla basınç dayanımında % 1 ile % 5 arasında düşüş sağladığı görülmüştür.



Şekil 7.16 Otoklavda 24 saat kür için bağıl dayanım grafiği

Şekil 7.17'de görüldüğü üzere farklı basınç ve kür sürelerindeki serilerin basınç dayanımı genel tablosu verilmiştir. Genel tablodan da anlaşılacağı üzere 10 saatten fazla yapılan kür eğilme dayanımında olduğu gibi basınç dayanımında da olumsuz etki yaratmaktadır. Ayrıca basınç dayanımı için en iyi performansı 3 MPa basınçta kür edilen numuneler vermiştir.

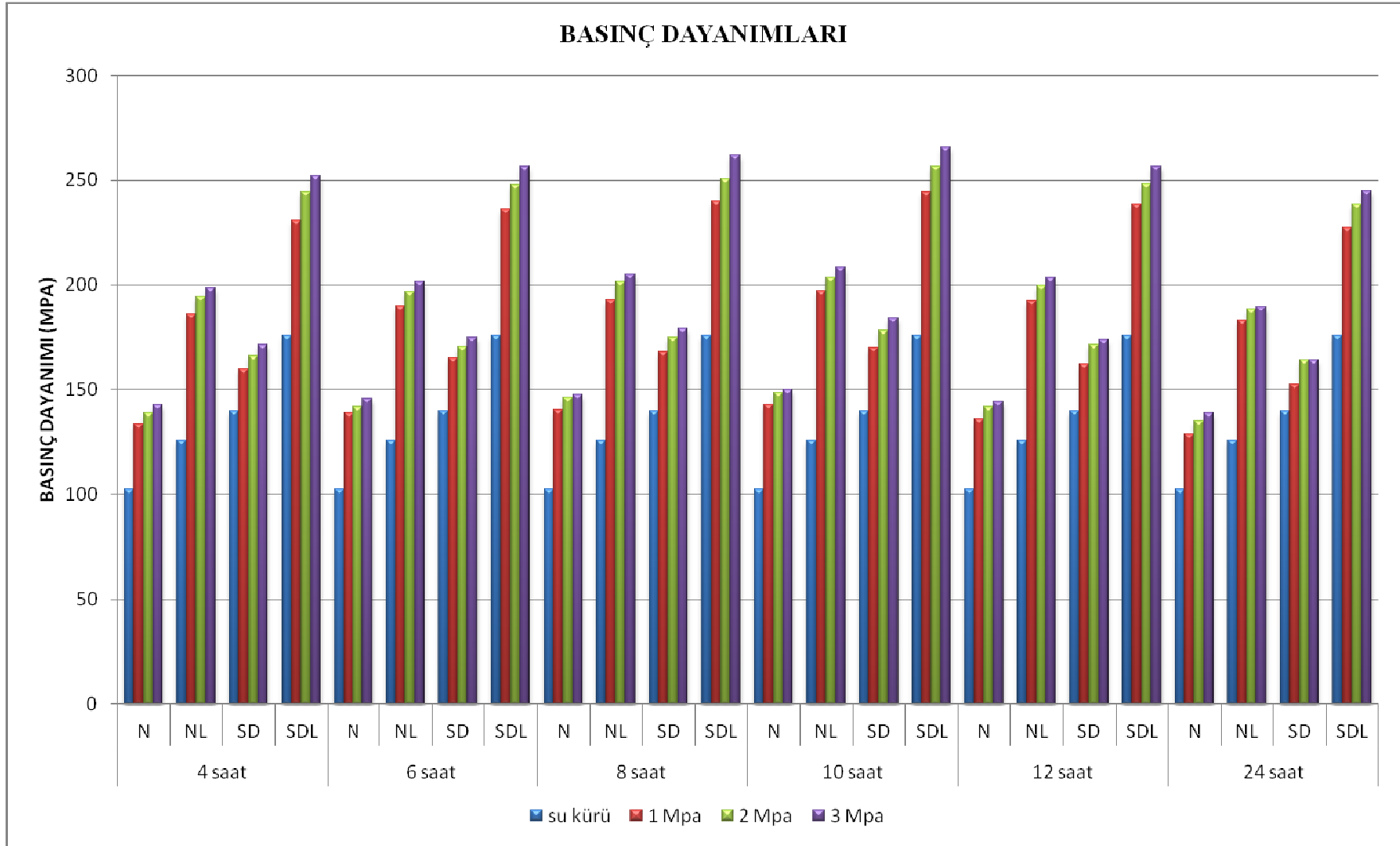
Şekil 7.18'de ise bu örneklerin kalıp çıkış örneklerine göre bağıl grafiği verilmektedir. Bu sonuçlar, kür süreleri sonunda basınç deneyi ile elde edilen sonuçların, dökümden 16 saat sonra kalıptan alınan numunelerin basınç dayanımına bölünmesiyle elde edilir. Şekil 7.18'den anlaşılacağı üzere, otoklav kürü örneklerle ortalama olarak 1 MPa için % 85 - % 176 arasında, 2 MPa için % 95 - % 190 arasında ve 3 MPa için % 101 - % 201 arasında basınç dayanımı artışı sağlamıştır.

Şekil 7.19'de ise farklı basınç ve kür sürelerindeki örneklerin, 7 gün su kürüne tabi tutulmuş örneklerle kıyasla bağlı grafiği verilmiştir. Otoklav kürüne tabi tutulan numuneler, 7 gün su kürüne tabi tutulmuş numunelere kıyasla, ortalama olarak % 55 - % 99 aralığında, daha fazla basınç dayanımı kazanmıştır.

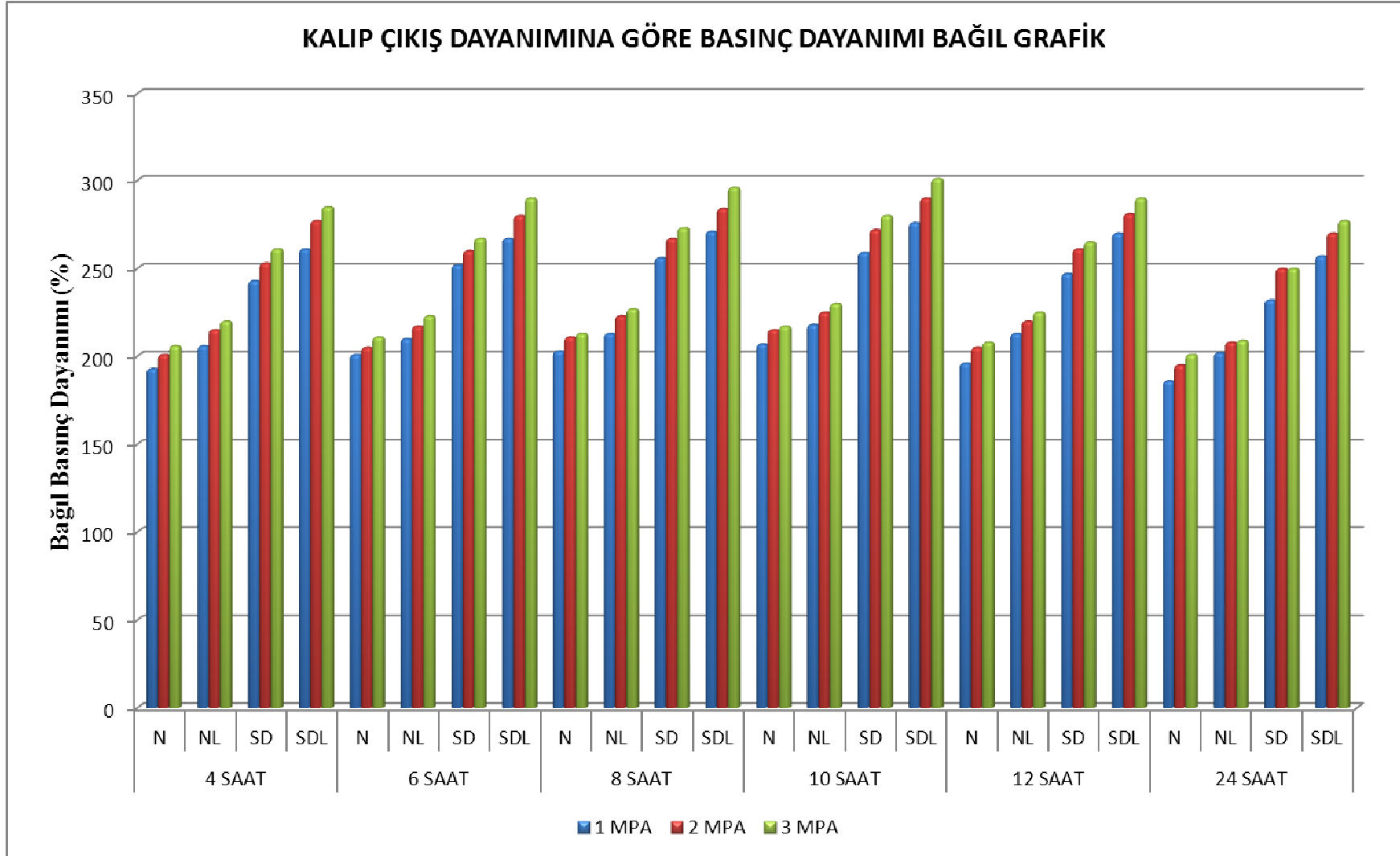
Şekil 7.20'da ise farklı basınç ve kür sürelerindeki numunelerin, 28 günlük su kürüne tabi tutulmuş numunelere kıyasla bağlı grafiği verilmiştir. Otoklav kürüne tabi tutulmuş numuneler, 28 gün su kürüne tabi tutulmuş numunelere kıyasla, yaklaşık olarak % 14 ile % 66 arasında, daha fazla basınç dayanımına sahiptir.

Şekil 7.21'de, karışıma silis dumanı eklenmiş serilerin, silis dumanı eklenmemiş serilerle kıyaslandığı görülmektedir. Silis dumanı katkısı, numunelerin örneklerin basınç dayanımına yaklaşık olarak % 18 - % 40 arasında katkı sağlamıştır.

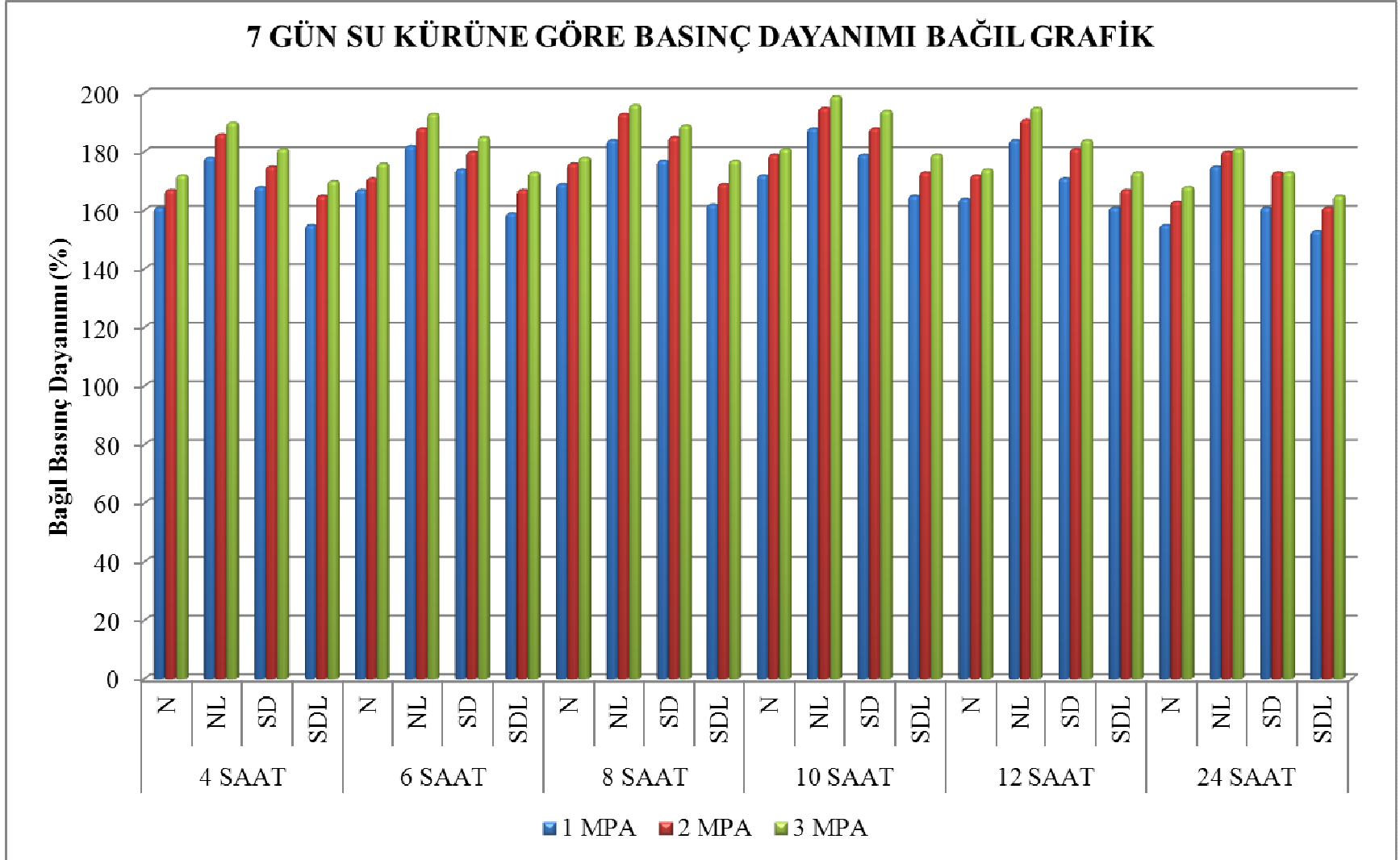
Şekil 7.22'de çelik lif katkısının etkisi görülmektedir. Çelik lifin basınç dayanımına katkısı, yaklaşık olarak % 23 ile % 49 arasındadır.



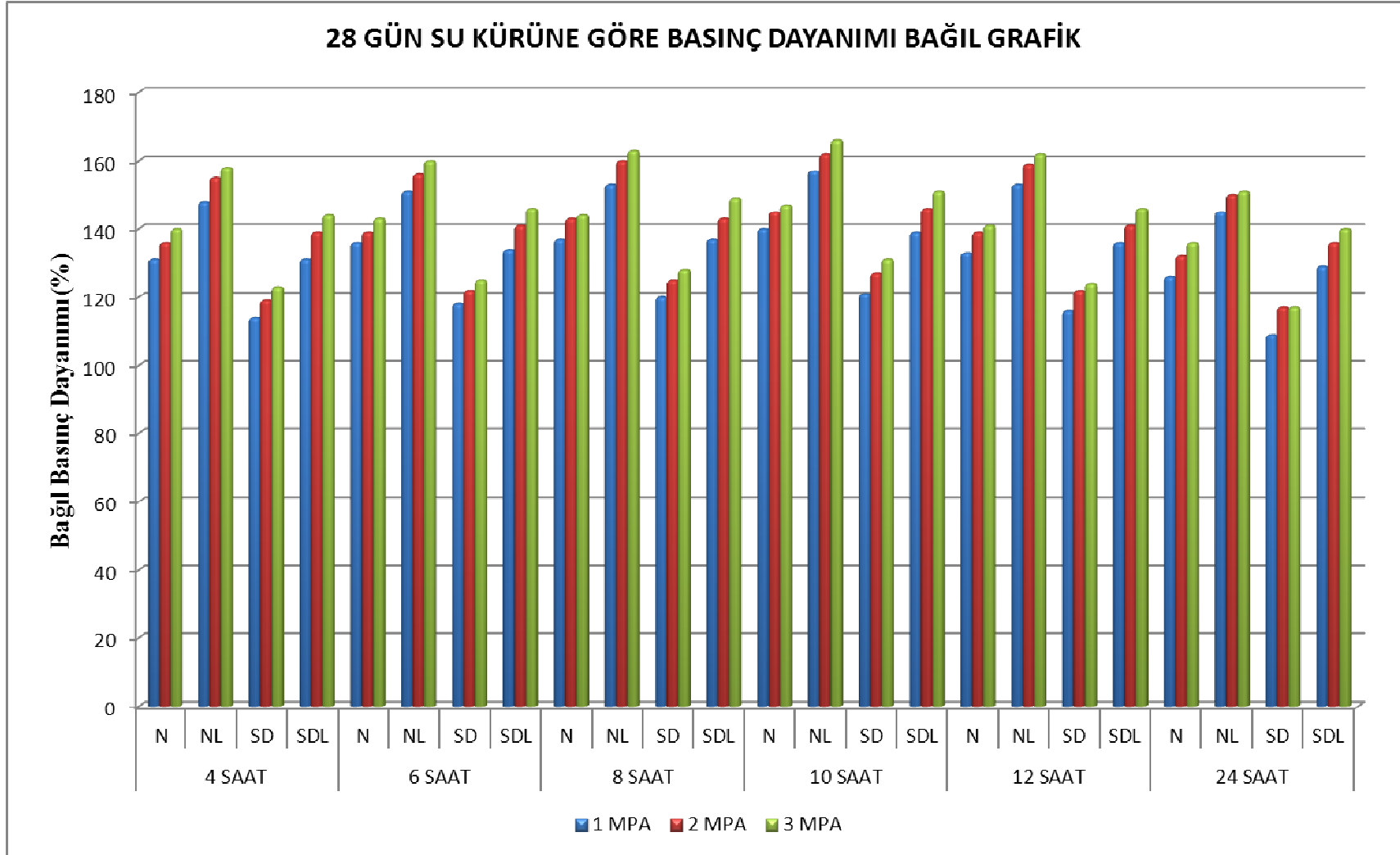
Şekil 7.17 Basınç dayanımları genel grafik



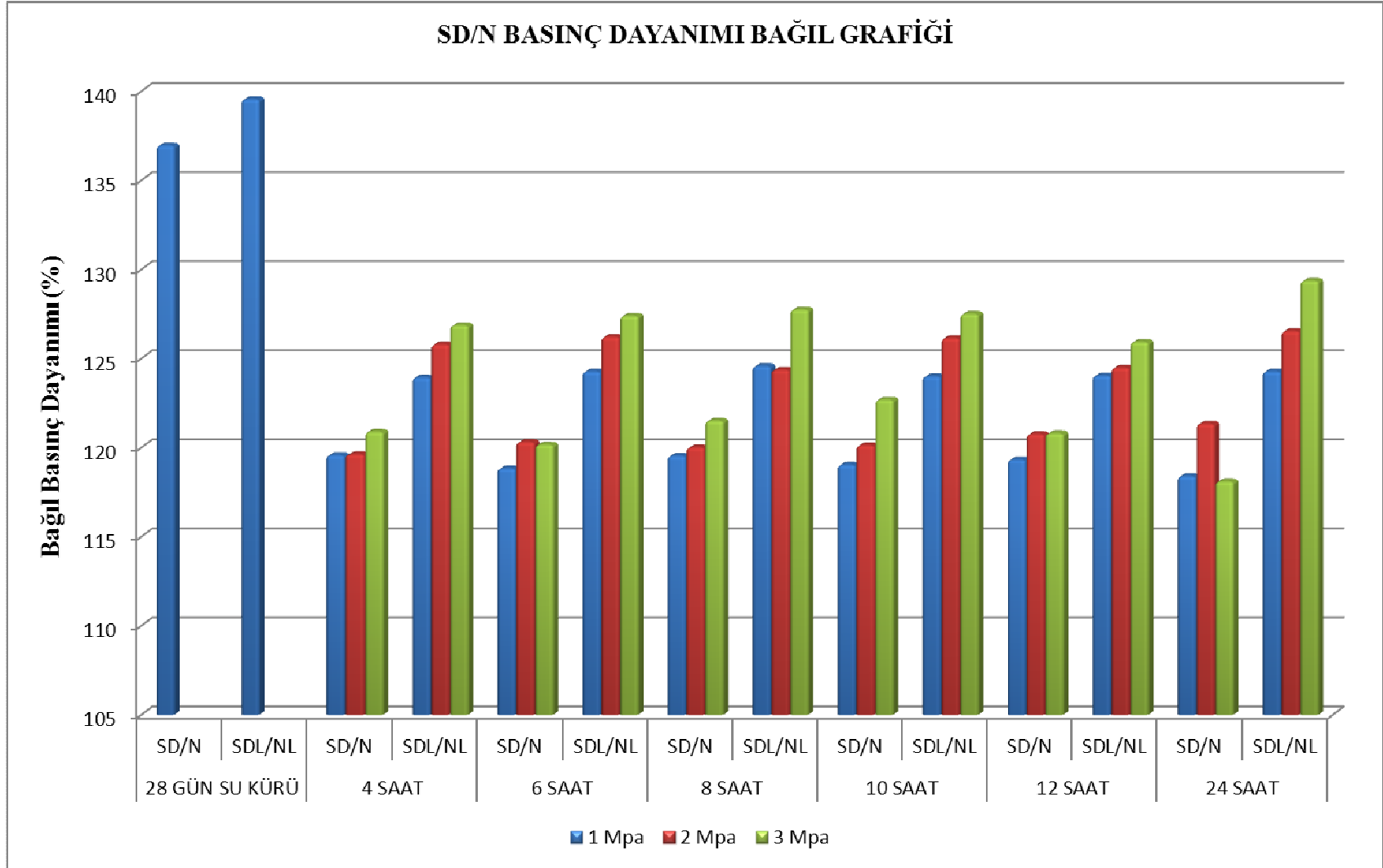
Şekil 7.18 Kalıp çıkış dayanımlarına göre bağıl dayanım grafiği



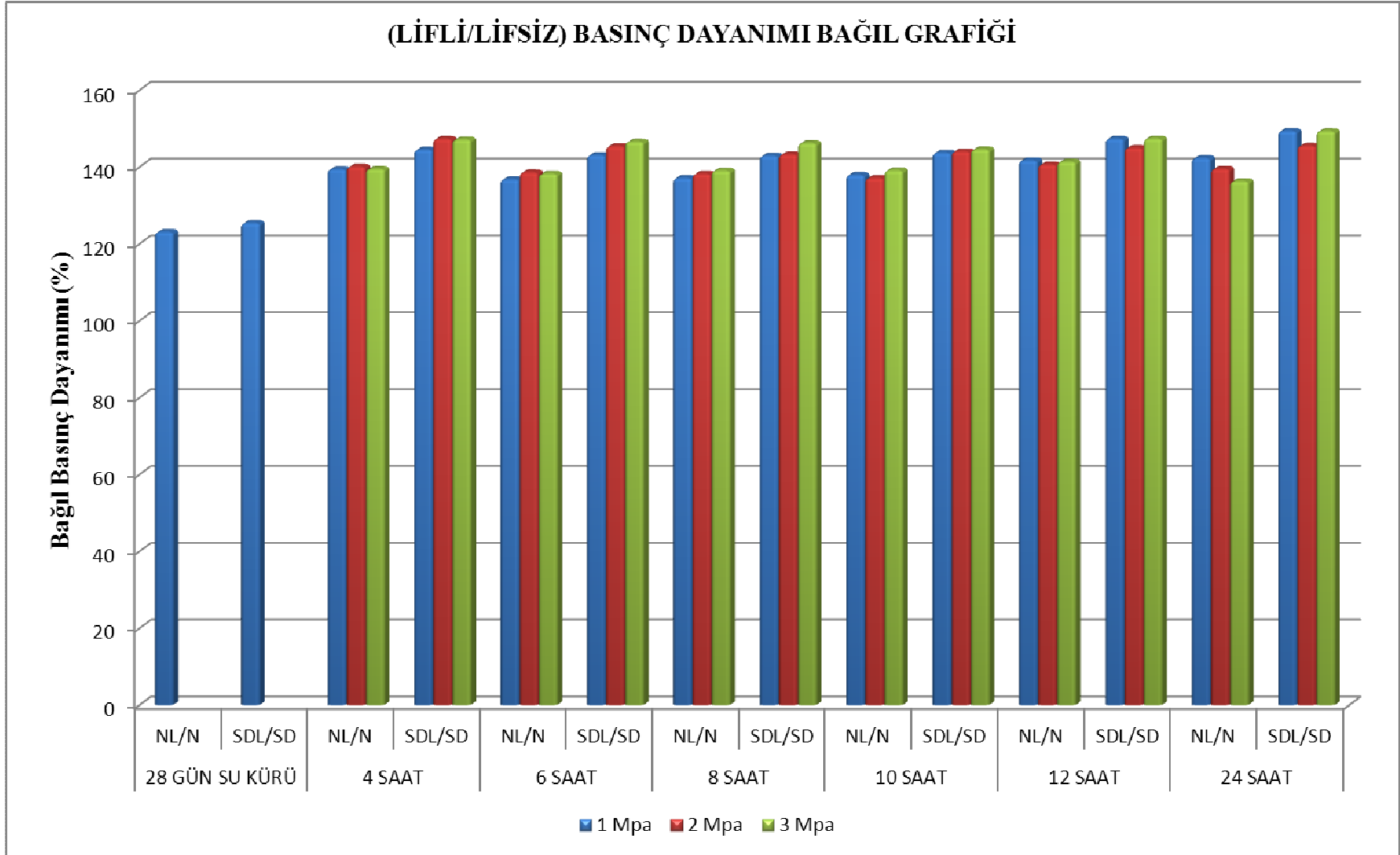
Şekil 7.19 Standart 7 günlük su kürüne göre bağıl dayanım grafiği



Şekil 7.20 Standart 28 günlük su kürüne göre bağıl dayanım grafiği



Şekil 7.21 Silis dumanının basınç dayanımına etkisi



Şekil 7.22 Çelik lifin basınç dayanımına etkisi

BÖLÜM SEKİZ

FARKLI LİF KULLANIMININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, çalışmalarda kullanılan iki farklı çelik lif tipinin basınç ve eğilme dayanımları üzerine etkisi, seçilen bazı örnekler üzerinde gösterilmiştir.

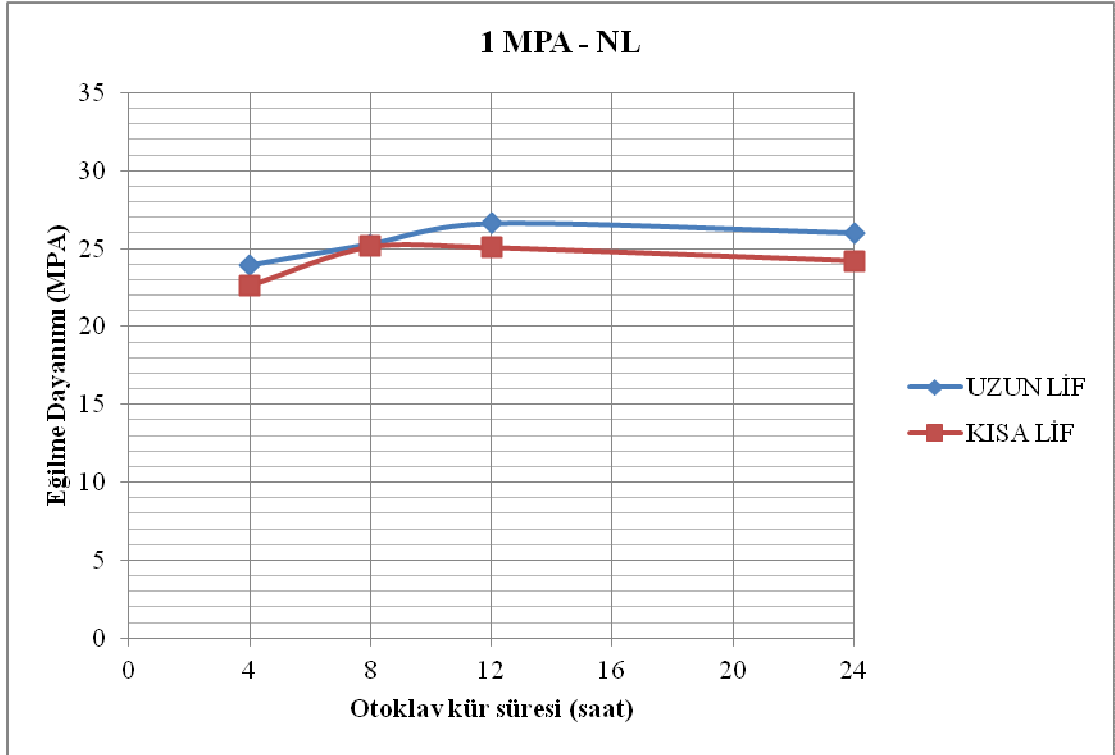
8.1 Farklı Liflerin Eğilme Dayanımlarının Karşılaştırılması

Tablo 8.1’de iki farklı çelik lifin (makro ve mikro çelik lif) eğilme dayanımları sonuçları verilmiştir.

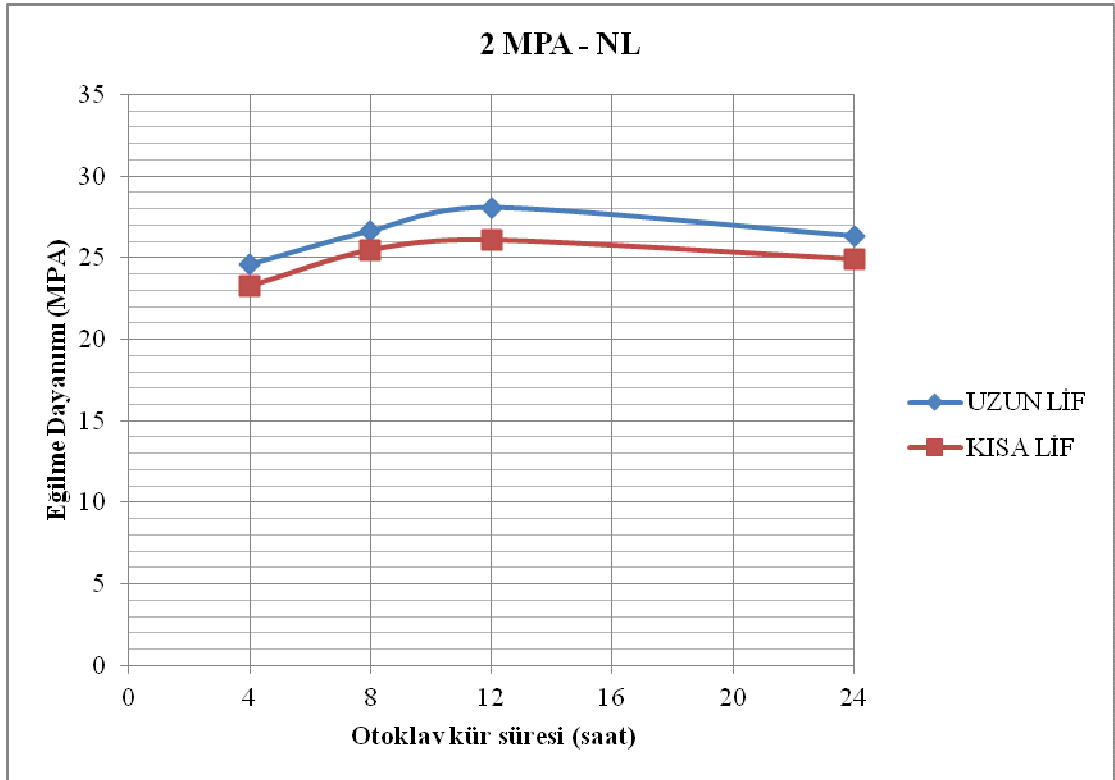
Tablo 8.1 Uzun (13 mm) ve kısa (6 mm) lifin eğilme dayanımları tablosu

KÜR BASINCI	KARIŞIM TÜRÜ	LİF TÜRÜ	SÜRE (SAAT)			
			4	8	12	24
			(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1 MPa	NL	UZUN	23,92	25,29	26,61	26,00
		KISA	22,60	25,14	25,09	24,22
	SDL	UZUN	27,27	29,35	30,11	29,47
		KISA	25,09	28,08	29,20	27,88
2 MPa	NL	UZUN	24,63	26,66	28,08	26,36
		KISA	23,26	25,49	26,10	24,93
	SDL	UZUN	28,64	29,35	30,52	29,78
		KISA	26,05	28,18	29,30	28,57

Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’de silis dumanı içermeyen numunelerin, 1 MPa ve 2 MPa basınç altında kür edilmesi ile elde edilen eğilme dayanımı sonuçlarının grafiği verilmiştir. Şekillerden anlaşılacağı üzere; uzun lif, kısa life kıyasla, eğilme dayanımında az da olsa artış sağlamıştır.

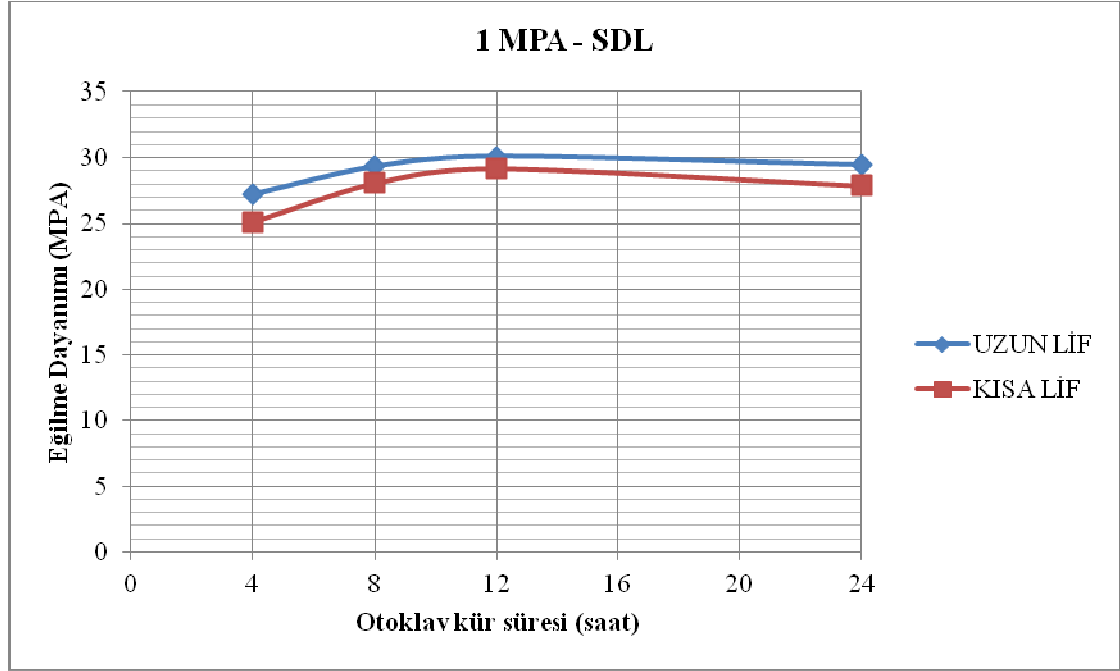


Şekil 8.1 NL kodlu serilerin 1 MPa kür basıncındaki eğilme dayanımı – kür süresi ilişkisi

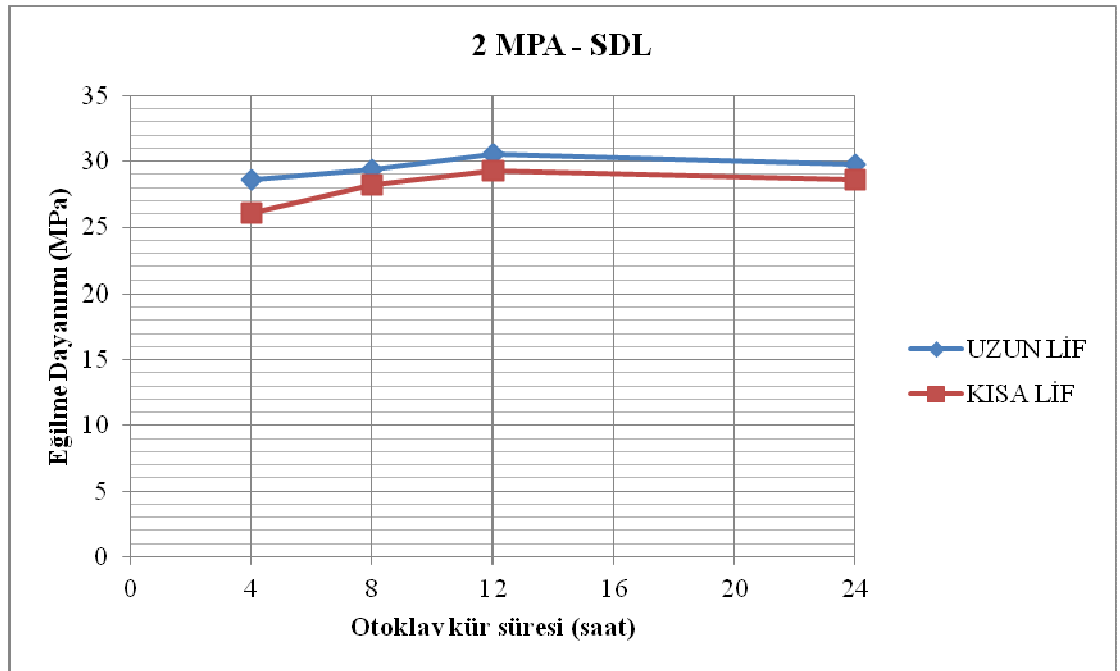


Şekil 8.2 NL kodlu serilerin 2 MPa kür basıncındaki eğilme dayanımı – kür süresi ilişkisi

Şekil 8.3 ve Şekil 8.4’de silis dumanı içeren numunelerin, 1 MPa ve 2 MPa basınç altında kür edilmesi ile elde edilen eğilme dayanımları sonuçlarının grafiği verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere, uzun lifler azda olsa eğilme dayanımlarında artış sağlamıştır ancak işlenebilirliği önemli ölçüde düşürmüştür.



Şekil 8.3 SDL kodlu serilerin 1 MPa kür basıncındaki eğilme dayanımı – kür süresi ilişkisi



Şekil 8.4 SDL kodlu serilerin 2 MPa kür basıncındaki eğilme dayanımı – kür süresi ilişkisi

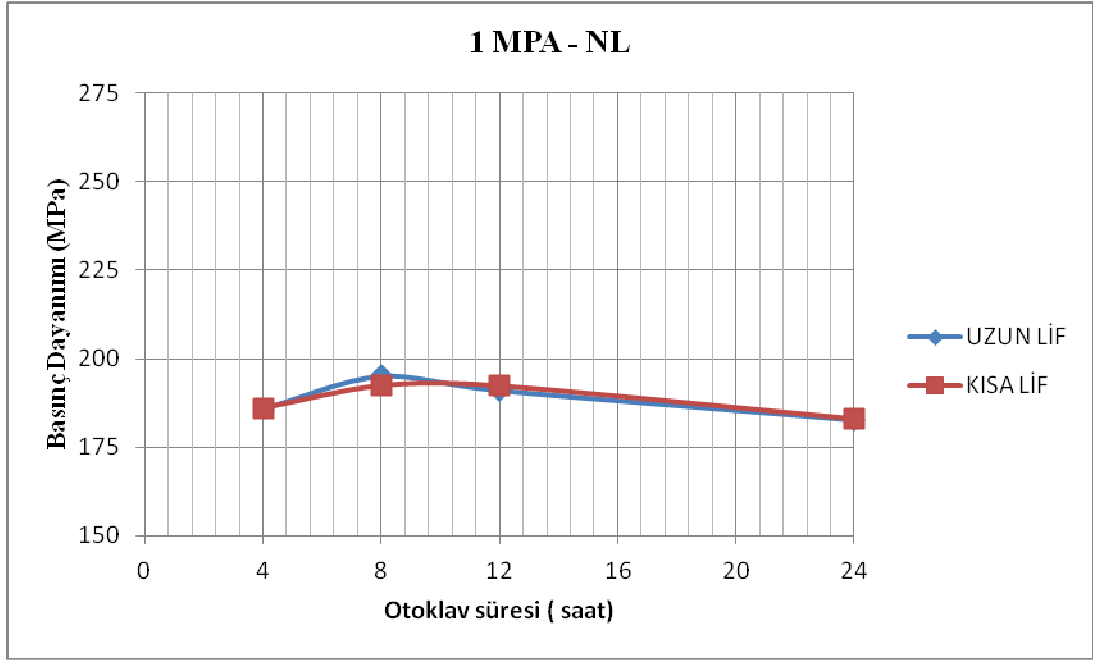
8.2 Farklı Liflerin Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması

Tablo 8.2’de iki farklı çelik lifin (makro ve mikro çelik lif) basınç dayanımları sonuçları verilmiştir.

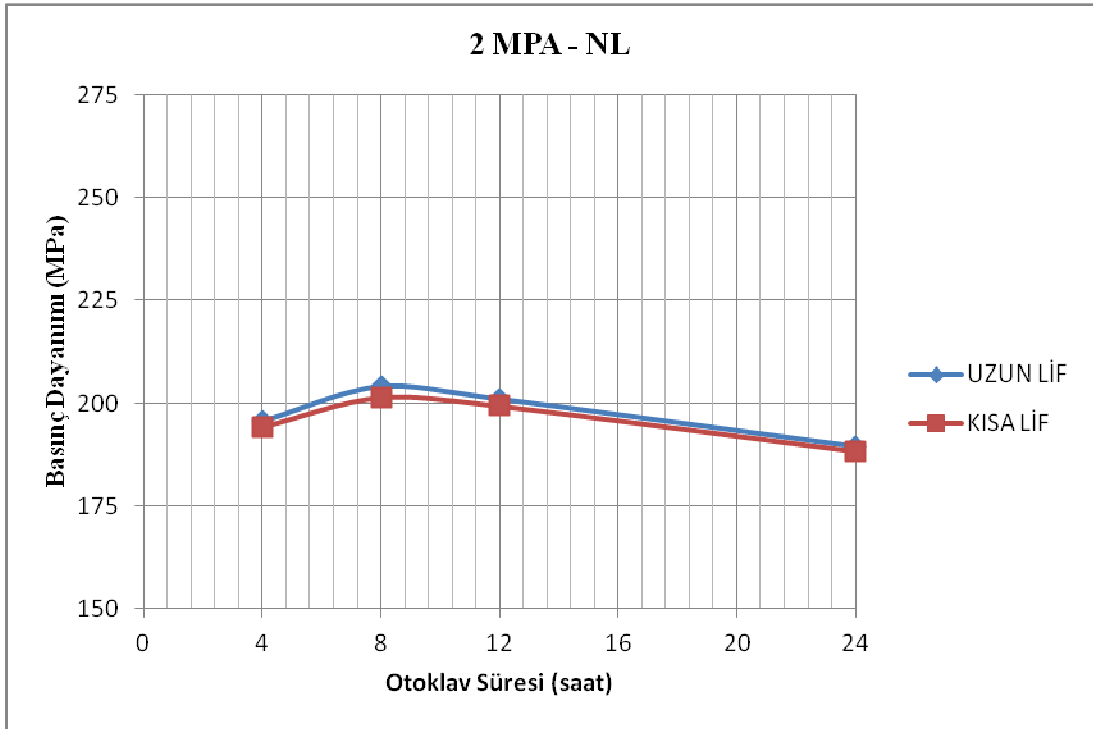
Tablo 8.2 Uzun ve kısa lifin basınç dayanımları tablosu

KÜR BASINCI	KARIŞIM TÜRÜ	LİF TÜRÜ	OTOKLAV SÜRESİ (SAAT)			
			4	8	12	24
			(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1 MPa	NL	UZUN	186,00	195,18	191,12	182,76
		KISA	186,02	192,52	192,40	182,84
	SDL	UZUN	234,76	245,86	242,16	231,84
		KISA	230,56	239,84	238,66	227,22
2 MPa	NL	UZUN	195,68	204,12	201,04	189,54
		KISA	194,36	201,50	199,42	188,44
	SDL	UZUN	240,82	252,86	249,20	241,20
		KISA	244,48	250,60	248,26	238,46

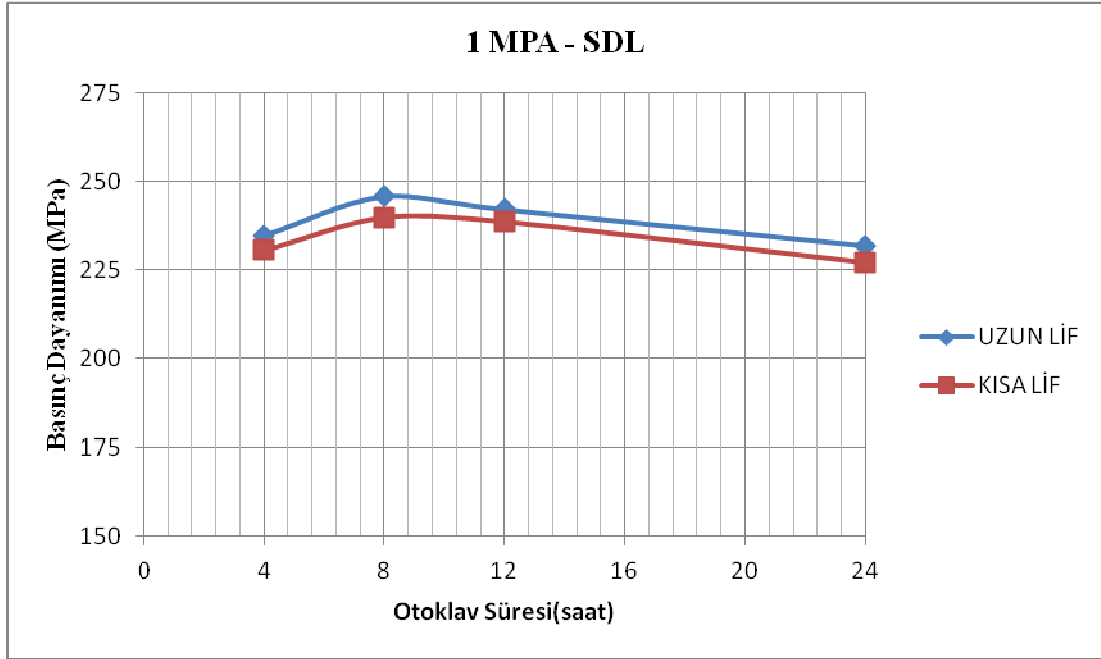
Şekil 8.5 ve Şekil 8.6’da silis dumanı içermeyen numunelerin, 1 MPa ve 2 MPa basınç altında kür edilmesi ile elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının grafiği verilmiştir. Şekillerden anlaşılacağı üzere; uzun lif, kısa life kıyasla, basınç dayanımında değişikliğe sebep olmamıştır. Her iki lif tipi de aynı kür basıncı ve aynı kür sürelerinde benzer basınç dayanımına sahiptir.



Şekil 8.5 NL kodlu serilerin 1 MPa kür basıncındaki basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi

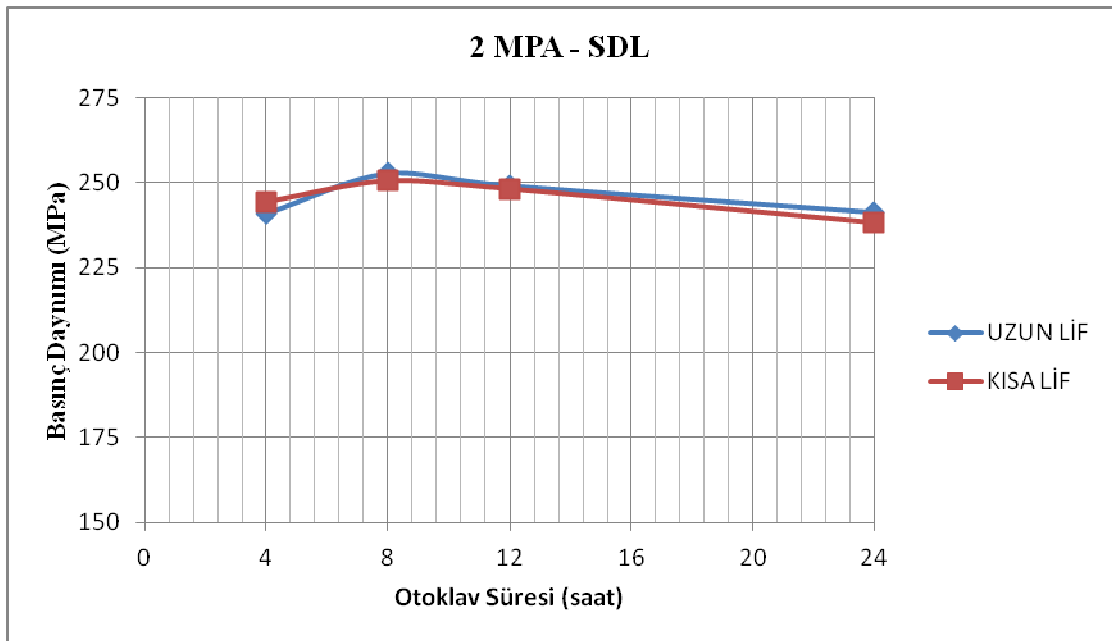


Şekil 8.6 NL kodlu serilerin 2 MPa kür basıncındaki basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi



Şekil 8.7 SDL kodlu serilerin 1 MPA kür basıncındaki basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi

Şekil 8.7 ve Şekil 8.8’de silis dumanı içeren numunelerin, 1 MPA ve 2 MPA basınç altında kür edilmesi ile elde edilen basınç dayanımları sonuçlarının grafiği verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere, uzun lifler basınç dayanımlarında değişiklik göstermemiştir ancak işlenebilirliği önemli ölçüde düşürmüştür.



Şekil 8.8 SDL kodlu serilerin 2 MPA kür basıncındaki basınç dayanımı – kür süresi ilişkisi

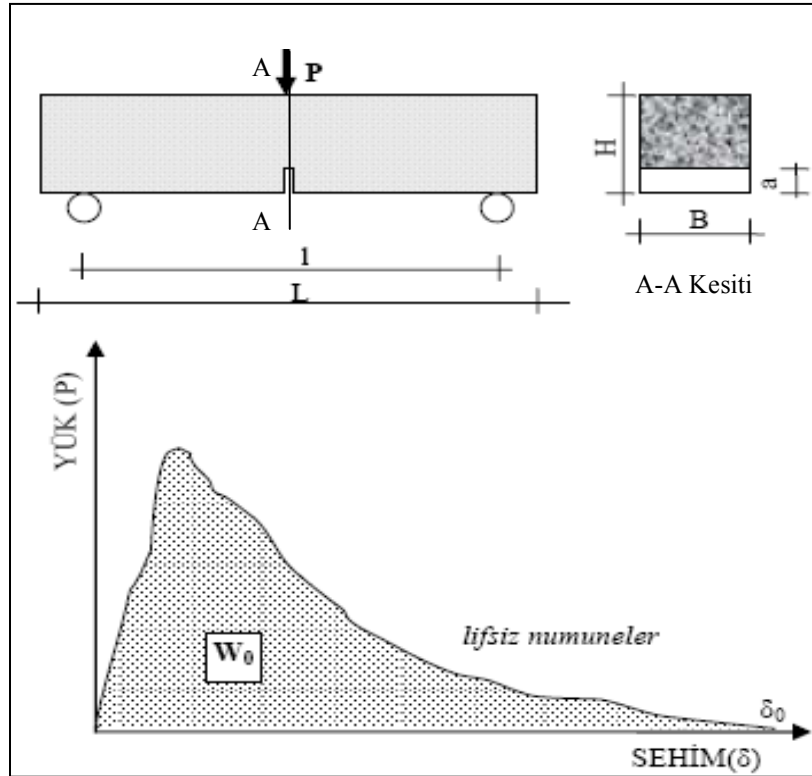
BÖLÜM DOKUZ

RPB KARIŞIMLARININ KIRILMA ENERJİLERİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, üretilen reaktif pudra beton serilerinin, kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Kırılma enerjisinin belirlenmesi için RILEM 50-FMC 1985'te tarif edilen çentikli kiriş örnekler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi kullanılmıştır.

9.1 Kırılma Enerjisinin Hesaplanması

Kırılma enerjisi deneyleri, ideal kür koşullarında (1 Mpa kür basıncı altında 10 saat süreyle) kür edilen 4 farklı karışım için gerçekleştirilmiştir. Deneyler çentikli örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her numuneye $H/6$ derinliğinde (yaklaşık olarak 7 mm) çentikler açılmıştır (Şekil 9.1).



Şekil 9.1 Çentikli numunelerde 3 noktalı eğilme deneyi ile yük – deplasman eğrisinin bulunması

Kırılma enerjileri, üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen (kapalı devre servo kontrol eğilme presi ile) yük – sehim eğrilerinin alt alanlarının ve numune sehiminin yaptığı işin eğilmeye çalışan aktif kesit alanına bölünmesiyle bulunmuştur. Bu alan numunenin kırılma süresince harcanan enerji olup, gevrek malzemelerde bu değer küçüktür. Bu durum gevrek malzemelerde ölçülen sehim değerinin az olmasından kaynaklanmaktadır. Sünek malzemelerde ise şekil değiştirme kapasitesine bağlı olarak sehim değeri artacağından kırılma enerjisi artacaktır. Hesaplarda kullanılan alt alan lifsiz numuneler için tamamen ayrılanaya kadar, lifli numuneler için 5 mm sehim değerine kadar bulunan yük – sehim eğrilerinden elde edilmiştir. Lifsiz numuneler, 0,001 mm/dk hızla, lifli numuneler ise 0,2 mm/dk hızla yüklenmiştir. Hesaplamalarda aşağıdaki formül kullanılmıştır (RILEM 50-FMC, 1985).

$$G_f = \frac{W_0 + m \frac{l}{L} g \delta_0}{B(H - a)} \quad (9.1)$$

Denklem 9.1’de; Kırılma enerjisi (G_f), Joule/m² veya sıklıkla N/m olarak ifade edilir.

W_0 : yük – sehim eğrisindeki alt alanı,

m : numunenin kütlesini,

l : mesnetler arası mesafeyi,

L : numune uzunluğunu,

g : yerçekimi ivmesini (9,81 m/s²),

δ_0 : kaydedilen son sehimini,

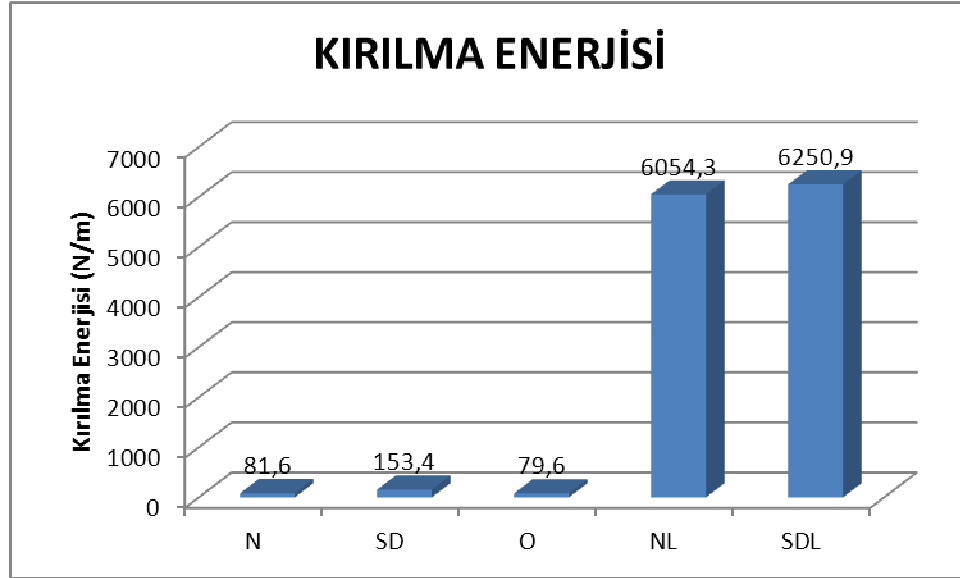
B : kiriş enini,

H : kiriş yüksekliğini ve

a : çentik derinliğini belirtmektedir.

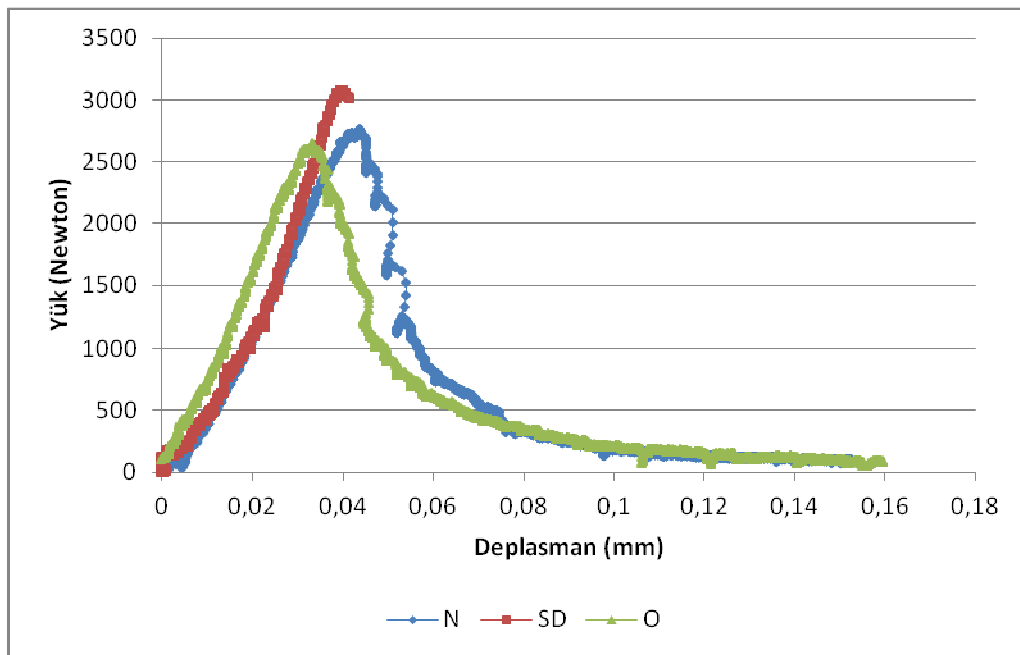
9.2 Kırılma Enerjilerinin Değerlendirilmesi

Şekil 9.2’de görüldüğü üzere çalışılan karışımlara ek olarak özel bir karışım türünün kırılma enerjisi incelenmiştir. O kodlu bu karışım türü, ince kuvars agregası içermeyen (0 – 75 μ), ileriki çalışmalara yön göstermesi amacıyla sadece kırılma enerjisi deneyi için üretilmiş bir karışım türüdür.



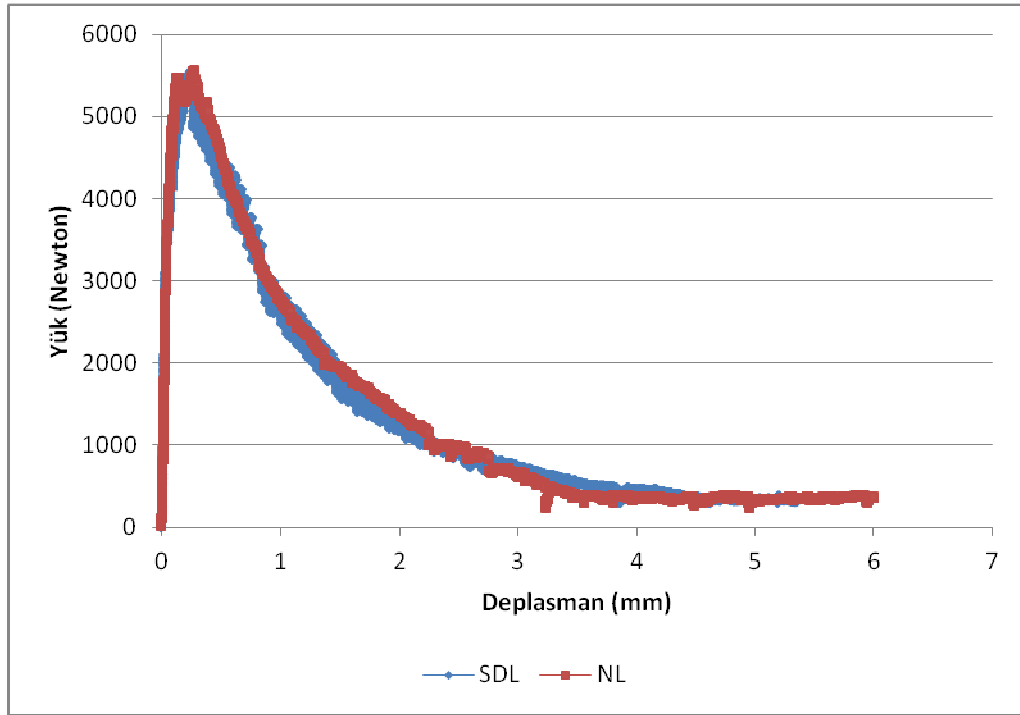
Şekil 9.2 Karışımların kırılma enerjileri

Şekil 9.3’de çelik lif içermeyen karışımların kırılma enerjileri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, silis dumanı içeren karışımlar, en yüksek kırılma noktasını gösterdiği halde gevrek bir davranış göstermiştir. Silis dumanı, beton içindeki boşlukları doldurduğundan çatlak boşluklarda ilerleyememiş ve ani kırılma yapmıştır. Silis dumanı içermeyen diğer karışımlarda ise, çatlaklar boşluk boyunca ilerleyebildiği için daha sünek bir davranış göstermiştir.



Şekil 9.3 Lifsiz karışımların yük – deplasman grafiği

Şekil 9.4’de lif katkılı karışımların kırılma enerjisi grafikleri verilmiştir. Lif kullanımının, gevrek yalın matrislerin kırılma enerjisini oldukça arttırdığı görülmüştür. Çelik lifler eğilme yükleri altında betonun ani göçmesine engel olmaktadır. Çelik liflerin eğilme dayanımlarını arttırmalarından ziyade kırılma davranışı üzerindeki etkileri daha belirgindir.



Şekil 9.4 Lif katkılı karışımların yük – deplasman grafiği

Kırılma enerjisi deneylerinde çelik liflerin matris içindeki dağılımına göre maksimum yükten sonra yük deplasman eğrisinin azalan kısmında iniş ve çıkışlar görülmüştür. Bu durum gerilme altındaki liflerin gerilme köprüsü görevini üstlenmesi ile açıklanabilir. Gerilme köprülenmesi lif ile matris ara yüzeyindeki aderans sayesinde gerçekleşmiştir. Gerilme altındaki lifler sehim arttıkça ve çatlak açıldıkça matristen yavaş yavaş sıyrılabilecek veya lif – matris aderansı çok kuvvetli ise ya da lifin matris içerisinden sıyrılmaya engel olacak kanca, yüzeyinde pürüz, çentik v.b. var ise sıyrılmayarak kopacaktır. Liflerin bu şekilde gerilme köprüsü görevi üstlenmelerinden dolayı matris çatlasa dahi enkesit hala yük taşıyabilmektedir (Karabulut, 2006).

BÖLÜM ON

İÇYAPI İNCELEMELERİ

Bu bölümde RPC örnekleri üzerinde yapılan SEM analizleri (taramalı elektron mikroskobu) ve destek teknoloji olarak EDS (enerji dağıtma spektrometresi) analiz sonuçları aktarılmaktadır

10.1 SEM Analizleri

SEM çalışmalarında kırık yüzeyler için SEI, parlak yüzeyler için BEC modunda çalışılmıştır.

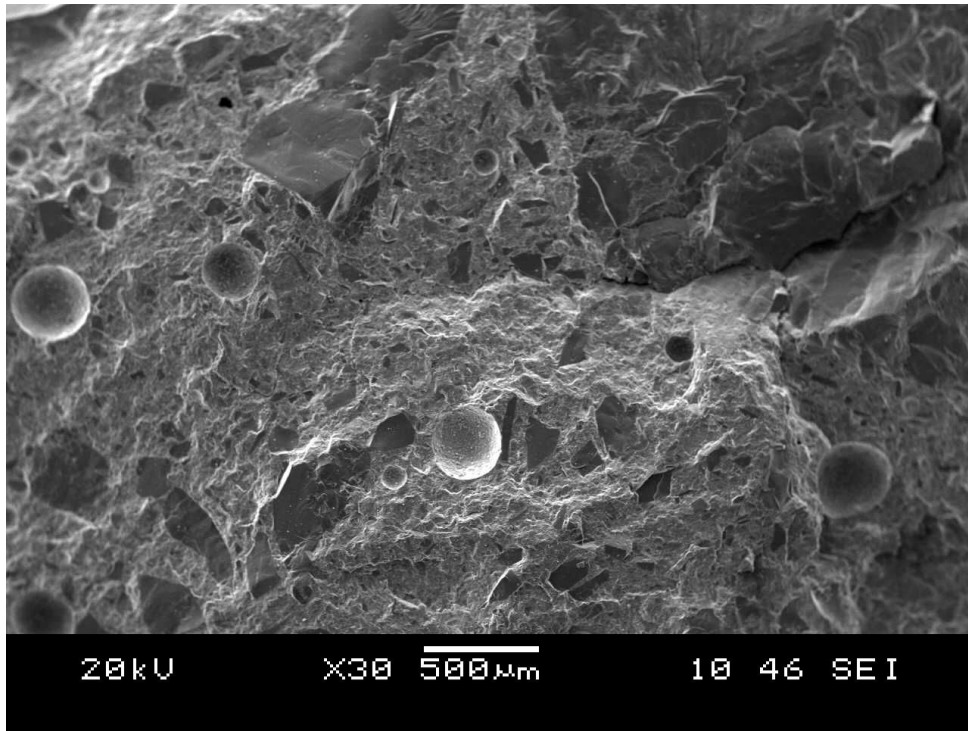
Kırık yüzeylerden alınan parçalar etüvde 50°C'de kurutulmuştur. Daha sonra metal plakanın üzerine yerleştirilip vakum ortamında kaplama işlemi uygulanmıştır.

Parlak kesit numuneleri ise ilk olarak kesilerek düz bir yüzey elde edilmiştir. Kesilen parçalar 50°C'lik etüvde kurutulmuştur. Daha sonra numuneler küçük parçalara bölünüp polyester kalıp dökülerek hazırlanmıştır. Polyester kalıp sertleştiğinde kalından inceye doğru, 10 adet çeşitli kalınlıklarda zımparadan geçirilip yüzeyleri düzeltilip polyesterden arındırılmıştır. Parlatılmış numuneler SEM incelemesinden önce etüvde 24 saat süreyle 50°C'de kurutulmuştur. Ardından vakum altına alınıp yüzeyleri ince bir altın tabakasıyla kaplanmıştır.

10.1.1 Bağlayıcı Olarak Sadece Çimento İçeren Serilerin SEM Analizleri

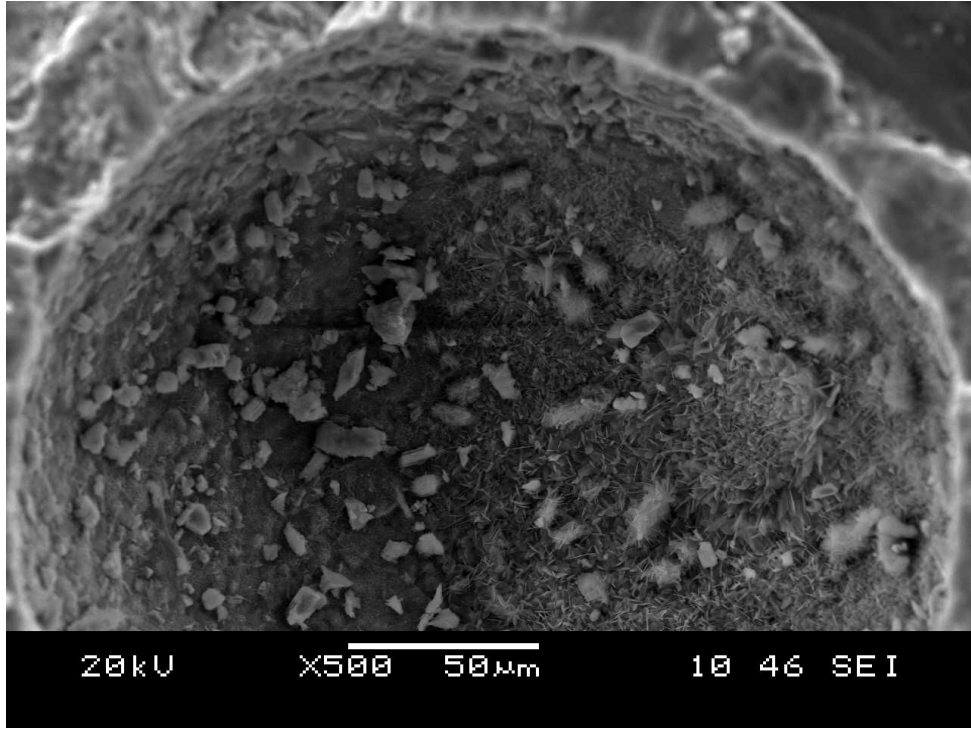
Şekil 10.1 – 10.17, bağlayıcı olarak sadece çimento içeren lifsiz numunelerin otoklavda 6 saat süreyle farklı basınçlarda kür edilmesiyle elde edilen SEM analizlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi, otoklav basıncı değiştikçe morfoloji de değişmektedir. Düşük basınçta (1 MPa) yapı tam gelişmemişken, 2 MPa basınçta kür edilince yapraksı, 3 MPa basınçta iğnemsilifsi yapılar gözlenmektedir. Yapılarda

Ca/Si oranı 1,87 – 2,77 arasında değişmekte olup, bu karışımlarda sadece çimento kullanılıp Si takviyesi yapılmadığından, Ca/Si oranının yüksek olduğu gözlenmektedir. Karışımda kullanılan 75 µm altı kuvarsın da otoklav küründe bir miktar Si takviyesi gibi davrandığı söylenebilir. Morfoloji benzese de Ca/Si oranı yüksek olduğu için, görüntülenen yapıların α -C₂SH'ten tobermorite tam dönüşümün gerçekleşmediğini, dolayısıyla yapının α -C₂SH ve tobermorite karışımından oluştuğunu söylemek mümkündür. Bu bulgular mekanik özellik deneyleri ile paralellik arz etmektedir. Karışımlara silis dumanı ilave edilince mekanik özellikler sadece çimento kullanılan karışımlara kıyasla gelişmektedir.



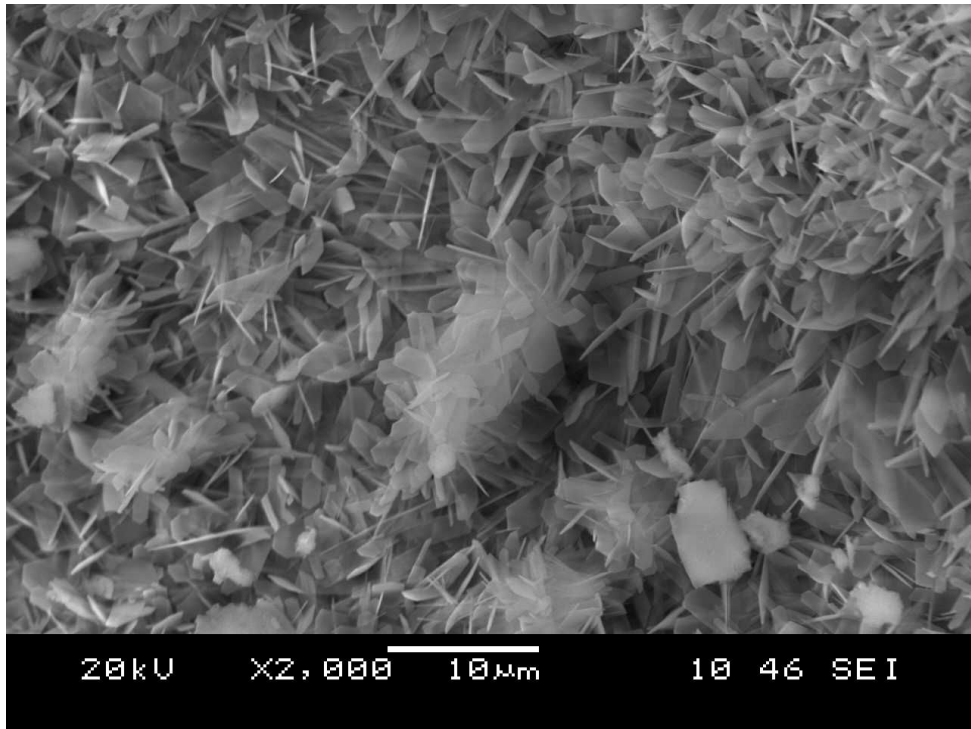
Şekil 10.1 N kodlu numunenin genel yapısı

Şekil 10.1'de boşlukların dağılımı ve matris genel görünümü verilmiştir. Şekil 10.2'de ise bu boşlukların genel görünümü verilmiştir.



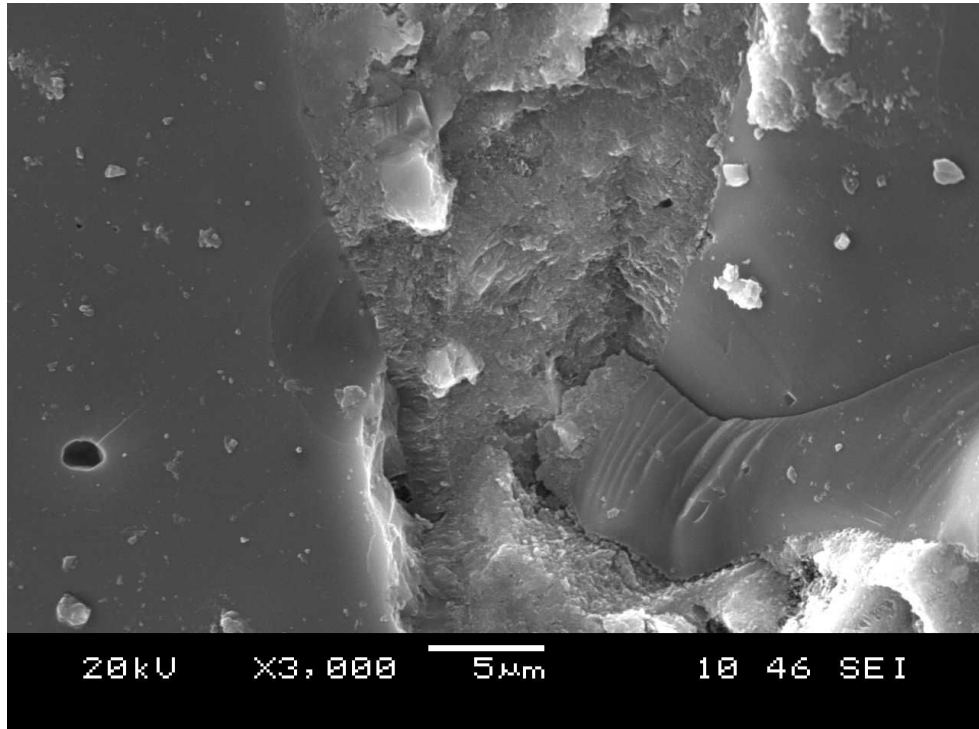
Şekil 10.2 Otoklavda 1 MPa kür basıncında N karışımındaki boşluk genel görünümü

Şekil 10.3'te ise bu boşluğun içinde oluşan yapraksı yapı gösterilmiştir.

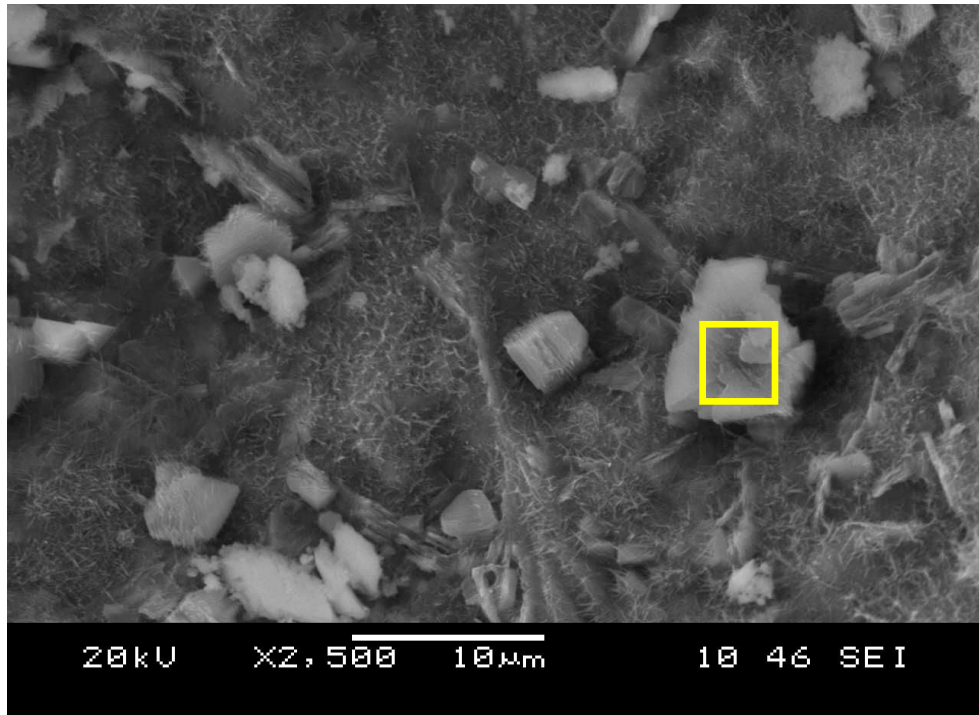


Şekil 10.3 Otoklavda 1 MPa basınçta N karışımında boşluk içinde oluşan yapraksı yapı

Şekil 10.4'de kuvars agregası-matris arayüzeyinin oldukça boşluksuz olduğu görülmektedir. Bu durum çok düşük su/bağlayıcı oranının bir sonucudur.

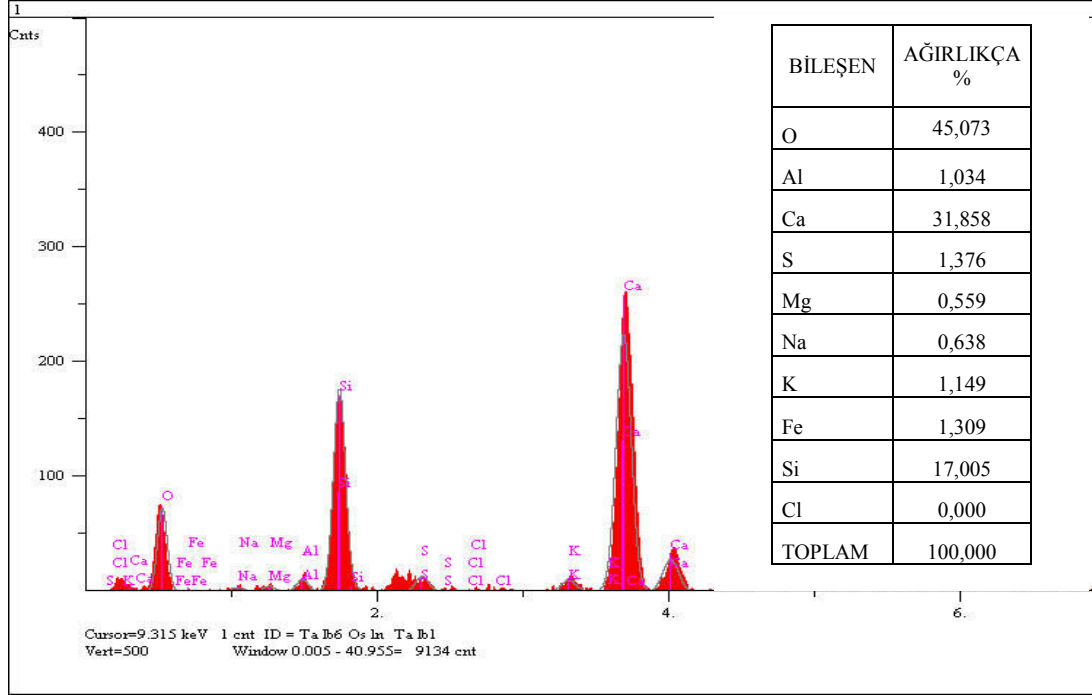


Şekil 10.4 Otoklavda 1 MPa kür basıncında N karışımında agrega matris ara yüzeyi



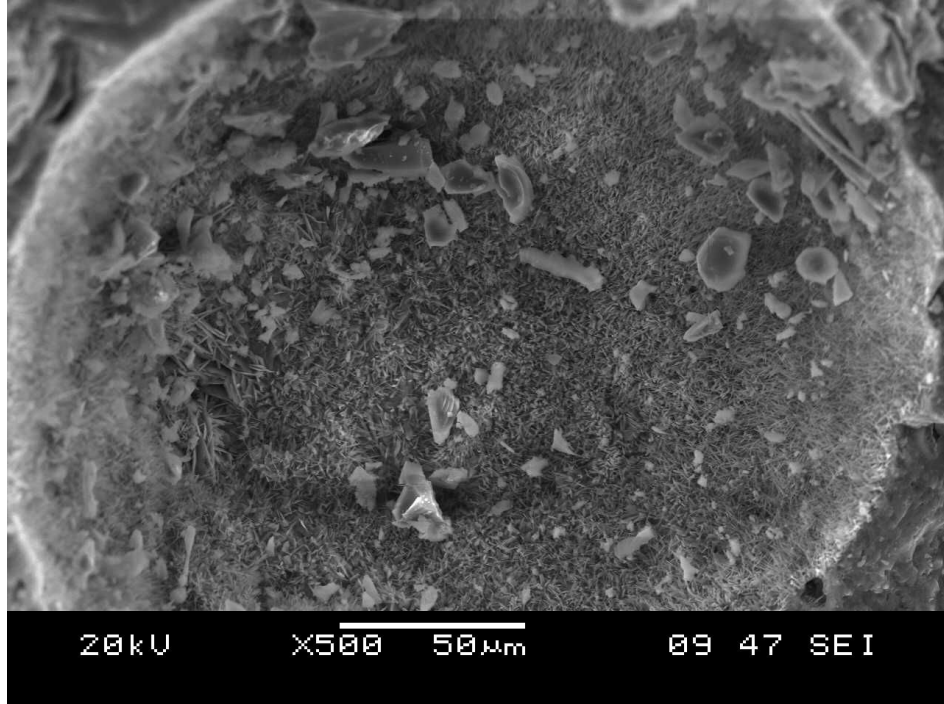
Şekil 10.5 Otoklavda 1 MPa kür basıncında N karışımında boşluk içi ve EDS analiz bölgesi

Şekil 10.5'te küresel bir boşluğun içi görülmektedir. Burada oluşan yapıdan kutu içinde gösterilen alanda EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Tabloya göre Ca/Si oranı 1,87'dir.

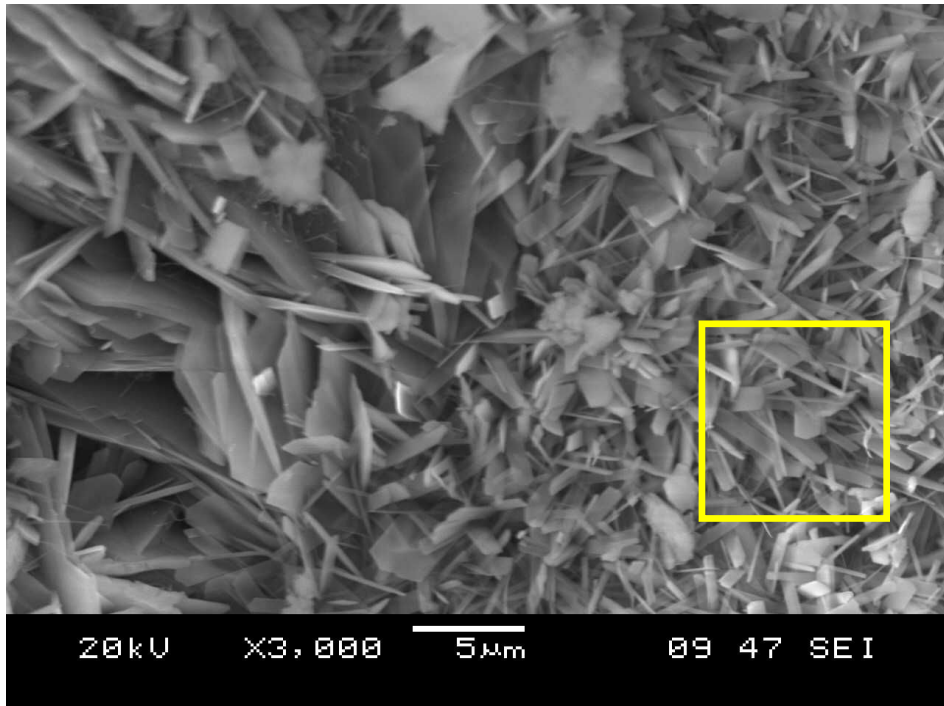


Şekil 10. 6 N kodlu, 1 MPa basınçta 6 saat kür edilmiş numunenin EDS analizi

Şekil 10.7 – 10.9, otoklavda 2 MPa'da 6 saat kür edilmiş N karışımlarının SEM analizleri sunulmuştur.

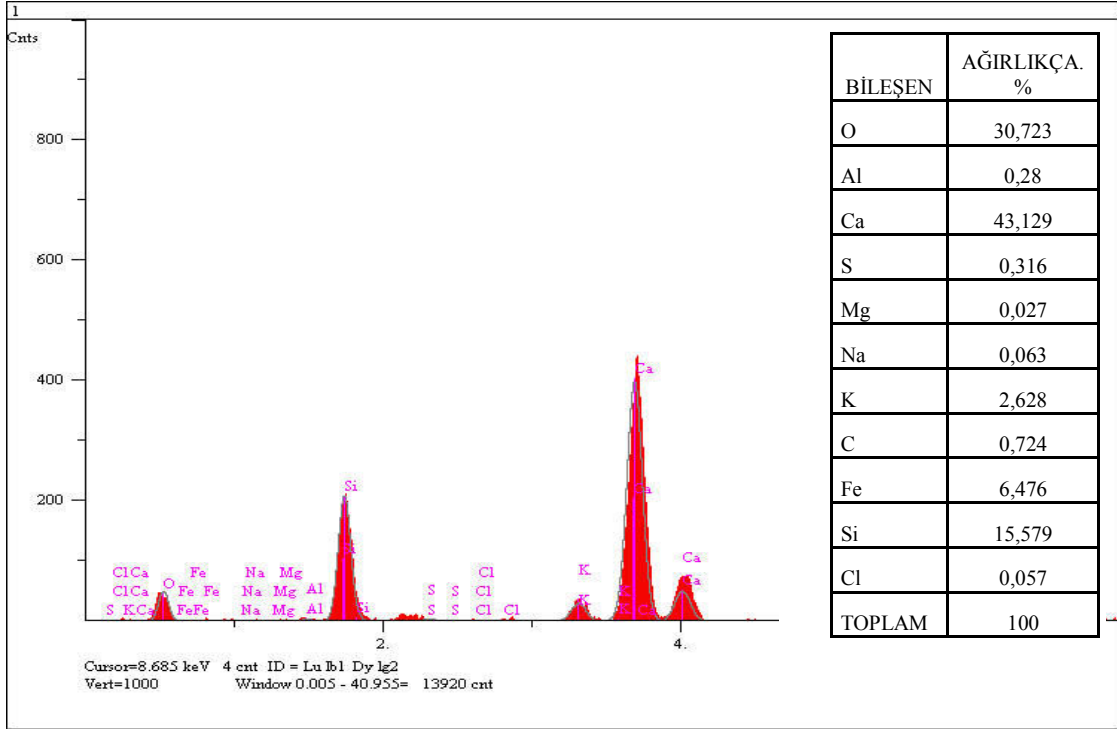


Şekil 10.7 N kodlu, 2 MPa basınçta 6 saat kür edilmiş numunenin boşluk görüntüsü



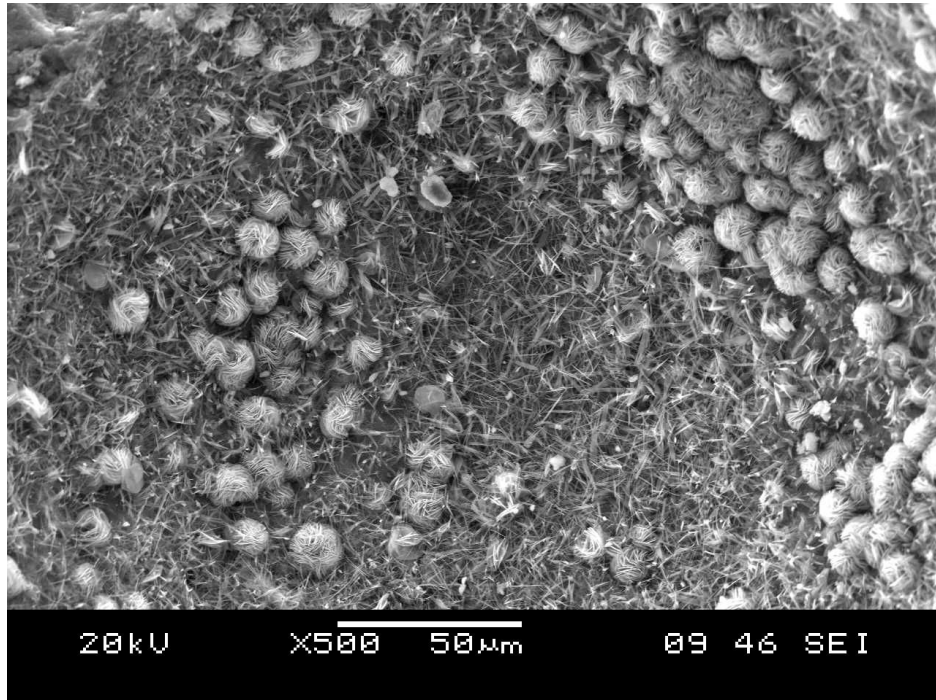
Şekil 10.8 Otoklavda 2 MPa kür basıncında boşluk içyapısı ve EDS analiz bölgesi

Şekil 10.8’de boşluk içinde oluşan yapraksı yapının analizi gösterilmektedir. Bu morfolojide kare ile gösterilen alanda EDS analizi yapılmıştır. Bu bölgenin Ca/Si oranı 2,77’dir.

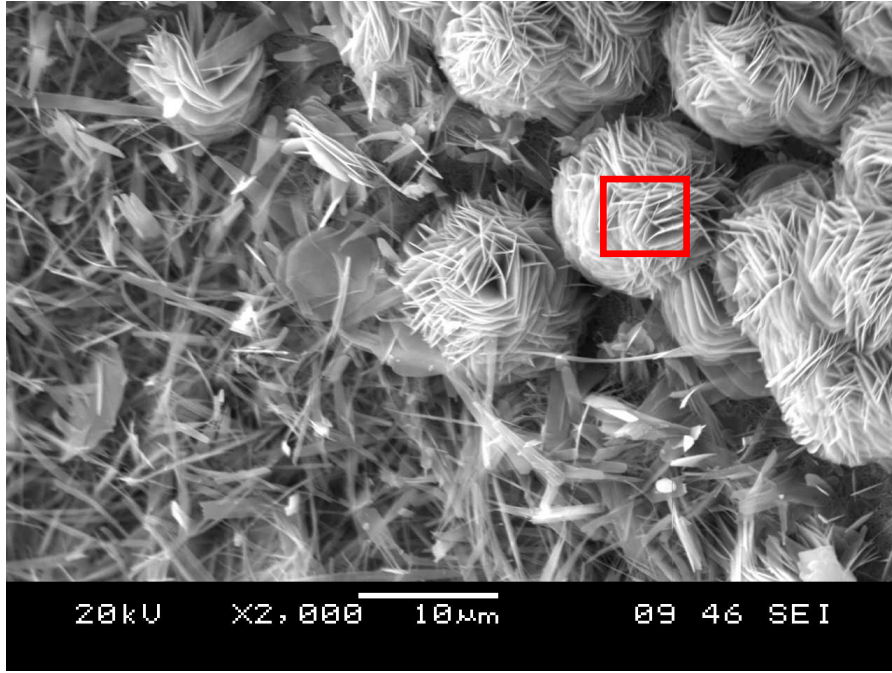


Şekil 10.9 N kodlu, 2 MPa basınçta 6 saat kür edilmiş numunenin EDS analizi

Şekil 10.10 – 10.14, otoklavda 3 MPa'da 6 saat kür edilmiş numunelerin SEM analizleridir.

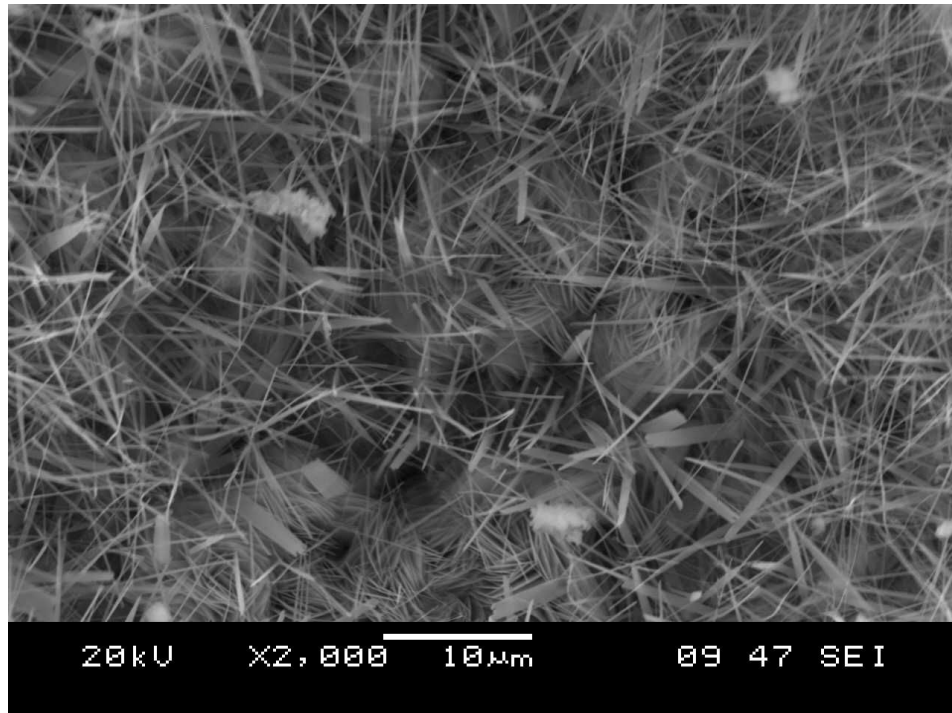


Şekil 10.10 N kodlu, 3 MPa basınçta 6 saat kür edilmiş numunenin görüntüsü



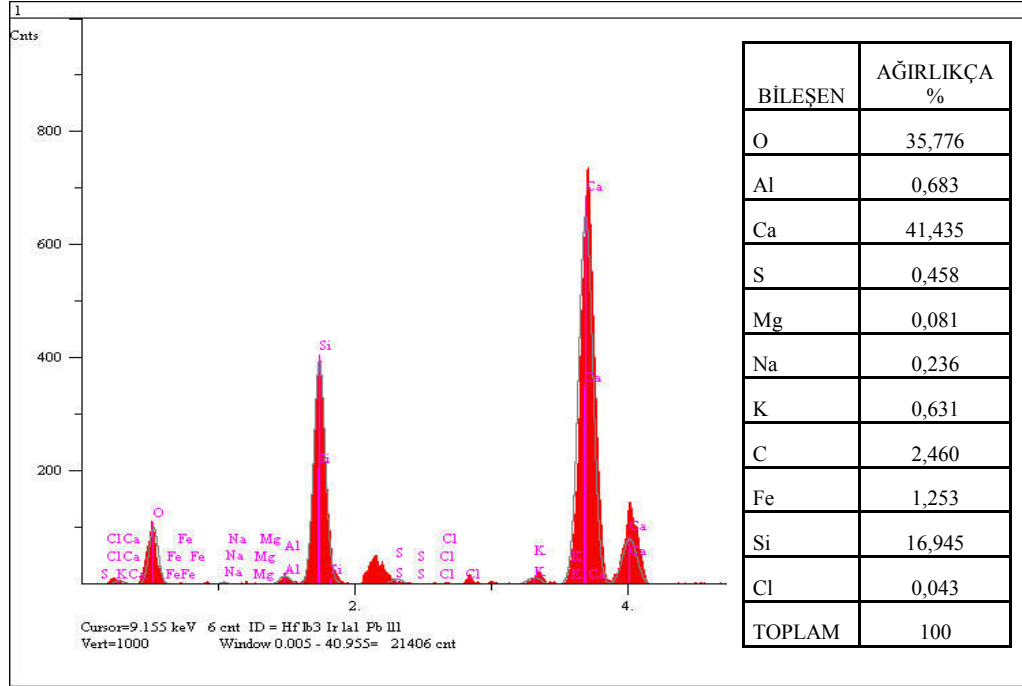
Şekil 10.11 Otoklavda 3 MPa kür basıncında N karışımındaki küresel boşluk içi

Şekil 10.10’da boşluk içinde oluşan yapının kür basıncının artmasıyla morfolojide topaklanma gözlemleniyoruz. Şekil 10.11 ve 10.12’de bu yapının detaylı incelenmesinde yapraksı yapıların iğnemsî bir yapıya dönüştüğü görülmektedir.



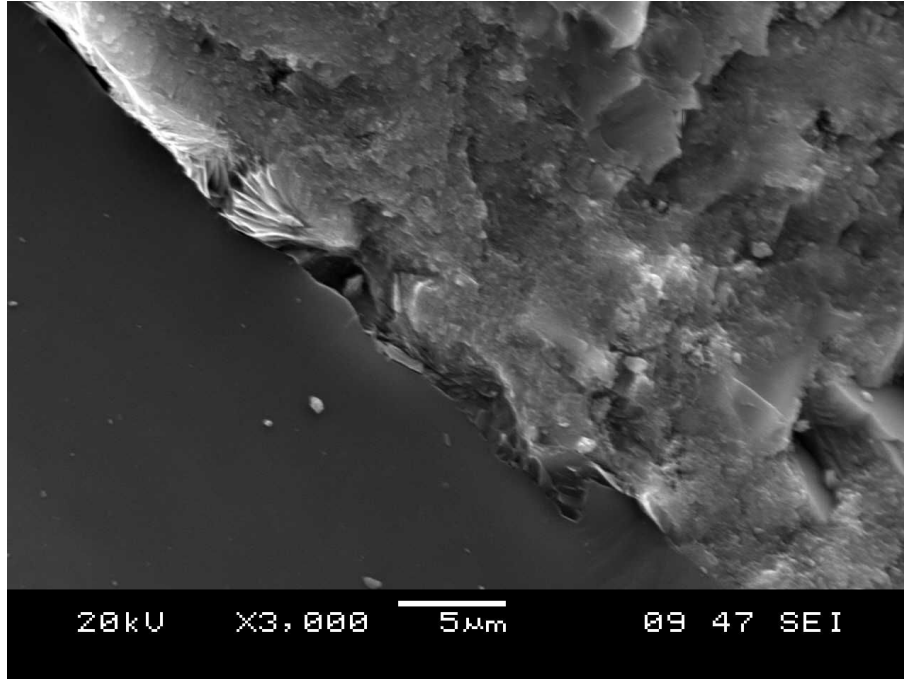
Şekil 10.12 Otoklavda 3 MPa kür basıncında boşluk içi

Şekil 10.12’de ise görüldüğü üzere boşluklarda iğnemsî – lifsi yapılar oluşmuştur. EDS analizinden Ca/Si oranı 2.45 olarak belirlenmiştir. N karışımlarında silis dumanı kullanılmamış, dolayısıyla Si takviyesi yapılmamıştır. EDS analizlerinde Ca/Si oranının yüksek çıkmasının nedeni budur.



Şekil 10.13: N kodlu, 3 MPa basınçta 6 saat kür edilmiş numunenin EDS analizi

Şekil 10.14’de ise agrega matris arayüzeyinin ne kadar kuvvetli ve boşluksuz bir biçimde kenetlendiği görülmektedir.



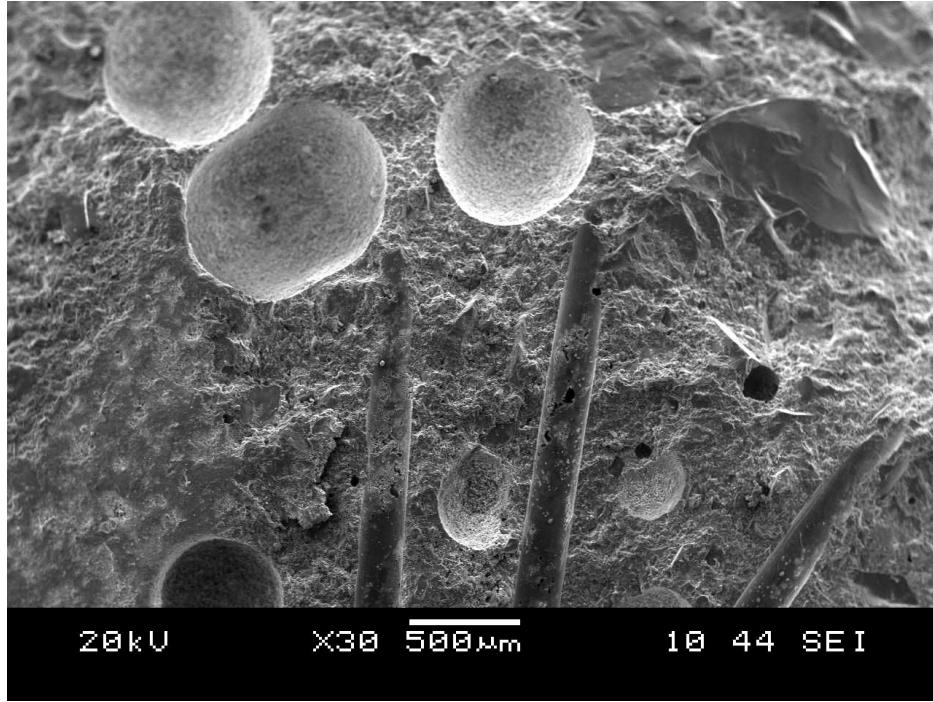
Şekil 10.14 Otoklavda 3 MPa kür basıncında N karışımında agrega matris arayüzeyi

10.1.2 Bağlayıcı Olarak Sadece Çimento İçeren Lif Katkılı Serilerin SEM Analizleri

Bu kısımda bağlayıcı olarak sadece çimento içeren lif katkı serilerin (NL kodlu) kalıptan alındıktan sonra, 28 günlük su küründen sonra ve 1 MPa basınç altında 6, 10, 12, ve 24 saat kür edildikten sonra gerçekleştirilen SEM analizleri verilmiştir.

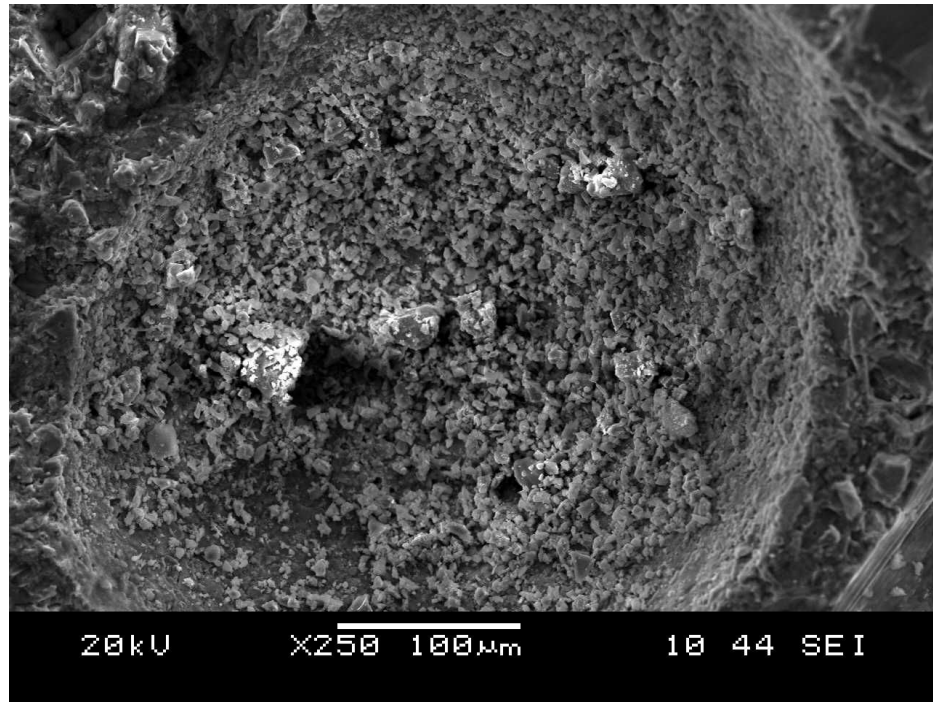
Şekil 10.15 – 10.21, kalıp çıkışı (küre tabi tutulmayan) örneklerin iç yapısıdır. Bu örneklerde iç yapının henüz oluşum aşamasında olduğu görülmektedir.

Şekil 10.15’de numune genel yapısı ve lif sıyrılma bölgeleri görülmektedir.

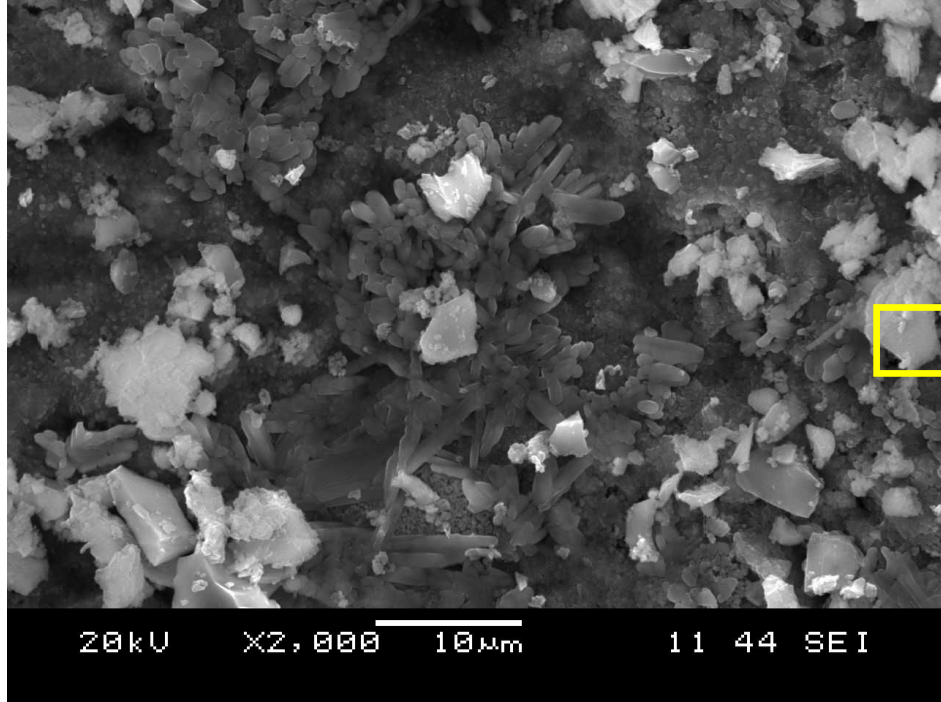


Şekil 10.15 NL kodlu numunelerin SEM analizleri

Şekil 10.16’da bu boşlukların incelenmesiyle görüldüğü üzere, 16 saat sonra kalıptan alınan numunelerde iç yapının otoklav geçirmiş örneklerle kıyasla farklı olduğu görülmektedir.

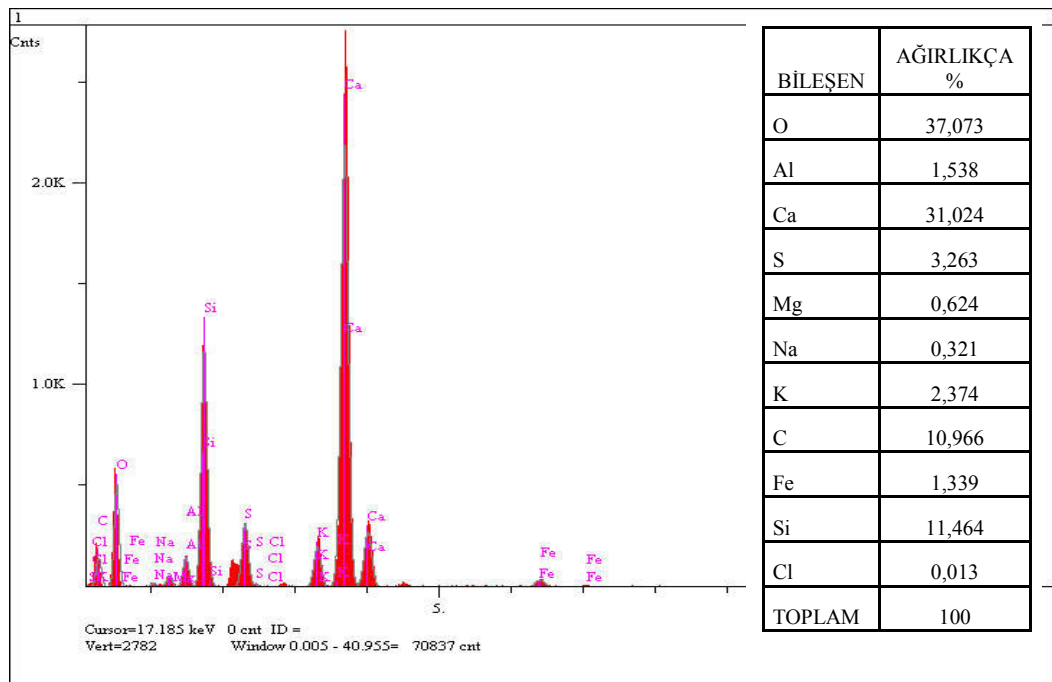


Şekil 10.16 NL kodlu kalıp çıkışı numunelerinde boşluk görünümü

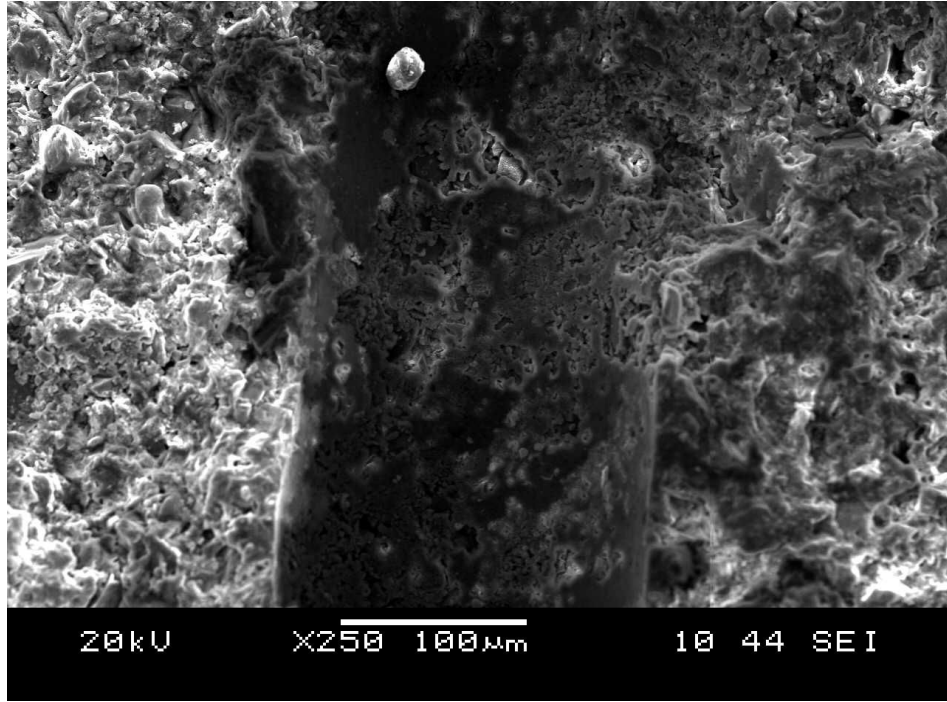


Şekil 10.17 NL kodlu kalıp çıkışı numunelerinde boşluk yapısı ve EDS analiz bölgesi

Şekil 10.17’de bu içyapıdaki oluşumların daha detaylı görünümü ve EDS analizinin yapıldığı bölge gösterilmiştir. Ca/Si oranını 2,71 olarak bulunmuştur.

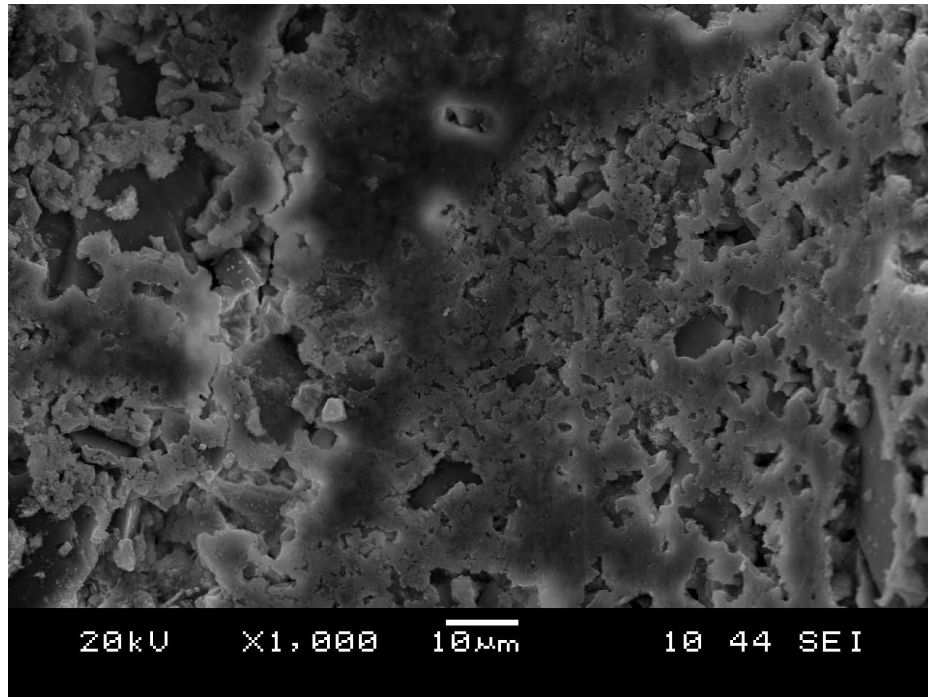


Şekil 10.18 Kalıp çıkışı (küre tabii tutulmayan) örneğinde EDS analizi



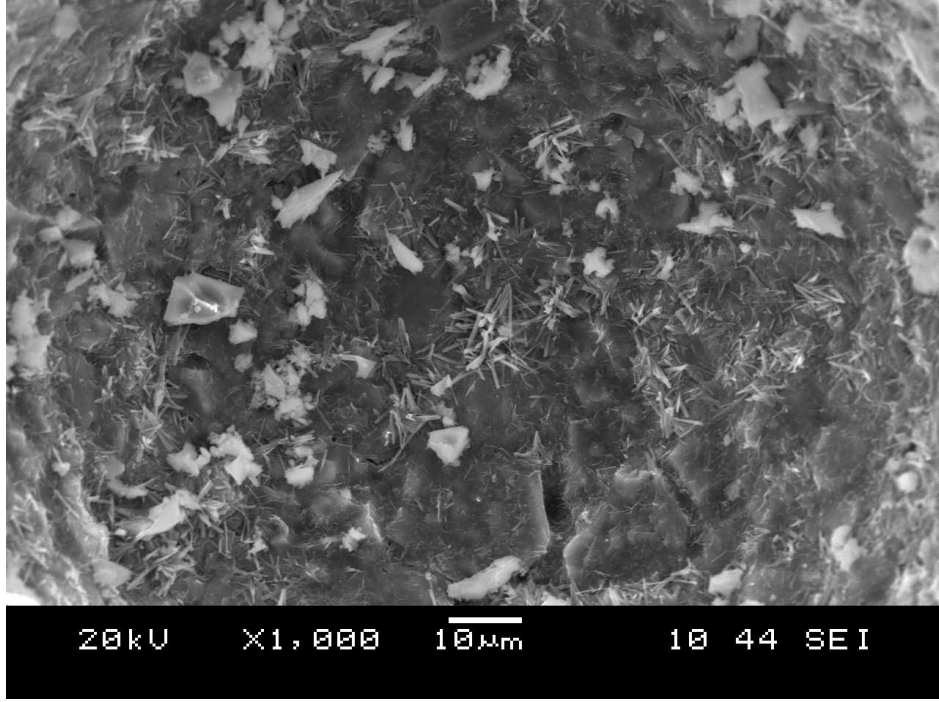
Şekil 10.19 NL kodlu kalıp çıkış (küre tabi olmayan) örneğinde lif sıyırma bölgesi

Şekil 10.19 ve 10.20'de, lif sıyırma bölgesi ve burada oluşan yapılar görülmektedir. Lif sıyırma bölgesinin gözenekli olduğu görülmektedir. Henüz kür geçirmemiş numunelerde bu durum doğaldır.



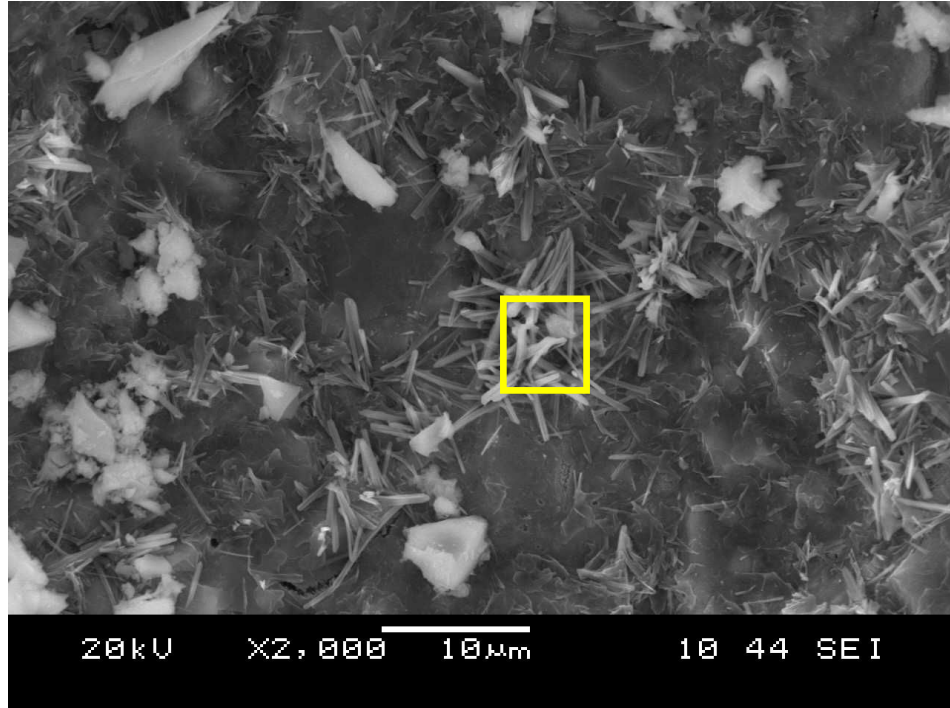
Şekil 10.20 Kalıp çıkışı numunelerinde lif sıyırma yüzeyi

Şekil 10.21 – 10.25’de, standard su küründe 28 gün kür edilen örneklerin içyapısı gösterilmiştir.

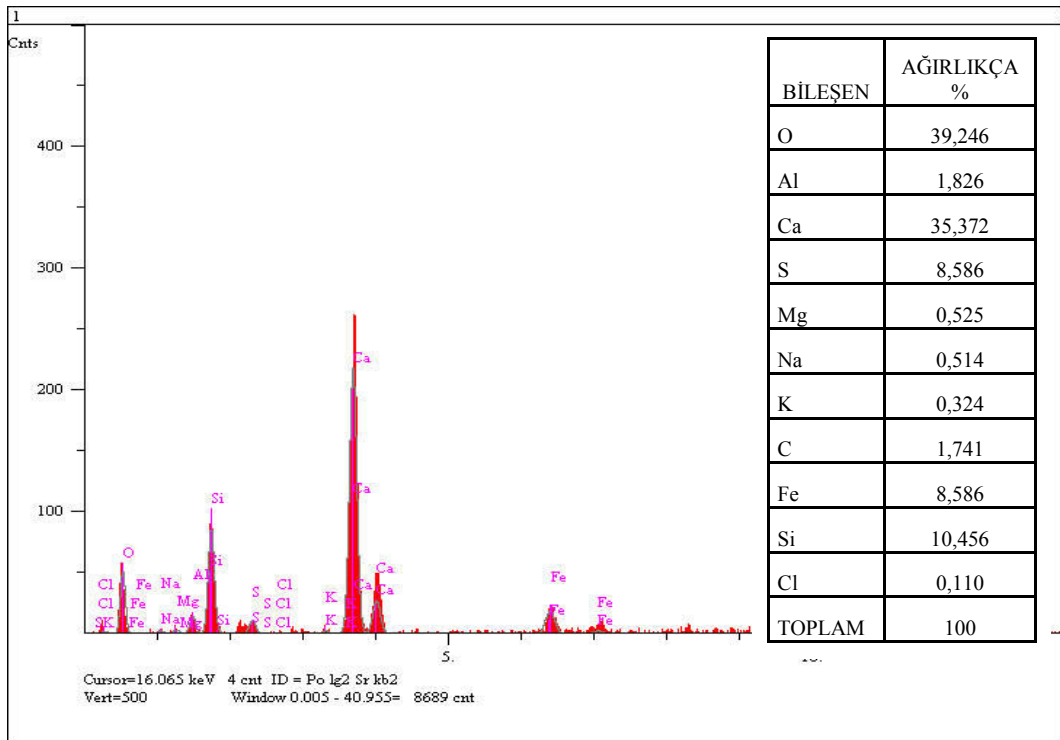


Şekil 10.21 NL karışımının Su kürü (28 gün) sonrası içyapısı

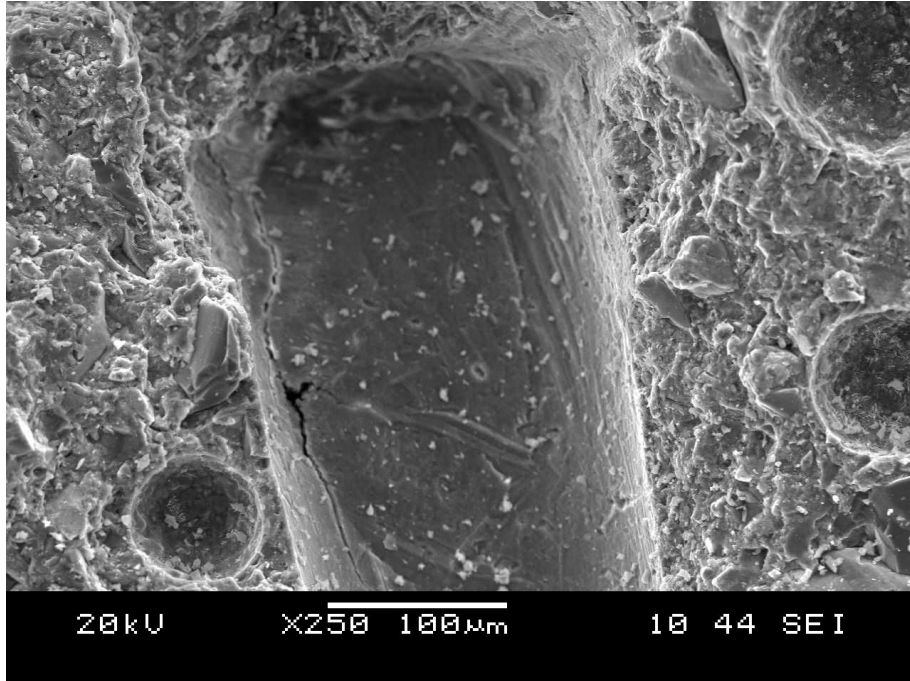
Su kürüne tabi tutulan numunelerde kristal şeklinde yapılar görülmektedir (Şekil 10.21). Bu boşluklarda görülen iğnemsî yapılarda Ca/Si oranı 3,38 olarak belirlenmiştir. Yüksek S içeriği ve iğnemsî görünüm bu yapının etrenjit ile karışık C – S – H olduğunu göstermektedir.



Şekil 10.22 NL serisinde Su kürü (28 gün) sonrası boşluk içi ve EDS analiz bölgesi

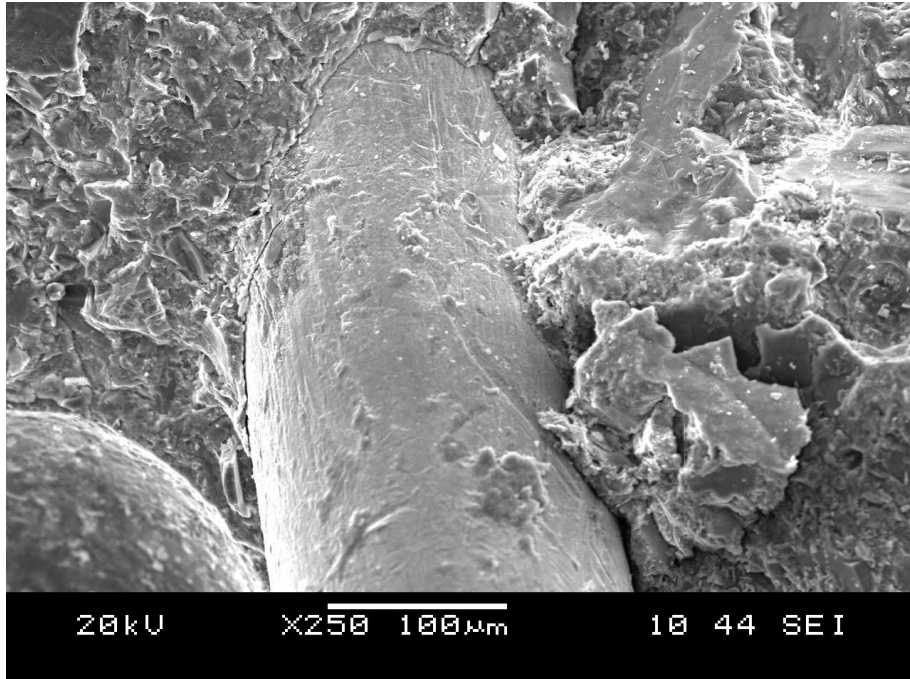


Şekil 10.23 NL serisinde 28 gün su kürüne tabi tutulmuş numunenin EDS analizi



Şekil 10.24 NL kodlu su kürü (28 gün) numunelerinde lif sıyrılma bölgesi

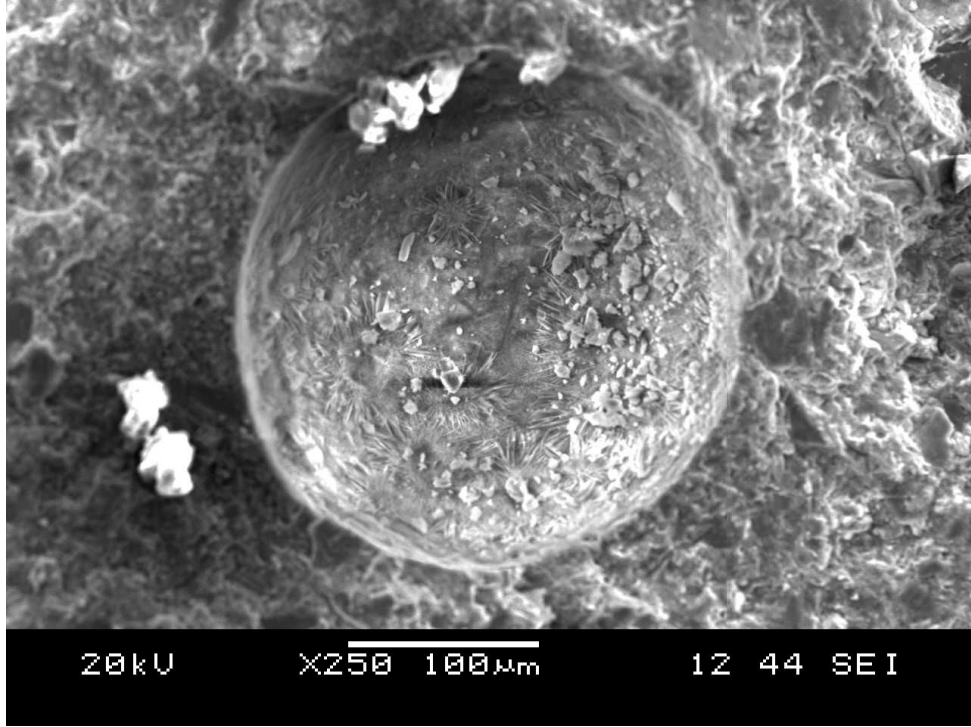
Şekil 10.24’de lif sıyrılma bölgesi ve burada oluşan yapılar görülmektedir. 28 gün su kürü sonrası lif sıyrılma bölgesi kalıp çıkışı örnekleriyle kıyaslandığında, daha gözeneksizdir. Şekil 10.25’de ise lif ile matrisin boşluksuz kenetlendiği görülmektedir.



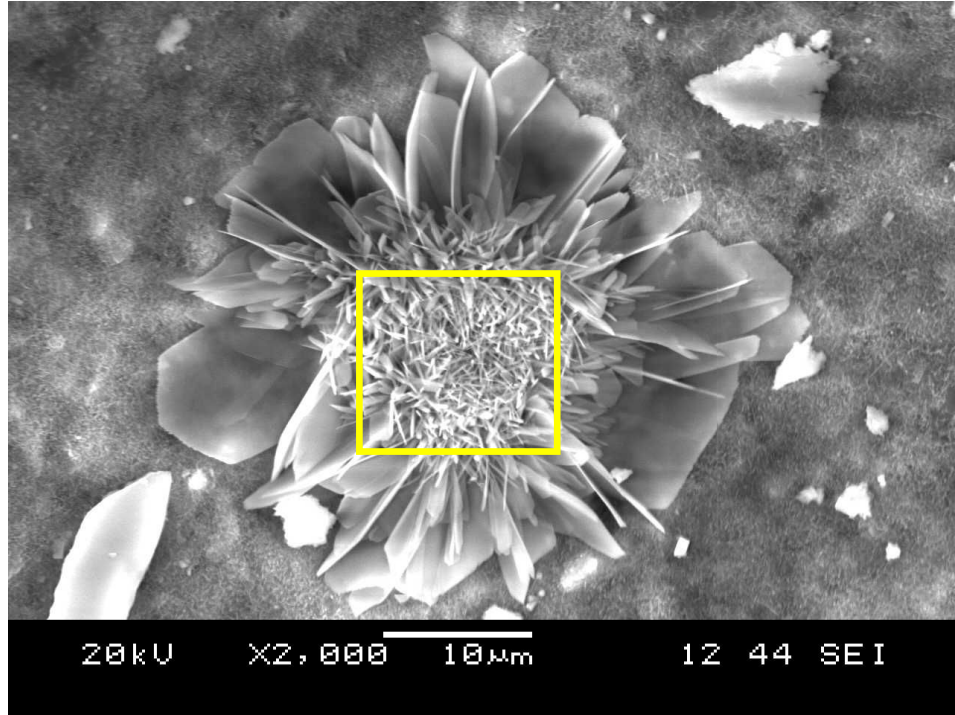
Şekil 10.25 NL kodlu su kürü (28 gün) numunelerinde lif – matris aderansı

Şekil 10.26 – 10.29, bağlayıcı olarak sadece çimento içeren lif katkılı numunelerin (NL kodlu) otoklavda 1 MPa basınçta 6 saat küre tabi tutulduktan sonra kırılan parça üzerinde gerçekleştirilen SEM analizlerini göstermektedir.

Şekil 10.26’da yapıda oluşan boşluk gösterilmiştir. 6 saatlik kür sonucu bu yapıda oluşan çiçeksi yapılar Şekil 10.27’de daha net görülmektedir.

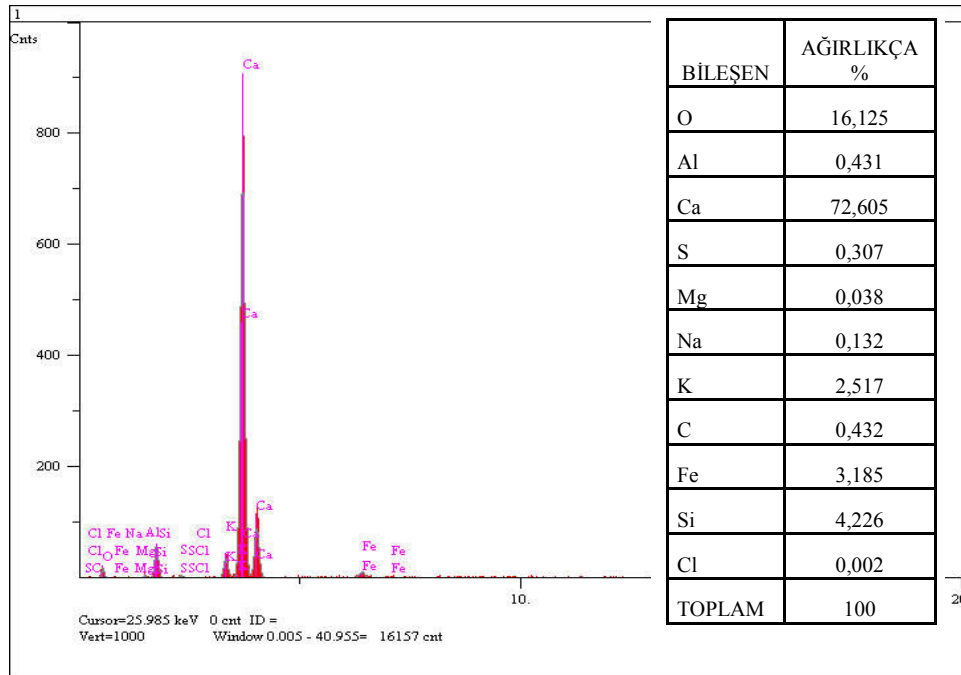


Şekil 10.26 NL kodlu 1 MPa basınçta 6 saat kür edilmiş numunelerin SEM analizleri



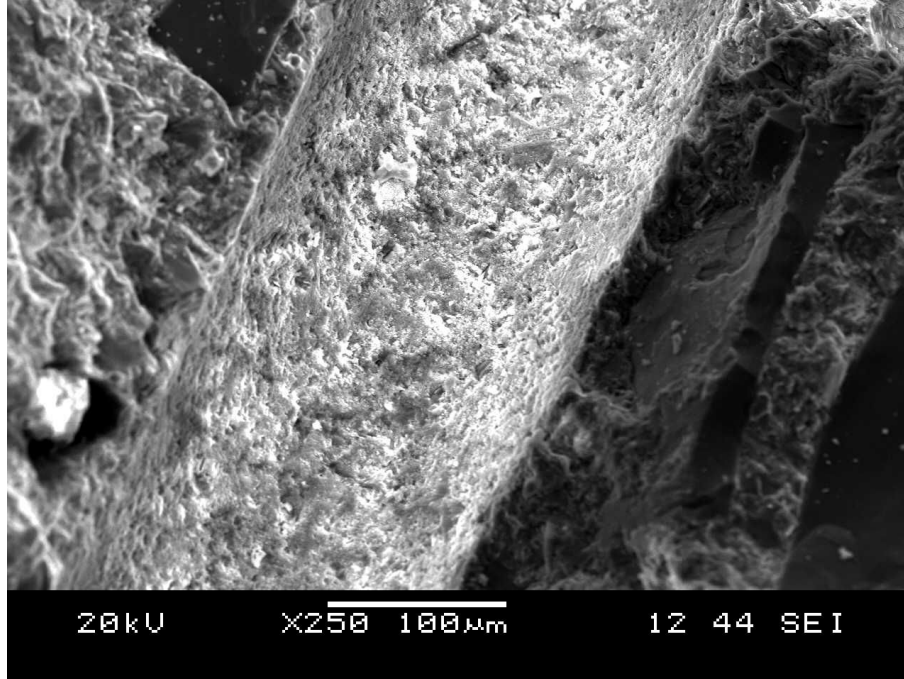
Şekil 10.27 NL kodlu 1 MPa basınçta 6 saat kür edilmiş örnekte EDS analiz bölgesi

Şekil 10.28’de ki tablodan anlaşıldığı üzere, çiçeksi yapının kalsiyumdan oluşan bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



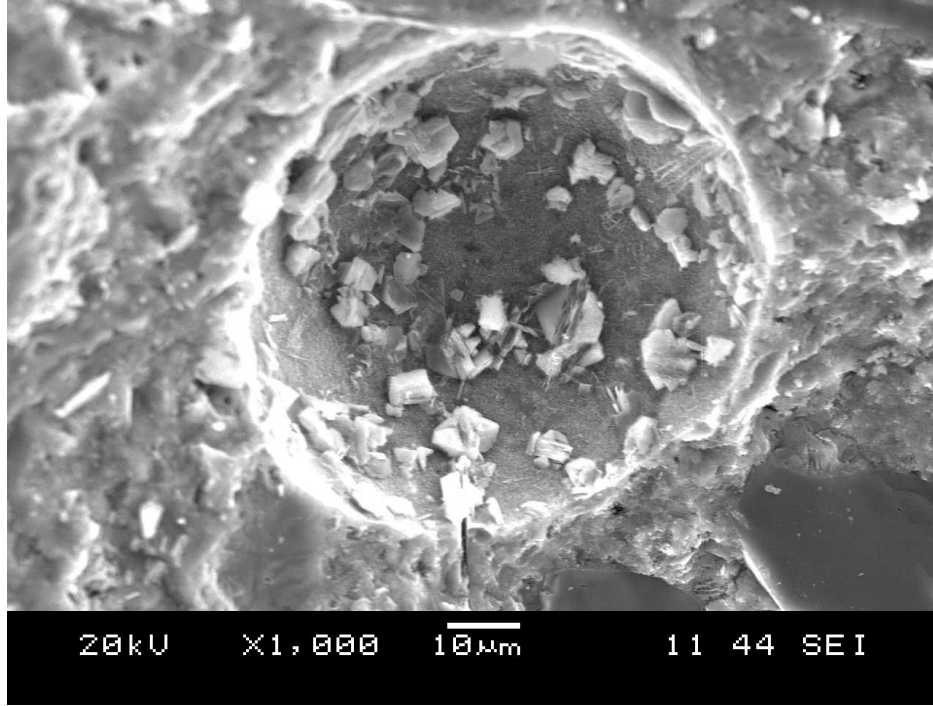
Şekil 10.28 NL kodlu 1 MPa basınçta 6 saat kür edilmiş örneğin EDS analizi

Şekil 10.29’da lif sıyrılma bölgesinde oluşan yapılar görülmektedir.

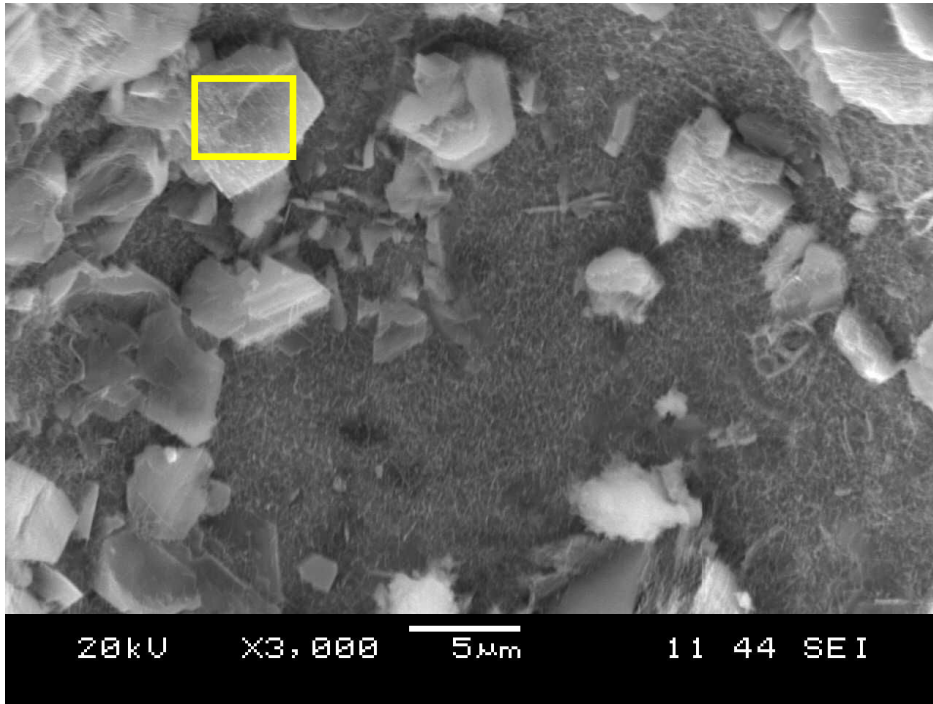


Şekil 10.29 NL kodlu 1 MPa basınçta 6 saat kür edilmiş örnekte lif sıyrılma bölgesi

Şekil 10.30 – 10.32, bağlayıcı olarak sadece çimento içeren lif katkılı (NL kodlu), otoklavda 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş numunelerin SEM analizleridir. Şekil 10.30’da ki boşlukta, ön planda kireç esaslı yapı, arka planda ise yapraksı yapı görülmektedir.

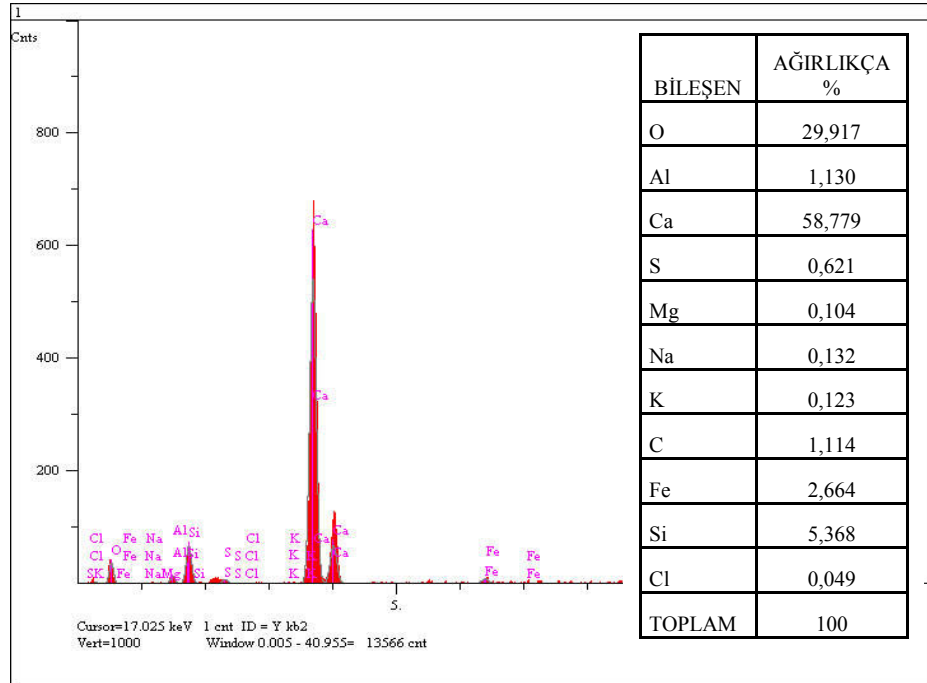


Şekil 10.30 NL kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnekte boşluk içi



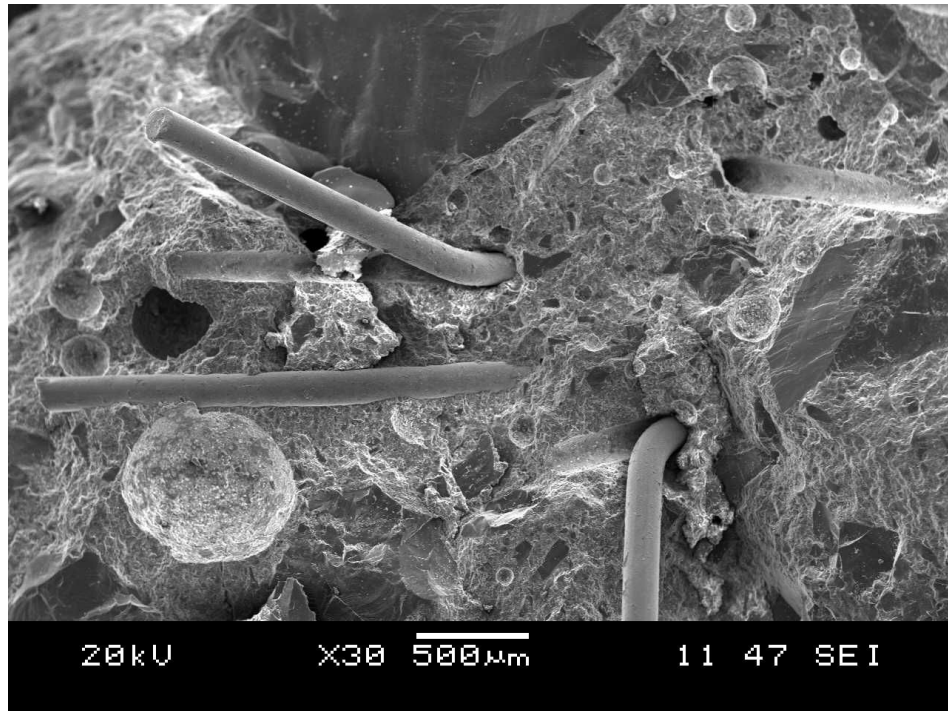
Şekil 10.31 NL kodlu numunede boşluk iç yapısı ve EDS analiz bölgesi

Şekil 10.31’de gösterilen bölgenin EDS analizi sonucu, bu yapının kalsiyum esaslı bir yapı olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 10.32).

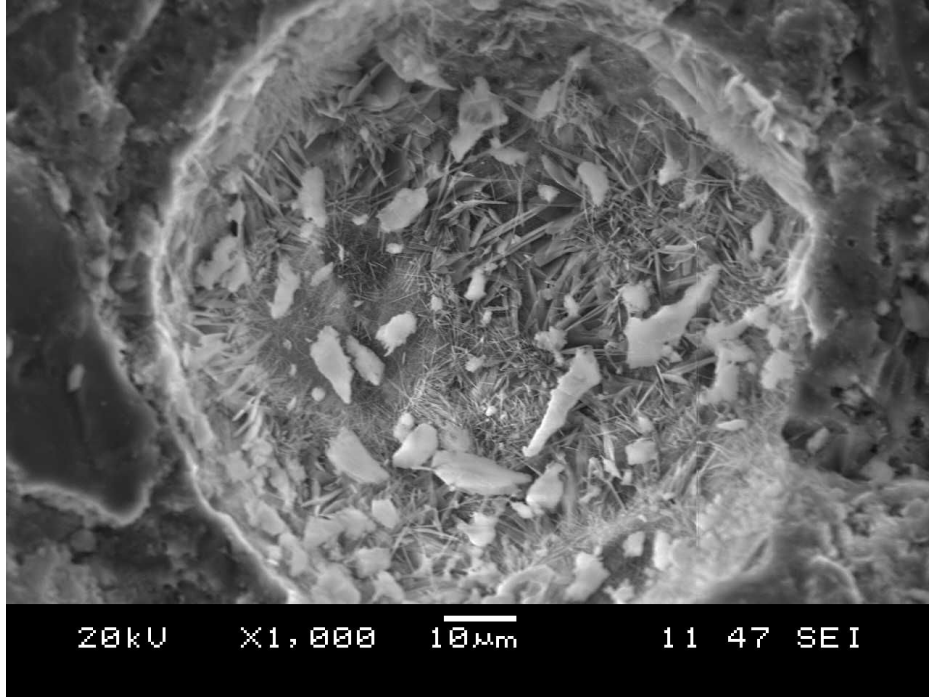


Şekil 10.32 NL kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş numunede EDS analizi

Şekil 10.33 – 10.36, NL kodlu 1 MPa basınçta 12 saat kür edilmiş numunelerin SEM analizleridir. Şekil 10.33’de bu numunenin boşluk, lif ve lif sıyrılma bölgeleriyle genel görünümü verilmiştir.



Şekil 10.33 NL kodlu 1 MPa basınçta 12 saat kür edilmiş numunelerin SEM analizi



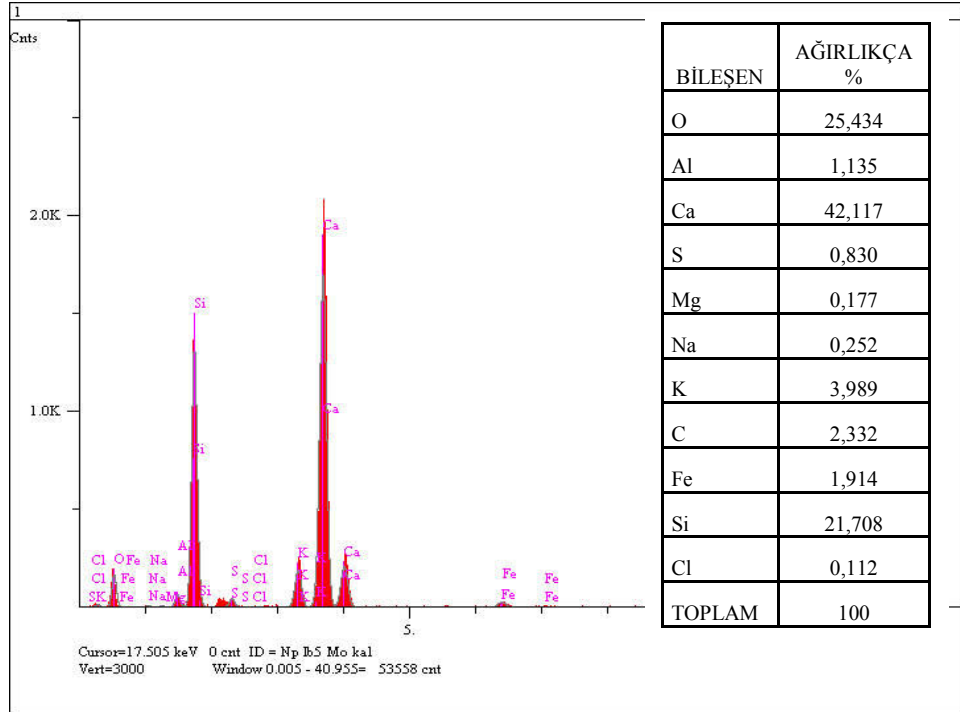
Şekil 10.34 NL kodlu 1 MPa basınçta 12 saat kür edilmiş numunede oluşan yapı

Şekil 10.34'te boşlukta oluşan iğnemsî ve kireçsî yapılar görülmektedir. Şekil 10.35'te bu bölgeye daha yakından bakıldığında ise bu bölgede iğnemsî bir yapının oluştuğu gözlemlenmektedir.



Şekil 10.35 NL serisinde 1 MPa basınçta 12 saat kürde EDS analiz bölgesi

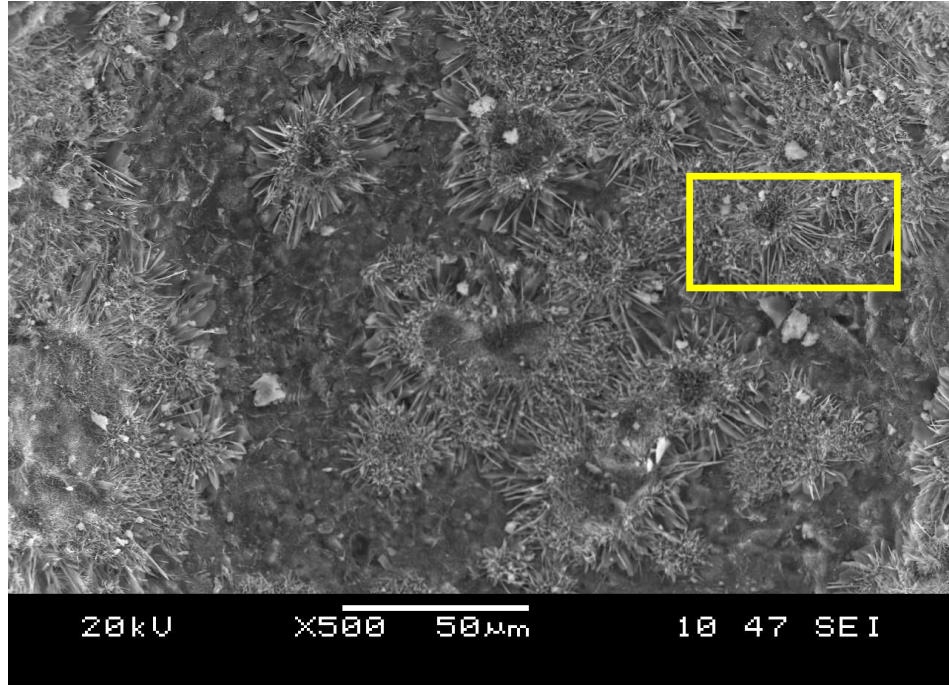
Şekil 10.35'te EDS analizi yapılan bölge gösterilmiştir. Bu EDS analizinin sonucuna göre bu bölgedeki Ca/Si oranı 1,94'tür.



Şekil 10.36 NL kodlu 1 MPa basınçta 12 saat kür edilmiş numunenin EDS analizi

Şekil 10.37 – 10.39, NL kodlu 1 MPa basınçta 24 saat kür edilmiş numunelerin SEM analizleridir.

Şekil 10.37'de bu örneklerde oluşan yapı görülmektedir. Şekilden de anlaşıldığı üzere otoklavda uzun süre kür edilen numunelerin iç yapısında yarı saydam yapraklı şekiller görülmektedir. Otoklavda uzun süre kürün, yarardan çok zarar getireceği literatürde ifade edilmiştir (Yazıcı ve diğer., 2008). Uzun kür, aşırı kristalleşmeye yol açmakta böylece mekanik özellikler bu çalışmada olduğu gibi, olumsuz etkilenmektedir.



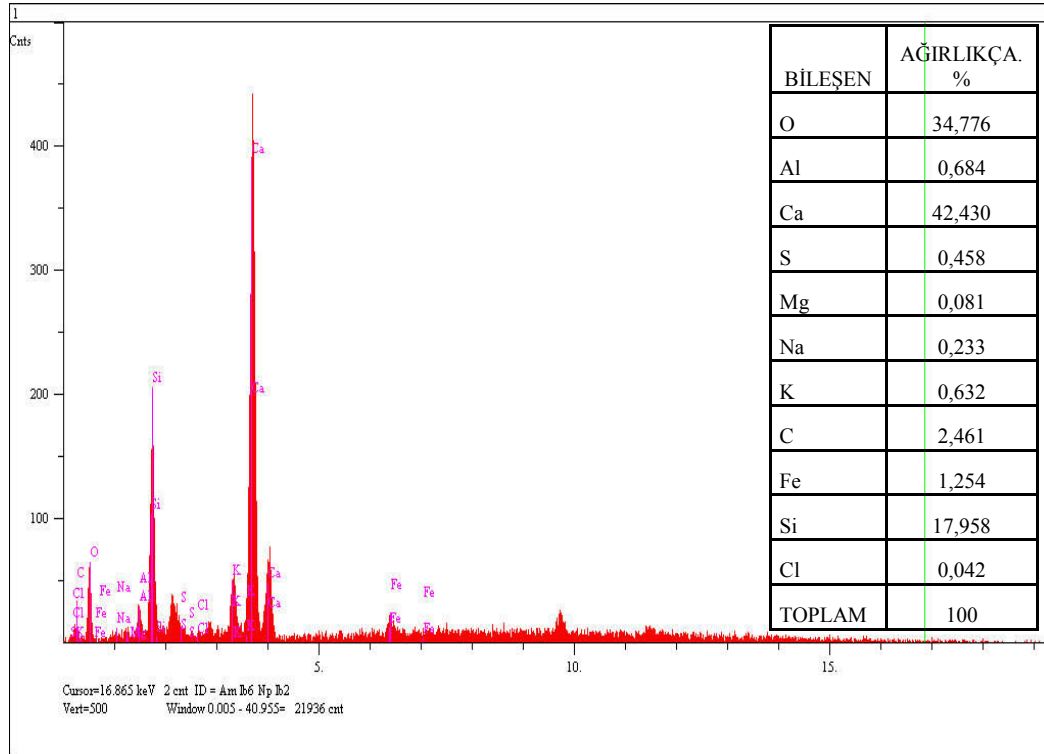
Şekil 10.37 NL örneğinin 1 MPa basınçta 24 saat kürde EDS analiz bölgesi



Şekil 10.38 NL kodlu 1 MPa basınçta 24 saat kür edilmiş numunenin içyapısı

Şekil 10.38'de bu yapıların incelenmesiyle çiçeksi yapılar olduğu gözlemlenmektedir. Bu yapıların eğilme ve basınç dayanımlarında düşüşe sebep

olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgeye yapılan EDS analizi sonucu, Ca/Si oranı 2,36'dır.

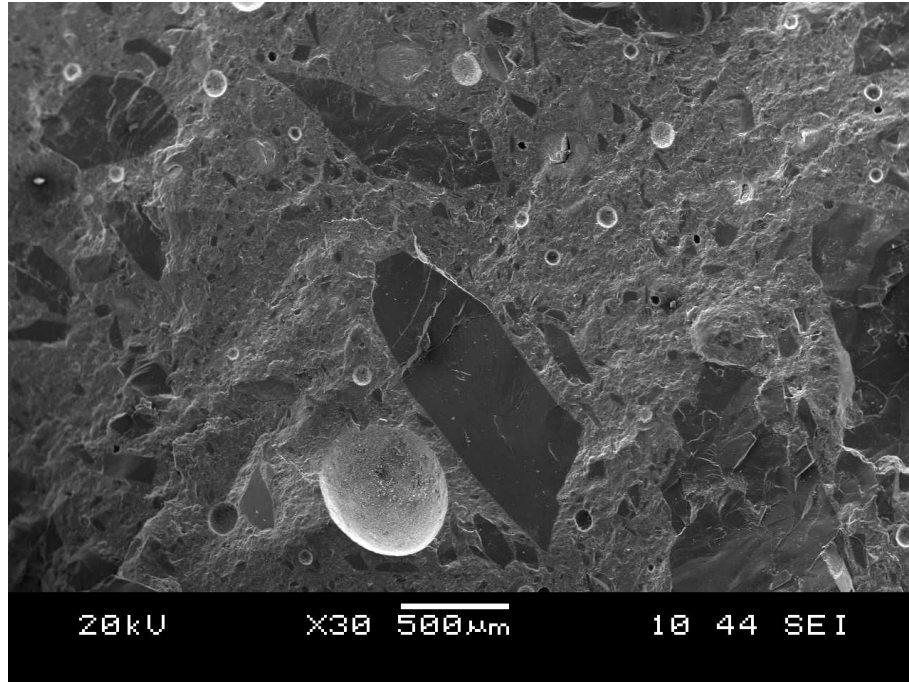


Şekil 10.39 NL kodlu 1 MPa basınçta 24 saat kür edilmiş numunenin EDS analizi

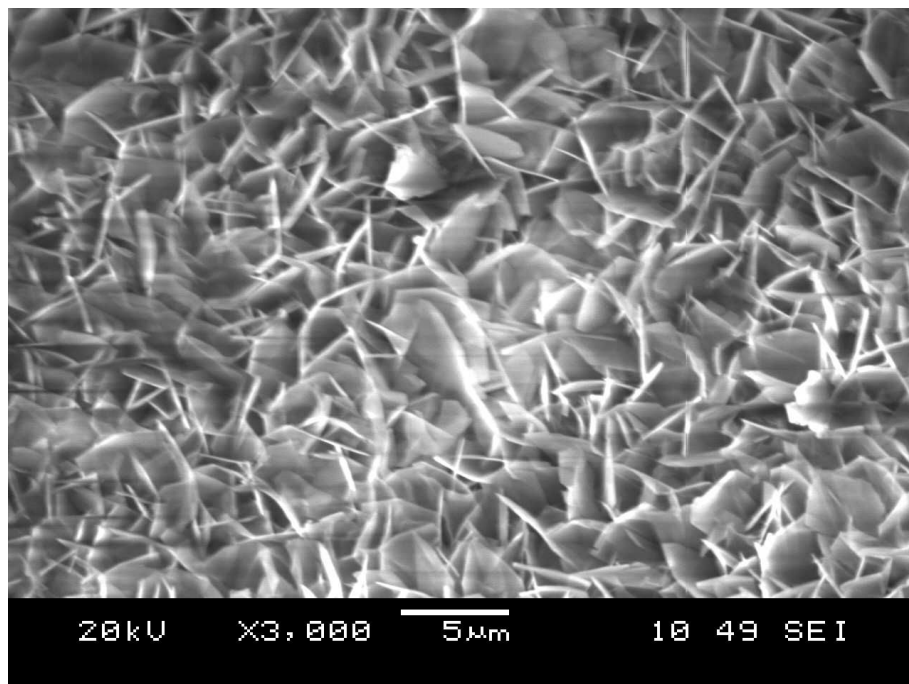
10.1.3 Silis Dumanı Katkılı Serilerin SEM Analizleri

Bu kısımda, silis dumanı katkılı numunelerin (SD kodlu), otoklavda 10 saat süreyle farklı basınçlarda kür edildikten sonraki SEM analizleri verilmektedir. Buna göre silis dumanının katılması ile morfolojinin yapraksı-gülsü görünüm aldığı, Ca/Si oranının 0,93 – 2,13 aralığında değiştiği, Silis takviyesi ile beklendiği şekilde α -C₂SH'ten tobermorite dönüşümün gerçekleştiği gözlenmektedir. Bu bulgular mekanik özellik deney sonuçları ile paralellik arz etmektedir. Şekil 10.44'de görüldüğü gibi matris-agrega arayüzeyi oldukça boşluksuz olup, silis dumanı katkısı ile artan mukavemeti açıklamaktadır.

Şekil 10.40 – 10.44, SD kodlu 1 MPa kür basıncında 10 saat kür edilmiş örneklerin SEM analizleridir. Şekil 10.40'da silis dumanı içeren örneğin genel görüntüsü verilmiştir.

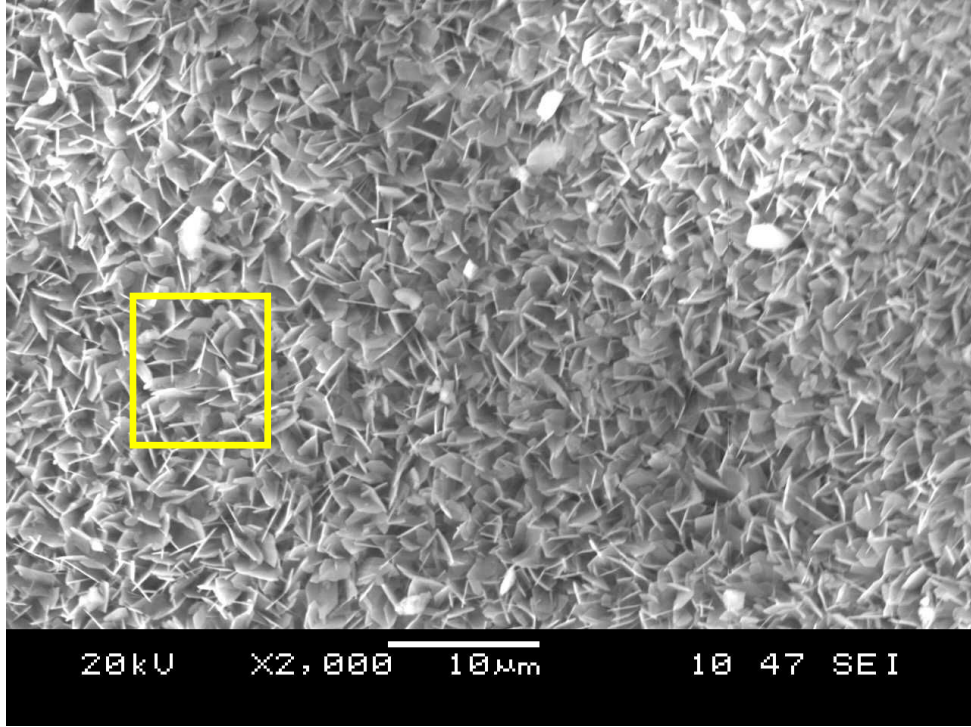


Şekil 10.40 SD kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş numunenin SEM analizi

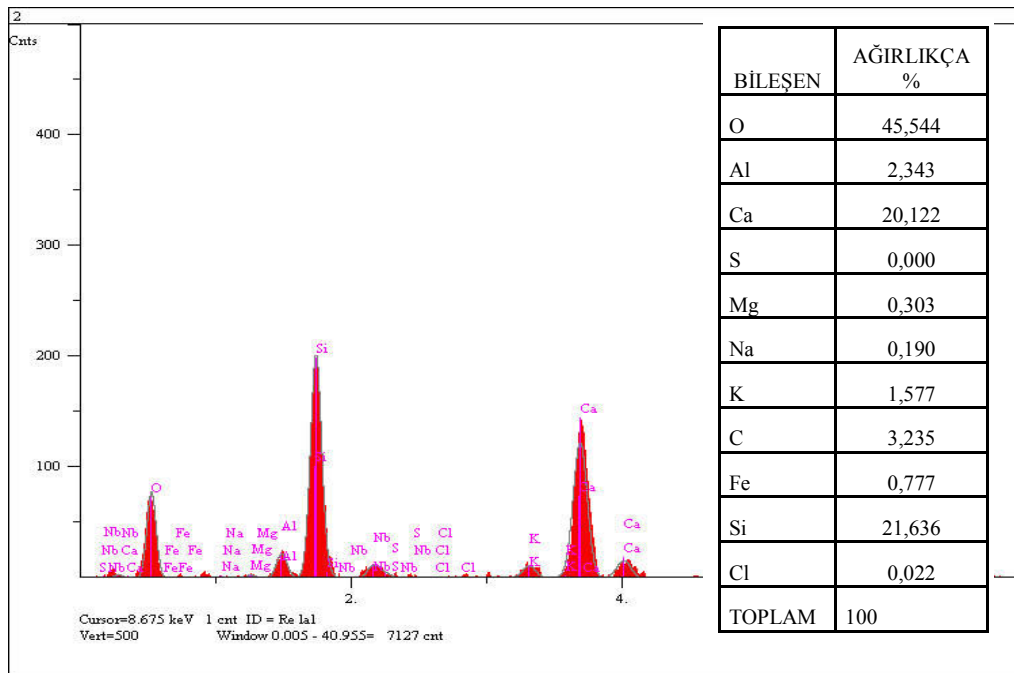


Şekil 10.41 SD kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örneğin içyapısı

Şekil 10.41 ve 10.42’de görüldüğü gibi, otoklavda 1 MPa basınçta 10 saat süreyle kür edilmiş silis dumani katkılı numunelerin içyapısında oluşan yoğun yapraklı şekiller görülmektedir.



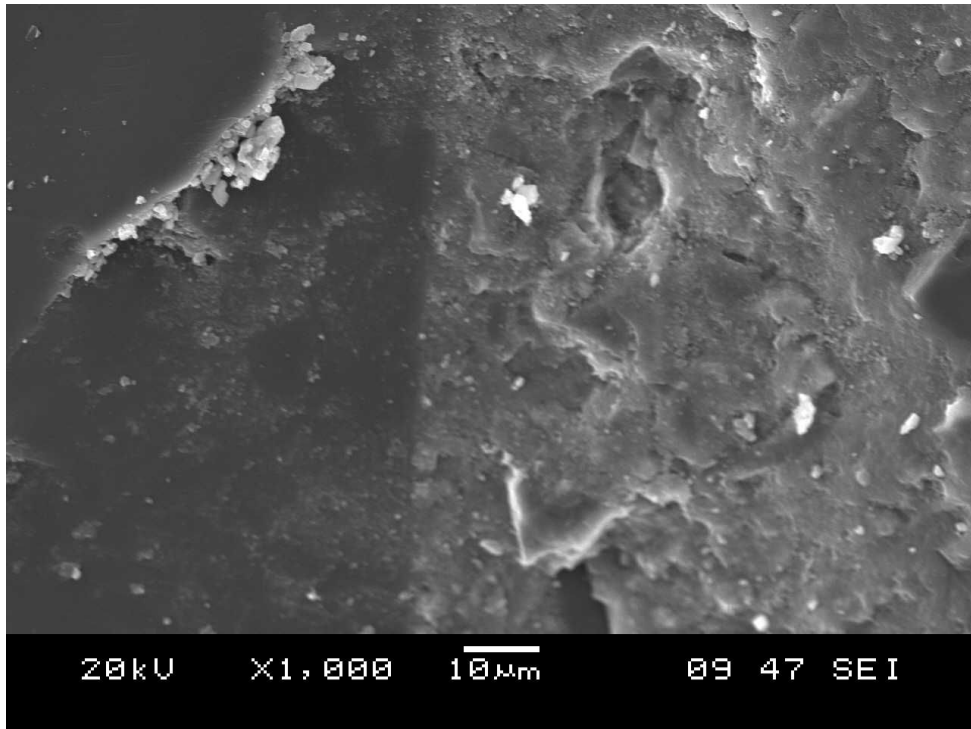
Şekil 10.42 SD kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örneğin EDS analiz bölgesi



Şekil 10.43 SD kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş numunenin EDS analizi

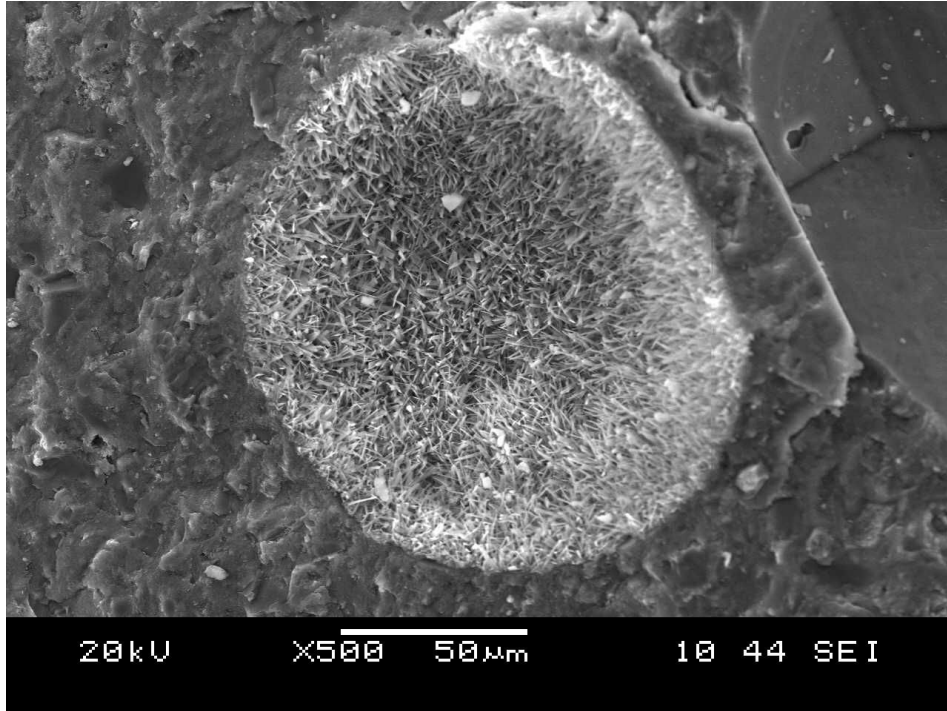
Şekil 10.43'de yapraksı şekillere yapılan EDS analiz sonucu gösterilmiştir. Tabloya göre bu bölgenin Ca/Si oranı 0,93'tür. Karışımlara silis dumanının eklenmesiyle Ca/Si oranında beklendiği şekilde azalma olduğu görülmektedir. Bu durum, $\alpha - C_2SH$ 'tan tobermorite dönüşümün gerçekleştiğini göstermektedir.

Şekil 10.44'de ise agrega – matris bölgesi görülmektedir. Silis dumanının boşlukları doldurma özelliği sayesinde agrega – matris kenetlenmesinin boşluksuz biçimde olduğu görülmektedir.



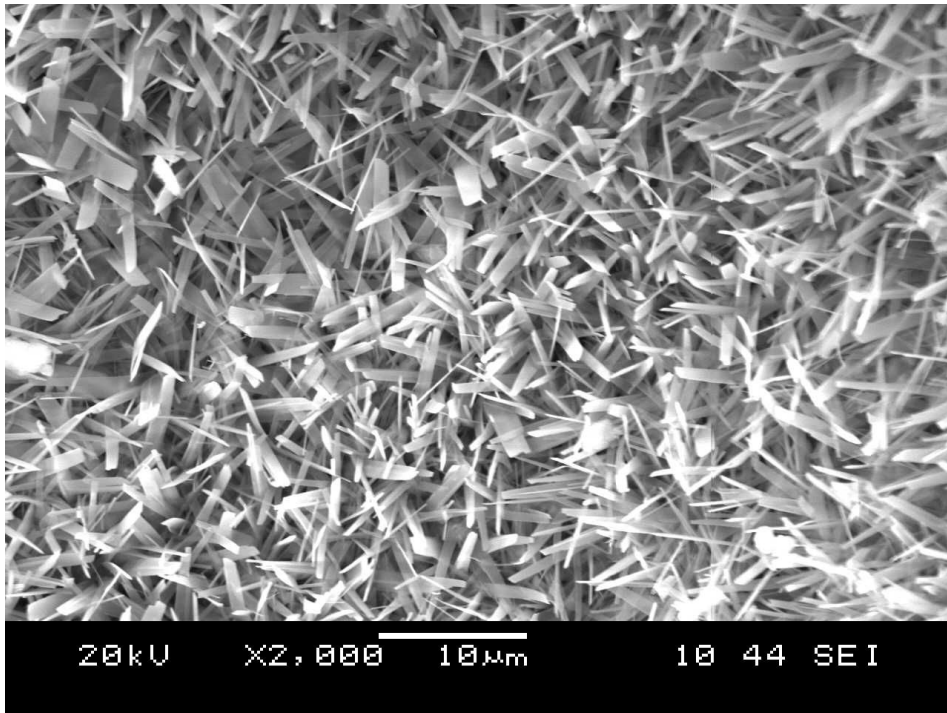
Şekil 10.44 SD kodlu örneğin agrega – matris bölgesi

Şekil 10.45 – 10.46'de, otoklavda 2 MPa kür basıncında 10 saat süreyle kür edilmiş SD kodlu numunelerin SEM analizleri verilmiştir.



Şekil 10.45 SD kodlu 2 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örneğin içyapısı

Şekil 10.45'te boşluk genel görünümü verilmektedir. Şekil 10.46'da ise bu boşluklarda oluşan yapı görülmektedir.

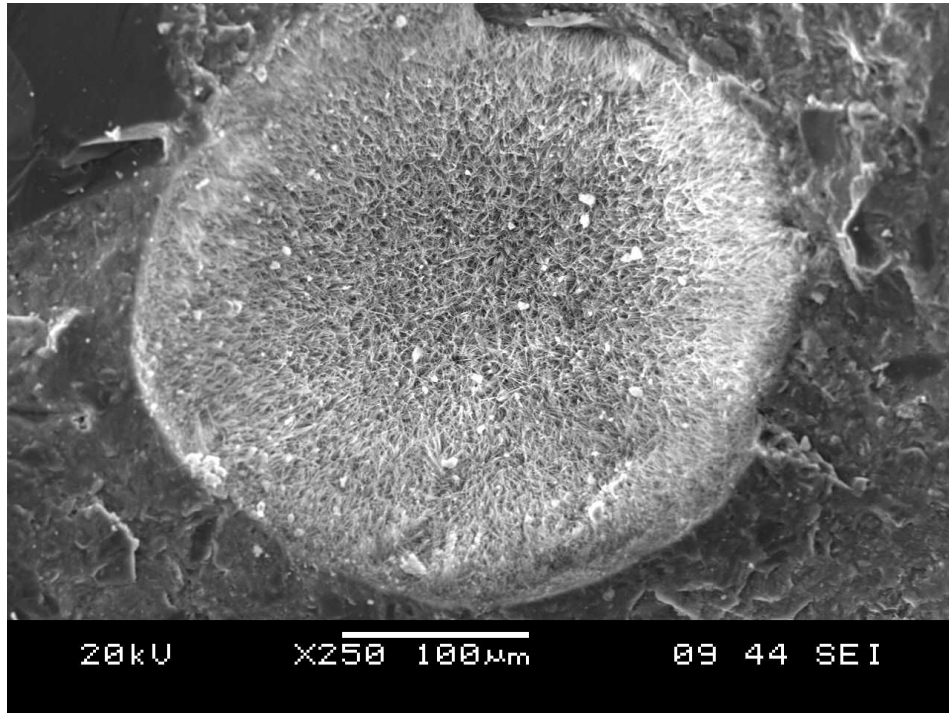


Şekil 10.46 SD kodlu 2 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örneğin EDS analiz bölgesi

Şekillerden de anlaşılacağı üzere, kür basıncının artmasıyla yapraksı oluşumların iğnemi oluşumlara doğru değiştiği görülmektedir.

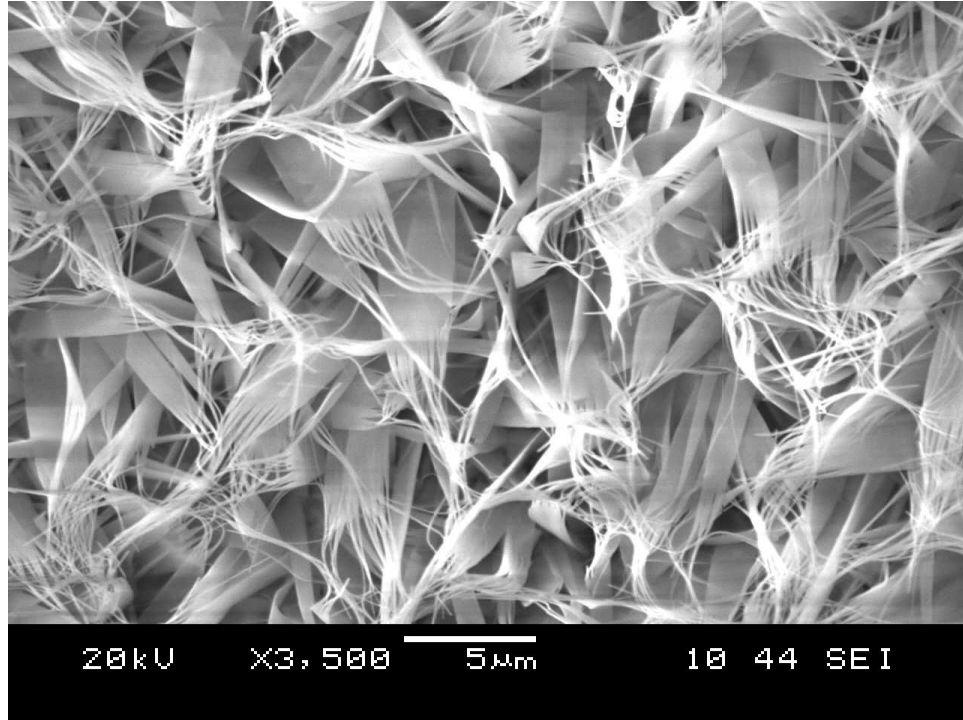
Şekil 10.47 – 10.49’da, silis dumanı katkılı, 3 MPa kür basıncında 10 saat kür edilmiş numunelerin SEM analizi görüntüleri verilmiştir.

Şekil 10.47’de boşluk yapısının genel görünümü verilmektedir.

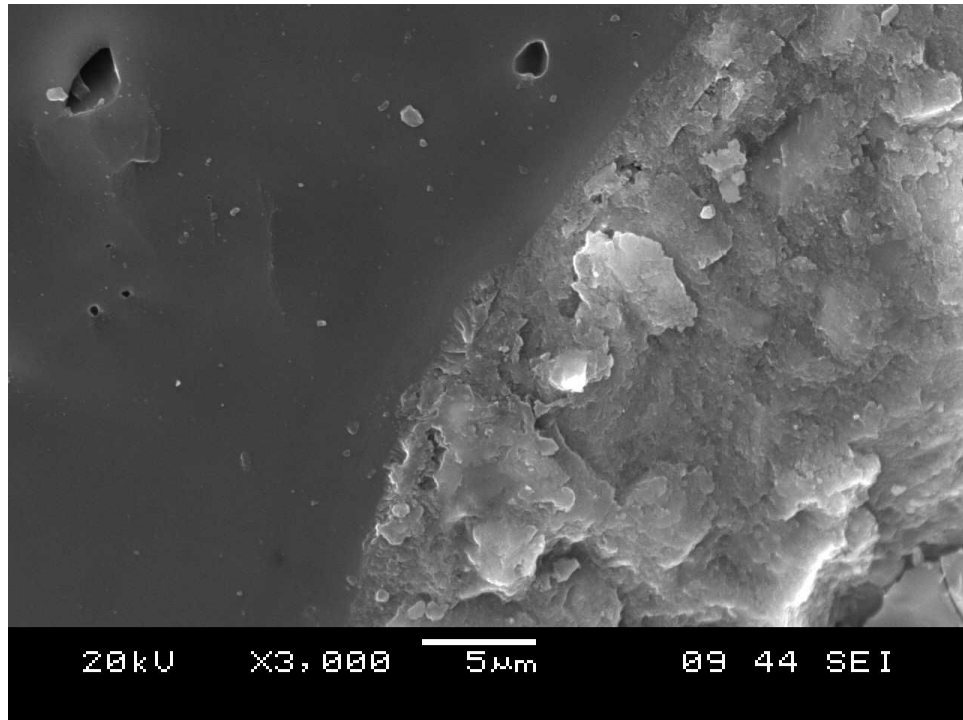


Şekil 10.47 SD kodlu 3 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş numunenin içyapısı

Şekil 10.48’de, yüksek basınçta buhar kürünün silis dumanı üzerindeki etkisini görmekteyiz. Boşluk içyapısında oluşan morfolojinin dalgalı iğnemi – yapraksı şekilde olduğu görülmektedir.



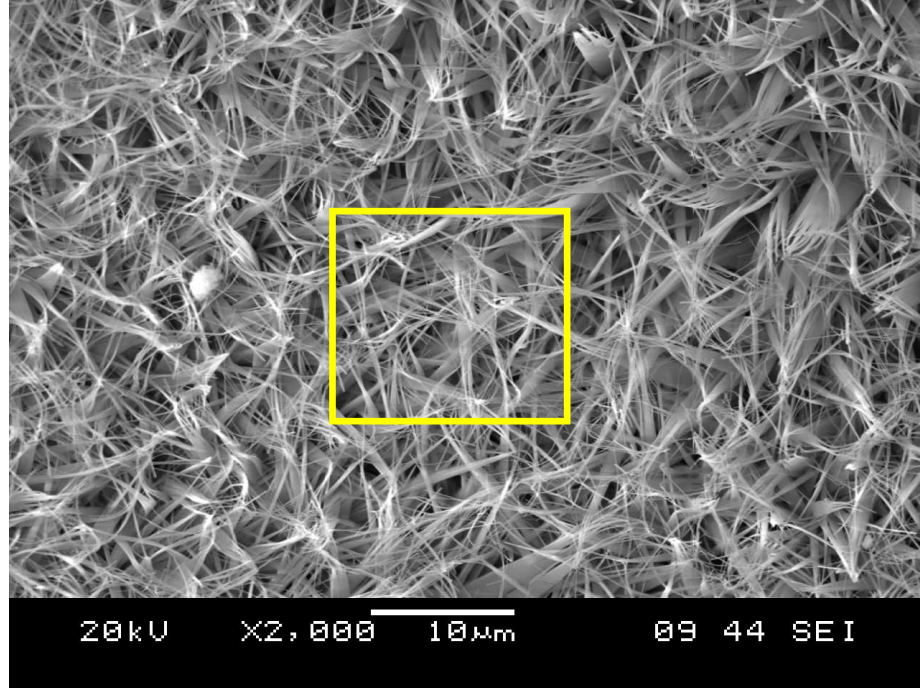
Şekil 10.48 SD kodlu 3 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örneğin içyapısı



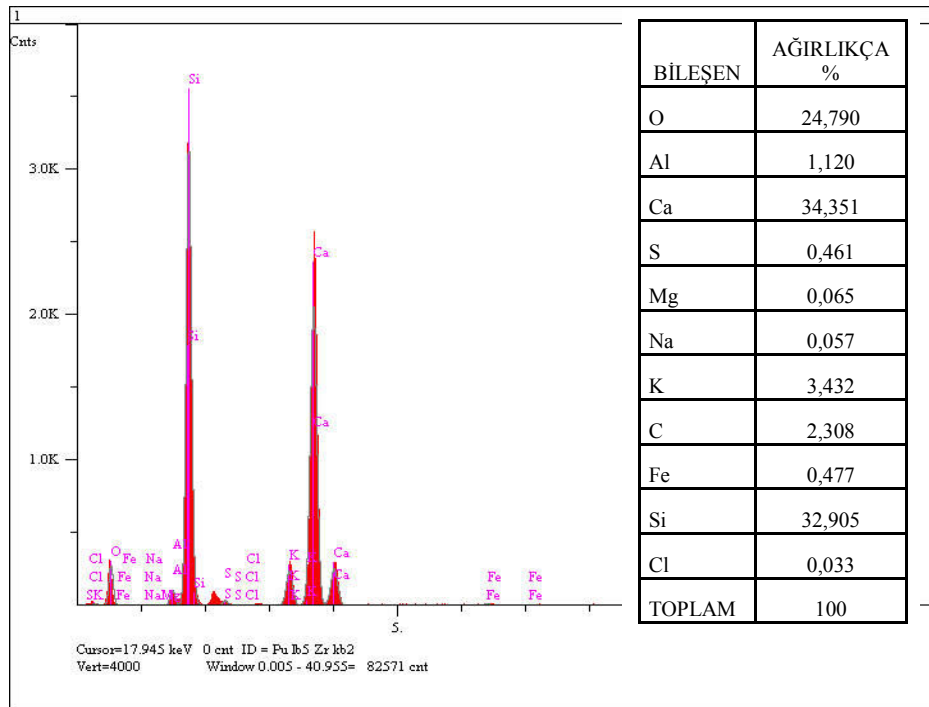
Şekil 10.49 SD numunesinin 3 MPa basınçta 10 saat kürde agrega – matris bölgesi

Şekil 10.49’da agrega – matris bölgesinin boşluksuz kenetlendiği görülmektedir.

Şekil 10.50’de EDS analizinin yapıldığı alan görülmektedir. Bu bölgenin analizi sonucu ortaya çıkan tabloda Ca/Si oranı 1,04’tür. Bu oran, tobermorite dönüşümün gerçekleştiği şeklinde yorumlanabilir.



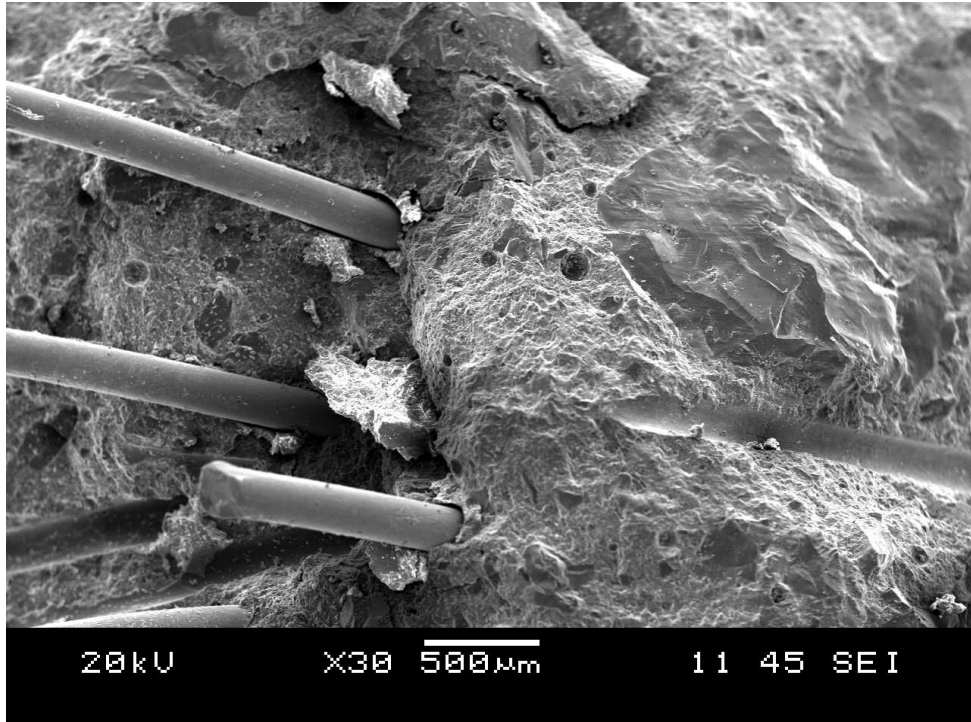
Şekil 10.50 SD örneğinin 3 MPa basınçta 10 saat kürde EDS analiz bölgesi



Şekil 10.51 SD kodlu 3 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örneğin EDS analizi

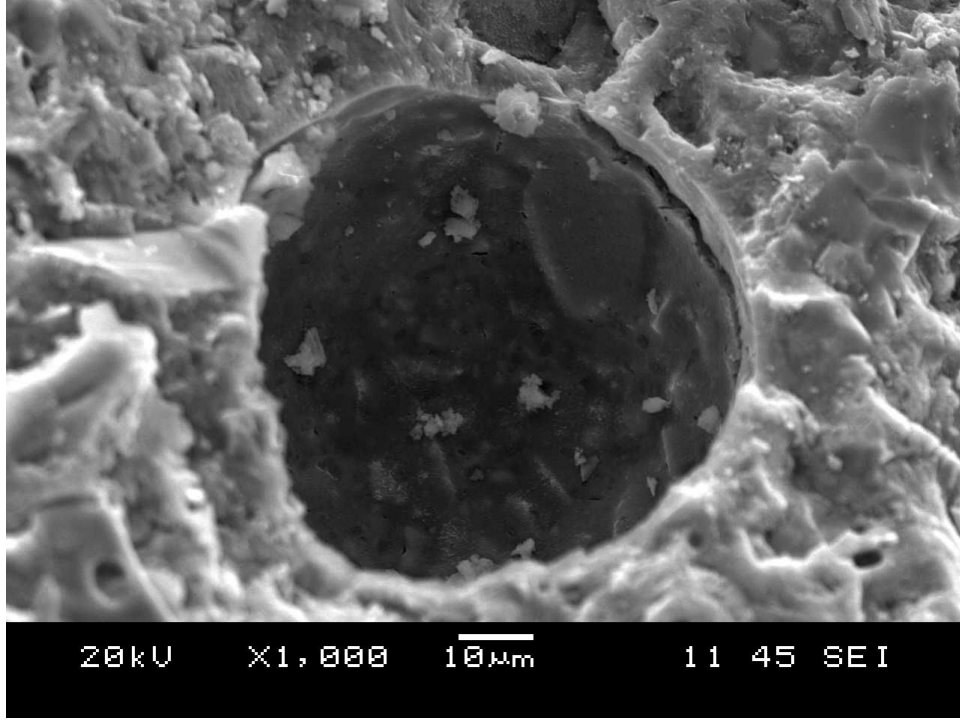
10.1.4 Silis Dumanı İçeren Lif Katkılı Serilerin SEM Analizleri

Bu kısımda silis dumanı içeren lif katkılı numunelerin (SDL kodlu) kalıptan alındıktan sonra, 28 günlük su küründen sonra ve 1 MPa basınç altında 6, 10, 12 ve 24 saat kür edildikten sonra gerçekleştirilen SEM analizleri verilmiştir.



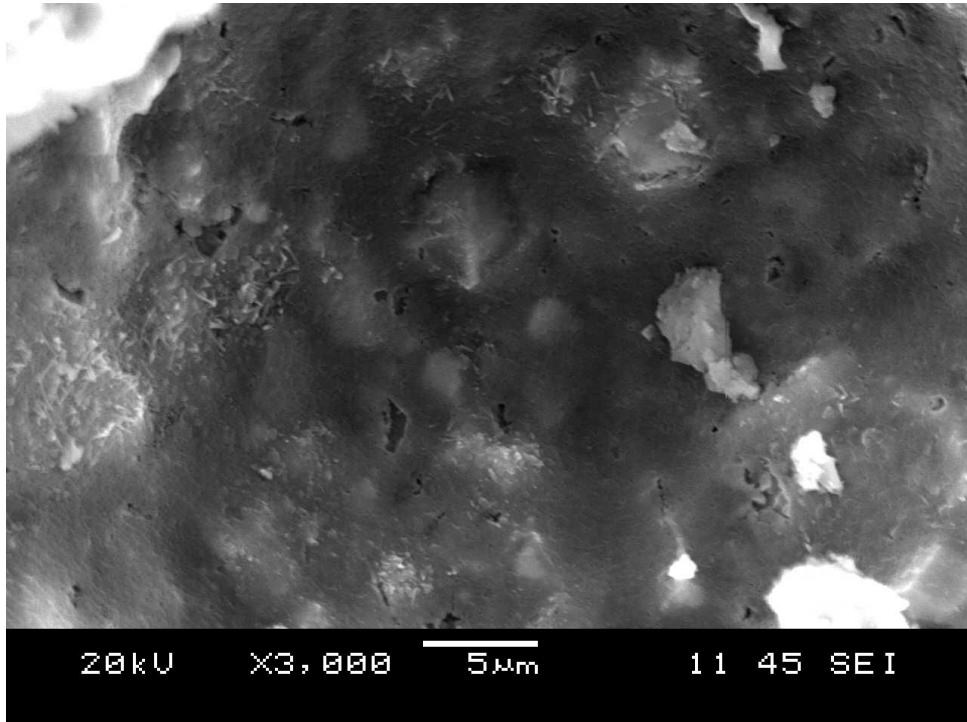
Şekil 10.52 SDL kodlu serilerin genel görünümü

Silis dumanı içeren lif katkılı numunelerin genel görüntüsü Şekil 10.52’de verilmiştir. Şekil 10.53 – 10.58’de ise hiçbir kür koşullarına tabi tutulmayan numunelerin SEM analizleridir. Bu analizlerden yola çıkarak, bu numunelerin içyapısında oluşumların henüz tamamlanmadığı söylenebilir. Otoklav geçirmemiş numunelerde boşlukların, boş veya kireç esaslı yapılarla dolu olduğu daha önce rapor edilmiştir (Yazıcı ve diğer., 2008)



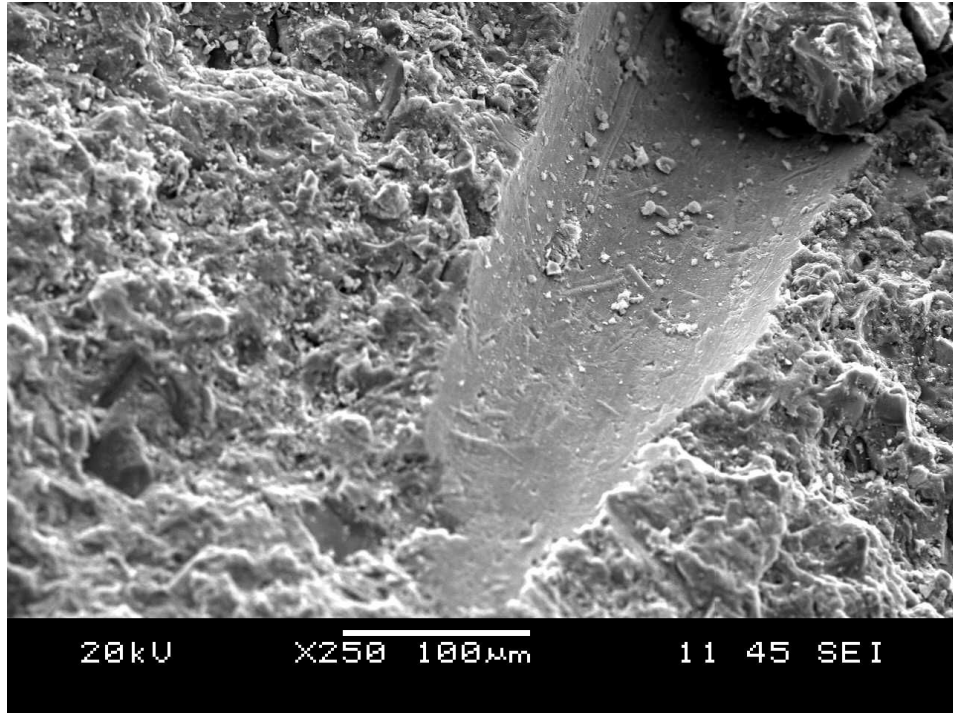
Şekil 10.53 SDL kodlu kalıp çıkış (küre tabii tutulmayan) örneğinde boşluk görünümü

Şekil 10.53’de boşluk genel görünümü verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere, bu boşlukta herhangi bir yapının oluşmadığı anlaşılmaktadır.

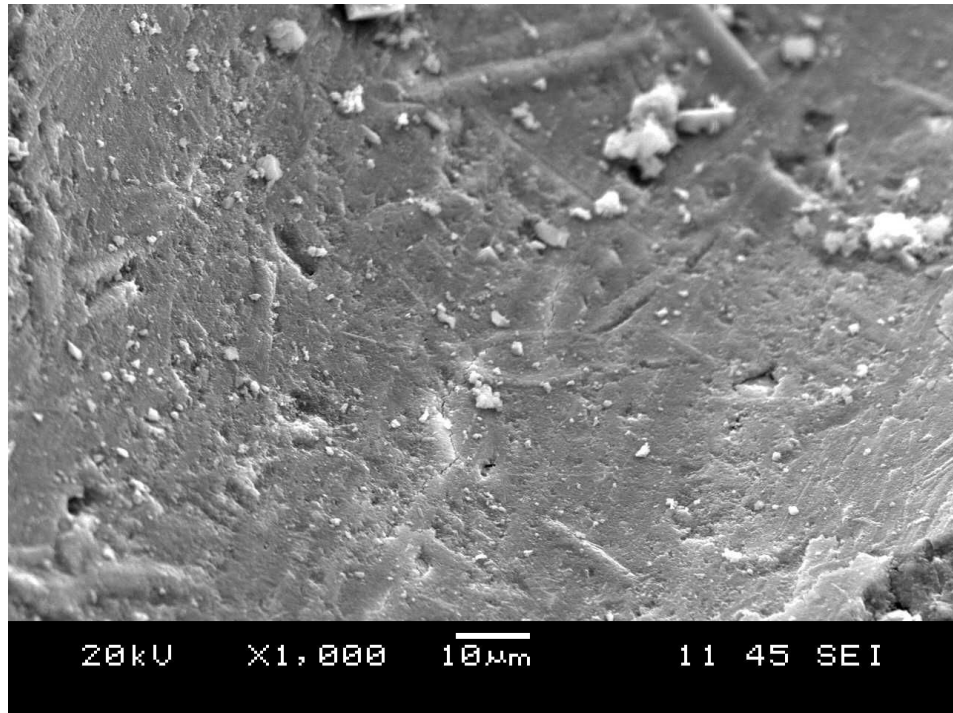


Şekil 10.54 SDL kodlu kalıp çıkış (küre tabii tutulmayan) örneği içyapısı

Şekil 10.55’de ve Şekil 10.56’da, lif sıyrılma bölgesi görülmektedir. Sıyrılma bölgesi oldukça gözeneksizdir.

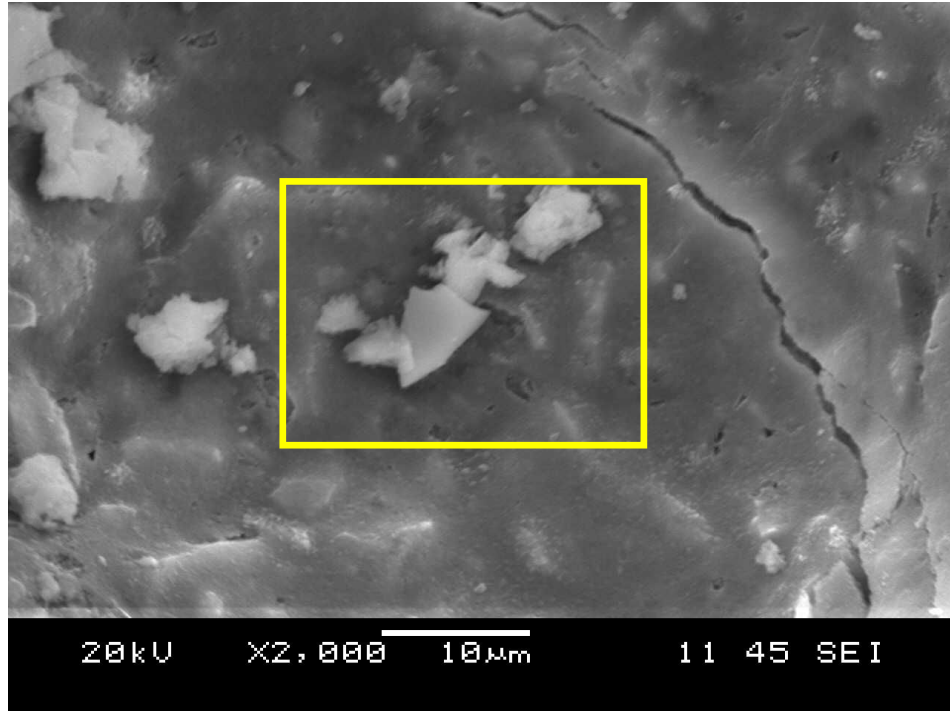


Şekil 10.55 SDL kodlu kalıp çıkış numunelerinde lif sıyrılma bölgesi

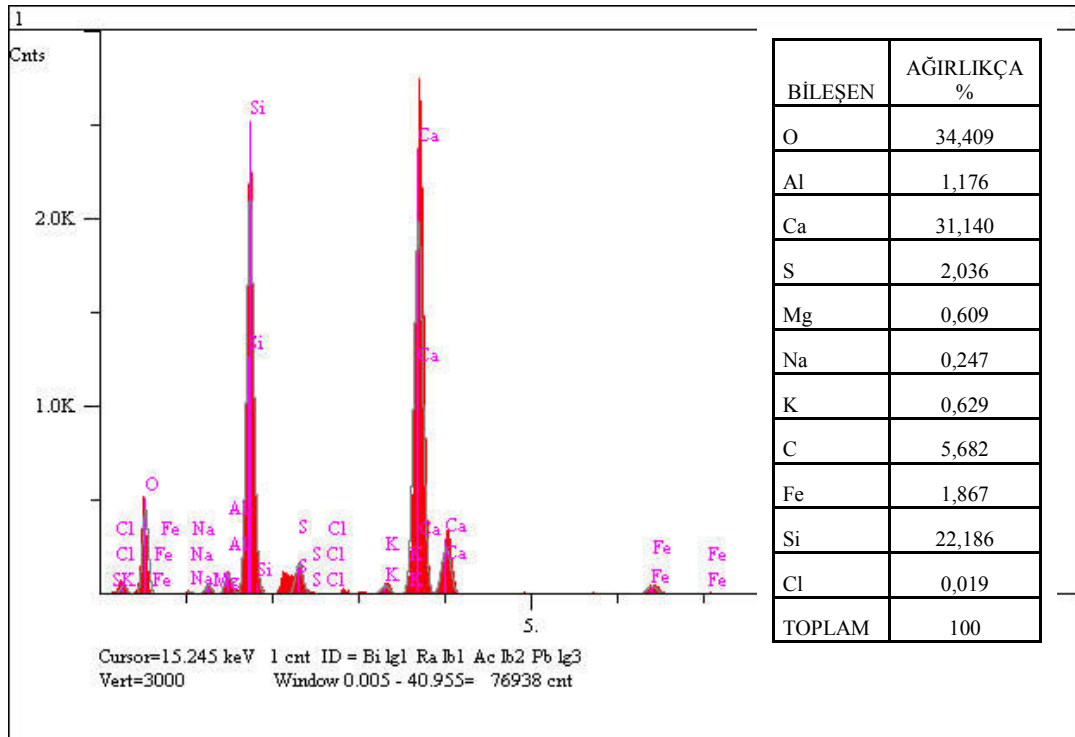


Şekil 10.56 SDL kodlu kalıp çıkış örneğinde lif sıyrılma bölgesi

Şekil 10.57'de boşluk kenarındaki çatlak görülmektedir. Bu bölgenin EDS analizine göre Ca/Si oranı 1,40 olarak bulunmuştur.

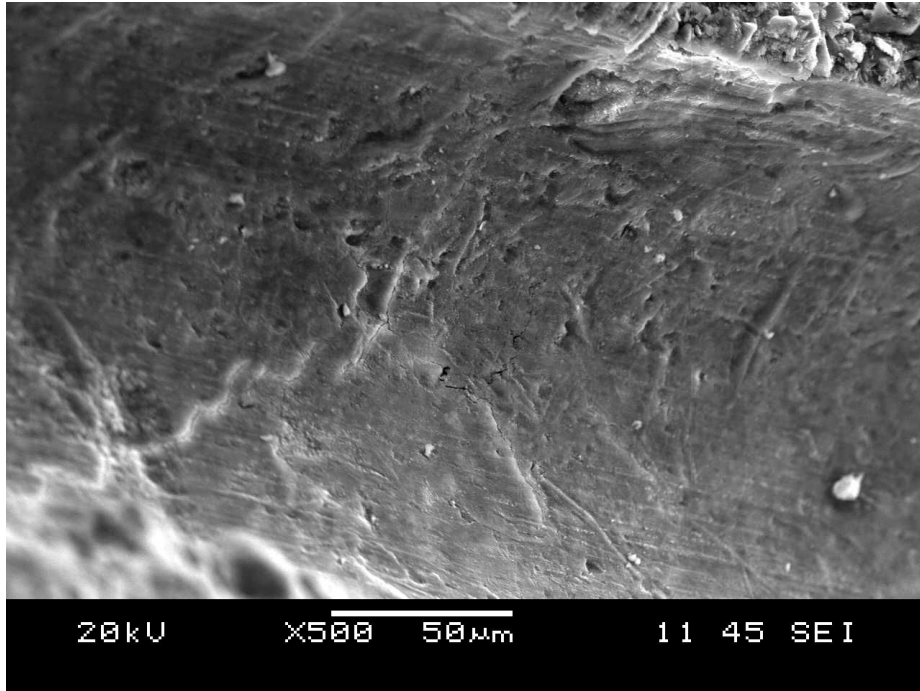


Şekil 10.57 SDL kodlu kalıp çıkış örneklerinde EDS analiz bölgesi



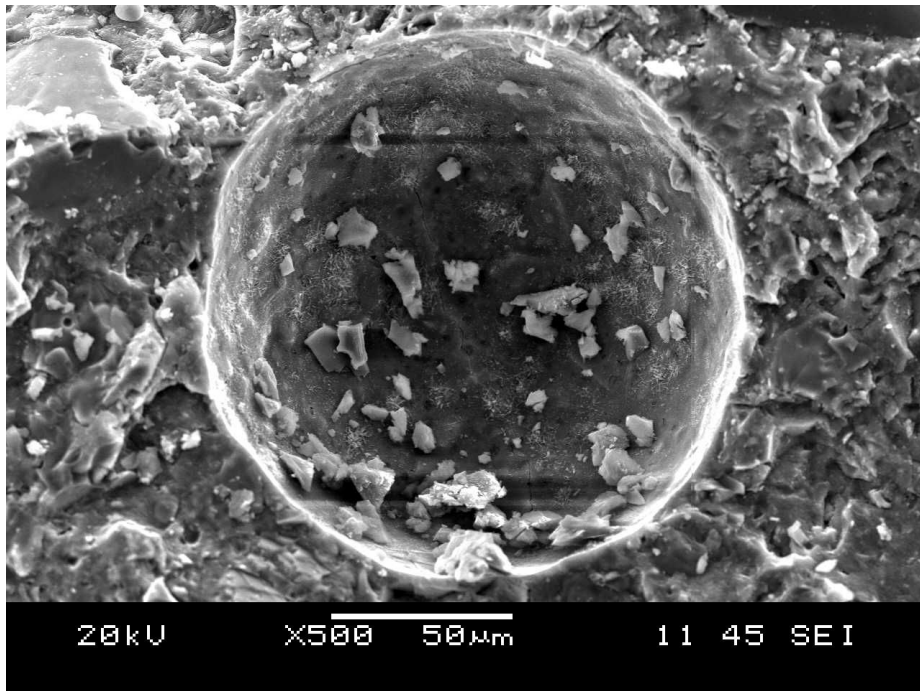
Şekil 10.58 SDL kodlu kalıp çıkış (küre tabii tutulmayan) örneklerinde EDS analizi

Şekil 10.59 – 10.62, silis dumanı ve lif katkı, 28 gün su kürüne tabi tutulmuş numunelerin SEM analizleri verilmiştir.



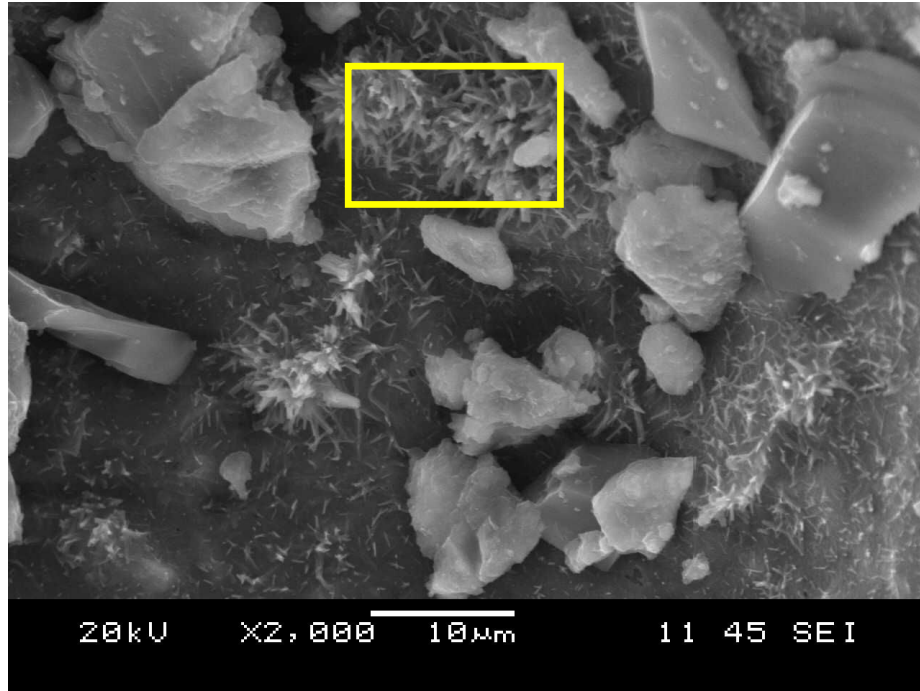
Şekil 10.59 SDL kodlu 28 günlük su kürü numunelerinde lif sıyrılma bölgesi

Şekil 10.59’da lif sıyrılma bölgesi görülmektedir. Şekil 10.60’da su kürü neticesinde boşluk içinde oluşan yapılar görülmektedir.

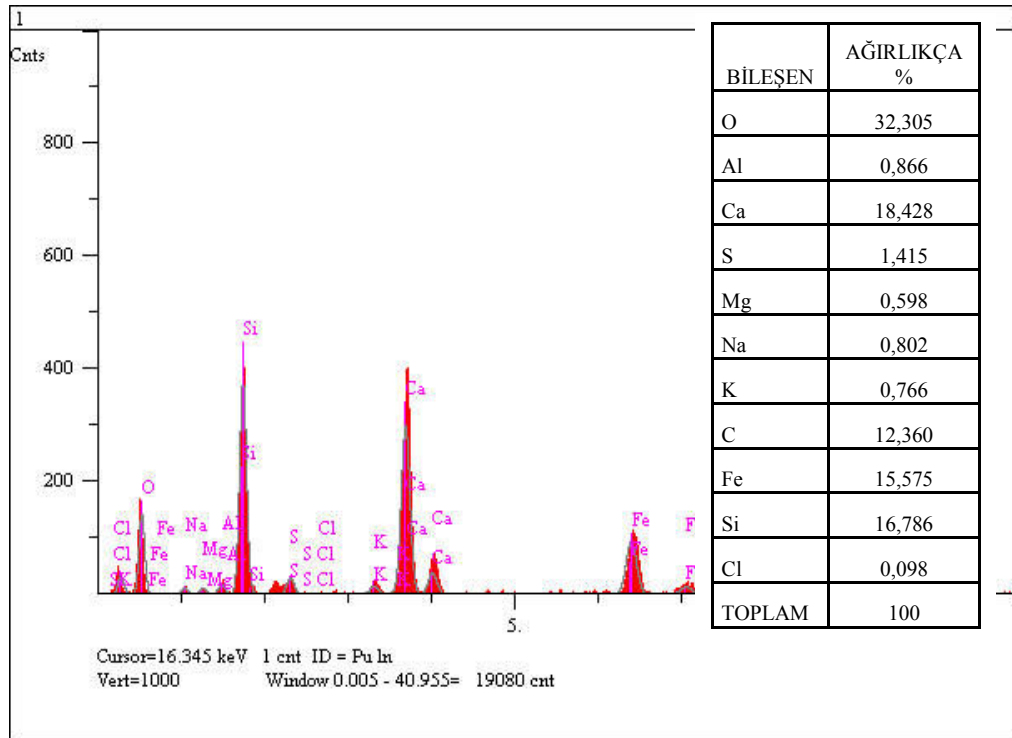


Şekil 10.60 SDL kodlu 28 günlük su kürü örneklerinde boşluk görüntüsü

Şekil 10.61’de, boşluk içyapısında oluşan morfoloji görülmektedir. Bu bölgede yapılan EDS analiz sonucu Ca/Si oranı 1,10’dur.



Şekil 10.61 SDL kodlu 28 günlük su kürü örneklerinde EDS analiz bölgesi



Şekil 10.62 SDL kodlu 28 günlük su kürü örneklerinde EDS analizi

Şekil 10.63 – 10.66’da, silis dumanı katkılı 1 MPa basınçta 6 saat süreyle kür edilmiş numunelerin SEM analizleri verilmiştir.

Şekil 10.63’de lif sıyrılma bölgesi ve burada oluşan yapı görülmektedir.

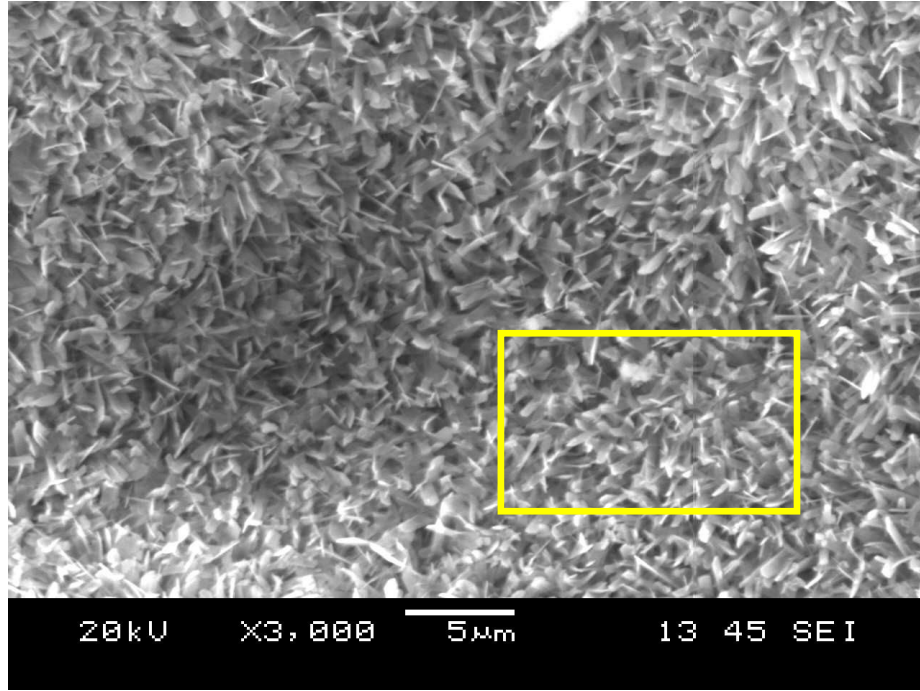


Şekil 10.63 SDL kodlu (1 MPa – 6 saat kür) lif sıyrılma bölgesi

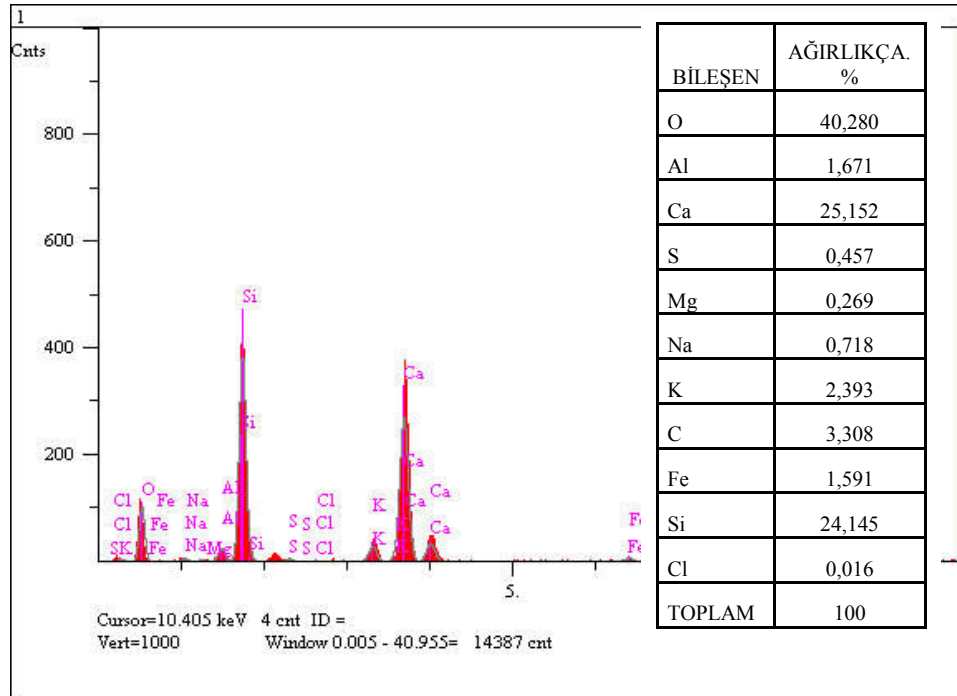


Şekil 10.64 SDL kodlu, 1 MPa kür basıncında 6 saat kür edilmiş numunenin iç yapısı

Şekil 10.64’de boşluk genel görüntüsü verilmiştir. Bu boşluk daha yakından incelendiğinde oluşan morfoloji Şekil 10.65’de gösterilmiştir. Burada yapraksı ve sık yapılar oluşmuştur. Bu bölgede alınan EDS sonucu Şekil 10.66’da verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre bu bölgenin Ca/Si oranı 1,04’tür.

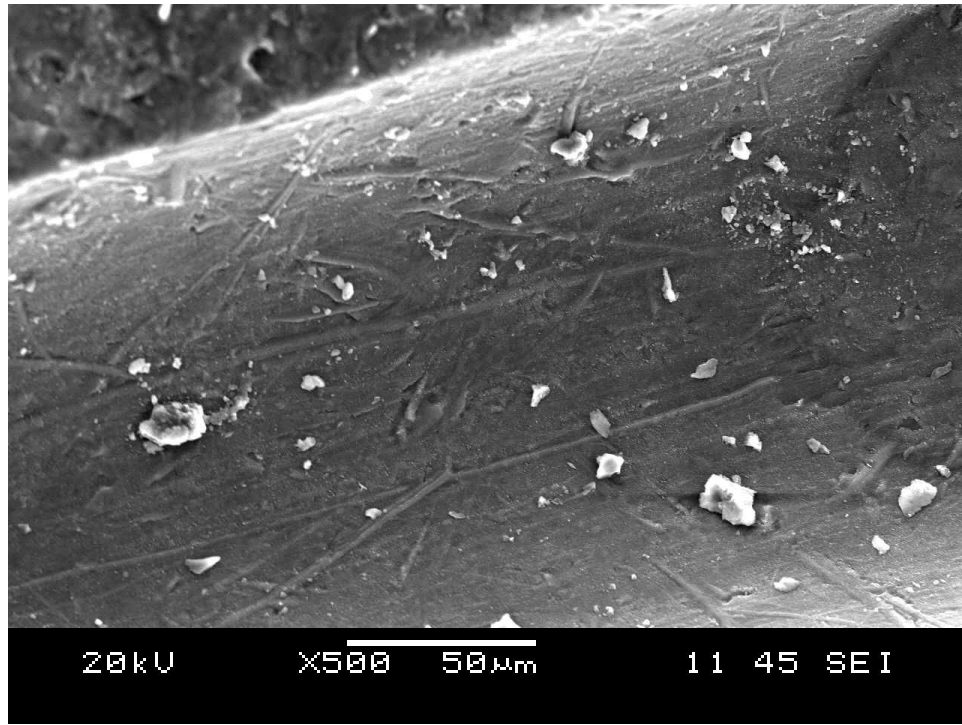


Şekil 10.65 SDL örneğinin 1 MPa basınçta 6 saat kürde EDS analiz bölgesi

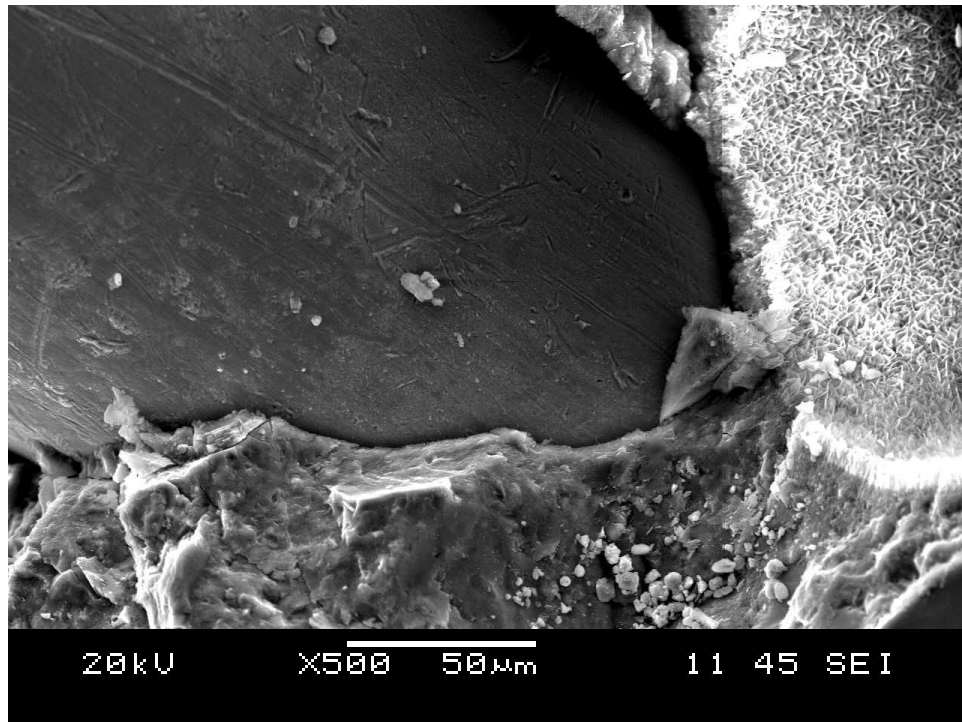


Şekil 10.66 SDL örneğinin 1 MPa kür basıncında 6 saat kürde EDS analizi

Şekil 10.67 – 10.70’de, silis dumanı ve lif katkı, 1 MPa basınçta 10 saat süreyle kür edilmiş numunelerin SEM analizleri verilmiştir.

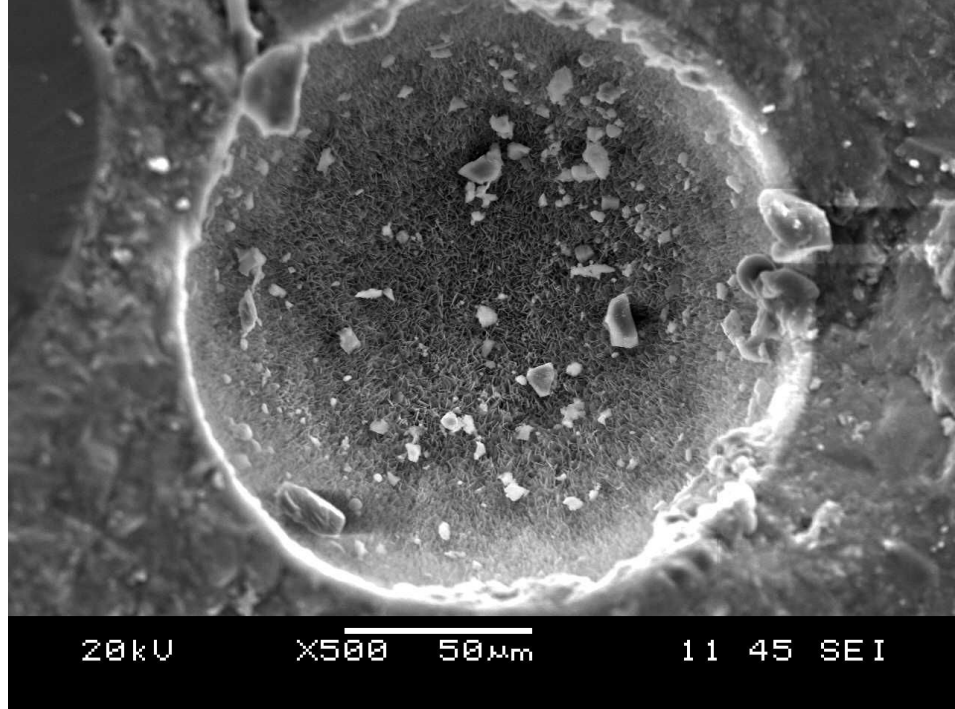


Şekil 10.67 SDL örneğinin 1 MPa basınçta 10 saat kürde lif sıyrılma bölgesi

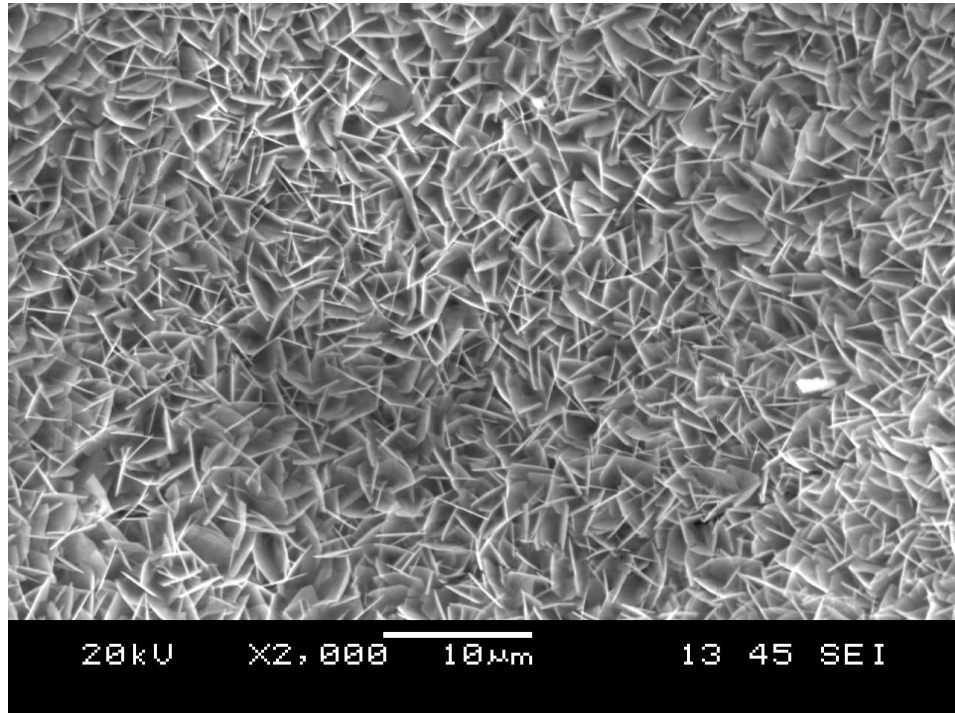


Şekil 10.68 SDL örneğinin 1 MPa basınçta 10 saat kürde lif kenetlenme bölgesi

Şekil 10.68’de lifin matrisle boşluksuz kenetlendiği ve lif çevresinde oluşan yapı görülmektedir. Şekil 10.69’da ise boşluk içyapısı görülmektedir.

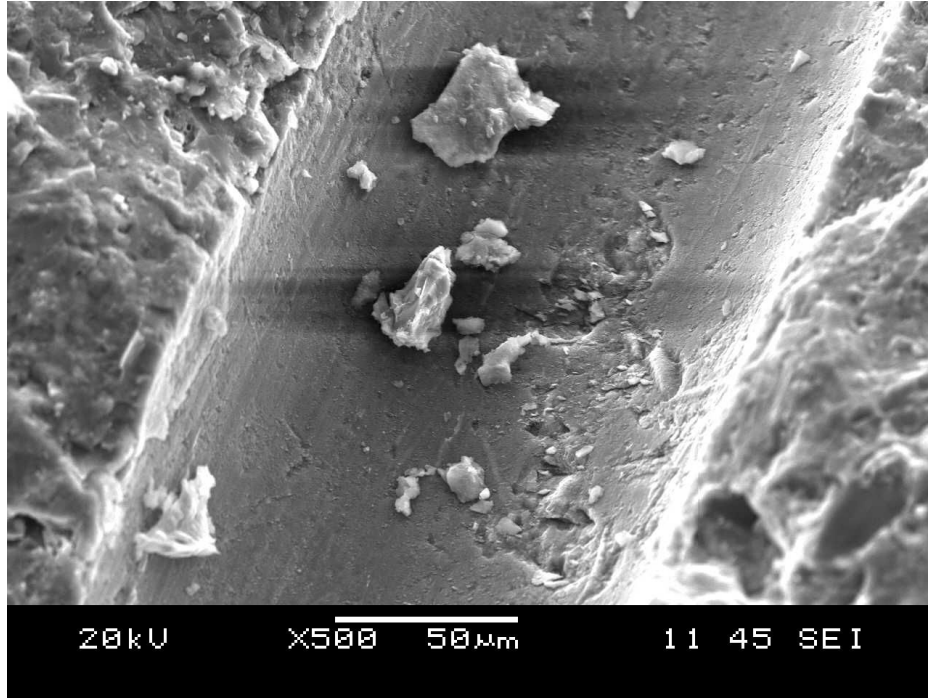


Şekil 10.69 SDL kodlu, 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örneğin boşluk içyapısı



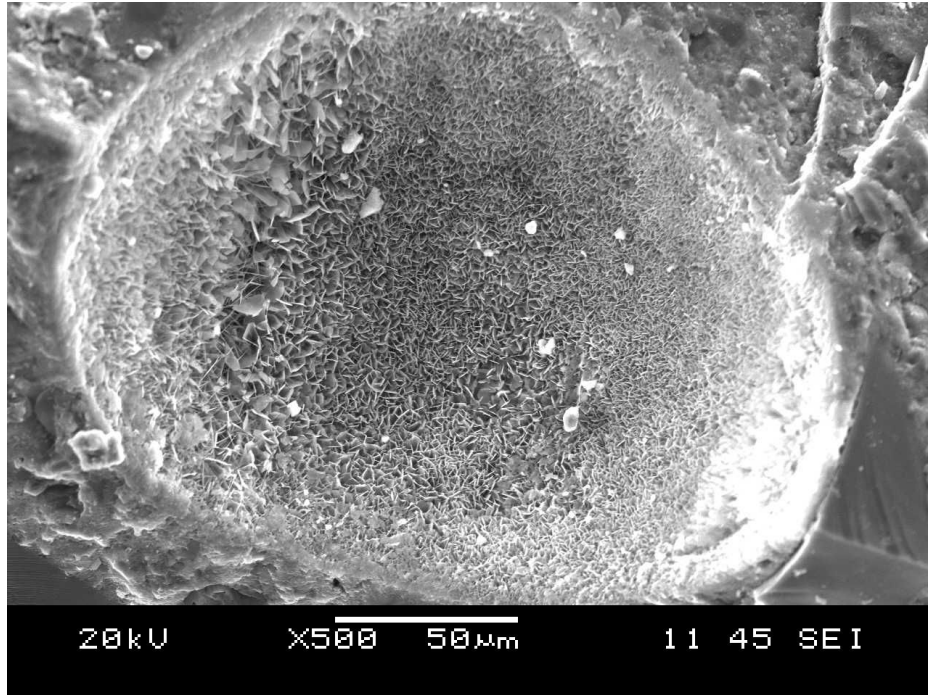
Şekil 10.70 SDL örneğinin 1 MPa basınçta 10 saat kürde EDS analiz bölgesi

Şekil 10.71 – 10.74’de, silis dumanı ve lif katkı, 1 MPa kür basıncında 12 saat süreyle küre tabi tutulmuş numunelerin SEM analizleri verilmiştir.

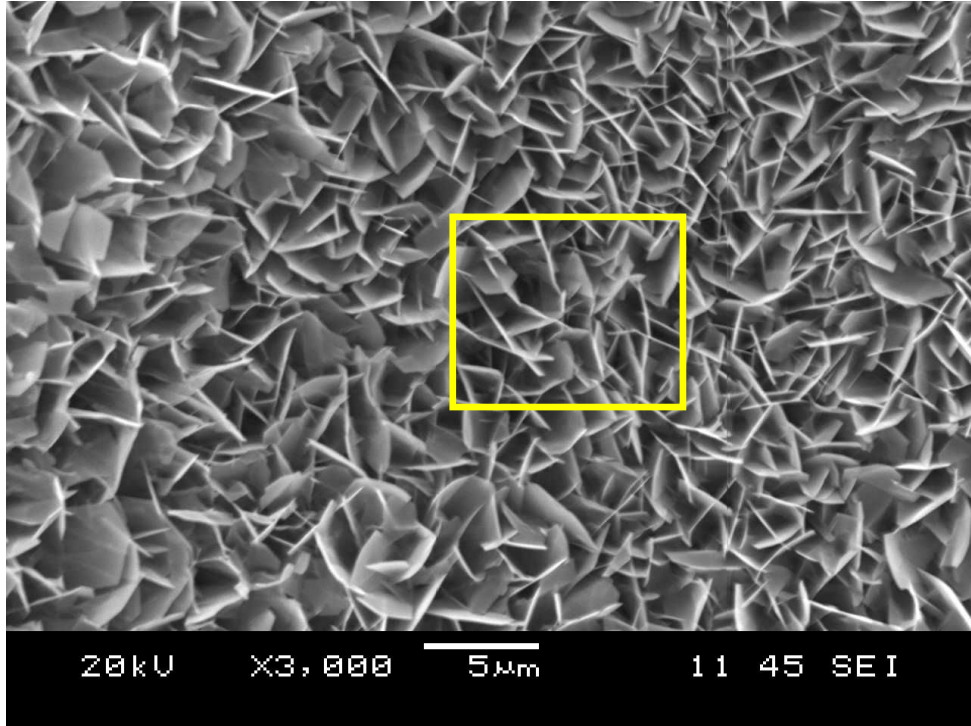


Şekil 10.71 SDL örneğinin 1 MPa basınçta 12 saat kürde lif sıyrılma bölgesi

Şekil 10.71’de lif sıyrılma bölgesi ve burada oluşmuş yapı görülmektedir.

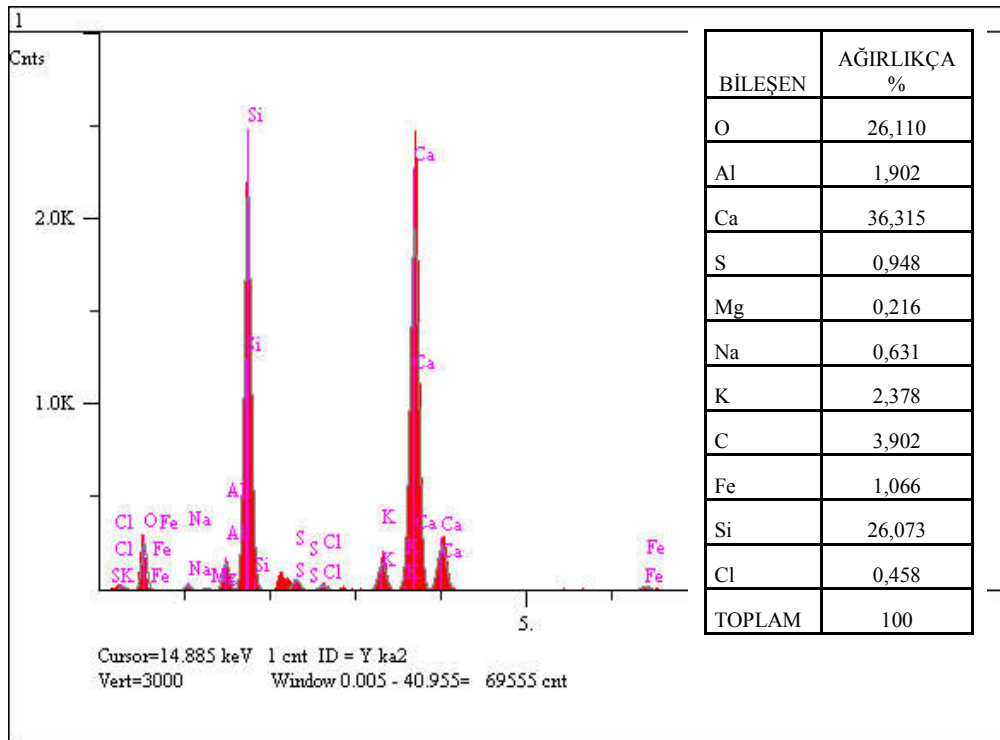


Şekil 10.72 SDL örneğinin 1 MPa kür basıncında 12 saat kür koşullarında içyapısı



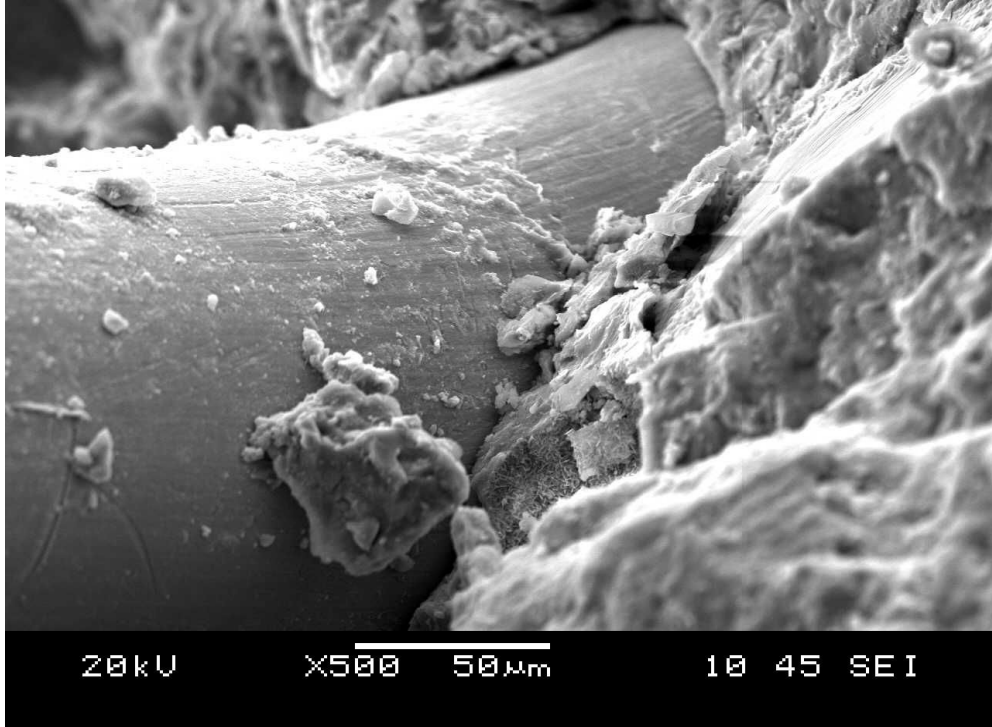
Şekil 10.73 SDL kodlu, 1 MPa basınçta 12 saat kür edilmiş örneğin EDS analiz bölgesi

Şekil 10.73’de boşluk içyapısında yapraksı morfoloji görülmektedir. Bu morfolojinin EDS analizi sonucu Ca/Si oranının 1,39 olduğu görülmektedir.



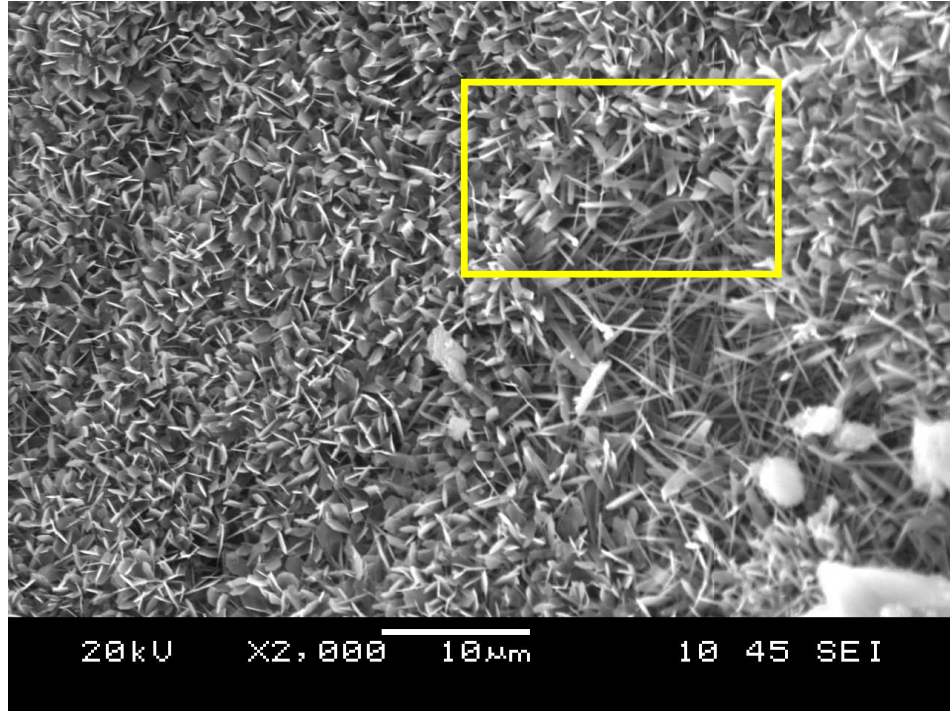
Şekil 10.74 SDL kodlu, 1 MPa kür basıncında 12 saat kür edilmiş numunede EDS analizi

Şekil 10.75 – 10.77, silis dumanı ve lif katkı 1 MPa kür basıncında 24 saat süreyle kür edilmiş numunelerin SEM analizleri verilmiştir.



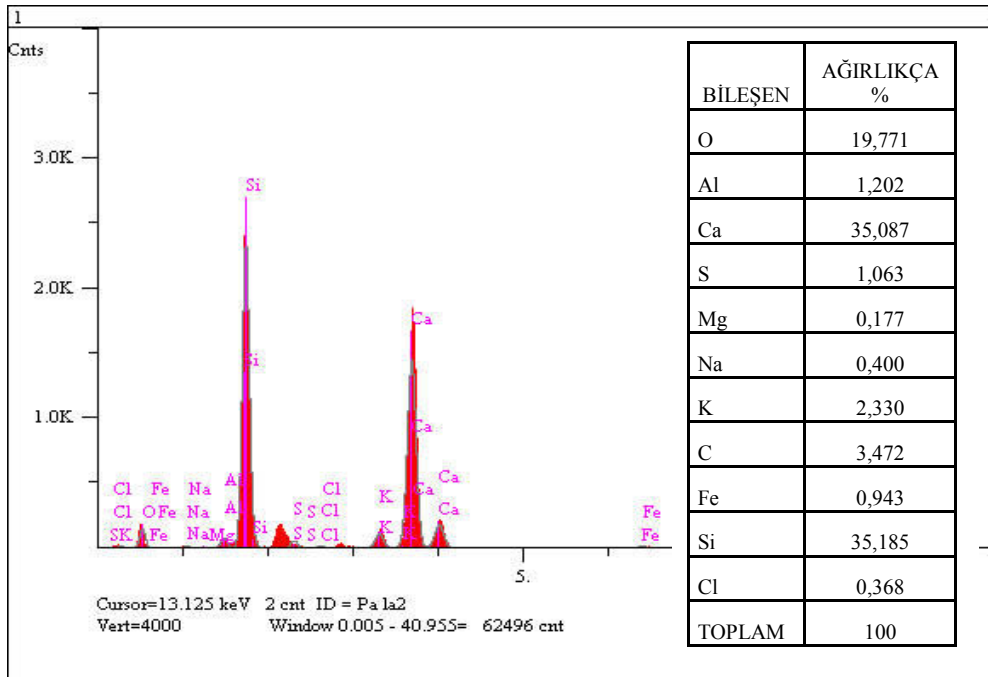
Şekil 10.75 SDL kodlu, 1 MPa basınçta 24 saat kür edilmiş örnekte lif kenetlenme bölgesi

Şekil 10.75’de boşluksuz bir lif kenetlenme bölgesi görülmektedir. Şekil 10.76’da uzun süre kür sonucu oluşan içyapı görülmektedir.



Şekil 10.76 SDL kodlu, 1 MPa basınçta 24 saat kür edilmiş örneğin EDS analiz bölgesi

Şekil 10.76’da gösterilen bölgede yapılan EDS analizi sonucu, bu bölgenin Ca/Si oranının 1,00 olduğu görülmüştür.



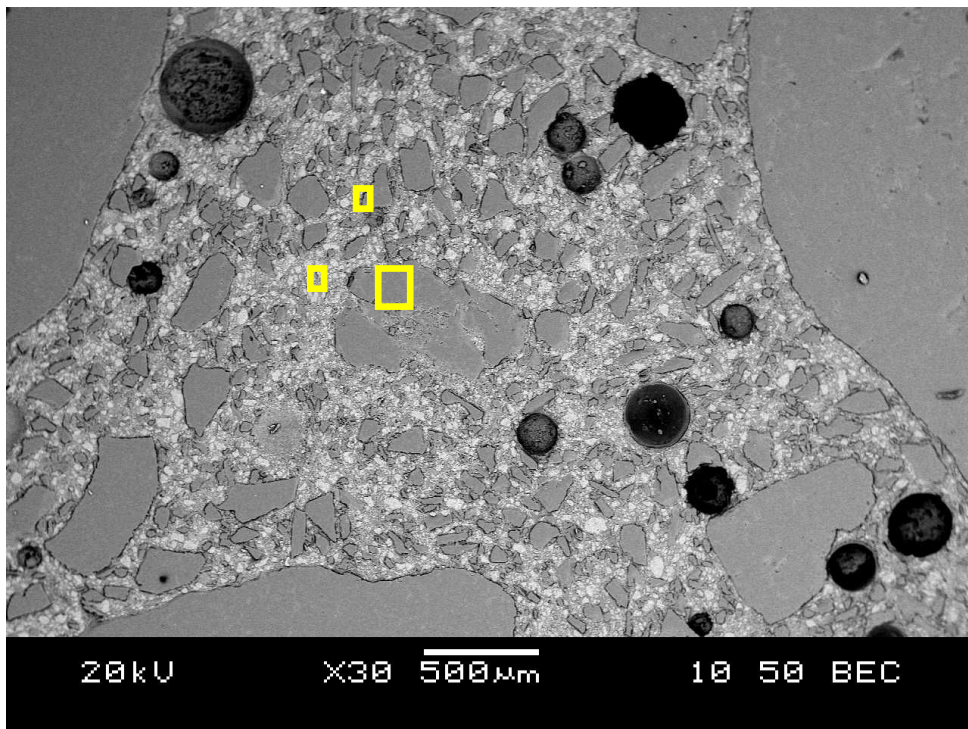
Şekil 10.77 SDL kodlu, 1 MPa kür basıncında 24 saat kür edilmiş numunenin EDS analizi

10.2 Parlak Kesit İncelemeleri

Parlak kesit incelemesinin amacı, beton içinde bulunan yapıları görmektir. Parlak kesit numuneleri ilk olarak kesilerek düz bir yüzey elde edilmiştir. Kesilen parçalar 50°C'lik etüvde kurutulmuştur. Daha sonra numuneler küçük parçalara bölünüp polyester kalıp dökülerek hazırlanmıştır. Polyester kalıp sertleştiğinde kalından inceye doğru, 10 adet çeşitli kalınlıklarda zımparadan geçirilip yüzeyleri parlatılıp polyesterden arındırılmıştır ve altın ile kaplanmıştır.

10.2.1 Bağlayıcı Olarak Sadece Çimento İçeren Serilerin Analizi

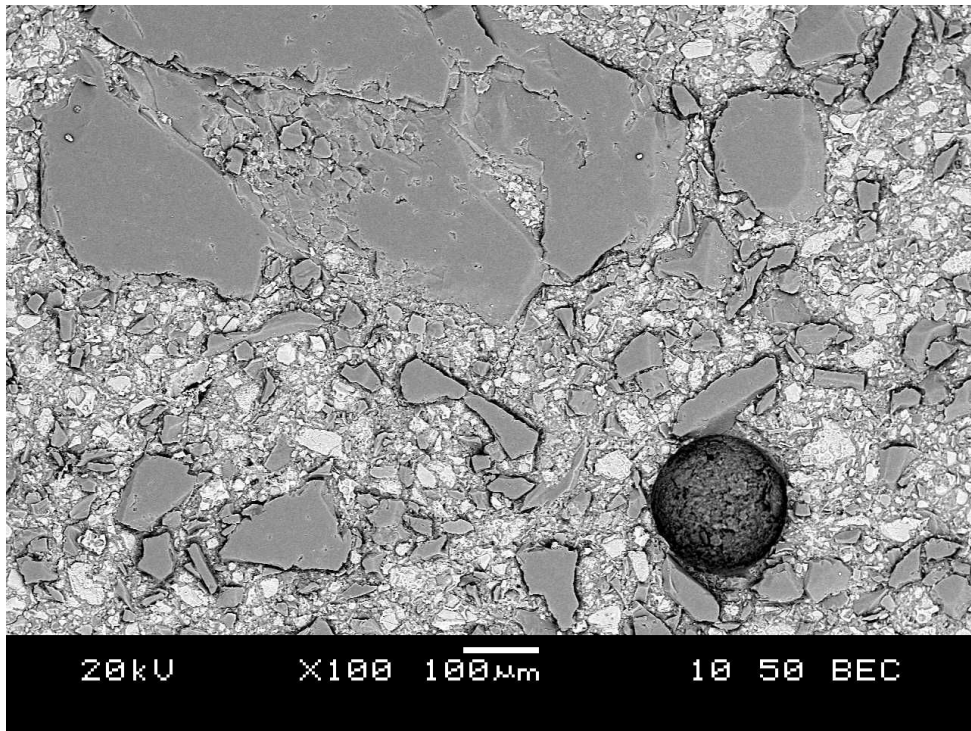
Bu kısımda, bağlayıcı olarak sadece çimento içeren serilerin, 10 saat süreyle farklı kür basınçlarında kür edilmiş örneklerine yapılan analiz sonuçları verilmiştir.



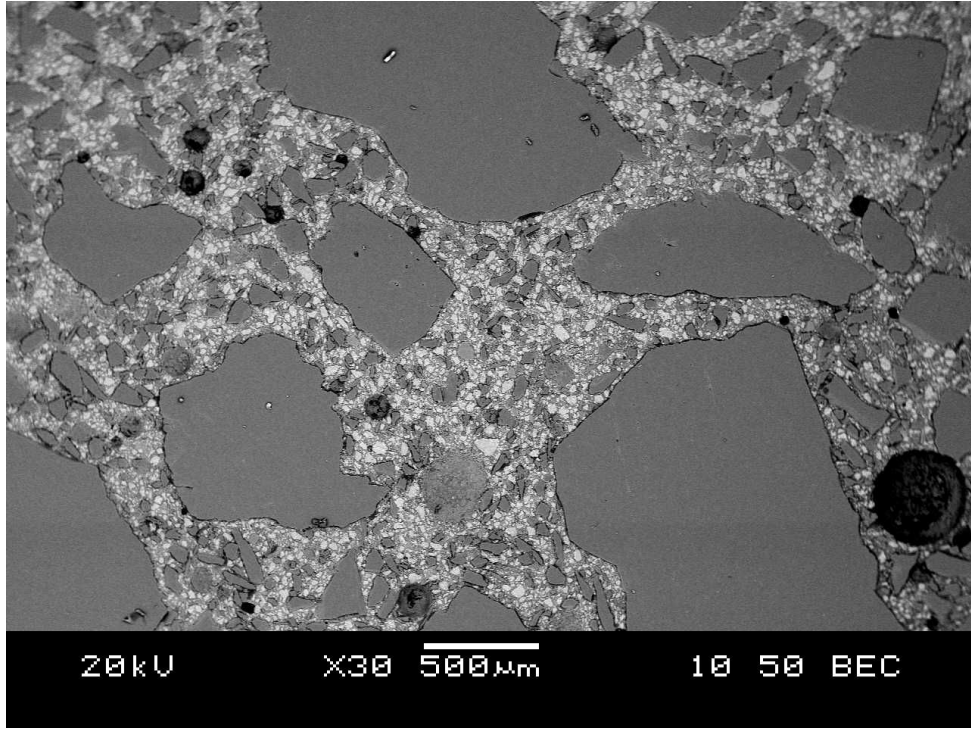
Şekil 10.78 N kodlu kalıp çıkış (küre tabi tutulmayan) örneği

Şekil 10.78'de görülen siyah bölgeler boşluklardır. Koyu gri tonunda olan parçalar kuvars agregasıdır. Şekillerde görülen daha açık renkli kısım matristeki hidrate olmamış çimentodur. Şekil 10.79'dan görüldüğü üzere düşük su/bağlayıcı

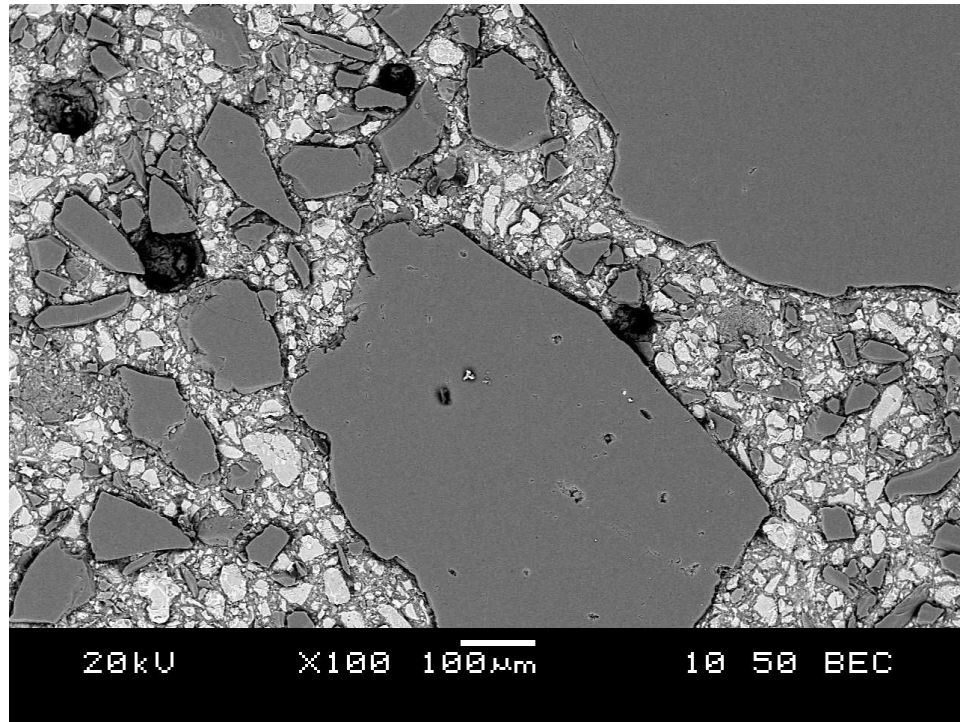
nedeniyle oldukça sıkı bir içyapı oluşmuştur. Kürsüz numunelerde çok sayıda beyaz tanecik dolayısıyla henüz hidrate olmamış tane mevcuttur. Özellikle otoklavda bu tanelerin hidrate olduğu beyaz tanelerin sayısı ve büyüklüğünün azaldığı gözlenmektedir (Şekil 10.82). tüm şekillerde büyük küresel boşluklar mevcut olup bu boşlukların düzgün küresel görünüşleri hava sürüklenme etkisiyle oluştuklarını göstermektedir. Söz konusu boşluklar yüksek miktarda akışkanlaştırıcı kullanımının bir yan etkisidir.



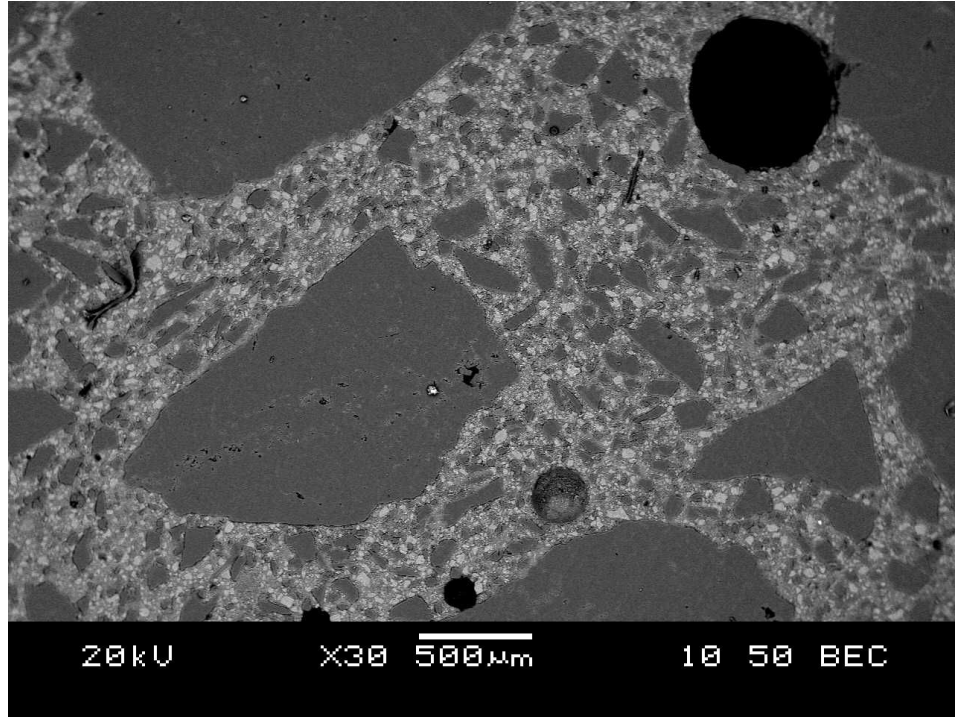
Şekil 10.79 N kodlu kalıp çıkış (küre tabi tutulmayan) örneği



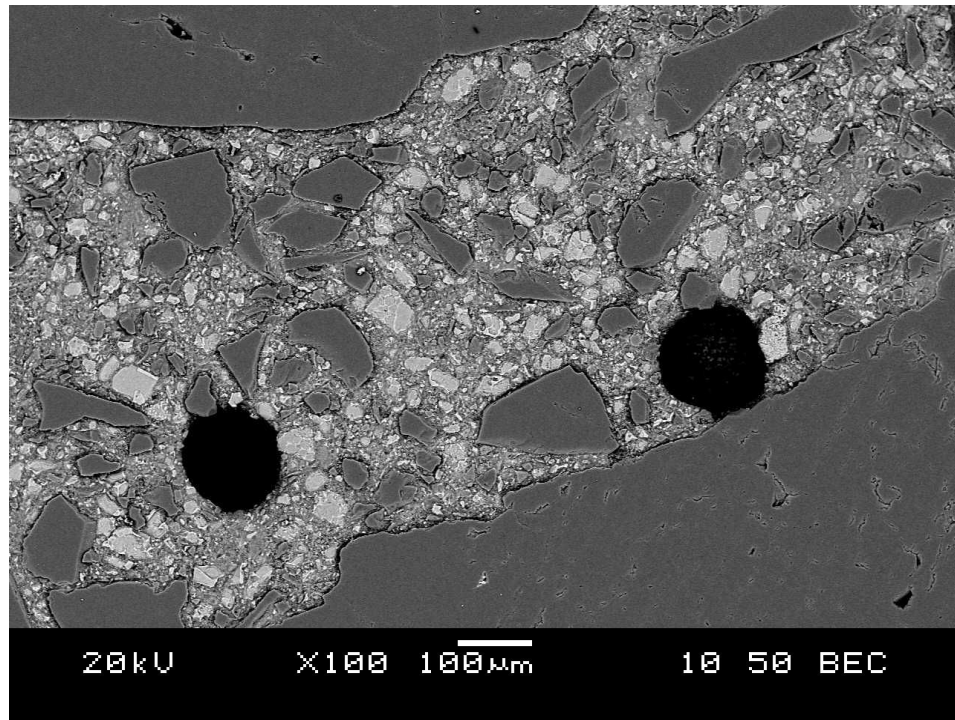
Şekil 10.80 N kodlu 28 gün su kürü örneği



Şekil 10.81 N kodlu 28 gün su kürü örneği

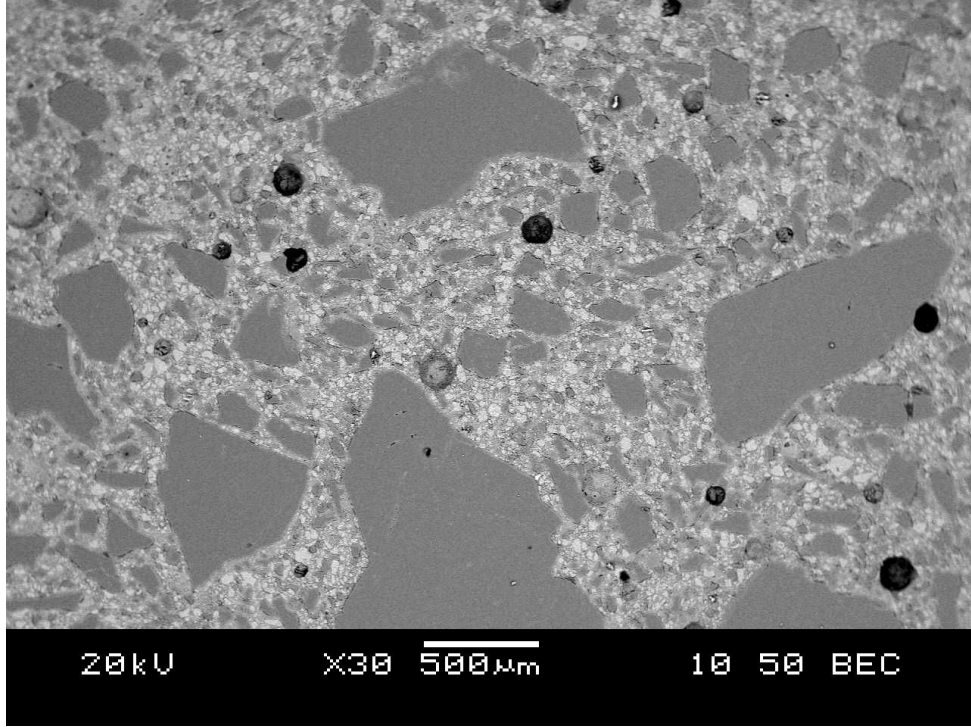


Şekil 10.82 N kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek

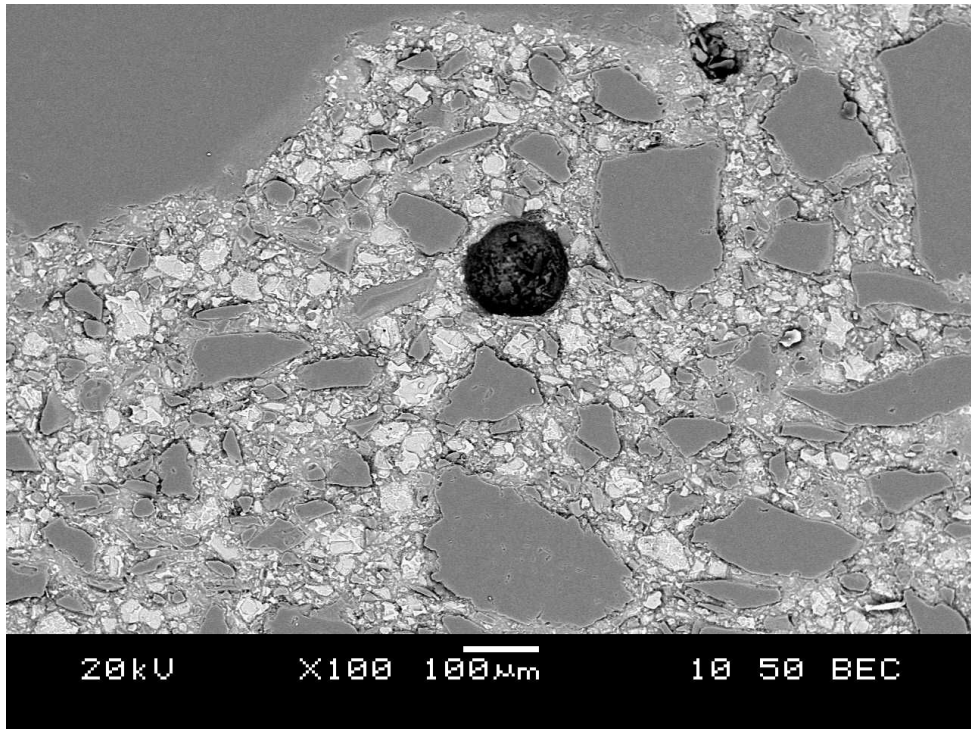


Şekil 10.83 N kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek

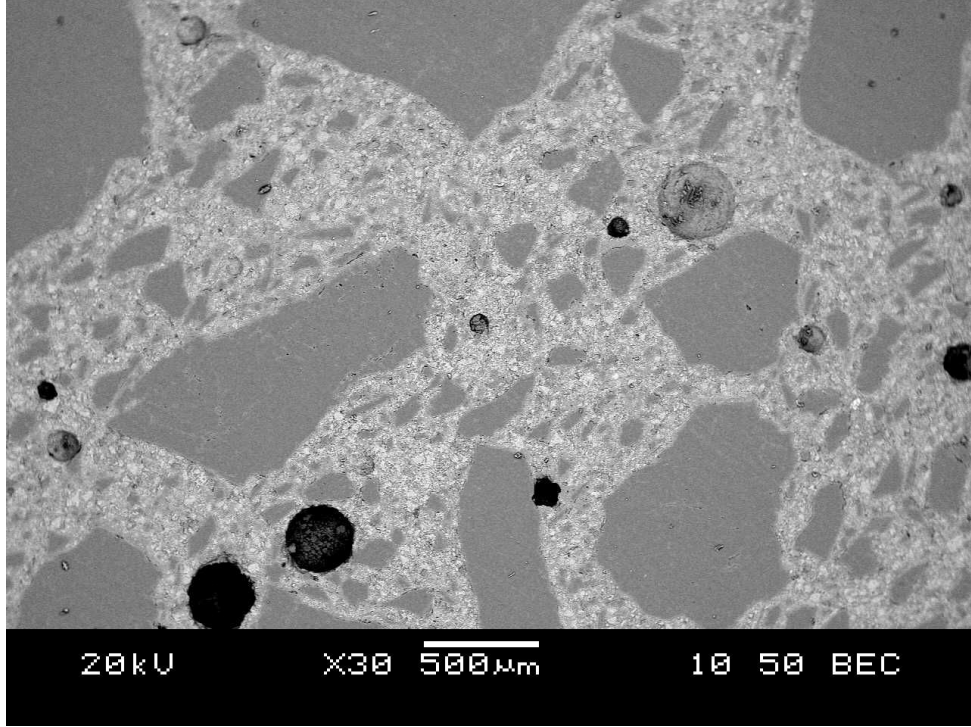
Şekillerden anlaşılacağı üzere agrega – matris yüzeyi boşluksuzdur.



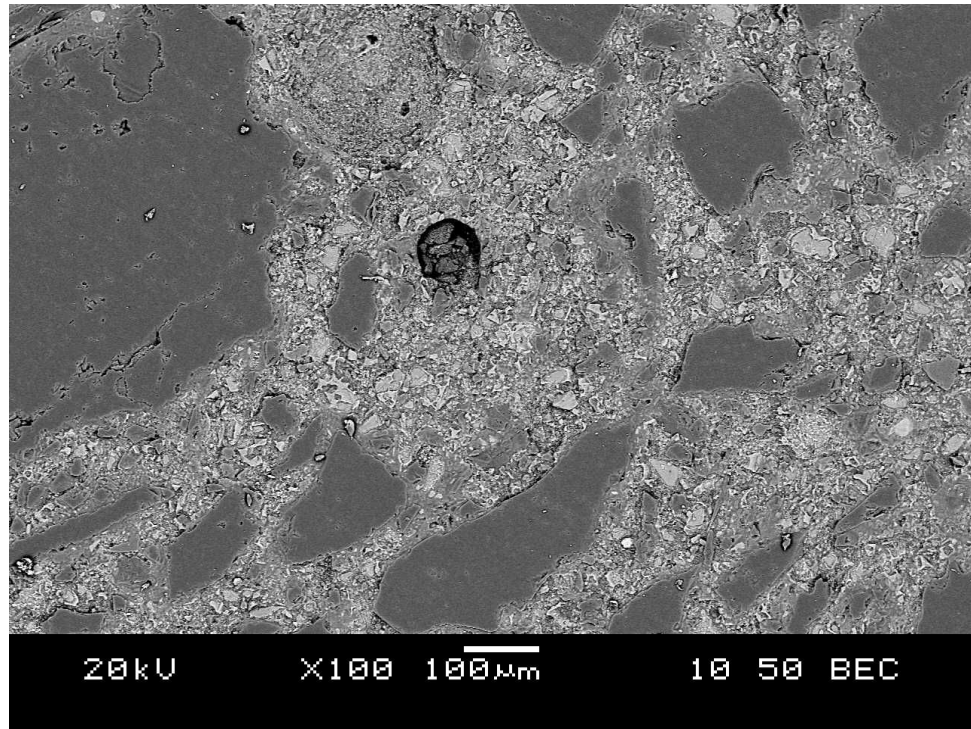
Şekil 10.84 N kodlu 2 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek



Şekil 10.85 N kodlu 2 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek



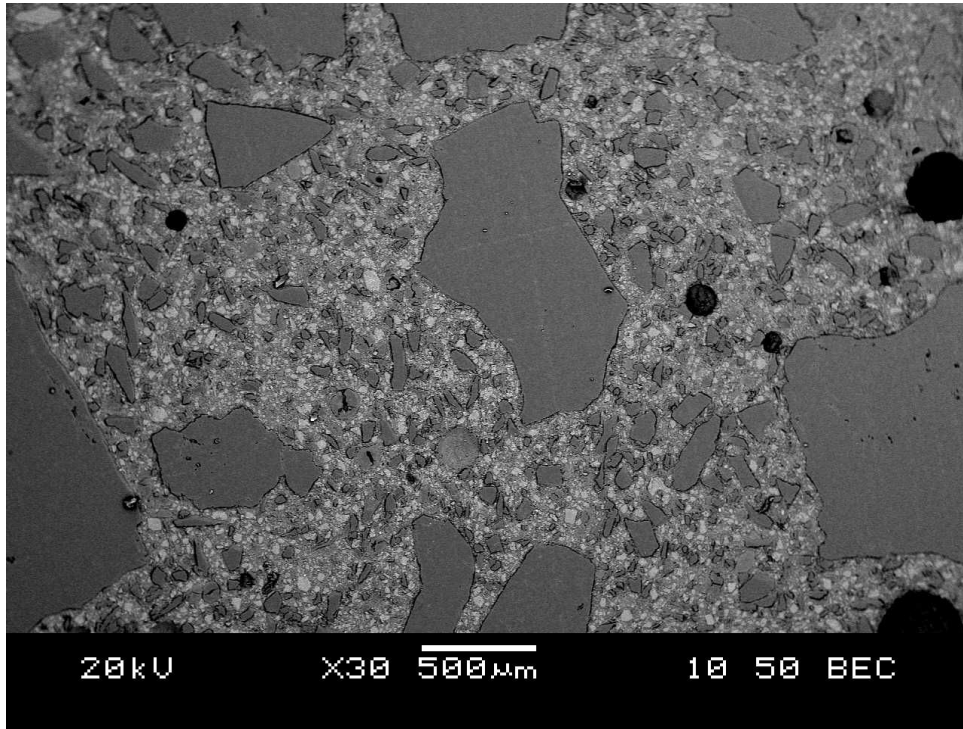
Şekil 10.86 N kodlu 3 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek



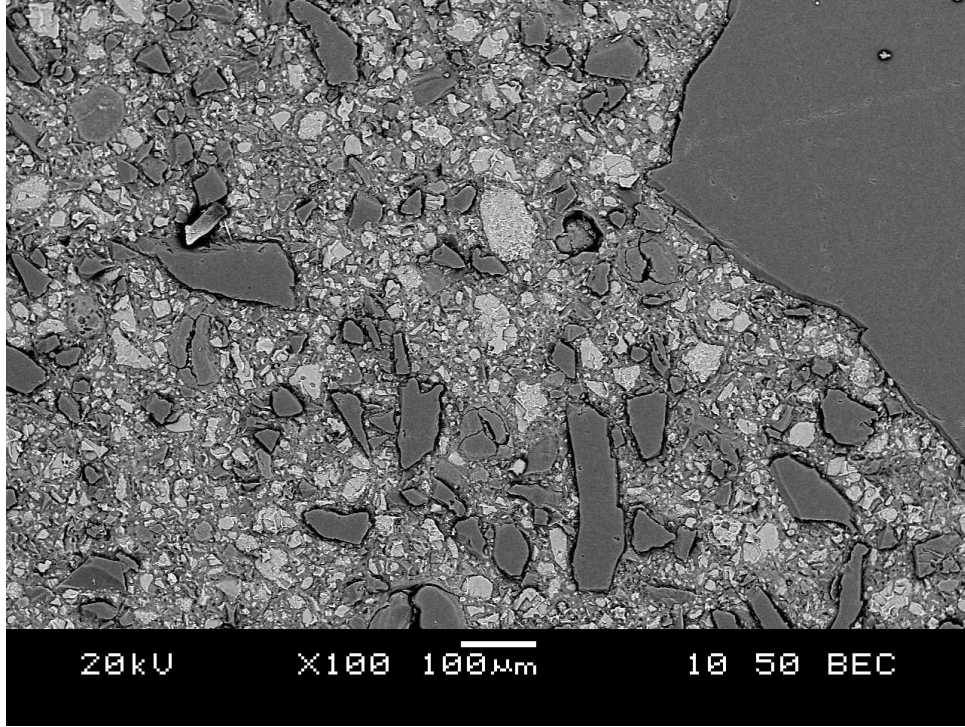
Şekil 10.87 N kodlu 3 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek

10.2.2 Silis Dumanı Katkılı Serilerin Analizleri

Bu bölümde silis dumanı katkıli serilerin, 10 saat süreyle farklı basınçlarda kür edilmiş örnekleri üzerinde yapılan analiz sonuçları verilmektedir. Şekil 10.92 incelendiğinde özellikle otoklav kürünün tanelerin hidrate olmalarını sağladığı, hidrate olmamış tanelerin boyutlarının küçüldüğü (beyaz taneler) gözlenmektedir. Bu durum otoklav kürü ile artan mekanik mukavemetleri sağlamaktadır.

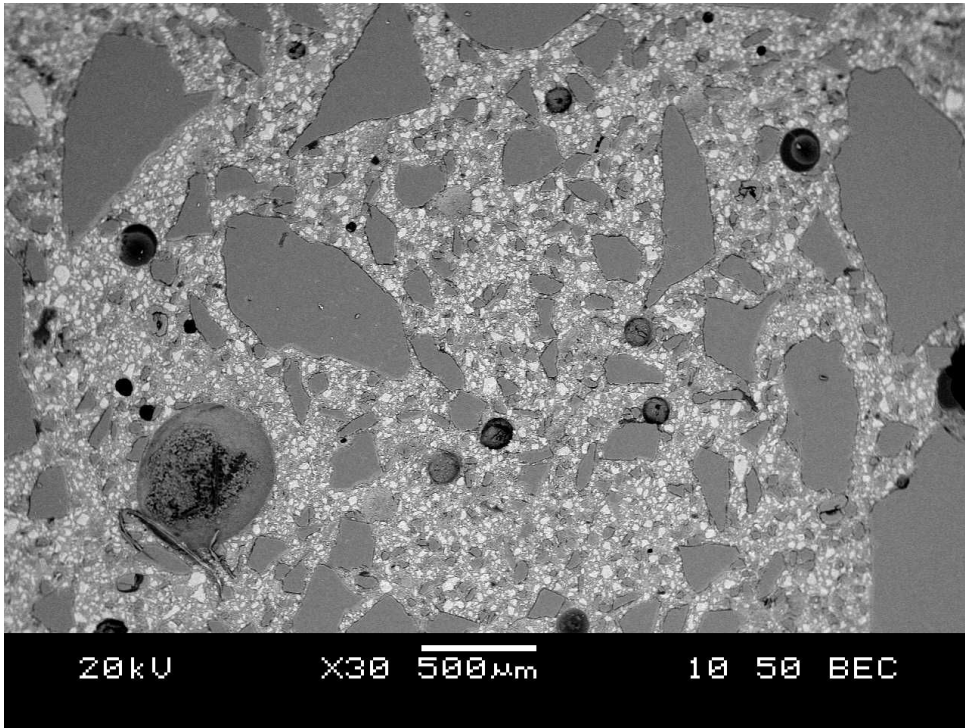


Şekil 10.88 SD kodlu kalıp çıkış (küre tabi tutulmayan) örneği

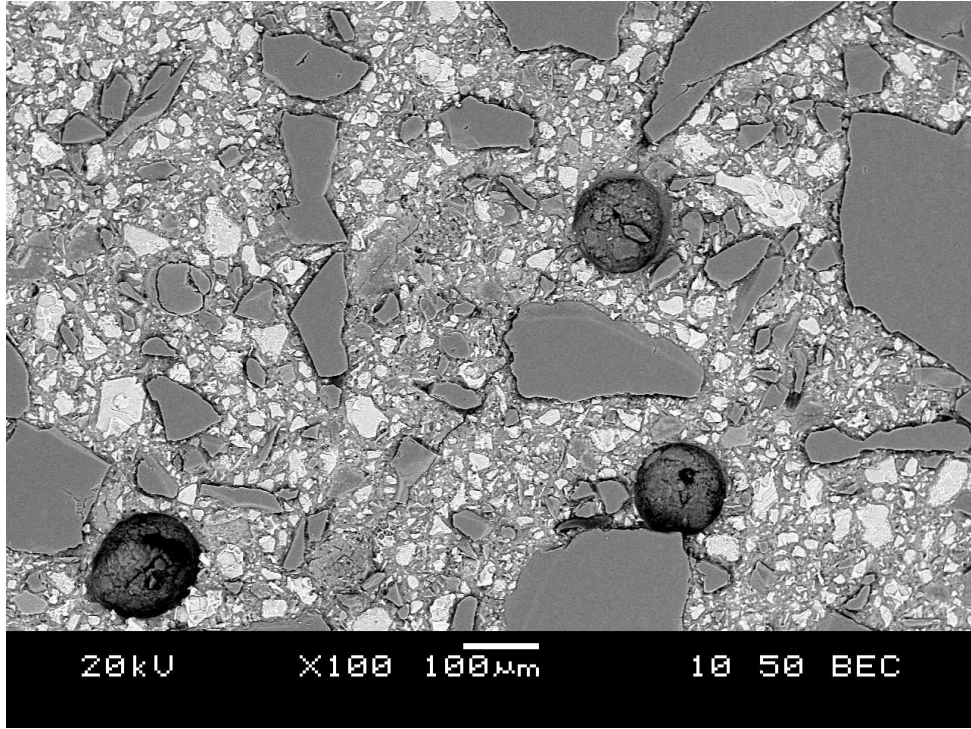


Şekil 10.89 SD kodlu kalıp çıkış (küre tabi tutulmayan) örneği

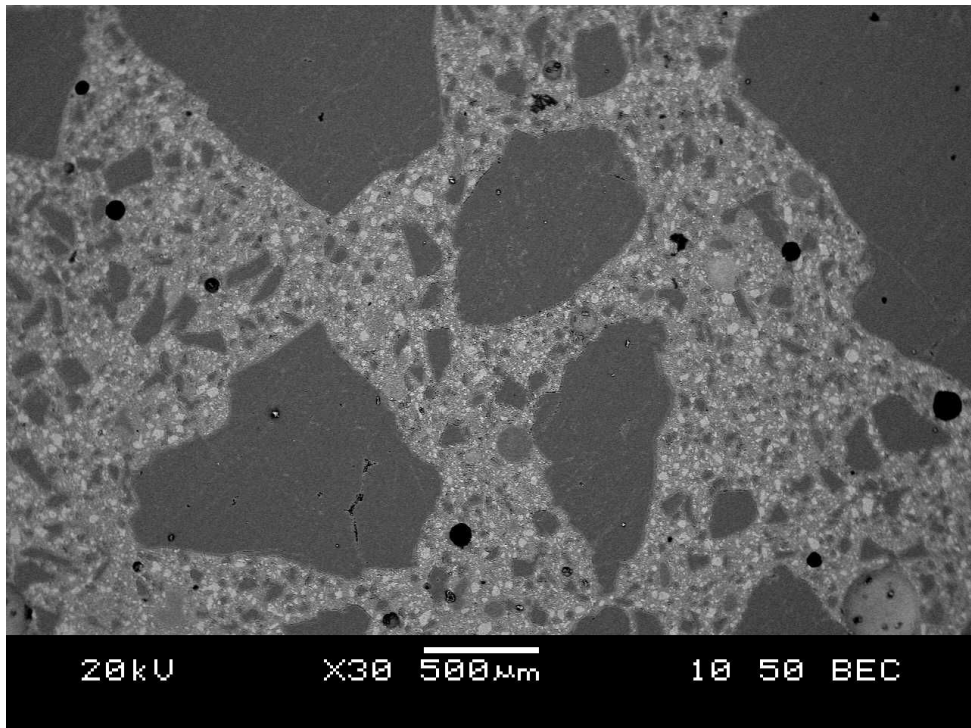
Şekil 10.89’da görüldüğü gibi, silis dumani içeren matris oldukça yoğundur.



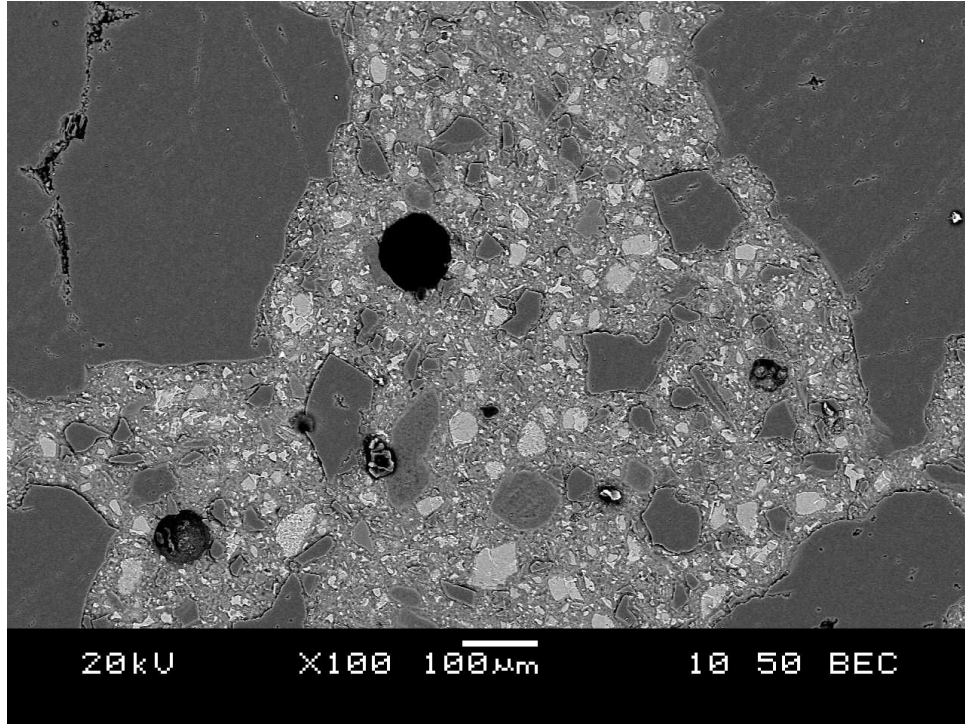
Şekil 10.90 SD kodlu 28 gün su kürü örneği



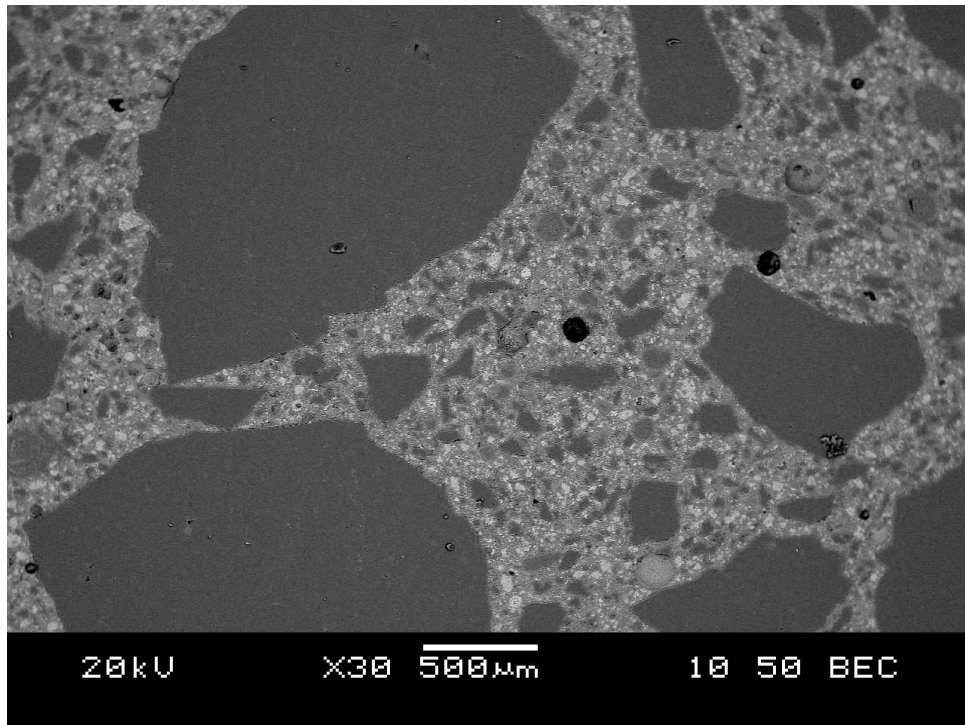
Şekil 10.91 N kodlu 28 gün su kürü örneği



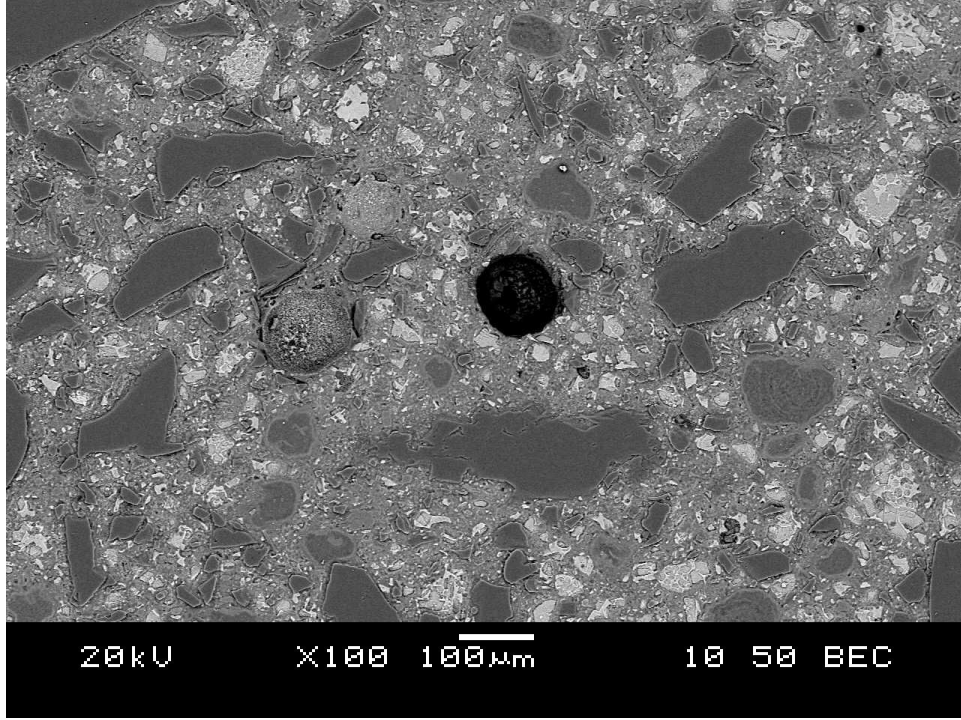
Şekil 10.92 SD kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek



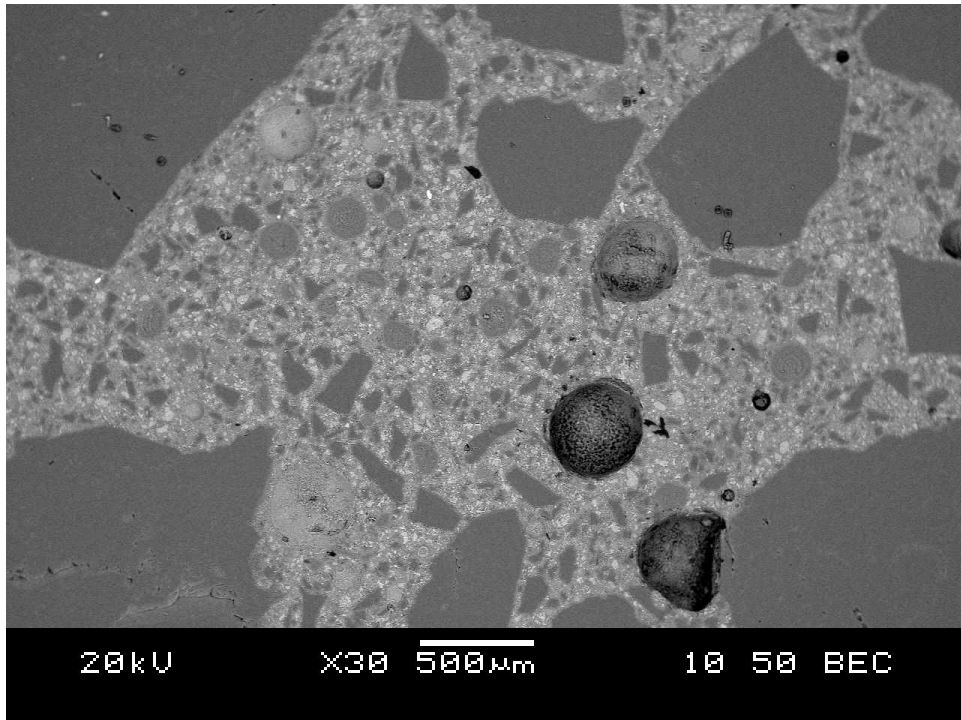
Şekil 10.93 SD kodlu 1 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek



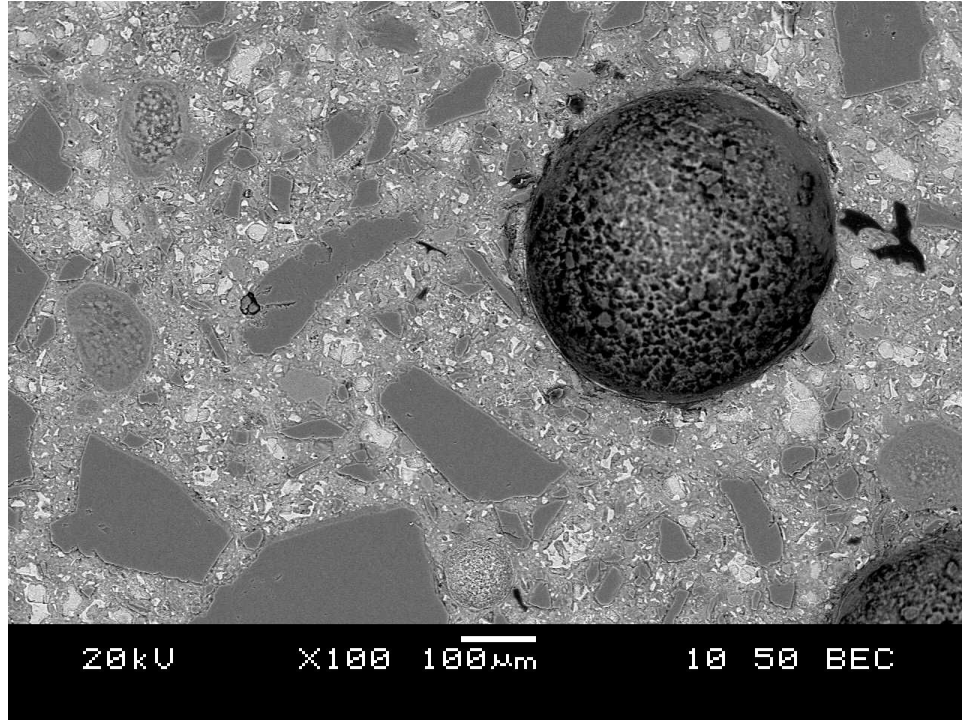
Şekil 10.94 SD kodlu 2 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek



Şekil 10.95 SD kodlu 2 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek



Şekil 10.96 SD kodlu 3 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek

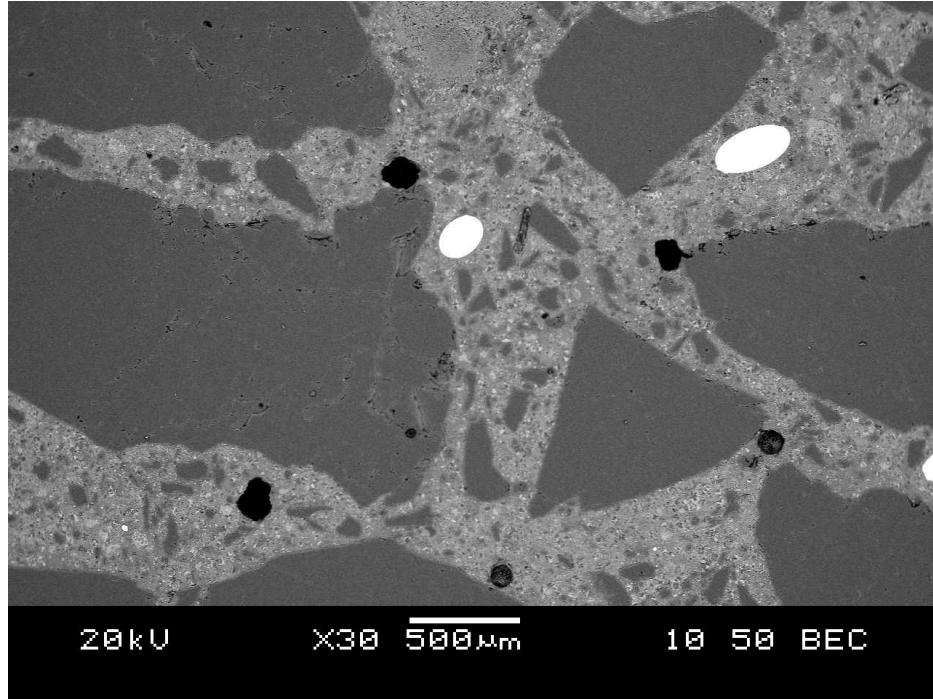


Şekil 10.97 SD kodlu 3 MPa basınçta 10 saat kür edilmiş örnek

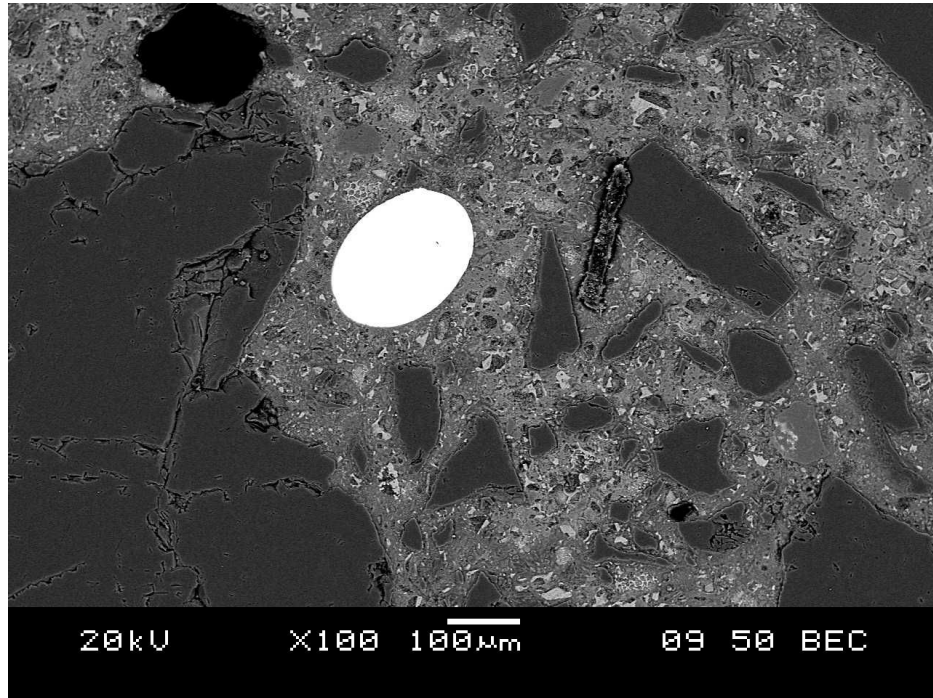
Tüm numunelerin oldukça boşluksuz olduğu görülmüştür. Bu bulgu yüksek mekanik özelliklerle uyumludur. Numunelerde görülen büyük küresel boşlukların, yüksek oranda kullanılan akışkanlaştırıcının, yan etki olarak hava sürüklenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Boşluk yapısının sayısallaştırılması için, civa porozimetresi gibi ek deneylere ihtiyaç vardır.

10.2.3 Bağlayıcı Olarak Sadece Çimento İçeren Lif Katkılı Serilerin Analizleri

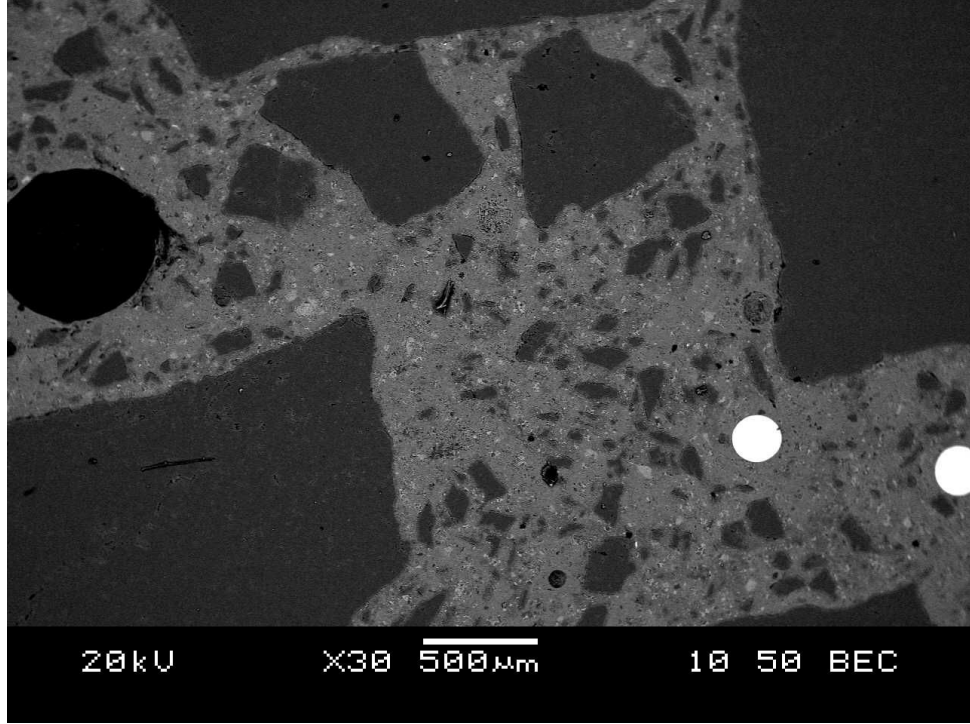
Şekil 10.98 – 10.101 çelik lifli karışımları göstermektedir. Şekillerde çelik lif kesitleri dairesel veya eliptik olarak parlak ve açık renkli olarak gözlenmektedir. Çelik lif – matris aderans bölgesine yakından bakıldığında oldukça boşluksuz olduğu görülmektedir (Şekil 10.99).



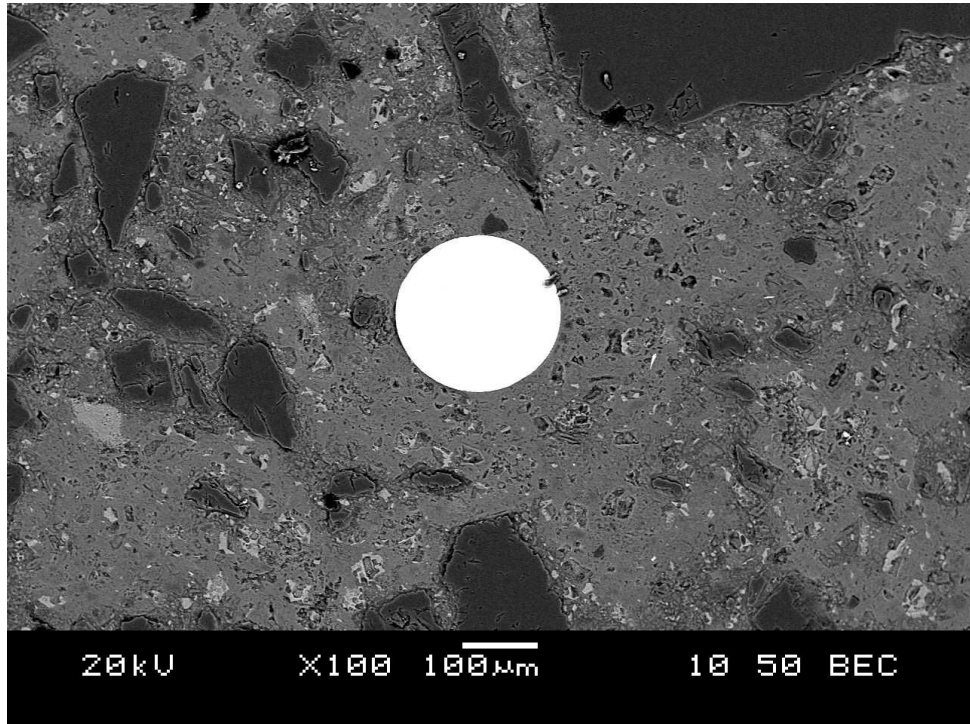
Şekil 10.98 NL kodlu 3 MPa basınçta 4 saat küre tabi tutulmuş örnek



Şekil 10.99 NL kodlu 3 MPa basınçta 4 saat küre tabi tutulmuş örnek



Şekil 10.100 NL kodlu 3 MPa basınçta 24 saat küre tabi tutulmuş örnek



Şekil 10.101 NL kodlu 3 MPa basınçta 24 saat kür edilmiş örnek

BÖLÜM ONBİR

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı türlerde üretilen reaktif pudra betonlarının, farklı otoklav kürü basıncında ve sürelerinde elde edilen mekanik özellikleri ve içyapı incelemeleri, bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

1. Otoklav kürüyle RPB'lerin basınç dayanımlarının, su kürüne kıyasla çok yüksek mertebelere taşındığı gözlemlenmiştir. Ancak su kürünün eğilme dayanımına etkisi otoklav kürüne kıyasla daha yüksektir. 28 günlük su kürüyle ulaşılan eğilme dayanımı değerleri, otoklav küründe sadece en verimli kür koşullarında geçilmiştir.
2. Otoklavda kür süresinin artmasıyla, basınç ve eğilme dayanımının arttığı, ancak belli bir süreden sonra dayanımlarda olumsuz etki yaptığı sonucuna varılmıştır. Sonuçlardan yola çıkılarak, otoklav kürü için optimum süre 10 – 12 saat olarak belirlenmiştir. Bu süreden sonra devam eden kürler, içyapıda kristalleşmeye yol açtığı için dayanımlarda düşüş meydana getirmektedir.
3. Otoklavda 3 Mpa basınç altında kür edilen numunelerin eğilme dayanımlarının, 1 ve 2 MPa basınçta kür edilen numunelere kıyasla düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni, 3 MPa kür basıncında numunelerin 240°C'de kür edilmesidir. Bu yüksek sıcaklığın, numunelerde mikro çatlaklara sebep olduğu ve bunun eğilme dayanımlarında düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. Ancak bu teori SEM analizleri ile doğrulanamamıştır.
4. Eğilme dayanımının aksine, otoklavda kür basıncının artmasıyla basınç dayanımında sürekli bir artış gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta oluşan mikro çatlaklar basınç dayanımını etkilememektedir. Bir başka deyişle, standart su kürü ile hidrate olmayacak birçok tane otoklav kürü sayesinde hidrasyon yapmakta, bu durum basınç dayanımını önemli mertebede arttırmaktadır. Otoklavda yüksek sıcaklıkta oluşan mikro çatlakların olumsuz etkisinin,

tanelerin hidratasyonu ile elde edilen artış tarafından gölgelendiği düşünülmektedir.

5. Basınç dayanımında en yüksek basınç dayanımları 3 MPa kür basıncında küre tabii tutulan numunelerde elde edilmesine rağmen, bu kür koşullarındaki numunelerde eğilme dayanımlarında düşüş görüldüğü için optimum kür basıncı 2 MPa olarak belirlenmiştir.
6. Su kürüyle 28 günde ulaşılan basınç dayanımı değerini, otoklavda 1 Mpa basınç altında 4 saat kür uygulaması ile geçilebildiği saptanmıştır. 4 saat gibi kısa sürede kazanılan yüksek eğilme ve basınç dayanımı değerleri ile otoklav kürünün, üretilen elemanların hızlı dayanım kazanması istenen prefabrik sektöründe, çok önemli bir yere sahip olduğu gerçeği ortaya çıkmıştır.
7. Karışımlara Silis Dumanı ilave edilmesiyle, eğilme ve basınç dayanımlarında artış sağlanmıştır. Silis dumanının ince yapısı ile boşlukları doldurma özelliği sayesinde, silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla eğilme ve basınç dayanımlarında önemli bir artış vardır. Silis dumanı içeren numunelerde, sadece çimento bağlayıcılı numunelere kıyasla, eğilme dayanımlarında % 2 ile % 19 arasında, basınç dayanımlarında ise % 18 ile % 40 arasında artış görülmüştür.
8. Karışımlara silis dumanı katılmasının en önemli etkisi ise, otoklav kürü geçirecek numunelerin silis ihtiyacının silis dumanı ile karşılanmasıdır. Silis dumanı ile gözenekli $\alpha - C_2SH$ yapısı daha kuvvetli tobermorit yapısına dönüşmektedir. Bu dönüşümde tüm karışımlarda kullanılan 75 μ m altı kuvars kumunun da katkısı bulunmaktadır.
9. Karışımlara çelik lif ilave edilmesiyle eğilme ve basınç dayanımlarında oldukça yüksek artışlar meydana gelmiştir. Çelik lif, eğilme dayanımlarında % 29 ile % 63 arasında, basınç dayanımında ise % 23 ile % 49 arasında artış sağlamıştır.

10. Karışımlarda, su/çimento oranını düşürmek için yüksek miktarda kullanılan akışkanlaştırıcı maddesi, içyapıda küresel boşluklar oluşturmuştur.
11. Kırılma enerjisi deneylerinde, silis dumanı içermeyen numunelerde çatlaklar boşluk boyunca ilerlediği için ani kırılmalar görülmemiştir. Ancak, silis dumanı içeren numunelerde, silis dumanının çok ince olması ve boşlukları doldurma özelliği sayesinde, çatlakların boşluk boyunca ilerleyememesi nedeniyle, numunelerin gevrek olduğu görülmüş ve ani kırılmalar meydana gelmiştir. Ancak silis dumanlı örneklerin kırılma enerjileri sadece çimento bağlayıcılı örneklerle kıyasla yüksektir. Bu durum silis dumanı katkısı ile eğilme dayanımının yani eğrinin tepe noktasının artması sonucudur.
12. Kırılma enerjileri deneylerinde, lifli numuneler çok yüksek değerlerde sonuçlar vermiştir. Lifsiz numunelerde ise silis dumanı katkılı numune, silis dumanı içermeyen numuneye kıyasla yüksek kırılma enerjisine sahiptir.
13. Uzun lifli karışımlar, kısa lifli karışımlara kıyasla eğilme dayanımlarında çok azda olsa yüksek değer vermesine rağmen, basınç dayanımlarında kısa lifli karışımlarla aynı basınç dayanım değerlerini vermiştir. Uzun lif, karışımın işlenebilirliğini önemli ölçüde düşürdüğü için karışımlarda kısa lif tercih edilmiştir.
14. Reaktif pudra betonlarının yüksek mertebelerde sonuç vermesinin en önemli etkeni, karışımda kullanılan çelik liflerdir. İkinci sırada ise silis dumanı katkısı ve sonrasında da otoklav kürü gelmektedir.
15. Kür çeşidine göre farklı morfolojilerde (iğnemsî, yapraksî... vb.) farklı içyapılar görülmüştür. Aynı sürede kür edilen numunelerden 1 MPa kür basıncı altında kür edilen numunelerin içyapısında yapraksî oluşumlar görülmüştür. Bu yapraksî oluşumların 2 MPa kür basıncı altında kür edilen numunelerde biraz daha sivrileştiği ve incelendiği görülmüştür. 3 MPa kür

basıncı altında kür edilen numunelerde ise bu yapının tamamen inceldiği ve iğnemsî bir yapıya dönüştüğü görülmüştür.

16. Kısa süre kür edilmiş numunelerin içyapısında α - C₂SH görülmüştür ve bu yapı gözenekli olduğu için mukavemet daha düşüktür.

17. Optimum sürede kür edilmiş numunelerde ise α - C₂SH, tobermorite dönüşmüştür. Bu istenen bir dönüşümdür ve bu dönüşümün numunelerin dayanımlarında artış sağladığı bilinmektedir.

18. Kür süresinin uzamasıyla içyapıda kristalleşmelerin görüldüğü ve bunun mukavemeti azalttığı sonucuna varılmıştır.

İleride yapılacak çalışmalar için şu öneriler sunulabilir:

- RPB karışımlarının daha akıcı hale getirilmesi ve prefabrik sektörünün yanısıra yerinde dökme sistemlerde kullanımı sağlanmalıdır.
- RPB karışımlarının farklı liflerle davranışı incelenebilir.
- RPB karışımlarının buhar kürü ile dayanımlarının gelişimi incelenebilir.
- RPB karışımlarının daha ekonomik hale getirilmesi için araştırma yapılabilir.
- RPB karışımlarının durabilite vb. özellikleri araştırılabilir

KAYNAKLAR

ACI Committee 517, 1970. *Recommended Practices For Atmospheric Pressure Steam Curing*, ACI Standard, American Concrete Institute.

ACI Committee 517, 1980. *Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric pressure steam*, ACI Journal, (77), s. 429 – 449 American Concrete Institute.

ACI Commite 262, 1984. *State of the Art Report on High Strength Concrete*, ACI Journal, s. 364 – 410.

ACI 544.1R – 96, 1997. *State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, ACI Committee Report, American Concrete Institute.

ACI 544.4R – 88, 1999. *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*, ACI Committee Report, American Concrete Institute.

Aitcin, P.C., 2000. *Cement of Yesterday And Today Concrete of Tomorrow*, Cement and Concrete Research, (30), s. 1349-1359.

Akkaya, Y., Peled, A. ve Shah, S. P., 2000. *Parameters Related to Fiber Length and Processing in Cementitious Composites*, Materials and Structures, (33), s. 515-524.

Akman, M.S., 1987. *Yapı Malzemeleri*, İ.T.Ü Matbaası, İstanbul.

Alabaş, V., 2002. *Buhar Kürü Yönteminin Beton Basınç Dayanımına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Aldea CM., Young F., Wang K. ve Shah SP., 2000. *Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement*. Cement and Concrete Research; (30) s. 465 – 472.

- Aslan, A. ve Aydın, A. C., 1999. *Lifli Betonların Genel Özellikleri*, Hazır Beton Dergisi, 6,36, s. 67 – 75.
- Balaguru, P.N. ve Shah, S.P., 1992. *Fiber Reinforced Cement Composites*, McGraw – Hill, Inc., s. 413 – 419.
- Baradan, B., 2000. *Yapı malzemesi II* (6.baskı), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Yayınları, İzmir, No:207.
- Bayramov, F., Aydemir, T., İlki, A. ve Taşdemir, M.A., 2004. *An Optimum Design for Steel Fiber Reinforced Concretes Under Cycling Loading*.
- Bentur, A. ve Mindness, S., 1990. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science, London And Newyork.
- Betterman, L. R., Ouyang, C. ve Shah, S. P., 1995. *Fiber – Matrix interaction in Microfiber Reinforced Mortar*, Advanced Cement Based Materials, (2), s. 53 – 61.
- Blais, P.Y. ve Couture, M., 1999. *Precast, prestressed pedestrian bridge – world's first reactive powder concrete structure*, PCI journal New technology, eylül – ekim, s. 61-70.
- Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. ve Aitcin, P., 1997. *Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes*, ACI Materials Journal, (94), s. 286 – 290.
- Bonneau, O., Vernet, C., Moranville, M., ve Aitcin, PC., 2000. *Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete*. Cement and Concrete Research; (30), s. 1861 – 1867.

- Chan, YW., ve Chu, SH., 2004. *Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete*, Cement and Concrete Composites, (34), s. 1167 – 1172.
- Collepari, M., Troli, R., Coppola, L. ve Collesparti, S., 2004. *Mechanical Properties of modified reactive powder concrete*, Cement and Concrete Composites, (34), s. 51 – 62.
- Dugat, J., Roux, N. ve Bernier, G., 1996. *Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, Materials and Structures*, (29), s. 233 – 240.
- Duyar, O., 2006. *Kendiliğinden yerleşen betonlar*, Hazır Beton, Yıl: 13, Mart-Nisan, s. 25 – 27.
- Düzgün, O.A., 2001. *Çelik Liflerin Hafif Betonların Dayanımları Üzerindeki Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ersoy, H.Y., 2001. *Kompozit Malzeme*, 1. Baskı, Literatür Yayınları, İstanbul.
- Erdem, TK., Turanlı, L. ve Erdoğan, TY., 2003. *Setting time: an important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete*. Cement and Concrete Research; (33), s. 741 – 745.
- Eyyubov, C., Köksal, F. ve Ünal, B., 2003. *Polipropilen ve Çelik Liflerin Donma Çözülme ve Aşınma Dirençlerine Ortak Etkisi*, 5. Ulusal Beton Kongresi Betonun Dayanıklılığı, İstanbul, Bildiriler Kitabı, s. 345 – 354.
- Feylessoufi, A., 1996. *Water environment and Nanostructural Network In A Reactive Powder Concrete*, Cement and Concrete Composites, (18), s. 23 – 29.

- Goldman, A. ve Bentur, A., 1993. *The Influence of Strength Microfillers on Enhancement of Concrete Strength*, Cement and Concrete Research, (23), s. 962 – 972.
- Hanson, J.A., 1963. *Optimum Steam Curing Procedure in Precasting Plants*, Journal of American Concrete Institute, (60), s. 75 – 100, PCI – Chicago.
- Hijorth, L., 1983. *Development and Application of High Density Cement Based Materials*, Phil. Trans. Roy. Soc., A310, s. 167 – 173, London.
- Karabulut, A., 2006. *Reaktif Pudra Betonunun Özelliklerinin Mineral Katkılarla Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kejin, W. ve Zhi, G. 2003. *Evaluating properties of blended cements for concrete pavements*. Final report. Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology: Iowa State University.
- Kmita, A., 2000. *A New Generation of Concrete in Civil Engineering*, Journal of Materials Processing Technology, (106), s. 80 – 86.
- Kocataşkın, F., 1991. *Yüksek Dayanımlı Betonun Bileşimi*, 2.Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası, (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), s. 211 – 226.
- Liu, B., Xie, Y. ve Li, J., 2005. *Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials*. Cement and Concrete Research; (35), s. 994 – 998.
- Long, G., Wang X. ve Xie Y., 2002. *Very High Performance Concrete with Ultrafine Powders*. Cement and Concrete Research, (32), s. 601 – 605.

- Maeder U., Gamboa IL., Chaignon J. ve Lombard JP. Ceracem., 2004. *A new high performance concrete: characterizations and applications. Ultra high performance concrete (UHPC)*. Uluslararası UHPC Sempozyumu, Eylül 13–15; s. 59 – 68.
- Malthota, V.M., eds 1992. *Advences in concrete technology*, Ottawa: Canmet.
- Mannan, MA., Basri, HB., Zain, MFM. ve Islam, MN., 2002. *Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete*. Building and Environment; (37), s. 1167 – 1171.
- Massazza, F., 2000. *Evaluation of Cements and Cementitious Systems: History and Prospects, Cement and Concrete Technology in the 2000s*, 2. Uluslararası Sempozyum, 3 – 28, TCMA, İstanbul.
- Matte, V. ve Moranville M., 1999. *Durability of Reactive Powder Composites Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes*. Cement and Concrete Composites, (21), s. 1 – 9.
- Mindess, S. ve Young J.F, Darwin D., 1991. *Concrete*, NJ: Prentice Hall.
- Mobasher, B. ve Yu Li, C., 1996. *Mechanical Properties of Hybrid Cement Based Composite*, ACI Materials Journal, (93), s. 284 – 292.
- Naaman, E.A. ve Najm, H., 1991. *Bond – Slip Mechanism of Steel Fibers in Concrete*, ACI Materials Journal, (88), s. 135 – 145.
- Neville, A.M., 1995, *Properties of Concrete. Longman Scientific and Technical*, New York.
- Neville, A.M., 1997. *Properties of Concrete*, Pitman Publishing, London.

- Öztekin, E., 1980. Tübitak Kurumu Bilgi Profili No 31, *Beton Sertleşmesinin Hızlandırılmasında Isıl İşlem Çevrimi ve Çimento Seçimi*, Ankara.
- Özyurt, N., 2000, *Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mekanik davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Postacıoğlu, B., 1986. *Beton Cilt 1 – Bağlayıcı Maddeler*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Reda, M.M., Shrive, N.G. ve Gillott, J.E., 1999. *Microstructural Investigation of Innovative UHPC*, Cement and Concrete Research, (29), s. 323 – 329.
- Richard, P. ve Cheyrez M., 1995. *Composition of Reactive Powder Concretes*, Cement and Concrete Research, (25), s. 17.
- Rossi, P., 2000. *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRC): An Overview*, Lif Donatılı Betonlar (FRC), 5. RILEM Sempozyumu, 87 – 100, Lyon, France.
- Rougeau P. ve Borys B., 2004. *Ultra high performance concrete with ultrafine particles other than silica fume, ultra high performance concrete (UHPC)*. Uluslararası UHPC Sempozyumu; Eylül 13–15, s. 213 – 25.
- Roux, N., Andrade, C. ve Sanjuan, M.A., 1996. *Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes*, Journal of Materials In Civil E., (8), s. 1 – 7.
- Shah, S.P. ve Rangan, B.V., 1971. *Fiber Reinforced Concrete Properties*, ACI Materials Journal, Title No:68 – 14, s. 126 – 136.
- Shaheen, E. ve Shrive, N. J., 2006. *Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete*. ACI Materials Journal, 103 (6), s. 444 – 451.

- Talebinejad I., Bassam SA., Iranmanesh A. ve Shekarchizadeh M., 2004. *Optimizing mix proportions of normal weight reactive powder concrete with strengths of 200–350 MPa, ultra high performance concrete (UHPC)*. Uluslar arası UHPC Sempozyumu; Eylül 13 – 15, s. 133 – 41.
- Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F., 2002. *Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı*, İtü Dergisi (1), s. 125 – 144.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N. ve Yerlikaya, M., 2004. *Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler*, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul, s. 1 – 34 .
- Taşdemir, M.A., Karihaloo, B.H., Bayramov, A.N., Yerlikaya, M. ve Sönmez, R., 2004. *Betonarme Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi için yüksek Dayanımlı/Yüksek Performanslı Betonlar, Yüksek Performanslı Lif Donatılı Kompozitler ve Kendiliğinden Yerleşen Betonlar*, 14. ERMCO Kongresi, Helsinki.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Açar, A.Ş. ve Yerlikaya, M., 2005. *Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı*, 6. Ulusal Beton Kongresi Yüksek Performanslı Betonlar, İstanbul, s. 33 – 44.
- Telford T., 1988. *Condensed silica fume in concrete*, FIP State of art report, 37.
- Topçu, İ.B., 2006. *Beton Teknolojisi*. Uğur Ofset, Eskişehir.
- Türkel S., ve Alabaş V., 2005. *The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete*. Cement and Concrete Research; (35), s. 405 – 411.
- Uğurlu, A., 1994. *Önyapımlı Betonların Kür Edilmesi*, Türkiye Mühendislik Haberleri, (371), s. 52 – 57, Ankara.
- Uyan, M., 1982. *Isıl İşlem Uygulaması ile Birlikte Katkı Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi*, Doç. Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

- Uyan, M. ve Yıldırım, H., 1991. *Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği*, 2.Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası, (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), s. 262 – 279.
- Ünal, O., 1994. *Isıl İşlem Uygulamasının Lifli Beton Özelliklerine Etkisi*, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Walraven, J., 1999, *The evolution of concrete, Structural Concrete*, Journal of fib, (Pl), s. 3 – 11.
- Yang, Q., Zhang, S., Huang, S. ve He, Y., 2000. *Effect of Ground quartz Sand on properties of High Strength concrete in the Steam-autoclaved curing*, Cement and Concrete Research, (30), s. 1993 – 1998.
- Yazıcı H., Aydın S., Yiğiter H. ve Baradan B., 2005. *Effect of steam curing on class C high-volume fly ash concrete mixtures*. Cement and Concrete Research, (35), s. 1122 – 1127.
- Yazıcı H, Yiğiter H, Karabulut A.Ş. ve Baradan B., 2008. *Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete*. Fuel; (87), s. 2401 – 2407.
- Yazıcı H., Yardımcı M. Y., Aydın S. ve Karabulut A., 2009. *Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes*, Construction and Building Materials, (23), s. 1223 – 1231.
- Yıldırım, S.T., 2002. *Lif Takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yiğiter, H., 2002. *Yüksek Performanslı Betonların Süneklik Özelliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.