

YÜKSEK DAYANIMLI BETONDA KALİTE DENETİMİ

Fatih Kürşat FIRAT¹, Ramazan AĞCA²

ÖZET : Beton tasarımında kalite ve maliyet ikilisi arasında bir optimum değer oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada, ülkemizin en önemli projelerinden biri olan Marmaray Projesi için üretilen C40 betonunun kalitesi, 7 ve 28 günlük silindirik beton numunelerinin basınç dayanımları kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca normal ve yüksek dayanımlı betonlar karşılaştırılmış, Türkiye'deki ilgili standartlar değerlendirilmiştir. Toplam 1804 adet numunenin deney sonuçlarının incelenmesi sonucunda Türkiye standartlarında yüksek dayanımlı beton olarak nitelendirilebilecek C40 betonunun bu proje için ortalama değerinin ve değişkenliklerinin yüksek olduğu bulunmuştur. Yüksek ortalama değer ve değişkenliğin üretim maliyeti açısından sonuçları tartışılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Yüksek dayanımlı beton, Değişkenlik katsayısı, Kalite.

QUALITY CONTROL in HIGH STRENGTH CONCRETE

ABSTRACT : During the design of a concrete mixture, it is required to generate an optimum value between quality and cost. In this study, quality of C40 concrete produced for Marmaray Project, which is one of the most important projects of Turkey, is statistically investigated by using the compressive strengths of 7 day and 28 day cylindrical specimens. Besides, the high strength concrete is compared with normal strength concrete; and the relevant codes and regulations used in Turkey are considered. Based on the evaluation of the 7 and 28 day concrete compressive strength test results of 1804 specimens, the mean value and the variability of C40 concrete which can be expressed as high strength concrete in the practice of Turkey, are found to be very high. The results of high mean value and variability are discussed in terms of production cost.

KEYWORDS: High strength concrete, Coefficient of variation, Quality.

¹ Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, AKSARAY

² Marmaray Projesi, Yenikapı Şantiyesi, Fatih, İSTANBUL.

I. GİRİŞ

Yirminci yüzyılın ikinci yarısından sonra çok hızlı bir şekilde kullanımı yaygınlaşan beton, inşaat mühendislerinin kalite yönetimi açısından en önemli araştırma konularından biri olmuştur. Betonun yapı malzemesi olarak ele alan araştırmacılar daha kaliteli betonun elde edilebilmesi üzerinde çalışmışlardır. Özellikle beton üretiminin, hazır beton tesislerinde gerçekleştirilmesinden sonra kalite yönetimi, beton üretim aşamasındaki en önemli parametre olarak karşımıza çıkmakta; hedeflenen dayanım ve özellikteki betonu en ucuza elde etmenin yanında, sıradan olana ek olarak daha yüksek dayanımlı beton gibi değişik özelliklere sahip beton üretiminde etkin rol üstlenmektedir.

Bir yapıda yüksek dayanımlı betonun kalitesini belirleyen önemli parametreler aşağıda sıralanmıştır:

- 7, 28 ve 90 günlük beton basınç dayanımları hedeflenen basınç dayanımından daha düşük olmamalıdır.
- Herhangi bir yapı üzerindeki beton dayanımı mümkün olduğu kadar az değişkenlikler göstermeli, değişkenlikler sınırlandırılmalıdır. Betonun yapısı homojen olmalıdır.
- Hedeflenen beton basınç dayanımının sağlanması için gereken süre, koşullara göre değişen durumlarda istenilenden daha yüksek veya daha düşük olmamalıdır.
- Çelik ile daha yüksek aderans sağlayarak birlikte zorlamalara karşı daha yüksek direnç göstermelidir.
- Zaman içerisinde betonda meydana gelecek rötre veya genişleme mümkün olduğu kadar az olmalıdır.
- Korozyona karşı direnç göstererek betonarme veya kompozit bir yapıda çeliğin daha iyi korunmasını sağlamalıdır.
- Eğilme dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı, elastisite modülü, sünme, yoğunluk, poisson oranı, ısıl genişleme katsayısı yüksek dayanımlı betonda aranan özelliklerden olup bunların değerlerinin arzulanan değerlerden sapma göstermemesi gerekmektedir.
- Yapı kullanım ömrü boyunca kimyasal reaksiyonlara, aşınmaya, donma-çözülme, ıslanma-kurumaya, asitlere, sülfata, ısınma-soğumaya karşı beton dayanıklı olmalıdır.
- Betonun geçirimsizliği, temas halinde olduğu su veya diğer sıvıların kendi içerisine giremeyecek derecede yüksek olmalıdır.
- Çekme mukavemeti nispeten yüksek olmalıdır.

Yukarıda ifade edilen özelliklerde kaliteli beton elde edebilmek, mühendislik teknolojisinin gelişmesi ile artık günümüzde mümkün olabilmektedir. Yüksek dayanımın ve yapının toplam ağırlığının önemli bir

proje parametresi olarak düşünüldüğü, iklimsel ve coğrafi çevrenin zorlayıcı nedenler olduğu, kimyasal etkilerin önem kazandığı yapılarda bu tür betonlar tercih edilmektedir. Çok katlı binalar yapma isteği ve daha uzun açıklıkları geçme ihtiyacı, yapı toplam ağırlığını düşürme gereksinimi, beton dayanımını artırma dolayısıyla yüksek dayanımlı beton kullanma zorunluluğunu da beraber getirmiştir. Böylece yüksek yapılarda, köprü ve viyadüklerde, tünel ve metro gibi yer altı çalışmalarında, su ile temas halinde olan açık deniz platformları, liman ve baraj gibi yapılarda, özellikle trafiğe çabuk açılması gereken yolların yapımında, zorlu çevre şartlarına maruz kalan yapılarda, kimyasal etkilerin önem kazandığı arıtma tesislerinde, prefabrikasyon yapı elemanlarında, havaalanlarında, nükleer enerji santrallerin yapımında bu tür betonlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Türkiye’de beton kalitesinin araştırılması konusunda 1989 yılında Akyüz ve Uyan [1] İstanbul ve çevresindeki betonun niteliği üzerine bir inceleme yapmıştır. 2006 yılında Fırat [2], Türkiye’de kullanılan betonun kalitesinin istatistiksel olarak incelemiş Türkiye’de yüksek dayanımlı beton kullanılarak yapılan binaların sayısının çok az olduğunu ifade etmiştir. Fırat ve Yüccem [3] 2008 yılında yapmış oldukları çalışmada en yüksek C30 beton sınıfına ait numuneleri değerlendirmiş ve bir belirsizlik analizi yapılmışlardır. Mertol [4] 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada sadece normal ve yüksek dayanımlı beton kullanılan tasarımları karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın amacı ise Türkiye’de şimdiye kadar hep normal dayanımlı betonlar için çalışılan beton kalitesinin incelenmesi konusunun, yüksek dayanımlı betonlar için ele alınmasıdır. Bu kapsamda, Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi kapsamında inşa edilen istasyon ve tünellerde kullanılan C40 betonuna ait kontrol amaçlı alınan silindirik numuneler değerlendirilmiştir.

II. YÜKSEK DAYANIMLI BETON TANIMI ve TÜRK STANDARTLARININ İNCELENMESİ

Yüksek dayanımlı beton, iyi kalitede agrega ve çimento ile silis dumanı gibi puzolanik maddeler kullanılarak üretilen, su/çimento oranı 0,20 mertebelerine hatta daha da düşürülerek yüksek işlenebilirlik ve döküm kolaylığı elde edilebilen özel bir beton türüdür. Kural olarak, betonarme yönetmeliklerinde var olan en yüksek beton sınıfından daha yüksek beton sınıfları yüksek dayanımlı beton olarak adlandırılabilirler [5]. Her ne kadar yüksek dayanımlı beton nispeten yeni bir malzeme olarak düşünülse de çok uzun yıllardır gelişimini sürdürmektedir. Bu süreç içerisinde de yüksek dayanımlı beton tanımlaması yıllar içerisinde değişmiştir. 1950’li yıllarda 34 MPa basınç dayanımına sahip betonlar yüksek dayanımlı beton olarak tanımlanmakta iken 1960’lı yıllarda 41 MPa ile 52 MPa basınç dayanımına sahip betonlar ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılmışlardır. Son yıllarda ise 138 MPa basınç dayanımına sahip betonlar yapılarda kullanılmıştır [6]. Ayrıca, laboratuvar koşullarında çok yüksek dayanımlı agrega kullanarak, basınç dayanımı 250 MPa’ya ulaşan betonlar da üretilmiştir [7].

Türkiye’de ise şu anda 2013 yılında tamamlanması beklenen, dokuzu yer altında, 47’si yer üstünde olmak üzere toplam 56 kattan oluşan Spine Tower isimli rezidans en yüksek dayanıma sahip betonun kullanıldığı bina olarak görülmektedir. Bu binada 80 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılmaktadır.

ACI 363R-10 [6] yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımının hangi dayanımlar arasında olacağını tanımlarken beton üretiminin gerçekleştirildiği coğrafi bölgeden bölgeye farklılıklar gösterebileceğini ifade etmiştir. 62 MPa’lık basınç dayanımına sahip betonun ticari olarak kullanıldığı bölgelerde yüksek dayanımlı betonun 83 MPa ile 103 MPa arasında basınç dayanımına sahip olacağını; 34 MPa’lık betonun ticari olarak kullanıldığı bölgelerde ise 62 MPa’lık betonun yüksek dayanımlı beton olarak tanımlanacağını ifade etmektedir. Bu nedenle yüksek dayanımlı betonun tanımı ülkeden ülkeye değişebilmektedir.

Ersoy ve Tankut [8], Türk standardı TS 500’de verilen sınırlamada olduğu gibi C50’den yüksek beton sınıflarındaki betonları yüksek dayanımlı beton olarak kendi çalışmalarında kullanmışlardır. Üzümeri ve Özden [9] ise 41 MPa’dan yüksek dayanıma sahip betonları yüksek dayanımlı beton olarak tanımlamışlardır. Song ve diğ. [10] 42 MPa’dan yüksek dayanımlı betonları kendi çalışmalarında yüksek dayanımlı beton olarak tanımlamışlardır. Bu çalışmada ise C40 betonu yüksek dayanımlı beton olarak tanımlanmıştır.

Şu anda Türkiye’de binaların projelendirilmesi ve inşa edilmesi sürecinde, inşaat mühendislerinin uymakta yükümlü oldukları en temel standart olarak “TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları [11] isimli standart akla gelmektedir. Bu standartta betonun tanımlanmasının ve sınıflandırılmasının basınç dayanımına göre yapılacağı ve basınç dayanımının belirlenmesinde çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan standart deney silindirlerinin 28 gün sonunda, TS EN 12390-2 (Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi) [12] isimli standarda uygun biçimde denenmesiyle elde edileceği ifade edilmektedir. Ayrıca beton karakteristik basınç dayanımı f_{ck} , denenecek silindirlerden elde edilecek basınç dayanımlarının bu değerden düşük olma olasılığı belirli bir oran (genellikle %10) olan değerdir denilmektedir. Gerektiğinde basınç dayanımı, küp deneylerinden de elde edilebilir. TS 500’de Madde 3.3.1. beton sınıflandırılması C16 ile C 50 arasında yapılmıştır. Madde 0.3. Kapsam kısmında ise TS 500’ün betonarme yapı elemanları ve yapıların, kullanım amaç ve süresine uygun güvenlikte tasarlanması, hesaplanması, boyutlandırılması ve yapımı ile ilgili kural ve koşulları kapsadığı; C50 den daha yüksek dayanımlı betonlarla yapılan betonarme yapıların tasarım ve yapım kurallarını kapsamadığı belirtilmiştir. C50’den yüksek dayanımlı beton kullanılması durumunda yapılan hesaplar literatürden kaynak gösterilerek kanıtlanmalıdır ifadesi kullanılmaktadır.

2002 yılında tadil edilen TS 500’de standart deney silindir ve küp numunelerin TS3068 (Laboratuvarda Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı) [13] isimli standarda göre yapılacağı ifade edilmekteydi. Bu standard, şişleme veya vibrasyon ile sıkıştırılabilen betonlarda; laboratuvarda hassas bir şekilde kontrol edilmiş şartlar altında, deney numunelerinin nasıl bakıma tabi tutulacağını belirten bir metodu kapsar. Bu standart 1999 yılında yürürlükten kaldırılmıştır yerine TS3068 ISO 2736-2 (Beton Deneyleri- Deney Numuneleri Bölüm 2: Dayanım Deneyleri İçin Deney Numunelerinin Yapımı ve Kürtü) [14] isimli standart getirilmiştir. Aynı şekilde bu standart da 2002 yılında iptal edilerek yerine TS EN 12390-2 [12] isimli standart getirilmiş ve bu standart 2010 yılında revize edilmiştir. Bu standart, dayanım deneylerinde kullanılacak beton deney numunelerinin yapımını ve küre tabi tutulması yöntemlerini kapsar. Deney numunelerinin yapımı ve küre tabi tutulması, deney numunesi kalıplarının hazırlanması, betonun kalıplara doldurulması ve sıkıştırılması, yüzeyin tesviye edilmesi, deney numunelerinin kuru ve nakliyesini ihtiva eder. Yukarıda anlatılanlardan beton numunelerinin değerlendirilmesi konusunda son yıllarda birçok değişiklikler yapıldığı birçok standardın yürürlükten kaldırılıp yerine yenisi getirildiği sonucu çıkarılmaktadır.

TS500 Madde 0.3. Kapsam kısmında Deprem bölgelerinde inşa edilecek yapılar için bu standartta verilen temel ilke ve koşulların yanında Bayındırlık ve İskan Bakanlığı’nca (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı) hazırlanan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik [15] gerekleri de yerine getirilmelidir ifadesi bulunmaktadır. Deprem yönetmeliği Madde 3.1.4’de beton dayanımının C50’den daha yüksek olduğu betonarme binalar ile taşıyıcı sistem elemanlarında donatı olarak çelik profillerin kullanıldığı binalar, “betonarme binalar için depreme dayanıklı tasarım kuralları” bölümünün kapsamı dışında olduğu vurgulanarak yüksek dayanımlı beton kullanılacak betonarme binaların tasarımında bu yönetmeliğin kullanılmayacağı ifade edilmiştir.

TS EN 206-1 (Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk) [16] isimli standart yerinde döküm ve ön yapımlı (prefabrik) yapılar ile binaların ve inşaat mühendisliği alanına giren diğer yapıların ön yapımlı yapısal elemanlarında kullanılan betonları kapsar. Bu standartta şantiyede hazırlanmış beton, hazır beton veya ön yapımlı beton elemanlar için tesiste imâl edilmiş betonlar dikkate alınmaktadır. Bu tür betonlardaki bileşen malzemeleri, taze ve sertleşmiş beton özellikleri ve bunların doğrulanması, beton bileşimi için oranlar ve sınırlar, beton özellikleri, taze betonun teslimi, uygunluk kontrolü ve kriterleri ve imalat kontrol işlemlerini kapsamaktadır. TS EN 206-1 Madde 3.1.10.’da yüksek dayanımlı beton, basınç dayanım sınıfı C 50/60’dan daha yüksek olan beton veya ağır beton; basınç dayanım sınıfı LC 50/55’ den daha yüksek olan hafif beton olarak tanımlanmıştır. Madde 9.9’da yüksek dayanımlı beton için özel bilgi ve tecrübe gerektiğinden imalat kontrolünde ilave şartlara ihtiyaç duyulabileceğini fakat bu şartların bu standartta verilmemiş olduğunu ifade etmektedir. Standardın Ek H kısmında “yüksek dayanımlı betonlar

için ilave hükümler” bölümünde, bilgi için ibaresi içerisinde bazı öneriler belirtilmiştir. Bu Ek kısmında yüksek dayanımlı betonun imalât kontrolü için ilâve bilgi, CEB Bulletin of Information 197-FIP, High strength Concrete-State of art report ;SR 90/1-1990, gibi ilgili literatürden edinilebilir ifadesi bulunmaktadır.

Yukarıda anlatıldığı gibi TS500 ve TS EN 206-1’de yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımı cinsinden sadece sınırları verilmiştir. Bu tür betonla inşa edilecek yapılardaki hesap ve yapım kurallarından bahsedilmemiş veya bu tür betonun taze ve sertleşmiş beton özellikleri, beton bileşimi için oranlar, sınırlar ve bileşen malzemeleri, taze betonun teslimi ve imalat kontrol işlemleri kapsam dışında bırakılmıştır. Her iki standartta da yüksek dayanımlı beton için literatüre bakılması gerektiği ifade edilmiştir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik ise yüksek dayanımlı beton kullanılacak betonarme binaların tasarımında bu yönetmeliğin kullanılmayacağı ifade edilmiştir. Sonuç olarak, Türkiye’de yüksek dayanımlı beton ve bu betonun yapısal tasarımı ile ilgili bir standart veya yönetmelik bulunmamaktadır.

III. NORMAL BETON İLE YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Beton teknolojisinin gelişme süreci içerisinde, yönetmelik ve standartlarla belirlenmiş o dönem için üretilen standart beton niteliğinden, daha üstün niteliğe sahip betonlar üretilmiştir. Yüksek dayanımlı beton olarak adlandırılabilen üstün nitelikli beton ile normal dayanımlı beton sürekli kıyaslanmıştır. Her ne kadar yüksek dayanımlı beton ile normal dayanımlı beton içerisinde benzer malzemeler bulunsun bile karışım miktarları ve malzeme özellikleri birbirinden farklılık gösterir. Özellikle son yıllarda üretilen yüksek dayanımlı beton, normal dayanımlı betondan nitelik ve nicelik olarak yeni bir yapı malzemesi olarak düşünülecek kadar farklıdır.

Yüksek dayanımlı beton ile normal dayanımlı beton arasındaki en önemli farklardan birisi su-çimento oranıdır. Beton niteliğinin artırılması, yeterli işlenebilirliğin sağlanması için içerisinde konan gereğinden fazla su miktarının azaltılması veya sabit su içeriğinde bağlayıcı miktarının artırılması ile mümkündür. Böylece beton içerisindeki kılcal boşluklar azaltılacak beton belirli oranda dayanım kazanacaktır.

Bazı durumlarda su-çimento oranını düşürmek için beton içerisindeki su miktarı belirli bir değere kadar azaltıldıktan sonra beton işlenebilirliğinde sorunlar çıkmakta yüksek katlara beton pompalanamamaktadır. Bu durumlarda daha üstün nitelikte beton elde edebilmek ve bunun yanında işlenebilirliği de sağlayabilmek için normal betona kıyasla çok fazla oranda akışkanlaştırıcılar ve priz geciktiriciler kullanmak gerekmektedir. Birçok durumda bu tip kimyasal malzemeler kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde etmek mümkün olmamaktadır.

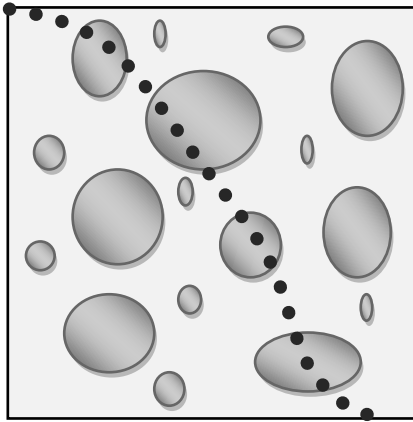
Beton içerisinde bağlayıcı rolü üstlenen silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, ve metakaolin gibi malzemelerin kullanımı bütün dünyada özellikle yüksek dayanımlı beton üretiminde giderek artmaktadır. Silisyum metalinin veya metal alaşımlarının üretimi için kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin indirgenmesi sonucu bir yan ürün olarak elde edilen çok ince taneli, endüstriyel atık maddeye silis dumanı adı verilmektedir. Silis dumanı amorf yapıya sahip çok ince taneli bir malzeme olduğundan aynı zamanda yüksek miktarda SiO_2 içerdiğinden mükemmel bir puzolanik malzemedir. Bu nedenle kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirildiği durumda hidrolitik bağlayıcılık özelliği göstermektedir [17]. Elektrik enerjisi üretmek maksadıyla termik santrallerin çoğunda pulverize kömür yakıtı kullanılmaktadır. Elektrik üretimi sırasında toz haldeki bu tür kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Uçucu bir endüstriyel bir atık olan bu küllere, uçucu kül adı verilmektedir [18]. Yüksek fırın cürufu fırınlarda demir üretimi sırasında ergimiş halde elde edilen bir atık ürünü olup; bazik esaslı bileşikler, silis, kalsiyum alümina silis içerir. Cürufun kimyasal bileşiminin ne olduğunun yanında kristal yapısı da önemli bir parametredir. Yüksek fırın cürufunun camsı madde bileşimi, camsı madde oranı, kalsiyum içerikleri, tane boyutu ve karakteristikleri bu tür malzemelerin beton içerisindeki aktivitelerinde önemli rol üstlenen ana faktörlerdir [19,20].

Normal dayanımlı betondan ziyade yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi maddelerin tane çapları çok küçük olduğundan çimento hamuru ve agrega arasındaki kılcal boşlukları gidermesi sonucu çimento hamuru ile agrega arasındaki aderansın daha artmasına neden olarak betonun dayanımını arttırmaktadır. Buna ilaveten beton karışımı içerisinde konan çimento miktarının fazla olması beton maliyetini çok olumsuz yönde etkileyeceği gibi aynı zamanda çimentonun hidrasyonu sırasında oluşan sıcaklığın artmasına neden olarak beton için istenmeyen etkilerin ortaya çıkmasına neden olur. Yukarıda bahsedilen puzolanik maddeler bu problemlerin giderilmesine olumlu yönde katkı sağlamaktadırlar. Bu malzemelerin hidrasyonu sırasında meydana gelen sıcaklık artışı, çimentonun hidrasyonu sırasındaki sıcaklık artışından daha düşük bir değere sahip olacaktır ve çatlak oluşumu azaltılacaktır [21,22].

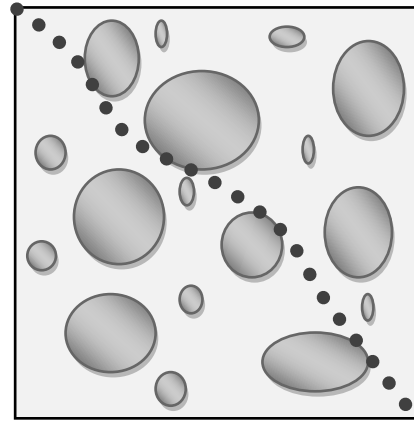
Beton, herhangi bir yük etkilediği durumlarda dahi içinde mikro çatlaklar ve boşluklar bulunan homojen olmayan ve yarı gevrek olarak nitelendirilebilecek bir yapı malzemesidir. Bu malzeme nispeten düşük yükler altında lineer elastik bir davranış gösterirken yük arttırıldığında, lineer elastik davranış bir noktadan itibaren geçilerek betonun içindeki mikro çatlaklar ve boşluklar aktif hale gelir ve beton nonlineer bir davranış göstermeye başlar. Özellikle agrega ile hidrasyona uğramış çimento hamuru arasındaki yüzey boşluk miktarı ve mikro çatlaklar büyür ve betonda kalıcı şekil değiştirmeler meydana gelir. Söz konusu kalıcı şekil değiştirmeler, betona etkileyen tepe yükü civarında kırılmanın gerçekleşeceği

düzlemde birikmeye başlar. Çatlaklar ilerlemeye devam ettikçe şekil değiştirmeler artar ve yük taşıma kapasitesi azalır. Böylece çatlaklar belirli bir süre içerisinde ilerleyerek betonun yük taşıma kapasitesinin aniden sıfıra düşmesini engeller ve tepe yükü sonrasında betona tokluk kazandırır. Bu nedenle beton, yarı gevrek bir malzeme kabul edilir [23].

Betonun kırılma mekaniğinde agrega, çimento hamuru ve ikisi arasındaki yüzey olmak üzere üç adet temel parametre bulunmaktadır. Beton dayanımının artırılması bu parametrelerin dayanımlarını arttırmak ile mümkün olacaktır. Normal dayanımlı betonun kırılma davranışını hidrasyona uğramış çimento hamuru tayin eder. Çünkü eğer agrega dayanımı çok düşük değilse çimento hamurunun dayanımı agrega dayanımından düşük olacak kırılma çimento hamurunda veya çimento hamuru ile agrega arasındaki yüzeyde gerçekleşecektir. Şekil 1.b'de normal dayanımlı betonların kırılma yüzeyi kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere agregalar sağlam kalacak, kırılma yüzeyi çimento hamurunda ve agrega ile temas sağladığı bölgede oluşacaktır. Bununla birlikte daha az su ve daha fazla çimento kullanılarak veya kimyasal katkıları, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi maddelerle çimento hamurunun dayanımı artırılıp çimento hamuru ile agrega yüzeyindeki boşluklar ve kılcal çatlakların azaltıldığı durumda, agreganın dayanımının önemi daha da artacaktır. Yüksek dayanımlı betondaki kırılma davranışı Şekil 1.a'da verilmiştir. Bu şekilden anlaşıldığı üzere kırılma davranışını agreganın dayanımı tayin edeceği için agrega dayanımının artırılmasıyla beton dayanımında artma elde edilebilecektir.



a) Yüksek Dayanımlı Beton

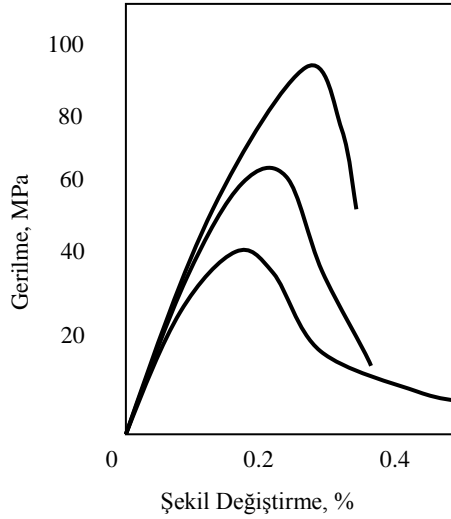


b) Normal Dayanımlı Beton

Şekil 1. Yüksek ve normal dayanımlı beton için kırılma yüzeyleri [22].

Şekil 2'de görüldüğü gibi normal dayanımlı betona kıyasla yüksek dayanımlı beton tepe noktasına kadar daha lineer bir davranış göstermektedir. Yüksek dayanımlı betonların tepe noktası geçildikten sonra

gerilme düşüşü ani olmakta ve daha gevrek kırılmaktadır. Bu tür betonlar için, en yüksek gerilmeye kadar meydana gelen bağıl enerji normal dayanımlı betonların enerji absorbe miktarından daha az olmaktadır. Aynı zamanda yüksek dayanımlı beton ile normal dayanımlı beton arasındaki önemli farklardan bir tanesi yüksek dayanımlı beton daha gevrek bir malzeme olduğundan normal dayanımlı betona oranla daha ani kırılır.



Şekil 2. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrileri [24].

IV. NUMUNELERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Marmaray Projesi, İstanbul'un Anadolu ve Avrupa yakasında yaklaşık 76 km uzunluğundaki mevcut Halkalı-Sirkeci ve Haydarpaşa-Gebze banliyö hatlarının iyileştirilmesi (CR1), İstanbul Boğazı'nda kesintiye uğrayan kısmında birbirine batırma tüp tünel ile bağlanması (BC1) ve araçların temin edilmesinden (CR2) oluşan 3 ayrı sözleşmeden oluşmaktadır. Marmaray (Demiryolu Boğaz Tüp Geçişi) BC1 Sözleşmesi, Asya ve Avrupa'yı İstanbul Boğazının altından birbirine demiryolu ile bağlayan Türkiye'nin olduğu kadar dünyanın da en önemli projelerinden birisidir. Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi 1387 m batırma tüp tünel, 10 km çift tüp delme tünel, 670 m istasyonlar dahil aç-kapa tünel, 1790 m istinatlı dolgu, yarma ve yüzey yapılarından oluşmaktadır [25].

Bu çalışmada kullanılan beton numuneleri, Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi kapsamında yer alan batırma tüpler, istasyonlar (aç-kapa tüneller) ve istasyonları birbirine bağlayan tünellerin yapımı esnasında, projede kalıcı beton olarak nitelendirilen, istasyonlar ve tüplerde kullanılan C40 betonundan alınmıştır. Bu numuneler beton dökülürken mikserlerden ve pompa ucundan alınmıştır. Kontroller

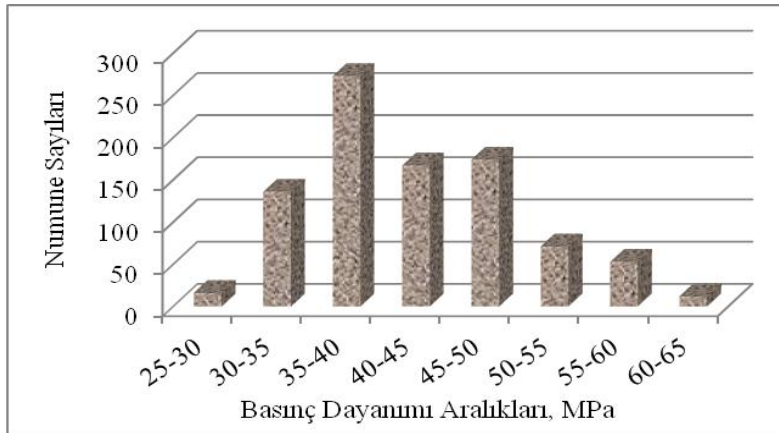
İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında ve Marmaray Laboratuvarında yapılmıştır. Bu bölümde, C-40 betonundan alınan 1804 adet 15x30 boyutlarında silindir numuneler üzerinde yapılan istatistiksel analiz ve karşılaştırmalar yer almaktadır.

Çizelge 1’de 7 ve 28 gün sonunda kırılmış bütün numunelere ait ortalama değer, standart sapma ve değişkenlik katsayıları verilmiştir. Değişkenlik katsayısı standart sapmanın ortalama değere oranı olup boyutsuz bir büyüklüktür.

Çizelge 1. 7 ve 28 günlük numunelere ait istatistiksel sonuçlar.

Kırım süresi	Numune sayısı	Ortalama değer (MPa)	Standart sapma (MPa)	Değişkenlik katsayısı
7 Günlük	902	42.05	7.49	0.178
28 Günlük	902	59.86	6.73	0.112

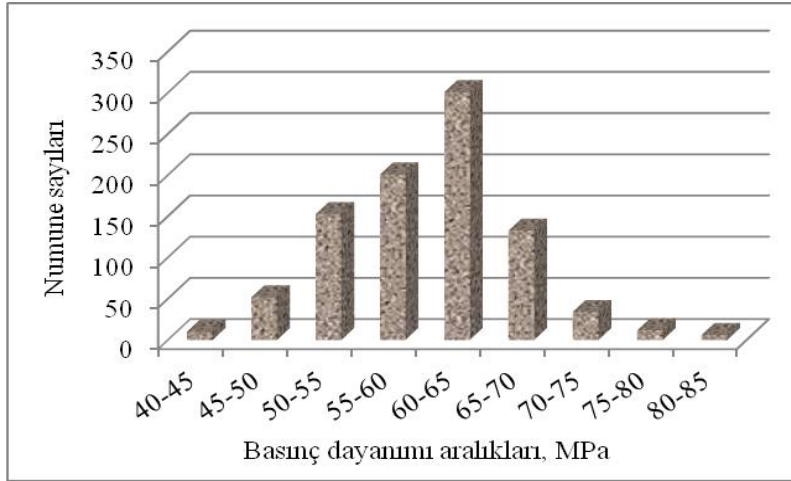
Şekil 3’te 7 günlük beton numunelerin sayısının numunelerin kırımı sonrasında elde edilmiş basınç dayanımlarına göre değişimi verilmiştir. 902 adet numunenin değerlendirilmesi sonucunda, numune sayıları: 25-30 MPa aralığı için 16, 30-35 MPa aralığı için 136, 35-40 MPa aralığı için 273, 40-45 MPa aralığı için 167, 45-50 Mpa aralığı için 174, 50-55 MPa aralığı için 71, 55-60 MPa aralığı için 53, 60-65 MPa aralığı için 12 adet olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. Basınç dayanımı aralıklarına göre 7 günlük beton numune sayılarının değişimi.

Şekil 4'te 28 günlük beton numunelerin sayısının basınç dayanımlarına göre değişimi verilmiştir. 902 adet numunenin değerlendirilmesi sonucunda, numune sayıları: 40-45 MPa aralığı için 10, 45-50 MPa aralığı için 52, 50-55 MPa aralığı için 153, 55-60 MPa aralığı için 201, 60-65 MPa aralığı için 301, 65-70 MPa aralığı için 133, 70-75 MPa aralığı için 34, 75-80 MPa aralığı için 12, 80-85 MPa aralığı için 6 adet olarak tespit edilmiştir.

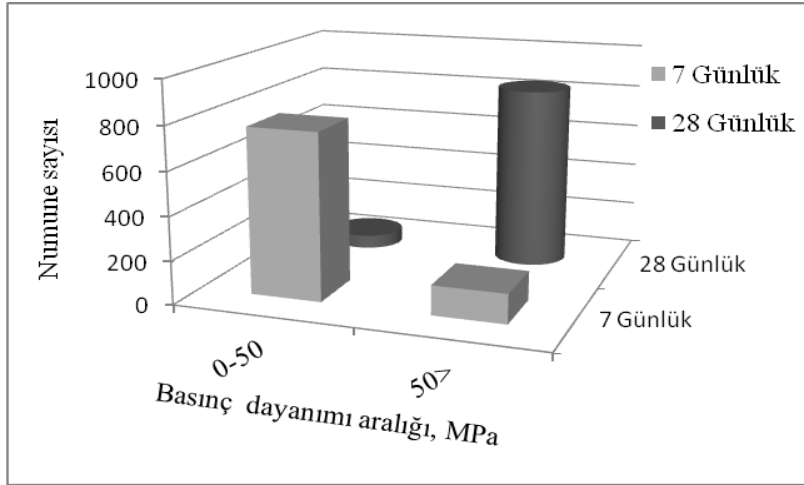
Şekil 3. ve 4.'te görüldüğü gibi kullanılan numunelerin 7 günlük olanları 30-50 MPa aralığı, 28 günlük olanları 50-70 MPa aralığında yoğunlaşmıştır. Buradan; C-40 betonun kazanacağı dayanımın önemli bir kısmını 7 gün içerisinde aldığı fakat tam dayanım için 28 günlük sürenin önemli olduğu kanısına varılmaktadır. Ayrıca, kullanılan kimyasal katkıların betonun priz alma süresini kısalttığı söylenebilir. Tasarlanan beton C-40 olmasına rağmen, grafikten de anlaşılacağı gibi yoğunlukla C-60 olarak görülmektedir. Bunun sebebi; air 200B, genium sky 506, pozzolith107, mikro silika çamuru gibi katkı bileşiklerin betona ilave edilerek betonun, sıvı geçirimsizliği, ayrışma ve kasma yapmaması, donma çözünme döngüsüne karşı direnci, işlenebilirlik ve plastik özellikler gibi birçok özelliği içinde ihtiva etmesi sağlanmıştır. Bu katkılardan dolayı su/çimento oranı azalmış sonuç olarak da betonun dayanımı artmıştır.



Şekil 4. Basınç dayanımı aralıklarına göre 28 günlük beton numune sayılarının değişimi.

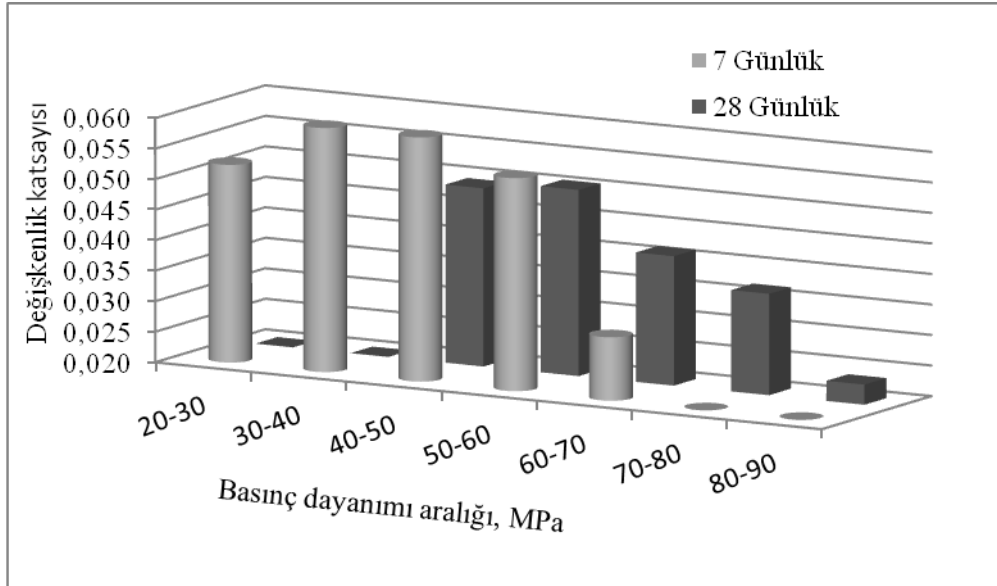
Şekil 5'te basınç dayanımı 50 MPa'nın altında ve üstünde olan numune sayıları verilmiştir. TS 500'de ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'de C50'den yüksek dayanımlı betonla yapılacak olan yapıların bu yönetmeliklerin kapsamına girmediği ifade edilmektedir. Tek eksenli basınç altında 7 günlük numunelerin 766 adeti 50 MPa'nın altında, 136 adedi 50 MPa'nın üstünde bir basınç

dayanımı oluşturacak yükte kırılmıştır. 28 günlük numunelerin ise 62 adedi 50 MPa'ın altında bir gerilme ile dayanımını kaybetmişken 840 adedi 50 MPa'ın üstünde bir gerilmeye karşı dayanım göstermişlerdir.



Şekil 5. C50 Betonundan yüksek ve düşük olan numune sayıları.

Şekil 6'da 7 ve 28 günlük betonun basınç dayanımı aralıklarına göre değişkenlik katsayıları verilmiştir. 7 günlük numunelerin değişkenlik katsayısının en yüksek olduğu beton C40-C50 betonu iken 28 günlük numunelerin değişkenlik katsayılarının en yüksek olduğu aralık ise C50-C60 aralığıdır.



Şekil 6. Basınç dayanımı aralıklarına göre değişkenlik katsayıları.

V. SONUÇ ve ÖNERİLER

C40 beton ihtiyacı için üretilen karışımın yoğunlukla C60-C65, bazen C85 olarak sonuçlar üretmesi ekonomik açıdan bakıldığında fazla güvenli bir tasarım olarak değerlendirilebilir. C40 betonunun sağlanamadığı koşullarda, oldukça ağır ve külfetli incelemeler yapılması ve bu incelemelerde beton yeterli dayanım göstermezse, yıkıp yeniden yapmaya kadar varacak düzeltici aksiyonların alınması gerekecektir. Genelde projelerin sıkışık takvimi olduğundan emniyetli tarafta kalmanın maliyetinden daha fazla, zaman maliyeti ortaya çıkabilecektir. Bu riskler değerlendirilerek, ihtiyacın üzerinde bir dayanım sağlayan karışım tasarlanıp üretilebilir. Bu üretimin ilave maliyeti, diğer olası maliyetler yanında makul kalacaktır.

Beton üretilirken olabilecek en düşük değişkenlik katsayısı elde edilmeye çalışılmalıdır. Bu çalışmada, 7 günlük numunelerin değişkenlik katsayılarının 28 günlük numunelere oranla %60 daha fazla olduğu görülmüştür. Değişkenlik katsayıları arasındaki bu büyük farkın en önemli sebebi çeşitli beton katkı maddelerinin kullanılmasıdır. 7 günlük numunelerin değişkenlik katsayılarının 28 günlük numunelere oranla çok fazla olduğu gerçeği imalat kontrol kriterleri açısından dikkate alınmalıdır.

Eldeki verilerin analizi sonucunda 7 günlüklerin %93'ü, 28 günlüklerin ise %14'ü 50 MPa'nın altında kırıldığı görülmüştür. Numunelerin 7 günlük olanlarının % 7'si, 28 günlük olanların ise %86'sı yüksek dayanımlı beton kapsamı içerisine girmektedir. Buradan TS 500 ve Deprem yönetmeliğindeki C50 sınırlandırılmasının, numunelerin kendi doğası gereği, C40 betonunda bile çok büyük bir yüzde ile aşılması nedeniyle bu sınırlandırmanın sorgulanması gerektiği sonucunu ortaya çıkarır.

TS500 ve TS EN 206-1'de yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımı cinsinden sadece sınırları verilmiş olup bu tür betonun üretim ve denetim aşamaları ile bu tür betonlar kullanılacak yapılar hakkında herhangi bir bilgi vermemiştir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te ise yüksek dayanımlı beton kullanılacak betonarme binaların bu yönetmeliğin kapsamı dışında olduğu belirtilmiştir. Türkiye'de yüksek dayanımlı beton ve bu betonla yapılacak binaların tasarımı ve yapımı hakkında mühendisleri yönlendirebilecek herhangi bir standart veya yönetmelik bulunmamaktadır. Bu durum bu tür betonların kullanımını, bütün avantajlarına rağmen yaygınlaştırmamaktadır. Bundan dolayı yüksek mukavemetli betonların üretimi ile ilgili hazır beton sektörünün de dahil olduğu çalışmalar yapılmalı, bu tür betonlar kullanılarak yapılmış yapı ve yapı elemanlarının davranışı incelenerek Türkiye koşullarına uygun standart ve yönetmelikler üretilmelidir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] S. Akyüz, M. Uyan, “İstanbul ve Çevresindeki Betonun Niteliği Üzerine Bir İnceleme”, 1. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul. 1989, Bildiri Kitabı, ss. 160-171.
- [2] F. K. Fırat, “Statistical Evaluation of the Quality of Concrete Used in Turkey”, 7th International Congress on Advances in Civil Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye, 2006, ACE06-061, ss. 1-10.
- [3] F. K. Fırat, M.S. Yüçemen “Uncertainty Analysis for Reinforced Concrete Members Constructed in Turkey, International Conference on Construction and Building Technology”, ICCBT, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008, pp. 81-88.
- [4] H.C. Mertol, “Normal ve Yüksek Dayanımlı Beton Kullanılan Tasarımların Karşılaştırılması”, 5. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi Bildirileri, İstanbul, Türkiye, Kasım 2010, ss. 99-108.
- [5] F. Kocataşkın, “Yüksek Dayanımlı Betonun Bileşimi”, 2.Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, Mayıs 1991, Bildiriler Kitabı, ss. 211-226.
- [6] ACI 363-10 (2010), State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2010.
- [7] İ. Berktaş, “Genelde Yüksek Dayanımlı Beton”, 2.Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, ss. 1-14.
- [8] U. Ersoy, T. Tankut. “Yüksek Dayanımlı Betonun Yapısal Davranışı ile İlgili Bir İrdeleme”, 2.Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, ss. 122-139.
- [9] Ş. M. Üzümeri, Ş. Özden, “Yüksek Dayanımlı Betonun İnşaatta Kullanımı Konusunda Standartlar ve Yönetmeliklerdeki Gelişmeler”, 2.Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, ss. 159-182.
- [10] P.S. Song, J.C. Wu, S. Hwang, B.C. “Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No:2, pp. 393–399, 2005.
- [11] TS-500, “Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları”, Türk Standartları Enstitüsü, Şubat 2000.
- [12] TS EN 12390-2, “Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi” Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 2010.

- [13] TS 3068, “Laboratuvarında Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı” Türk Standartları Enstitüsü, Mart 1978.
- [14] TS 3068 ISO 2736-2 (Beton Deneyleri- Deney Numuneleri Bölüm 2: Dayanım Deneyleri İçin Deney Numunelerinin Yapımı ve Kürü), Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 1999.
- [15] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Türkiye, 2007.
- [16] TS EN 206-1, “Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk” Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 2002.
- [17] T. Y. Erdoğan, “Beton”, İkinci baskı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 2007.
- [18] H. Y. Aruntaş, “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt. 21, Sayı. 1, ss.193-203, 2006.
- [19] Ş. Erdoğan ve Ş. Kurbetçi, “Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Cilt. 426, Sayı. 4, ss. 115-120, 2003.
- [20] H. Yalçın, M. Gürü, “Çimento ve Beton”, Birinci Basım, Palme Yayıncılık, Ankara, 2006.
- [21] M.A.M. Johari, J.J. Brooks, S. Kabir, P. Rivard, “Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 5, pp. 2639-2648, 2011.
- [22] H.C. Mertol, “Normal ve Yüksek Dayanımlı Beton Kullanılan Tasarımların Karşılaştırılması”, 5. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi Bildirileri, İstanbul, Türkiye, ss. 99-108, Kasım 2010.
- [23] Y. Akkaya, F. Bayramov, M. A. Taşdemir, “Betonun Kırılma Mekanizması: Tasarımda Kullanılan Mekanik Özellikler İle Kırılma Parametreleri Arasındaki Bağlantılar”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Cilt 426, Sayı. 4, ss. 70-75, 2003.
- [24] M. A. Taşdemir F. Bayramov, M. Yerlikaya, “Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Cilt 426 Sayı. 4, ss. 76-84, 2003.
- [25] Şennazlı, N., Şimşek, O., Biberoglu, S., Olgungöz, Ö., Marmaray Projesi, “Demiryolu Boğaz Geçişi, Tüneller ve İstasyonlar İnşaatı – Sözleşme BC1” <http://www.sial-geo.com.tr/new/pubs/6.pdf>, 2011.