

SERTLEŞMİŞ BETON VE ÖZELLİKLERİ

Dayanımını kısmen kazanmış betona *sertleşmiş beton* denir. Sertleşmiş beton dendiğinde genellikle 28 günlük ve daha yaşlı beton anlaşılmalıdır. Sertleşmiş beton özellikleri betonun kullanıldığı yapının ömrü boyunca etkili olan özelliklerdir. Bunlar dayanım, dayanıklılık, deformasyon, geçirimsizlik, hacim sabitliği, rötne ve sünme gibi özelliklerdir.

Betonun kullanıldığı yere göre önem kazanan bu özellikler betonun bileşimine, taze haldeki özelliklerine, kalıba yerleştirme ve sıkılama sırasında uygulanan işlemlere, kalıp içindeki saklama koşullarına ve kalıp alındıktan sonraki ortam koşullarına bağlıdır. Bu özellikler betondan taze halde iken alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerle saptanmaya çalışılır. Bu tür deneyler beton bileşimi dışındaki etkileri içermediğinden yapıdaki beton hakkında kesin bilgi vermez. Ancak bu tür deney sonuçlarından yararlanılarak yapıdaki beton kalitesi hakkında bir fikir elde edilmektedir. Bunun yeterli olmadığı durumlarda doğrudan yapıdaki beton üzerinde deneyler yapılabileceği gibi yapıdan alınacak beton örnekleri laboratuvarında incelenerek bir karar verilebilir.

BETONUN DAYANIMI

Sertleşmiş betonda aranan temel karakteristik dayanımdır. Dayanım, bir yapının yalnızca ayakta durabilmesi için gerekli bir şart olarak değerlendirilmemelidir. Zira dayanımı yüksek betonun diğer özellikleri de genellikle arzu edilen düzeydedir. Bu nedenle çok özel durumlar hariç basınç dayanımı beton kalitesinin ölçüsü olarak dikkate alınır. Bir yapıda kullanılacak betonun tasarımı yapılırken binanın maruz kalacağı yüklerin büyüklüğü dikkate alınır ve beton bu yükleri belli bir emniyetle taşıyacak biçimde tasarlanır ve üretilir.

Sertleşmiş betonda aranan en önemli karakteristiğin basınç dayanımı olmasının bazı nedenleri şunlardır:

- Betonun basınç dayanımını belirlemek diğer karakteristiklerini belirlemekten çok daha kolay ve basittir.
- Beton, çoğunlukla basınca maruz kalacak şekilde kullanılır.
- Basınç dayanımı bilindiği takdirde diğer dayanım türlerinin büyüklükleri hakkında fikir edinmek mümkündür.
- Basınç dayanımı betonun diğer özellikleri hakkında nitelici bilgi sağlamaktadır. Örneğin, basınç dayanımı yüksek bir betonun geçirimsizliğinin düşük olduğu ve performansının yüksek olduğu kabul edilir.

Beton çimento hamuru ve bu hamurun içerisinde dağılı halde yer alan agrega tanelerinden oluşan kompozit bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bu bakımdan betonun dayanımı, çimento hamurunun dayanımı, agreganın dayanımı ve çimento hamuru ile agrega arasındaki aderans ile doğrudan ilişkilidir.

Betonun basınç dayanımı, standartlarda belirtilen boyutta ve biçimde hazırlanan numuneler üzerinde belirlenir. Numuneler standart kür koşullarında öngörülen sürede saklandıktan sonra eksenel basınç yüklemesi altında kırılarak söz konusu beton için basınç dayanımı hesaplanır.

Basınç dayanımı genellikle 15 cm küp veya 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde belirlenir. Bunun yanı sıra halen 10 cm ve 20 cm küp numuneler ile 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir numuneler de kullanılmaktadır. Çekme dayanımı ya basınç deneyinde kullanılan numuneler üzerinde veya prizmatik numuneler üzerinde saptanmaktadır.

Standartların belirttiği biçimde taze beton numune kalıplarına doldurulur ve 24 saat süresince nemli bir odada saklanır. Bu süre sonunda kalıplarından çıkarılan numuneler deney tarihine kadar standart kür koşulları diye bilinen $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de %95 bağıl neme sahip bir odada veya bu sıcaklıkta su içinde bekletilir.

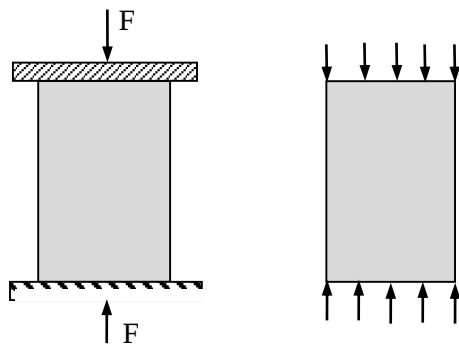
Deney günü numuneler kür odasından çıkarılır ve onların kısmen kuruması beklenir. Numunelerin üst yüzleri mala ile düzeltildiği için nispeten pürüzlüdür. Bu, basınç deneyinde gerilme yığılmasına neden olur. Bunun önüne geçmek için küp numuneler yan yüzleri üzerine yatırılır ve o şekilde kırılır. Silindir numunelerde buna olanak olmadığından bazen yalnızca üst yüz düzgünleştirilir bazen hem üst yüz hem de alt yüz düzgünleştirilir veya uygun bir madde ile başlıklararak pürüzsüz hale getirilir. Başlık için kullanılan malzemelerden bir tanesi kükürttür. Başlığın kalınlığı 5 mm'den fazla olmamalıdır.

Numune kalıpları çelik, plastik ya da fiberglas olabilir. Taze beton küp kalıplara iki, silindir kalıplara üç tabaka halinde doldurulur ve her bir tabaka 16 mm çapında ve 60 cm uzunluğunda bir çelik çubukla 25'er kez şişlenir. Şişleme sonrası kalıbın dışına plastik bir tokmak ile hafifçe vurularak sıkıştırma işlemi tamamlanmalıdır. Kalıbın üst yüzeyi çelik mala veya perdah malasına kesme hareketi yaptırılarak dikkatlice düzeltilmelidir. Nihayetinde etiketleme yapılarak numuneler mutlaka kayıt altına alınmalıdır.

Basınç deneyinde numuneye belli bir hızla artan kuvvet uygulayarak kırılır. Günümüzde bu işlemi otomatik olarak yapan pres kullanılmaktadır. Kuvvet uygulamak için preste numunenin yerleştirildiği yerin altında ve üstünde çelik bloklar mevcuttur. Altındaki blok sabit olup üstteki blok bir yatak üzerine oturtulmuş küresel şekilli ve oynak başlıktır. Numune ile temas eden alt ve üst blokların yüzeyleri sertleştirilmiş çelik olup çok düzgün yüzeylerdir.

Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının $\frac{1}{8}$ ile $\frac{1}{10}$ 'u mertebesinde olduğu kabul edilir.

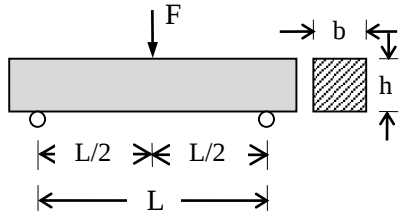
Bununla birlikte literatürde betonun çekme dayanımını basınç dayanımına bağlı olarak tahmin etmeye yarayan deneysel bağıntılar vardır.



Burada F, kırılmaya neden olan kuvveti, A numunenin kesit alanıdır. Buna göre, basınç dayanımı $\sigma_b = \frac{F}{A}$ şeklinde hesaplanır.

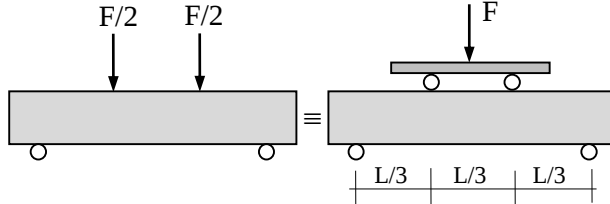
Çekme dayanımı prizmatik numuneler üzerinde doğrudan çekme deneyi ile saptansa da doğrudan çekme deneyini gerçekleştirmek zor olduğundan daha çok eğilme ve/veya yarma

deneyleriyle dolaylı olarak saptanır. Eğilme deneyinde, $10 \times 10 \times 40$ cm boyutunda veya daha başka boyutlarda prizmatik numuneler yan yüzleri üzerine çevrilerek iki mesnet üzerine oturtulur. Numuneler daha sonra açıklığın ortasından veya $1/3$ noktasından yüklenerek kırılır.



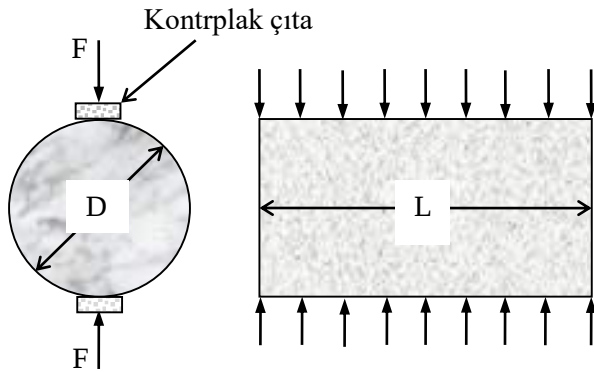
$$\sigma_{e\check{c}} = \frac{3 F \times L}{2 b \times h^2} \text{ (Açıklığın ortasından yükleme)}$$

Burada, F kırılmaya neden olan kuvvet ve $\sigma_{e\check{c}}$ eğilmede çekme dayanımıdır.



$$\sigma_{e\check{c}} = \frac{F \times L}{b \times h^2} \text{ (Üçte bir noktadan yükleme hali)}$$

Yarma deneyinde genellikle standart silindir numuneler yan yüzleri üzerine yatırılır ve doğrultmanı boyunca yüklenir. Böylece numune, doğrultmanı boyunca etkiyen çizgisel bir yük etkisiyle yarılır. Bazı hallerde yarmada çekme dayanımını belirlemede küp numuneler de kullanılmaktadır.



Yarmada çekme dayanımı ($\sigma_{y\check{c}}$) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\sigma_{y\check{c}} = \frac{2 F}{\pi L \times D}$$

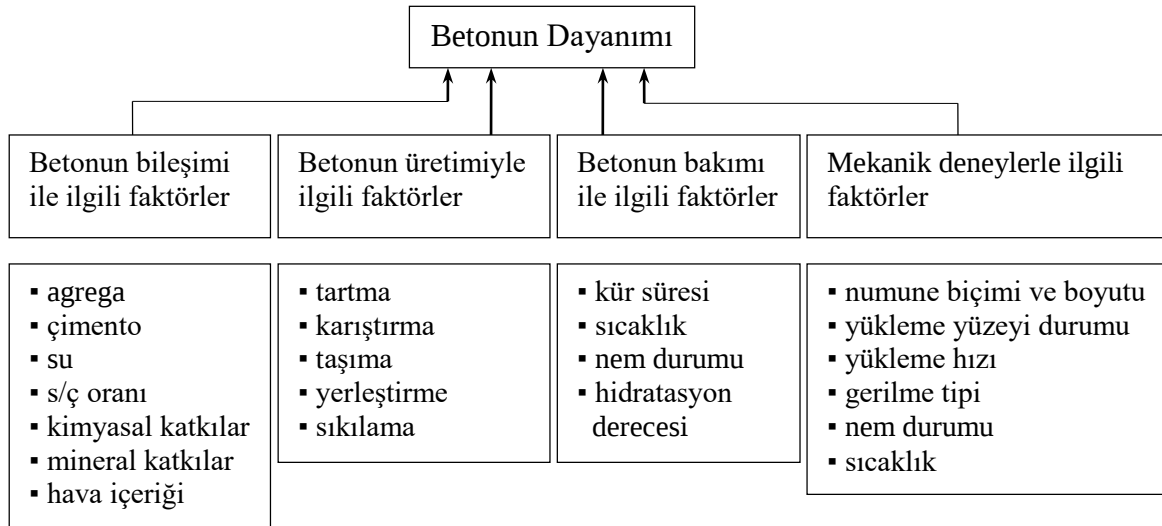
Burada, F yarılmaya neden olan kuvvet, D numune çapı veya genişliği olup $\sigma_{y\check{c}}$ yarmada çekme dayanımıdır.

Eğilmede çekme dayanımı gerçek çekme dayanımından %50 ila %100 oranında daha yüksek, yarmada çekme dayanımı ise gerçek çekme dayanımından %25 ila %50 daha düşük değerler verdiği literatürde rapor edilmektedir.

BETON DAYANIMINA ETKİYEN FAKTÖRLER

Beton üretiminde kullanılan agregaların dayanımı genellikle yeterlidir. Bu nedenle çimento hamurunun dayanımı betonun dayanımı açısından taşıdığı önem daha iyi anlaşılmış olur. Çimento hamurunun dayanımının yeterli olması bir yandan betonun taşıma kapasitesini artırırken diğer yandan çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansın daha sağlam olmasına katkı sağlamaktadır.

Bünyesinde büyük boyutta çok sayıda boşluk bulunan betonun dayanımı doğal olarak düşer. Çimento hamurunun dayanımını arttırmak için her şeyden önce çimento hamuru bünyesinde mevcut jel boşlukları dışındaki boşlukları olabildiğince azaltmakla mümkündür. Bu boşluklar kapiler boşluklar, hapsolmuş hava boşlukları ve hava sürükleyici kimyasal katkı maddesinin çimento hamuru bünyesinde oluşturduğu sürüklenmiş hava boşluklarıdır. O nedenle dayanımı maksimize etmenin öncelikli yolu beton içerisindeki boşlukları minimize etmekten geçer. Bunun için her şeyden önce iyi bir beton karışımı tasarımı ve yeterli kür öncelikli adımlar olmalıdır. Unutmamak gerekir ki beton yapısındaki boşluk miktarını azaltmanın bir başka yolu hidrasyon ürünlerini arttırmaktır. Bunun için iyi kür şarttır. Betonun dayanımına etkiyen faktörler aşağıdaki gibi özetlenebilir:



Beton Bileşimiyle İlgili Faktörler

Betonun kırılması ya çimento hamurunun ezilmesi veya agrega tanelerinin parçalanması ya da her ikisinin parçalanması veya agrega ile çimento hamuru arasındaki aderansın yok olması biçiminde olur. Genellikle agreganın dayanımı yüksek olduğundan kırılma daha çok çimento hamurunun ezilmesi ve çimento hamuru-agrega aderans kaybı biçiminde gerçekleşir. Bu nedenle geleneksel betonlarda dayanım kaybı açısından agrega belirleyici değildir. Aderans bakımından agrega yüzey dokusu, biçimi ve temizliği son derece önemlidir. Pürüzlü, köşeli ve temiz agrega taneleri çimento hamuru ile daha iyi bir aderans sağlar. Ancak bu tür agrega ile üretilen betonları yerleştirmek ve sıkıştırmak zordur. Yerleştirme ve sıkıştırma yetersiz olduğunda beton bünyesinde boşluk miktarı artar ve bu nedenle dayanım azalır.

En büyük agrega tane boyutu ve agrega granülometrisi işlenebilirliğe ve dolayısıyla beton karışımına konan su ve çimento miktarına etki eder. En büyük agrega büyüklüğü büyüdükçe belirli bir işlenebilirlik derecesi için su miktarı o nispette azalır. Ancak agrega boyutunun

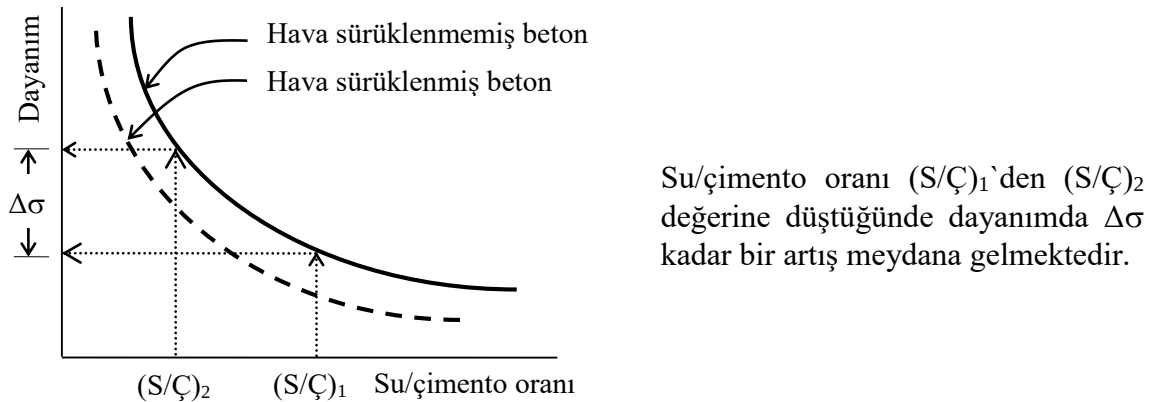
belirli bir sınır ötesinde arttırmanın pratik bir yararı yoktur. Agreganın granülometrisinin de işlenebilirlik yoluyla dayanım üzerine etkisi olur. Betonun dayanımına etkileyen önemli bir faktör de agrega içindeki zararlı maddeler ve agreganın mineralojik yapısıdır.

Betonun dayanımına etkileyen en önemli faktörler çimento ve sudur veya su/çimento (S/Ç) oranıdır. Çimento hamurunun sağlam olması ve agrega tanelerine sıkıca tutunması betonun dayanımına önemli katkı yapar. Beton karışımındaki çimento hamuru miktarı kaplanacak agregatanelerinin toplam yüzey alanı ile orantılıdır. Bununla ilişkin olarak 1 m³ betonda bulunması gereken minimum çimento miktarı, C_{min}, en büyük agregatane boyutu (D) ile ilişkili olarak şu şekilde verilmektedir:

$$C_{\min} = \frac{550}{\sqrt[5]{D}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Geleneksel betonarme betonlarında, D≈20-30 mm kabul edilerek, C_{min}=300 kg/m³ alınır. Beton karışımında çimento miktarı arttıkça beton dayanımı da artar. Ancak ekonomi, rötre, sünme ve bazı diğer nedenlerden dolayı çimento miktarı kadar bileşimi de önemlidir. Çimento hamuru dayanımının gelişmesinde etkili olan C₂S ve C₃S bileşenlerinin miktarı ve incelik ile çimento hamurundaki su miktarı aynı şekilde betonun dayanımı üzerinde etkilidir. Hidratasyon için çimento ağırlığının 0.25 ila 0.30'u kadar bir su yeterlidir.

Hidratasyon için gerekli sudan fazla su kullanıldığında çimento hamurunun dayanımı ve buna bağlı olarak betonun dayanımı azalır. Ancak suyun beton karışımında agregataneleri ıslatarak onların hamur içinde hareketini kolaylaştırmak, özetle betonu işlenebilir hale getirmek gibi bir işlevi daha vardır. Bu işlevi nedeniyle, su/çimento oranı nadiren 0.45'in altına iner. Aksi halde su miktarı işlenebilirlik kötüleşecek şekilde azaltılması halinde bu kez beton iyi yerleştirilemez ve sıkılamaz.



Yeterince sıkılamayan betonun yapısı boşluklu olacağından dayanımı düşer. Bunun üstesinden gelmek için akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddelerini kullanmak suretiyle su/çimento oranını betonun işlenebilirliğinde bir azalma olmayacak şekilde azaltılabilir. Dolayısıyla, bu şekilde betonun dayanımını arttırmak mümkündür.

Uygun sıcaklık ve nem koşullarında kür görmüş betonun herhangi bir yaştaki dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade eden birkaç ampirik bağıntı vardır. Bunlardan en yaygın olarak bilinenleri şunlardır:

Bolomey bağıntısı:

$$f_c = k_B \times \left(\frac{C}{S} - 0.50 \right)$$

Burada, f_c betonun basınç dayanımı, N/mm²;
10 < k_B < 30 N/mm² (28 günlük betonlar için).

Graf bağıntısı:

$$f_c = \frac{f_{cc}}{k_G} \times \left(\frac{C}{S} \right)^2$$

Burada, f_c betonun basınç dayanımı, in N/mm²; f_{cc} çimentonun 28 günlük basınç dayanımı, $f_{cc}=42.5$ N/mm² (CEM I 42.5 için);
4 < k_G < 10 (betonun yaşından bağımsız).

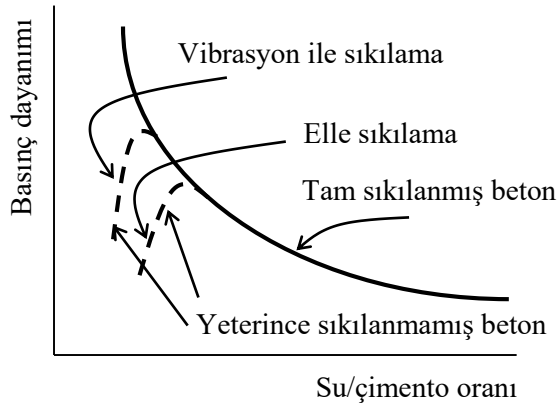
Feret bağıntısı:

$$f_c = k_F \times \left(\frac{V_\varsigma}{V_\varsigma + V_s + h} \right)^2$$

Burada, f_c betonun basınç dayanımı, N/mm²; 90 < k_F < 280 N/mm² (28 günlük betonlar için); V_ς , V_s , ve h sırasıyla mutlak hacim cinsinden çimento, su ve hapsolmuş hava miktarlarıdır.

Betonun Üretimiyle İlgili Faktörler

Bileşimi iyi ayarlanmış olmasına rağmen bir beton iyi karıştırılmamış, kalıba özenle yerleştirilmemiş ve tam sıkılanmamış ise dayanımında bir azalma olur. Yetersiz karıştırma veya uzun süreli karıştırma üniform olmayan bir karışımın oluşmasına neden olabilir. Uzun süreli karıştırma sadece agregaların ufalanmasına neden olmaz aynı zamanda beton sıcaklığında artışa neden olabilir ve sonuçta istenen işlenebilirlik için su gereksinimi artmış olur. Taşıma ve yerleştirme esnasında ayrışma ve su kusmayı engellemek için uygun yöntemler uygulanmalıdır. Ciddi dayanım kaybına neden olan büyük boşlukları elimine etmek için sıkılamada gerektiğinde vibratör kullanılmalıdır. Aşırı vibrasyon betonda ayrışmaya neden olabilir.



Betonun basınç dayanımı ile S/Ç oranı arasındaki ilişki

Bazen gösterilen tüm itina rağmen betonun kalıba yerleştirilmesi ve sıkılanması mükemmel olmayabilir. Beton ayrışabilir ve/veya su kusabilir. Bunun nedeni beton bileşim ve kıvam itibarıyla söz konusu o iş için uygun olmamasıdır. O nedenle beton bileşimi saptanırken kullanılacağı yerin ve şantiye koşullarının sürekli bir biçimde göz önünde bulundurulması gerekir.

Su/çimento oranı çok düşük olan bir betonu tam olarak sıkılamak zordur ve beton bünyesinde boyut itibarıyla büyük boşluklar kalabilir. O nedenle, yukarıda verilen şekilde kesikli çizgilerle belirtildiği gibi, çok düşük su/çimento oranına sahip betonların dayanımlarında belirgin bir düşme görülür.

Betonun Bakımıyla İlgili Faktörler

Betonun dayanımı çimentonun hidratasyonuna, hidratasyon ise ortam nemine, sıcaklığa ve kür süresine bağlıdır. Betonun hidratasyon için uygun şartlarda saklanmasına “kür” denir. Standart kür, betonu $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de su içinde (%100 bağıl nem ortamı) 28 gün tutmaktır. Bu şartlar laboratuarda kolaylıkla sağlanabilir. Beton 28 gün standart kür sonunda kazanacağı dayanımın %65-80'ine 7 gün standart kür sonunda eriştiği kabul edilir. Eğer hidratasyon yavaş geliyorsa, betonun kalıpta tutulma süresi uzatılır. Buna karşın hidratasyon çeşitli yöntemlerle hızlandırılırsa kalıp alma süresi kısaltılabilir.

Beton bileşimindeki su çimentonun hidratasyonu için her halükârda yeterlidir. Eğer bu suyun buharlaşması engellenirse, hidratasyon için gerekli nem koşulu sağlanmış olur. Bu nedenle dökümden 1-2 saat sonra başlamak üzere birkaç gün boyunca betonun ıslak tutulması gerekir. Bunun için ya betonun yüzeyi ıslatılır veya beton yüzeyi ıslak çuval bezi ya da naylon ile örtülerek betonun su kaybı engellenir. Dökümden sonraki ilk günler yalnız nemin değil, beton sıcaklığının da belli değerler arasında tutulması çok önemlidir. Yüksek sıcaklıkta büyük miktarda su kaybı hidratasyonun durmasına neden olabilir.

Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonun hızı ortamın ve betonun sıcaklığına bağlı olarak değişir. Düşük sıcaklıklarda bu reaksiyon yavaş, yüksek sıcaklıklarda ise hızlıdır. Bu nedenle betonu hem yüksek sıcaklıklarda hem de düşük sıcaklıklarda koruyup normal dayanımına ulaşabilmesi için en uygun sıcaklık ve nemde tutmak gerekir. Sıcak ve rüzgârlı bir ortamın buharlaşmayı hızlandırıcı etkisinin olduğu ve buharlaşmaya bağlı su kaybının kalın kesitli elemanlara kıyasla ince kesitli elemanlarda (tabliye) daha hızlı gerçekleştiği unutulmamalıdır.

Beton dökümünde en uygun sıcaklık $15-16^{\circ}\text{C}$ civarındadır. Betonun sıcaklığı 30°C 'den yüksek olduğunda betonun nihai dayanımı istenenden daha düşük olur. 10°C 'nin altındaki sıcaklıklar hidratasyon hızında düşüşe neden olur. 0°C veya daha düşük sıcaklıklarda, çimentonun hidratasyonu büyük ölçüde yavaşlar.

Betonun sıcaklığı arttıkça hidratasyon hızlanır. Hidratasyon reaksiyonlarının hızlanması betonun dayanım gelişimine yansır. Betonu kalıpta tutma süresini kısaltmak için başvurulacak yöntemlerden biri betonun kalıp içinde ısıtılmasıdır. Dayanım gelişimi ısı ile hızlandırılmış betonların kontrol betonuna kıyasla nihai dayanımlarında bir miktar azalma görülür. Çimentonun hidratasyonu -10°C 'nin altındaki sıcaklıklarda tamamen durmaktadır. Ancak uygulamada hava sıcaklığı $+5^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düştüğü günlerde hidratasyonun durduğu kabul edilir. Bu günler kalıp alma süresinden sayılmaz.

Betonun dayanım gelişimi zamanla ilerlemekle birlikte normalde üç haftada hedef dayanımı kazandığı kabul edilir. Buna göre kalıp alma süresi de kalıplanmış elemanlara yük gelip gelmediğine bağlı olarak 3 gün ile 3 hafta arasında değişir.

Yerleştirme, sıkıştırma ve beton yüzeyini düzeltme işlemlerinden sonra çimentonun hidratasyonu için gerekli olan suyu sağlamak amacıyla beton nemli küre tabi tutulmalıdır. Nemli kür için çeşitli yöntemler vardır. Bunlar iki kategoriye ayrılabilir:

Su kürü: Bu yöntemle betona ek nem sağlanır ve betondan nemin kaybı önlenir. Su ile kür yapma genellikle beton üzerine su püskürtülerek veya serpiştirilerek veya bez ve talaş gibi ıslak kaplamalar kullanılarak gerçekleştirilir.

Örtü kürü: Bu yöntemle betondaki nem kaybı önlenir. Örtme ile kür yapma, beton yüzeyi su geçirmez kâğıt veya plastik örtü ile kaplanarak ya da bazı kimyasal katkıları kullanarak gerçekleştirilir.

Mekanik Deneylerle İlgili Faktörler

Bir yapıda kullanılan betonun istenen kalitede olup olmadığı yapıda beton dökülürken alınan numunelerin laboratuvarında standart kür koşullarında kür edildikten sonra test edilerek saptanır. Yapıda betonun kalıba yerleştirme, sıkılama ve kür koşulları, bu numunelerin hazırlama ve laboratuvarında saklama koşullarından farklıdır. Bu nedenle numunelerin dayanımı yapıdaki betonun dayanımına eşit olmaz. Bununla birlikte numunelerin dayanımının yüksek olması yapıdaki betonun dayanımının da yüksek olması olasılığını artırır.

Ayrıca numunelerin dayanımlarının birbirlerine yakın çıkması yapıdaki betonun homojen olduğunun ve betonla ilgili işlemlere yeterince özen gösterildiğinin bir göstergesidir. Deneyssel olarak numuneler üzerinde saptanan dayanım aşağıdaki faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu faktörler topluca deney koşulları olarak bilinir.

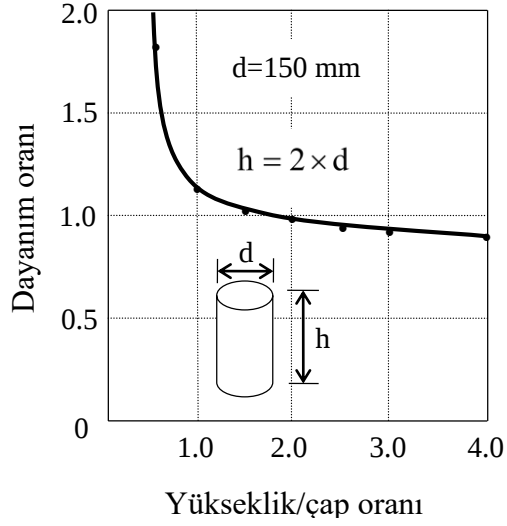
- Numunenin biçimi ve boyutu,
- Numunenin nem durumu,
- Numunenin yükleme yüzeyi durumu,
- Numunenin yükleme hızı,
- Numunenin sıcaklığı.

Standart numunelerin biçimi küp, silindir ve kare kesit prizmadır. Biçim genellikle yükseklik/çap oranıyla tanımlanır. *Narinlik* adı verilen bu oran küp numunelerde 1, standart silindir numunelerde 2 olup prizmalarda 4'den büyüktür. Narinliğin 2'den daha büyük olduğu numunelerde basınç dayanımı bu orandan etkilenmez. Narinlik 2'nin altına indikçe dayanım artar. Biçimleri aynı fakat boyutları farklı numunelerin basınç dayanımları arasında da fark vardır. Genel bir kural olarak, numune küçüldükçe basınç dayanımı artar.

Biçim etkisi nedeniyle standart silindir ve küplerin basınç dayanımları aynı değildir. Standart küp basınç dayanımı ile aynı betondan üretilmiş standart silindir basınç dayanımı arasında $\sigma_{\text{silindir}} \cong 0.85 \times \sigma_{\text{küp}}$ şeklinde bir matematiksel ilişki vardır. Yükseklik/çap oranına bağlı olarak dayanım oranındaki değişim şematik olarak aşağıda verilmektedir.

Islak betonun basınç dayanımı tam kuru betonunkinden düşük, yarmada çekme dayanımı ise tam kuru betonunkinden yüksektir. Tam kuru betonun eğilmede çekme dayanımı da ıslak betonunkinden yüksektir. Ancak ıslak bir beton kurumaya bırakıldığında, kuruma dıştan başladığı için betonun dış kısmında çekme gerilmeleri oluşur. Bu koşuldaki bir betonun eğilmede çekme dayanımı hem tam kuru haldeki dayanımından hem de ıslak haldeki dayanımından düşük olabilir. İlgili standart, standart yükseklikte olmayan beton silindir numuneler için önerdiği düzeltme faktörleri aşağıdaki çizelgede verilmektedir.

Yükseklik/çap oranı	2.00	1.75	1.50	1.25	1.10	1.00	0.75	0.50
Çarpan faktör	1.00	0.98	0.96	0.94	0.90	0.85	0.73	0.60

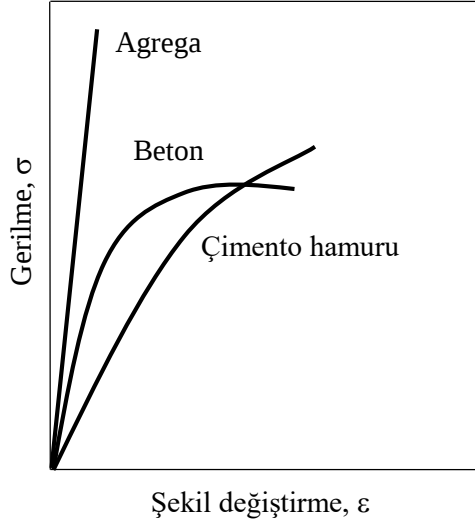


Yükseklik/çap oranındaki değişimin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Deneylerde betona uygulanan kuvvetin artış hızı betonun dayanımı üzerinde etkilidir. Kuvvet ne kadar hızlı uygulanırsa beton o nispette yüksek bir kuvvet etkisinde kırılır. Yükleme hızının etkisi betonun dayanım düzeyine de bağlıdır. Yüksek mukavemetli betonlar yükleme hızından düşük mukavemetli betonlara oranla daha fazlaca etkilenir. Standart deneyler için ilgili standartlara göre numune kırılıncaya kadar saniyede 1,5 ila 3,5 kgf/cm² sabit yükleme hızı uygulanır.

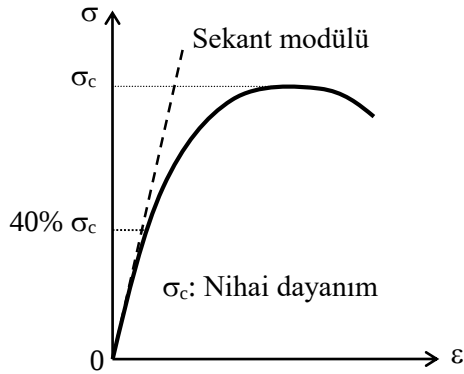
BASINÇ ETKİSİNDE BETONUN DAVRANIŞI

Geleneksel betonda agreganın dayanım üzerindeki etkisi ihmal edilebilir ancak onun varlığı betonun davranışı üzerinde etkisi itibariyle önemlidir. Aşağıdaki şekilde basınç altında agrega, çimento hamuru ve betonun (σ - ϵ) eğrileri verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere agrega ve çimento hamuru elastik davranış gösterirken beton elastik olmayan davranış göstermektedir. Meydana gelen şekil değiştirme uygulanan gerilme ile doğrusal değişmediği gibi kuvvet kaldırıldığında şekil değiştirmenin tamamı geri gelmemektedir.



Agrega, çimento macunu ve beton için tipik gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

Betonun şekil değiştirmesini kısa süreli ve uzun süreli olmak üzere iki aşamada değerlendirmek mümkündür. Uzun süreli davranış zamana bağlıdır ve *sünme* olarak bilinir. Burada betonun yük altında kısa süreli davranışı değerlendirilecektir. Kısa süreli bir basınç deneyinde betonun davranışına ilişkin elde edilen gerilme-şekildeğiştirme diyagramı aşağıda verilmektedir.



Diyagram genelde bir yarım parabol şeklindedir. Diyagramın doğrusal bölgesi olmamakla birlikte başlangıçta doğrusala yakın bir davranış göstermektedir. Bu nedenle, genellikle betonun nihai dayanımının %40'ına kadar uzanan gerilme bölgesinde doğrusal elastik olduğu kabul edilir.

Böyle bir kabul hesapları kolaylaştırmak için yapılmaktadır. Bununla birlikte hesaplarda elastiklik modülü için alınacak değer tartışmalıdır. Çünkü diyagramın belirli bir doğrusal kısmı olmaması nedeniyle farklı elastik modülleri tanımlanmaktadır. Örneğin, teğet modülü, sekant modülü, dinamik elastiklik modülü gibi.

Teğet modülü çok dar bir bölge için geçerlidir. Dinamik elastik modülü de genelde bir teğet modülü olduğundan aynı sakıncayı taşır. Bu nedenle, betonun davranışını daha geniş bir bölgede temsil etmesi itibariyle elastiklik modülü olarak sekant modülünün alınması daha

gerçekçi olmaktadır. Betonun elastik modülü ile basınç dayanımı arasında çeşitli ampirik ilişkiler geliştirilmiştir. Bunların bazıları aşağıdaki gibidir.

$$E = A \times (\sigma)^{1/n}$$

Burada σ , betonun basınç dayanımı, A ve n sabitlerdir.

Amerikan Beton Enstitüsü tarafından önerilen ilişki şöyledir:

$$E = 4.73 \times \sigma^{1/2}$$

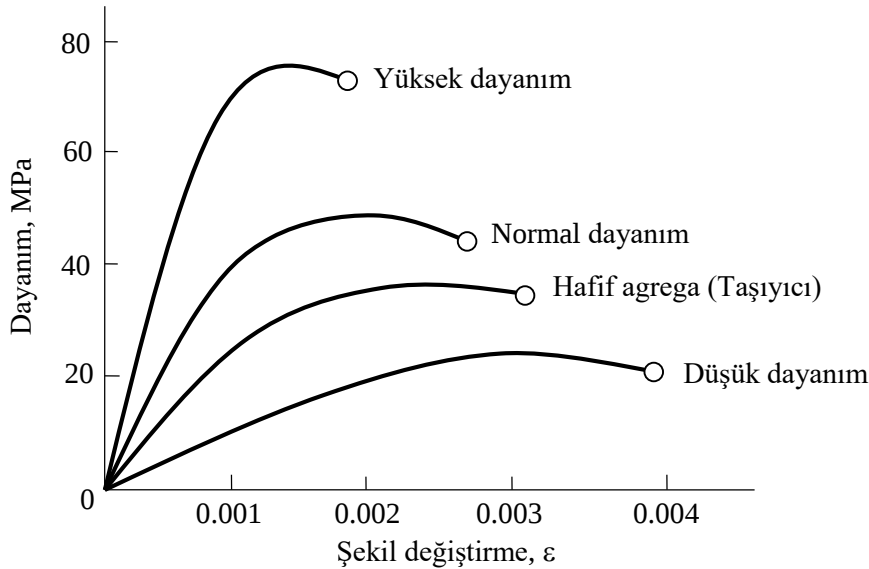
Burada E, GPa cinsinden ve σ , MPa cinsindendir.

Betonun elastiklik modülü, beton sınıfına bağlı olarak genellikle 100 000 ila 400 000 kgf/cm² arasında değerler alır. TS 500 tarafından bu anlamda verilen bağıntı şöyledir.

$$E = 10270 \times \sqrt{f_c} + 140\,000$$

Burada E, elastiklik modülü, kgf/cm² cinsinden, f_c betonun karakteristik silindirik basınç dayanımıdır.

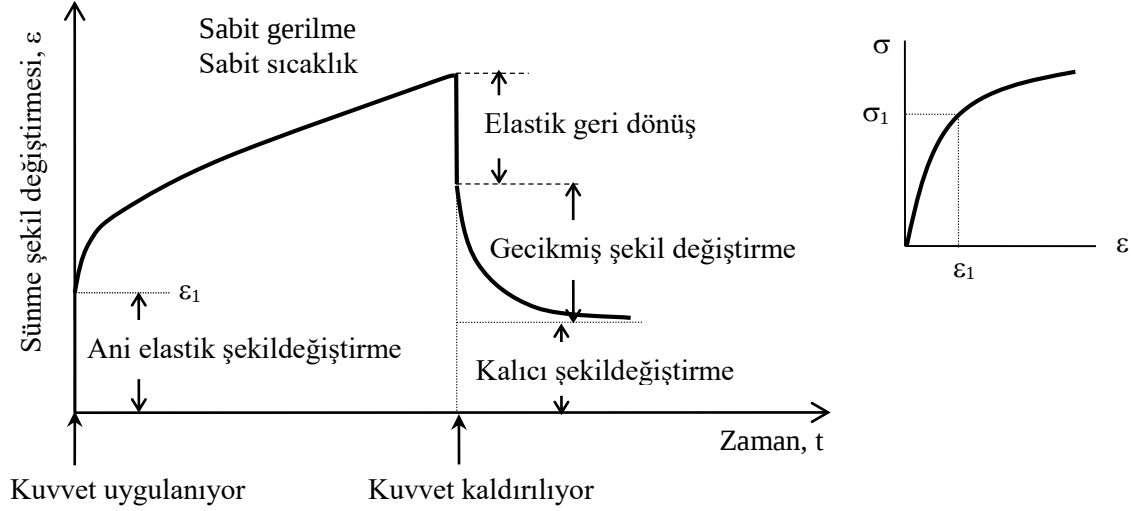
Gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin biçimi betondaki mikro çatlakların büyüklüğüne bağlıdır ve bu esas olarak agrega ile çimento hamuru arasındaki uyumluluğun bir fonksiyonudur. Benzer mukavemete ve elastiklik modülüne sahip olduklarında (normal mukavemetli bir çimento hamurda gözenekli hafif agregalar veya yüksek mukavemetli bir çimento hamurunda normal agregalar), onların gerilme-şekil değiştirme eğrileri aşağıda verilen grafikte görüldüğü üzere doğal olarak doğrusala yakın bir eğilim gösterirler. Çünkü ikisi arasında meydana gelen gerilme konsantrasyonu düşük düzeyde gerçekleşir.



Normal agregalar için gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin şeklinin doğrusal olmaması çimento hamurunun mukavemetindeki azalma ile artmaktadır. Agrega-çimento hamuru aderansını artıran faktörler gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusallığını artırır çünkü aderans çatlakların oluşumu daha etkin bir şekilde engellemektedir. Burada etkili olan faktörler arasında agreganın köşeli şekli ve pürüzlü dokulu yüzeyi verilebilir.

BETONDA SÜNME

Beton yapı elemanları hareketli yüklerin yanı sıra sabit dış kuvvet ya da yüklere de maruz kalır. Beton yapı elemanı maruz kaldığı bu sabit yük ya da kuvvet etkisinde ani şekil değiştirme yapar. Beton yapı elemanı bu *ani şekil değiştirmenin* yanı sıra *sünme* olarak bilinen zamana bağlı bir şekil değiştirme de yapar. Buna ilişkin gösterim aşağıda (s-e) diyagramı olarak verilmektedir.



Beton yapı elemanına uygulanan kuvvet kaldırıldığı zaman beton yapı elemanına kuvvet uygulandığında yaptığı şekil değiştirmeye eşit ani bir şekil değiştirme yapar. Beton genelde ilk boyutlarına dönmez. Örneğin, betonun kendi ağırlığı gibi betonarme yapılara etkileyen yüklerin çoğunluğu uzun sürelidir. Bu nedenle hesaplarda betonun bu yükler altındaki yalnızca ani şekil değiştirmesi değil, uzun süreli şekil değiştirmesi de dikkate alınmalıdır.

BETONDA RÖTRE

Beton su aldığında genişler, kurduğunda büzülür. Betonun bu şekilde yapmış olduğu hacim değişimine *rötre* denir. Su kaybına bağlı olarak hacim değişimi hem taze betonda hem de sertleşmiş betonda meydana gelebilir. Su kaybına bağlı olarak taze betonda meydana gelen hacim değişimi *plastik rötre*, sertleşmiş betonda meydana gelene *kuruma rötresi* denir. Hidrate olmuş çimentonun atmosferdeki karbon dioksitle reaksiyonu sonucu oluşan rötre *karbonasyon büzülmesi* olarak bilinir. Bu rötre kuruma büzülmesinin özel bir halidir. *Otojen rötre* veya *hidratasyon rötresi*, hidratasyon sırasında betonun, çevresel etkilerden bağımsız olarak, kendi kendine kuruması sonucu meydana gelir. Bu kuruma rötresinin özel bir halidir.

Plastik rötre: Beton plastik halde iken agrega tanelerinin kalıp içinde dibe oturması ve betonun yüzeyde toplanan suyun buharlaşması sonucu meydana gelen rötredir. Özellikle döşeme ve tabliye betonları gibi geniş yüzeyli elemanlarda meydana gelir. Büzülme, beton henüz sertleşmeden meydana geldiğinden beton kolayca çatlayabilir. Beton yüzeyinde görülen çatlaklar genelde plastik rötre sonucu oluşan çatlaklardır. Bu tür rötre, su kaybı engellenerek önlenir. Beton henüz plastik olduğu için püskürtme şeklinde ıslatma yapılabileceği gibi beton yüzeyi ıslak çuval bezi veya plastik örtülerle örtülebilir ya da beton yüzeyine yüzey sertleştirici kimyasal maddeler püskürtülebilir. En yaygın yöntem beton

yüzeyini sürekli ıslak tutmaktır. Plastik rötre aynı zamanda rüzgâr kırıcılar kullanılarak, beton sıcaklığı azaltılarak, betonun prizi hızlandırılarak kontrol edilebilir. Bu önlemler sadece plastik rötre ve bunun sonucunda oluşan çatlamaı önlemek içindir. Beton plastikliğini kaybederek sertleştikten sonra hem bu tür rötre olmaz hem de beton rötre sonucu oluşan gerilmelere karşı daha dayanıklı hale gelmiş olur.

Kuruma rötresi: Kuruma rötresi sertleşmiş betondan su kaybı sonucu yapı elemanlarında çarpılma veya eğilme şeklinde meydana gelir. Beton yapı elemanları sonradan ıslatılsa da ilk boyutlarına dönmez. Normal koşullarda kuruma rötresinin bir yılda tamamlandığı ifade edilir.

Hidratasyon rötresi: Hidratasyon süresince çimento hamuru bünyesindeki suyun sürekli bir biçimde azalması sonucu meydana gelir. Hidratasyon nedeniyle azalan su dışarıdan bir şekilde tedarik edilememesi durumunda çimento jelini oluşturan jel parçacıkları yüzeyindeki ve aralarındaki basınç dengesi bozulur ve sonuçta rötre oluşur. Bu durum, özellikle kütle betonlarının dışarıyla teması az olan iç kısımlarında ve su/çimento oranı düşük betonlarda sıkça görülür. Betonun kendi kendine kuruması biçimindeki bu rötre *otojen rötre* olarak da bilinir. Hidratasyon rötresi aylar sürebilir, genellikle üç aylık bir süre sonra durur.

Hem sünme hem de büzölme zamana bağlı şekil değiştirmeler olup suyun hareketini içeren aynı iç süreçten kaynaklanır. Büzölme durumunda, su hareketi için itici güç, suyun dış tarafa doğru difüzyonuna neden olan çevresel koşullardır (yani, su kaybolmaktadır). Sünme durumunda, itici güç gerilmedir ve bu da suyun beton içinde bir yerden başka bir yere hareket etmesine neden olur (yani, su kaybı olmaz). Böylece, kuruması önlenmiş doymuş betonda sünme şekil değiştirmeleri oluşur. Bu, *temel sünme* olarak bilinir.

Sünme şekil değiştirmesi gerilmenin yönüne bağlıdır; bununla birlikte, kurumada nem kaybı (serbest büzölme) tüm yönlerde eşit kasılmaları içerir. Uygulamada, genellikle basınç etkisi altında betonun eksenel yükleme yönündeki zamana bağlı deformasyonu ile ilgileniyoruz. Uygulamada, beton yük altında doğal kuruma ortamına maruz kaldığında sünme ve büzölme aynı anda meydana gelir. "Sünme şekil değiştirmesi" ile ne kastedildiğini bilmek önemlidir. Birçok mühendis, yük altında betonun zamana bağlı tüm deformasyonlarını sünme ve kuruma büzölmesini ayırt etmeden birlikte ölçer.

Yapıda, sünme ve büzölme nedeniyle eksenel deformasyonda zamanla bir artış (örneğin, basınç etkisinde kolon), sehimde bir artış (örneğin, eğilme etkisinde kiriş) veya gerilme gevşemesi (örneğin, ön gerilmeli bir yapı elemanı; büzölme ve sünme nedeniyle beton büzölür ve ön germe zamanla azalır). Zamana bağlı bir büzölme, bir beton bileşen kısıtlanırsa ve büzölmeye çalışırken çekme gerilmeleri oluşursa çatlamaı neden olabilir. Sünme ve büzölmenin önemli bir özelliği yük kaldırıldığında ve beton yeniden doymuş hale geldiğinde şekil değiştirmelerin tamamen geri dönmemesi gerçeğidir.

SÜNME VE RÖTREYE ETKİYEN FAKTÖRLER

Sünme ve büzölmeye etkiyen temel faktörler ve etkime yönü aşağıda verilmiştir:

Betonun bileşimi: Genel kural olarak çimento ve su miktarı arttıkça, su/çimento oranı yükseldikçe, agrega/çimento oranı azaldıkça sünme ve rötreye artar.

Betonun dayanımı: Kuvvet uygulandığında, betonun dayanımı ne kadar yüksekse ve çimento hidratasyonunu tamamladığı ölçüde betonun sünme ve rötresi azalır.

Uygulanan gerilmenin büyüklüğü: Uygulanan gerilme doğal olarak betonun dayanımından büyük olamaz. Ancak betonun dayanımına ne kadar yakınsa sünme o nispette fazla olur.

Ortam şartları: Betondaki nem sünme açısından çok önemlidir. Sıcaklık ve rüzgâr gibi çevresel şartlar buharlaşmayı ve dolayısıyla sünme ve rötreyi arttırıcı etki yapar.

Beton elemanın boyutları: Genelde beton elemanın boyutları büyüdükçe sünme azalır. Atmosfere maruz beton elemanın yüzey alanı arttıkça buharlaşma hızlanır; dolayısıyla büzölme artar.

Benzer şekilde elemanın yüzey alanının hacmine oranı büyüdükçe büzölme hızı artar. Bu nedenle küçük hacimli elemanların büzölme hızı büyük hacimli elemanların büzölme hızından daha büyüktür. Bununla beraber nihai büzölme aşağı yukarı birbirine eşittir.

Beton elemandaki donatı miktarı: Rötreye yapmadığından agrega gibi donatı da çimento hamurunun büzölmesine engel olur ve betonun rötresini azaltır. Ancak beton yeterince dayanım kazanmamışsa donatı ile beton arasında sürtünmeye bağlı meydana gelen iç gerilmeler nedeniyle beton çatlayabilir.

Rötreye dolayısıyla çatlama, özellikle zemine oturan döşemelerde ve yol betonlarında sıklıkla görülür. Bu çatlakları belirli noktalarda yoğunlaştırmak için veya önlemek için döşemeler belli boyutta bloklar halinde dökölür ve bloklar arasında derzler bırakılır. Anı adı verilen bu bloklar büyüklüğü döşeme kalınlığına, betonun kıvamına, en büyük agrega tane boyutuna bağlı olarak 2.5 ila 9 m arasında değişebilir.

BETONUN DÜRABİLİTESİ (DAYANIKLILIĞI)

Betonun dayanıklılığı, betonun özelliklerini hizmet verdiği sürece iç ve dış etkiler nedeniyle zamanla kaybetmemesi özelliği olarak tanımlanır. Bir yapıdaki beton yalnızca çeşitli yük türlerine dayanacak dayanım düzeyine sahip olmamalı aynı zamanda yıllar boyunca hizmet verdiği her türlü çevresel koşulda orijinal şeklini ve kalitesini korumalıdır. Bu bakımdan sertleşmiş betonda dayanıklılık en az dayanım kadar önemlidir.

Betonu zararlı çevresel etkilerden korumak için kaliteli bir beton üretmek öncelikli koşuldur. Ancak ekonomi nedeniyle üreticiler çoğu zaman kaliteden taviz vermek zorunda kalmaktadırlar. Betonun kalitesi hem iç hem dış etkiler nedeniyle risk altındadır. Beton bulunduğu ortamda don etkisi, atmosferik etkiler, zararlı suların etkisi, aşınma ve darbe etkisi gibi harici etkilere maruz kalabileceği gibi ısıl genleşme, çiçeklenme, rötire, nemlenme ve su emme gibi dâhili etkilere de maruz kalabilir.

En yaygın olarak karşılaşılan durabilite sorunları donma-çözölmeye dayanıklılık, kimyasal etkilere dayanıklılık, sülfat etkisi, aşınmaya dayanıklılık, alkali-silika reaksiyonu, karbonatlaşma, hacim değişimlerine dayanıklılık olarak sıralanabilir.

Donma-çözölmeye dayanıklılık: Çimento hamuru bünyesinde çok sayıda küçük boyutta gözenekler bulunduğundan donma ve çözölmeye çevrimlerine karşı oldukça hassastır. Sıcaklık 0°C'nin altına düştüğünde, su yaklaşık -5°C'de donmaya başlar. Gözenek ne kadar küçük olursa, buz oluşumunun başlayabilmesi için sıcaklık o nispette düşük olmalıdır. Buz kristalleri bir kez oluştuğunda, meydana gelen %9 mertebesinde hacim artışı gözeneklerde kalan suyu sıkıştırmak suretiyle gözeneklerde basıncın oluşmasına neden olur.

Donma-çözölmeye dayanıklılık itibariyle kompasite önemli bir parametredir. Bu nedenle olabildiğince boşluksuz bir beton üretmek gerekir. Zira kompasite arttıkça donma-çözölmeye dayanıklılığı artar. Hava sürükleyici kimyasallar bu anlamda donma-çözölmeye direncini artırıcı etki yaparlar.

Kimyasal etkilere dayanıklılık: Betonlar çeşitli kimyasal maddelerin hatta saf suyun etkisiyle bozulabilen bir malzemedir. Ancak uygulamada daha çok asitlerin ve sülfatların etkisinden söz edilir. Betonların kimyasal dayanıklılığı, kompasitesi yüksek ve geçirimsizliği düşük bir beton üreterek sağlanabildiği gibi çimento miktarını artırarak, puzolan katkılı çimento kullanarak, beton yüzeyini geçirimsiz tabaka ile kaplayarak da sağlanabilir.

Sülfat saldırısı: Sülfat saldırısı, sülfat iyonları dış ortamdan (yer altı suyu veya deniz suyu) betona nüfuz ettiğinde meydana gelir. Sülfat saldırısı sonucu betonun yüzeyi beyazımsı bir görünüm kazanır ve genellikle beton elemanın kenarlarında ve köşelerinde hasar başlar ve ardından beton çatlar ve ufalanır. Sülfat saldırısına bağlı olarak oluşan bu görüntünün nedeni kalsiyum sülfat (alçıtaşı) ve kalsiyum sülföalüminat (etrenjit) dolayısıyladır. Her iki ürün de yerine geçtikleri bileşiklerden daha büyük bir hacim işgal eder. Böylece süreç sertleşmiş betonun genleşip çatlamasıyla sonuçlanır.

Aşınmaya dayanıklılık: Akarsu, rüzgâr veya trafik beton için aşındırıcı etki yaratabilir. Bu etkilerin betonda neden olduğu yüzeysel aşınma başlamışsa tahribatın ilerlemesinin önlenmesi zorlaşır. Onun için bu gibi etkilere açık betonlar başlangıçta sağlam yapılmalıdır. Yüzeylerinin sert olması için özellikle bazı tedbirler alınmalıdır. Sert agrega kullanımı bir çare olabilir.

Alkali-silika reaksiyonu: Betonun dağılmasına ve parçalanmasına neden olması sonucu dayanıklılığı olumsuz etkiler. Alkali-silika reaksiyonu agregadaki reaktif silis ile çimentoda bulunan alkaliler (Na_2O , K_2O) arasında meydana gelen bir kimyasal reaksiyondur. Reaksiyon sonucu oluşan jel hacim arttırıcı bir ürün olması nedeniyle zamanla betonun çatlamasına neden olabilir. Reaksiyon çok yavaş olup etkisi yıllar sonra ortaya çıkabilir.

Bu tür reaksiyonlara engel olmak ya reaktif silis içermeyen agrega ya da alkali içeriği düşük çimento kullanmak gerekmektedir. Çimentonun eşdeğer alkali içeriği ($\text{Na}_2\text{O}+0.65\text{K}_2\text{O}\leq 0.60$) olması halinde bu reaksiyonun teorik olarak meydana gelmeyeceği ifade edilmektedir. Diğer bir yararlı çözüm betona puzolan ilave etmektir. Puzolanlar çok ince halde reaktif silika içerdiklerinden çimentodaki alkali ile çok hızlı bir biçimde reaksiyona girerler. Böylece, alkali-silika jeli matris içinde yayıldığı için zararlı genleşme engellenmiş olur.

Karbonatlaşma: Atmosferde bir miktar karbondioksit bulunur. Yağmur suyu ve kar suyu atmosferden bir miktar CO_2 alır ve zayıf bir karbonik asit oluşur. Yeraltı suları ayrıca çözünmüş halde bir miktar karbondioksit içerebilir. Beton atmosfere maruz kaldığında veya CO_2 içeren yer altı suları betona sızdığında, CO_2 ile $\text{Ca}(\text{OH})_2$ arasında CaCO_3 oluşumuna yol açan bir reaksiyon gerçekleşir.

Karbonatlaşma yavaş bir süreçtir. Genellikle betonun yüzeyinde başlar ve iç kısımlara doğru ilerler. Karbonatlaşma nedeniyle yüzeye yakın kısımda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ azaldığından, bu karbonatlı kısımlardaki betonun alkaliliği azalır. Bu şekilde karbonatlaşma, çelik donatının korozyona karşı savunmasız hale gelmesine neden olur.

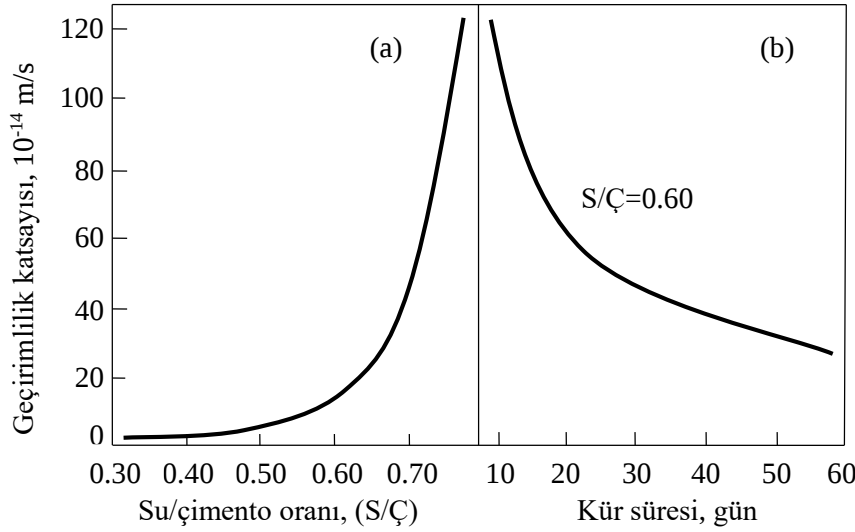
Hacim değişimlerine dayanıklılık: Çimento bileşiminde fazla miktarda CaO , MgO varsa, geç zamanda bunların su ile reaksiyonu sonucu betonda bir hacim artışı olabilir. Ancak çimentonun bileşimini üretim sırasında çok sıkı kontrol etmek suretiyle bu sorun bertaraf edilebilmektedir. Bu nedenle hacim değişimi denince ısı ve nem değişimi sonucu meydana gelen ısı genleşme ve rötre anlaşılmalıdır. Bu tür hacim değişimleri engellenirse beton çatlayabilir. Çatlaklar dona ve kimyasal etkilere karşı betonun direncini azalttığından neticede beton çatlar ve ufalanabilir.

Hacim değişimlerine karşı dayanıklılık uygun malzeme seçerek, beton bileşimini ayarlayarak, ısı genleşme ve rötre için uygun aralıklarla derzler bırakılarak ve betona iyi kür yaptırılarak arttırılabilir.

BETONUN PERMEABİLİTESİ (GEÇİRİMLİLİĞİ)

Dayanıklılığın anahtarı “geçirimlilik” tir. Bu itibarla geçirimliliği azaltmak adına iyileştirici her türlü çaba dayanıklılığa doğrudan yansır. Nemlenme, çiçeklenme gibi etkiler betonun geçirimliliğine ve su emme özelliğine bağlıdır. Geçirimliliği ve su emmesi az olan beton ayrıca dona ve kimyasal etkilere de dayanıklıdır. Betonun yoğunluğunun yüksek olması geçirgenliği ve kapilariteyi azaltır. Geçirimlilik özellikle baraj, su deposu, havuz, sulama kanalları gibi su yapıları için çok önemli bir özelliktir.

Geçirimlilik, uygun malzeme seçimi yapılarak, beton bileşimi ayarlanarak, dozaj arttırılarak, mineral katkı maddesi kullanılarak, su/çimento oranı düşürülerek azaltılabilir. Betonun ayrışmasını önleyici yerleştirme ve sıkılama yöntemlerinin kullanımı da geçirimsizlik adına önemli bir faktördür. Su/çimento oranı ile kür süresinin betonun geçirimliliği üzerindeki etkisi grafiksel olarak aşağıda gösterilmektedir.



Geçirimliliğin su/çimento oranı (a) ve kür süresine (b) bağlı olarak değişimi