

BETON AGREGALARI

Agregalar beton üretiminde kullanılan doğal veya yapay inorganik malzemelerdir. Hacimce betonun %70-80'ini oluştururlar. Bu nedenle betonun performansı açısından agreganın kalitesi son derece önemlidir. Agregalar sadece ucuz oldukları için değil aynı zamanda betonun dırabilitesine ve hacimsel stabilitesine sağladıkları yarar itibarıyla da önemlidir. Çimento hamuru kuruyunca büzülür. Hamura agreganın eklenince, büzülme önemli derecede sınırlandırılır. Betonda olabildiğince fazla agreganın ve olabildiğince az çimento kullanmak ekonomik açıdan avantajlıdır ancak bu ekonomik avantaj betonun arzu edilen taze ve sertleşmiş özellikleri itibarıyla dengelenmelidir.

İstenen kalitede beton üretebilmek için üretimde kullanılan agregaların özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekir. Beton performansı açısından etkin olan agreganın özellikleri kimyasal ve mineral bileşim, özgül ağırlık, su emme, sertlik, dayanım, elastiklik modülü, ısı özellikleri, fiziksel ve kimyasal stabilite, granülometri, tane boyutu ve biçimi ve yüzey dokusu olarak verilebilir. Bütün bunlar bilinse dahi, beton için iyi agreganın tanımlamak kolay değildir. Örneğin, donma-çözülme direnci düşük olan bir agreganın betonda kullanıldığında pekâlâ farklı performans gösterebilir.

AGREGALARIN SINIFLANDIRILMASI

Beton üretiminde kullanılan agregalar çeşitli özellikleri dikkate alınarak sınıflandırılır. Buna göre agregalar kaynağına, özgül ağırlığına, tane büyüklüğüne, mineralojik bileşimine, jeolojik orijinlerine, tane şekline ve yüzey dokusu, reaktif olup olmadıklarına göre sınıflandırılabilir.

Kaynağına göre sınıflandırma:

Agregalar doğal agregalar (kum, çakıl, kırmataş, ponza, barit, hematit, magnetit) ve yapay agregalar (genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş vermikülit, pişmiş kil, uçucu kül agregası, yüksek fırın cürufu agregası) olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Doğal agregalar nehir yataklarında, deniz ve göl kıyıları ile taş ocaklarından elde edilir. Bunlar konkasörde kırılarak istenen boyutta elde edilen agregalardır. Konkasörde kırılarak istenen boyutta elde edilenlerine “kırmataş” veya “mıcır” adı verilir. Yapay agregalar, beton üretimi ile doğrudan ilgisi bulunmayan bir endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilen agregalardır veya ısı işlem uygulayarak beton yapımı için uygun hale getirilen agregalardır.

Özgül ağırlığa göre sınıflandırma:

Özgül ağırlığa göre agregalar üç gruba ayrılabilir. Özgül ağırlıkları $2.4-2.8 \text{ g/cm}^3$ arasında olan agregalar “nomal ağırlıklı agreganın” olarak kabul edilir. Özgül ağırlığı 2.4 g/cm^3 ’den küçük olanlar “hafif agreganın”, 2.8 g/cm^3 ’den büyük olanlar “ağır agreganın” olarak bilinir. Geleneksel beton üretiminde normal ağırlıklı agreganın kullanılır. Normal ağırlıklı agreganın söz konusu olduğunda “normal” kelimesi kullanılmaz; yalnızca “agreganın” kullanılır.

Hafif agreganın, yüksek mukavemetten ziyade hafifliğin arandığı uygulamalarda hafif beton üretmek amacıyla kullanılır. Sünger taşı, bims, tüf doğal hafif agregalara örnek gösterilebilir. Bunların tamamı volkanik kökenli olup lavın katılaşması sırasında bileşimlerinde oluşan gazlardan ötürü gözenekli-boncuksu yapıları vardır. Bunların özgül ağırlıkları $0.75-1.5 \text{ g/cm}^3$ dolayındadır. Bu taşların bazıları ısıtıldığında aniden genişler ve soğuyunca bu yapılarını

korurlar. Bazılarının yapısında bulunan suyun ayrılması önemli hacim artışına neden olabilir ve mısırın patlaması biçiminde genleşebilir.

Yapay hafif agregalar sanayi atığı malzemeler olup kırma, ısıtma işlemi gibi bazı işlemler uygulandıktan sonra ya da önce kullanılabilir. İyi yanmış sinterleşmiş kömür cürufu ısıtma işlemi görmeden kullanılan yapay hafif agregalara örnek olarak verilebilir. Köpürtülmüş yüksek fırın cürufu, sinterlenmiş uçucu kül ise ısıtma işlemi gördükten sonra kullanılan malzemelerdir.

Ağır agregalar, zararlı ışınlarla karşı korunma gerektiren ancak kalın kesit olanağı olmayan yerlerde çok yoğun ya da ağır beton üretiminde kullanılırlar. Ağır agregalara örnek barit, magnetit, hematit, limonit, geotit gibi demir filizleri ile hurda demir gösterilebilir. Bu demir filizlerinin özgül ağırlıkları 3.5 g/cm^3 üzerindedir.

Tane büyüklüğüne göre sınıflandırma:

İlgili standarda göre göz açıklığı 4 mm olan kare delikli elek üstünde kalan agregaya “iri agrega”, elekten geçen agregaya “ince agrega” olarak isimlendirilmektedir. İnce agreganın 0.25 mm göz açıklıklı elekten geçen kısmı “taşunu” veya “filler” olarak bilinir.

İnce ve iri agrega karışımına “karışık agrega” adı verilir. Dereden, denizden, göllerden çıkarılmış, elemekten ve yıkamadan, olduğu gibi kullanılan kum çakıl karışımı doğal agregaya “tuvenan agrega” denir. Bu tür agrega genellikle kullanılmamakta veya basit işler için üretilen düşük dayanımlı betonlarda kullanılmaktadır. Tuvenan sözcüğü Fransızca’da “tümü bir arada” anlamına gelen “tout-venant” kelimesinden gelmektedir.

Mineralojik bileşimlerine göre sınıflandırma:

Mineralojik yapılarına göre agregalar silisli, alüminli ve kalkerli olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Reaktif silis içeren agregalar çimentonun oluşturduğu alkali ortamda alkali-silika reaksiyonu nedeniyle yumuşar ve çözülürler. Kumtaşı, çakmaktaşı, serpantin ve şist gibi taşlar bu kategorinin tipik örnekleridir. Alüminli agregalar alüminyum ve silis ile bazı sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum bileşiminden oluşan mineraller içerir. Bu kategoriye iyi bir örnek granitte bol miktarda bulunan feldspattır. Bu mineral havanın ve özellikle CO_2 içeren suların etkisinde ayrışarak kile dönüşür. Ayrışma agrega beton üretiminde kullanılmadan önce meydana geliyorsa, agrega tanelerinin yüzeyi bir kil tabakasıyla kaplanır. Beton üretiminde kullanıldığında bu agrega çimento hamuru ile iyi aderans yapmaz. Ayrışma beton üretiminden sonra oluşuyorsa, fazla sakınca yaratmaz. Feldspatin bütün türleri böyle ayrışmamakla birlikte granit gibi agregalar kırmataş haline getirildikten sonra uzun süre beklemeden (~3 ay içinde) kullanılmalıdır.

Kalkerli agregalar kalsiyum karbonatlı agregalar olarak da bilinir. Bu tür agregalar asitlere karşı dayanıksızdır. Atmosferde ve suda bulunabilecek sülfürik asit, karbonik asit gibi asitlerden etkilenirler. Bu tür agregalarda çimento ile reaksiyon yapabilen bazı karbonatlı bileşenler de bulunabilir.

Jeolojik orijinlerine göre sınıflandırma:

Kayaçlar oluşum biçimleri bakımından magmatik, tortul ve metamorfik olmak üzere sınıflandırılabilir. Magmatikler boşluksuz ve sağlam yapıları nedeniyle beton agregası olarak kullanımları uygundur. Hafif ve boşluklu türleri hafif beton üretiminde kullanılır. Tortul kayaçların özellikleri değişken olmakla birlikte kalker ve dolomit kırmataş olarak kullanılmaktadır. Metamorfik kayaçların sert olanları beton üretiminde kullanılabilir. Şistler ve

kil bileşimli kayaçlar su emdikçe şiştikleri ve hacim artışına neden oldukları için beton üretimi için uygun değildir.

Bunun dışında agregalar reaktif özelliklerine göre reaktif ve reaktif olmayan, tane şekline göre yuvarlak, köşeli, yassı, uzun ve yassı ve yüzey dokusuna göre düzgün, granüler, kristalli ve petekli olmak üzere farklı şekilde sınıflandırılmaktadır.

AGREGALARDA ARANAN TEMEL ÖZELLİKLER

Hacimsel olarak betonun büyük bölümünü agrega oluşturmaktadır. Bu nedenle kullanılan agreganın betonun tüm özellikleri üzerine önemli derecede etkisi görülür. Kaliteli bir beton üretmek için agregada şu özellikler aranır:

- Agregas sağlam olmalı, aşınmamalı, su içinde yumuşamamalı ve ayrışmamalıdır.
- Agregas çimento bileşenleriyle zararlı bileşikler oluşturmamalıdır.
- Agregas taneleri biçim ve yüzey dokusu itibarıyla beton üretimi için uygun olmalıdır.
- Agregas granulometrisi standartlara ve amaca uygun olmalıdır.
- Agregas içinde zararlı maddeler bulunmamalıdır.
- Agregas dona dayanıklı olmalıdır.

AGREGADA ZARARLI MADDELER

Betonun sertleşip dayanım kazanmasına olumsuz etki yapan, betonun yoğunluğunu azaltan, parçalanıp ufalanmasına neden olan ya da donatının korozyonu tehlikeye sokan maddelerin agregada içinde fazla miktarda bulunması istenmez. Bu maddeler şunlardır:

i) Organik kökenli maddeler: Bu maddeler doğal agrega içinde bulunan toprak, bitki artıkları gibi organik maddeler olup betonun sertleşmesine ve dayanım kazanmasına zarar verebildiği gibi renk değişimine, şişerek beton yüzeyinde patlamalara neden olabilir.

ii) İnce veya yıkanabilir maddeler: İlgili standart (TS 3527) 63 µm (0.063 mm) elekten geçen maddeleri ince madde olarak tanımlar. Bunlar agrega içinde dağılmış veya topraklar halinde agrega tanelerine yapışık halde bulunan kil, silt ve çok ince taşı gibi maddelerdir. Bunların bir kısmı betonun karılması sırasında kolayca ezilmesine rağmen bazıları ezilmez ve beton içinde zayıf agrega gibi davranır. Bu tür maddelerin çimento hamuru ve agrega arasındaki bağı zayıflatığı, su ihtiyacını arttırdığı ve beton yüzeyinde parça atmalara neden olduklarından agregada fazla miktarda bulunması istenmez.

iii) Ezilebilir hafif maddeler: Kolay ezilen ve ufalanan, agrega ve çimento hamurundan daha zayıf olan ve özgül ağırlığı 2 g/cm³'den küçük olan hafif taneler, kömür, linyit, odun parçaları gibi maddelerdir. Agregada içinde fazla miktarda bulunması halinde, betonun dayanımı ve durabilitesi olumsuz etkilenir. Betonun yüzeyinde lekeler ve çatlaklar meydana gelir.

iv) Agregada içinde bulunan diğer zararlı maddeler: Bunlar betonun sertleşmesine olumsuz etki yapan şekerimsi maddeler ve çözünen tuzlar, alkali reaksiyonuna neden olan bileşikler, kükürtlü bileşikler, donatı korozyonuna neden olan nitratlar ve özellikle suda çözünen klorür gibi maddelerdir.

ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONU

Alkali-silika reaksiyonu çimentodaki alkalilerle (Na_2O ve K_2O) agregada mevcut reaktif silis bileşikleri arasında meydana gelen kimyasal bir tepkimedir. Reaksiyon sonucu alkali-silika jeli meydana gelmektedir. Bu jel ortamda bulunan nemi emerek şişer ve sertleşmiş betonun zamanla genişmesine sebebiyet verir. Bunun sonucunda beton çatlar.

Alkali-silika reaksiyonu için aşağıdaki koşulların birlikte mevcut olması gerekir:

- Çimentoda mevcut alkali oksit miktarı: Çimentoda mevcut eşdeğer alkali oksit miktarı $(\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \times \text{K}_2\text{O}) \geq \%0.6$ ve agregada alkalilik reaktifliğine duyarlı opal, riyolit, tridimit ve riyolit tüfleri, dasit tüfleri, andezit ve andezit tüfleri ve fillatlar gibi mineraller bulunması.
- Alkaliye duyarlı agregası: Agregalar reaktif silisli bileşikler içerebilirler. Bu bileşikler beton boşluk suyunda çözünen alkali hidroksitlerle kimyasal tepkimeye girerler. Bu reaksiyon sonucunda alkaliye duyarlı bu bileşikler yumuşar ve çözünür. Meydana gelen jel betonda şişme ve genişlemeye neden olur.
- Ortam şartları: En önemli faktör rutubettir. Rutubet yeterli olduğu sürece reaksiyon $+10^\circ\text{C}$ ila $+60^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşebilir.

Alkali-silika reaksiyonunu önlemek için pratik olarak aşağıdaki önlemler alınabilir:

- Reaktif silis içermeyen agregası kullanmak
- Alkaliliği düşük çimento kullanmak
- Puzolanik maddeler kullanmak
- Suyun betona girişini önlemek.

AGREGALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Beton agregalarının öncelikle dayanımı yüksek olmalı; sağlam olmalı, aşınma direnci yüksek olmalı, çimento hamuru ile aderansı yüksek olmalı ve donatıya dayanıklı olmalıdır.

Agregada aranan en önemli özelliklerden biri basınç mukavemetidir. Kaliteli beton üretiminde kullanılan agreganın basınç dayanımının 100 MPa 'dan büyük olması istenir. Basınç dayanımı agreganın porozitesi ile yakından ilişkilidir. Porozitenin düşük olması basınç dayanımını yükseltir. Basınç dayanımına kıyasla daha kritik olan çimento hamuru ile olan aderanstır. Yüksek dayanımlı betonlar için agregası dayanımı normal dayanımlı betonlara kıyasla daha önemlidir. Normal agregaların basınç dayanımları $70-275 \text{ MPa}$ arasında değişir.

Çatlak, kusur ve yabancı maddeler içermeyen agregası “sağlam” olarak nitelendirilir. Başka bir ifadeyle, sağlam agregası donma-çözülme, ıslanma-kuruma ve ısınma-soğuma gibi zararlı çevresel etkilere karşı yüksek direnç gösteren agregasıdır. Bu özelliklere sahip olamayan agregalar “zayıf” olarak nitelendirilir. Zayıf agregalar bu tür zararlı etkiler altında hacimsel değişim gösterirler ve betonun dayanımı üzerinde olumsuz etki yaparlar. Kolay ezilebilen kumtaşı, yumuşak kireçtaşı, kil toprakları, kil içerikli kireçtaşı ve boşluklu çörtler sağlam olmayan agregalara örnek olarak verilebilir.

Aşınma, tekrarlı sürtünme kuvveti etkisinde malzeme yüzeyinde oluşan yıpranmadır. Özellikle ağır trafik yükü gibi dinamik etkilere maruz yollarda kullanılan agregalar için aşınma direnci çok önemlidir. Aşınma değeri, aşınma etkisiyle agregalar kütlelerinde yüzde olarak meydana gelen kayıptır. Yüksek aşınma değeri düşük aşınma direncini ifade eder. Los Angeles deneyi (Bilyalı Tambur) agregaların aşınma direncini belirlemede kullanılan en yaygın yöntemdir. Deney için genellikle fırın kurusu 5 kg agregalar örneği kullanılır. Aşınmaya maruz betonda kullanılacak agregalar için aşınma değeri 500 dönüş sonucu %30'dan az olmalıdır. Agregaların elde edildiği kayaların aşınma direnci Böhme deneyi vasıtasıyla belirlenir. Deney için 71x71 mm yüzeysel alana sahip olacak şekilde kesilen kayalar numuneler kullanılır.

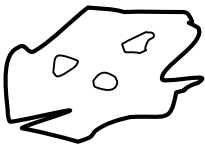
Camsı agregalar, şistler, marnlı kireç taşları, iri kristalli taşların aşınma dirençleri düşüktür. Özgül ağırlığı yüksek ve sert taşların, bazalt gibi, aşınma dirençleri yüksektir. Aşınma dirençleri yüksek olan kayaların doğal olarak basınç dayanımları da yüksek olur.

Aderans bakımından agregalar tane biçimi ve yüzey dokusu en önemli faktörlerdir. Aderans basınç dayanımından ziyade çekme dayanımı üzerinde daha etkilidir. Köşeli agregalar ile çimento hamuru arasındaki aderans düzgün agregalara oranla daha yüksektir. Bunun nedeni, köşeli agregalar tanelerinin yüzey alanı düzgün yüzeylilere göre büyük olduğu içindir. Hamur ile temas eden yüzey alanı büyüdükçe aderans da güçlenir. Genel olarak, aderans iyi olduğunda betonun kırılma yüzeyinde kırılmış agregalar taneleri görülür. Bununla beraber, çok sayıda kırılmış agregaların olması agregaların çok zayıf olduğunu gösterir. Aderans itibarıyla etkili olan diğer önemli bir faktör agregaların temiz olup olmamasıdır.

AGREGALARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Agregalar fiziksel özellikleri denince genellikle porozite, su emme, özgül ağırlık, birim ağırlık, donatı dayanıklılık gibi özellikler düşünülür.

Porozite: Porozite, agregalar tanesi içindeki toplam boşluk miktarının agregalar tanesi hacmine oranı olarak tanımlanır. Burada agregalar taneleri arasındaki boşluk dikkate alınmamaktadır. Buna göre, porozite sayısal olarak şu şekilde ifade edilebilir:



$$p = (V_p / V_b) \times 100$$

Burada, V_p agregalar tanesi içindeki boşlukların hacmini, V_b agregaların toplam hacmini göstermektedir.

Agregalar tanesi içindeki boşluklar birbirleriyle bağlantılı olabildiği gibi bağlantısız da olabilir. Birbirleriyle bağlantılı boşluklar agregalar yüzeyine açık olduklarında su bu boşluklardan agregalar içine kolayca girebilir. Porozite agregaların pek çok özellikleri üzerinde önemli derecede etki yapar. Porozite arttıkça, agregaların yoğunluğu, dayanımı, elastiklik modülü ve aşınma direnci önemli derecede azalır.

Bir agregalar yığınınındaki boşluk miktarı, agregalar örneğindeki taneler arasındaki boşlukların hacmidir. Yüzde olarak, boşluk oranı aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$v = (V_v / V_t) \times 100$$

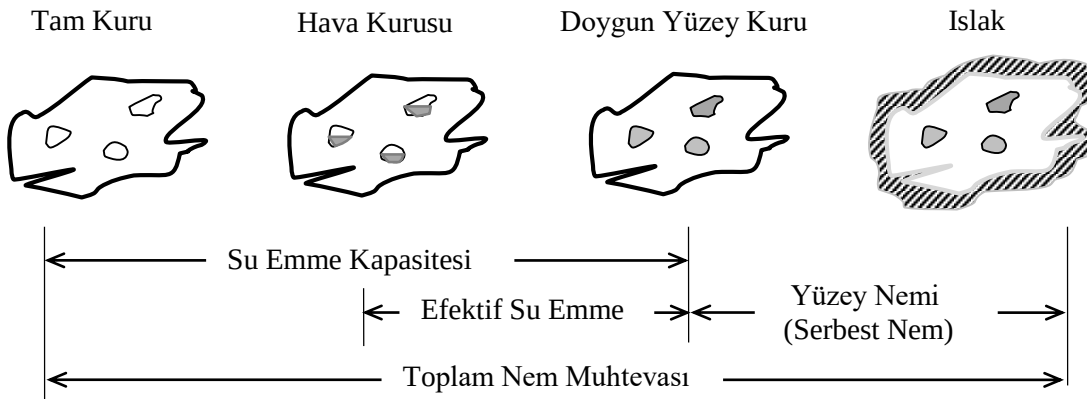
Burada V_v örnekteki agregalar taneleri arasındaki boşluğun toplam hacmini, V_t agregalar taneleri arasındaki boşlukla birlikte agregalar örneğinin toplam hacmini göstermektedir.

Nem Durumu ve Su Emme: Agregataneleri az da olsa boşluk içerdikleri için su emebilirler. Nem durumu bu boşluklarda ve agregatayüzeyinde ne kadar su bulunduğuyile ilgili olup agregatayüzeyindeki su miktarının agreganın tam kuru ağırlığına oranıdır. Agregada bulunan su miktarı agreganın yüzeyindeki boşlukların büyüklüğüne, onların sürekliliğine ve toplam hacmine bağlıdır.

Agregalar dört nem durumunda bulunabilir:

- Tam Kuru (FK): Agregada hiç su bulunmuyor olması ve nem içeriğinin %0 olması halidir.
- Hava Kuru: Agreganın dış yüzeyi kuru gibi gözükse ancak boşluklarında bir miktar suyun bulunması durumu.
- Doygun Yüzey Kuru (DYK): Agregatayüzeyi kuru, boşlukları tamamen su ile dolu olması.
- Islak: Agregadaki boşlukların tamamı su ile dolu ve agregatayüzeyinde de fazla miktarda suyun bulunuyor olması hali.

Nem durumuna bağlı olarak agreganın birim ağırlığı değişir. Bu nedenle, agreganın birim ağırlığı ve beton karışımında kullanılan agregatamiktarının DYK hali için belirlenmesi zorunludur. Agreganın DYK olmaması halinde bu değerlerde düzeltme yapmak gerekir. Bunun için agregada herhangi bir anda bulunan su miktarı ki buna *doğal su* denir ve DYK haldeki su miktarı ki buna *doyma suyu* denir, bilinmesi gerekir. Doğal nem ile doyma suyu arasındaki fark *yüzey suyu* veya *serbest su* olarak bilinir.



Agregada nem durumunun şematik olarak gösterilmesi

Doğal su ile doyma suyu arasındaki fark pozitif (+) ise agregatayslak, negatif (-) ise agregataykuru, sıfır ise agregatayDYK halledir. Karışım suyu yüzey suyu kadar artırılır veya eksiltir. Yüzey suyu (+) değer alıyorsa, karma suyu miktarı yüzey suyu kadar azaltılırken agregatamiktarı da yüzey suyu kadar artırılır. Yüzey suyu (-) değer alıyorsa, işlemin tersi yapılır. Bu tür düzeltmeler küçük değerler olmakla birlikte beton özelliklerine önemli derecede etki yapabilir.

Agreganın nem durumuna bağlı olarak karışım suyunda yapılacak eklemeyi veya eksiltmeyi belirlemek için agreganın su emme kapasitesinin ve nem muhtevasının biliniyor olması gerekir.

Bu işlem tüm agregagrupları için yapılır. Su emme kapasitesi agreganın absorbe edebileceği maksimum su miktarı olup agreganın tam kuru hali ile doymun kuru yüzey hali arasındaki fark kadardır. Buna göre, su emme kapasitesi şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Su emme kapasitesi: } SE (\%) = \frac{W_{DYK} - W_{FK}}{W_{FK}} \times 100$$

Burada, W_{FK} ve W_{DYK} agreganın sırasıyla tam kuru ve doymun kuru yüzey ağırlıklarıdır.

Agreganın herhangi bir andaki nem muhtevası şu şekilde hesaplanabilir:

$$\text{Nem muhtevası: } DN (\%) = \frac{W_{AG} - W_{FK}}{W_{FK}} \times 100$$

Burada, W_{FK} ve W_{AG} agreganın tam kuru ve doğal halde ağırlıklarıdır.

Agrega numunesi için doygun yüzey kuru hali belirlemek için, agrega önce 24 saat suya batırılır. Daha sonra agrega bir bez içinde yuvarlanarak yüzeyi kurulanır. Prosedür iri agregada için kolay olsa da ince agregada için oldukça zordur, beceri ve pratik gerektirir.

İnce agregada da benzer şekilde 24 saat su içinde tutulduktan sonra suyu süzülür. Bir süre kurutulur. Kuruma sırasında DYK hale gelip gelmediği bazı yöntemlerle kontrol edilir. Örneğin, kum renginin koyudan açık renke döndüğü an gibi veya avuç içinde sıkılıp bırakılması gibi ya da kesik koni yöntemi gibi.

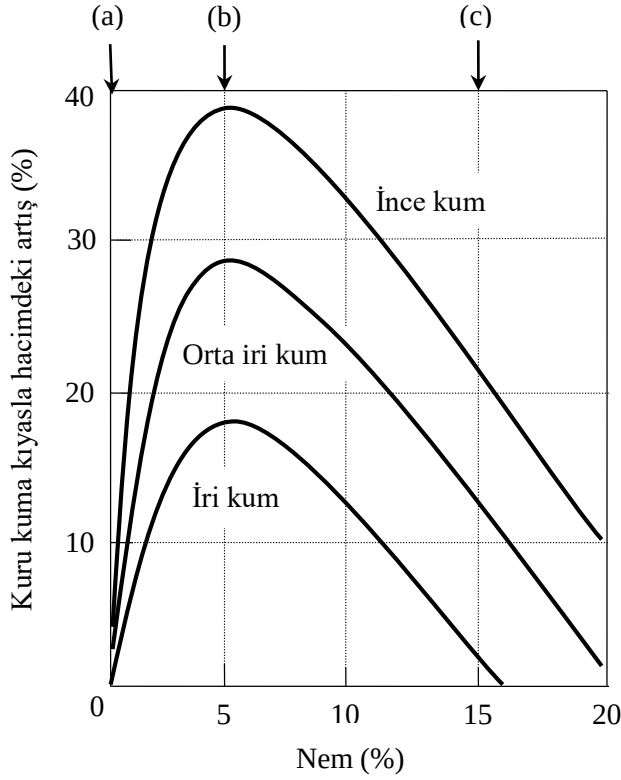
Nem muhtevası ve su emme kapasitesi değerleri kullanılarak her bir agregada grubu için yüzey nem oranı (YNO) % olarak aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$YNO (\%) = MC (\%) - AC (\%)$$

Doygun yüzey kuru (DYK) hali karışımın su ihtiyacı açısından "denge" anlamına gelir. Yani, karışıma konan agregada karışım suyundan ne emer ne de karışıma su verir. Beton karışımı hesabı agregalar doygun yüzey kuru halde oldukları varsayımı ile yapılır. Su/çimento oranı ve malzeme miktarları buna göre belirlenir. Ne yazık ki, agregalar şantiyede çoğunlukla doygun yüzey kuru halde olmazlar. Bu nedenle, beton tasarımı hesabı yapılırken agregaların nem durumunu dikkate alarak gerekli düzeltmeler yapılmalıdır.

Nem içeriği su emme kapasitesinden daha azsa, agregada kurudur; beton karışımına gereken miktarda su eklenmelidir. Nem içeriği daha fazla ise, agregada ıslaktır ve fazla su miktarı karışım suyundan azaltılır. Bu, orijinal su/çimento oranını korumak ve böylece betonun mukavemetini ve diğer özelliklerini büyük ölçüde etkileyen gerekli işlenebilirlik seviyesini sağlamak açısından hayati öneme sahiptir.

Şantiyede yığın halde iri agregada genelde %1 oranında efektif bir nem muhtevasına sahiptir. Buna karşın ince agregada genellikle ıslak haldedir ve tipik olarak 0 ila %5 oranında yüzey nemine sahiptir. Bunun nedeni ince agregada yüzeyi tarafından tutulan suyun yanı sıra kum taneleri arasında da ilave suyun tutulmasıdır. Bu su kum tanelerini iterek birbirinden uzaklaştırır ve kumun görünür hacminin artmasına neden olur. "Kabarma" olarak bilinen bu olay beton tasarımı hacim esaslı yapıldığında hataya sebebiyet verir. Bu itibarla, nem düzeltmesi yapılmaması durumunda doğacak sakınca kum açısından çok önemlidir. Zira kumun ağırlıkça miktarı içerdiği nem miktarına bağlı olarak önemli oranda azalabilir. Sonuçta betona gerektiğinden az kum ve gerektiğinden fazla su konmuş olur. Fazla su ise betonun mukavemeti bakımından sakıncalıdır. Bu nedenle, beton tasarımı yapılırken agregada tartılarak alınır ve birim ağırlık genellikle kuru agregada üzerinde yapılır. Aşağıda verilen grafikte gösterildiği üzere iri agregada ince agregaya göre daha az kabarma yapar.



Agregada kabarma durumu: (a) Kuru; (b) Kısmen suya doymuş; (c) Tamamen doymuş

Özgül Ağırlık: Özgül ağırlık beton karışımı hesabı için gereklidir. Agregada için özgül ağırlık hesaplanırken agregadaki boşlukların hacmi agreganın hacminden düşürülür. Beton karışım tasarımı genellikle agregaların DYK halde olduğu kabul edilerek yapıldığından, hesaplarda agreganın doymuş yüzey kuru özgül ağırlığı kullanılır. Özgül ağırlık aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{Özgül ağırlık: } \delta_{\text{DYK}} = \frac{W_{\text{DYK-havada}}}{W_{\text{DYK-havada}} - W_{\text{DYK-suda}}}$$

Burada δ_{DYK} agregada örneğinin özgül ağırlığı, g/cm^3 veya t/m^3 , $W_{\text{DYK-havada}}$ agregada örneğinin DYK halde havada ağırlığı, $W_{\text{DYK-suda}}$ DYK halde agreganın su içinde asılı ağırlığıdır.

Bununla birlikte agregada içindeki nem durumuna bağlı olarak birkaç tür özgül ağırlık tanımlamak mümkündür. Hakiki özgül ağırlık (δ_h), görünen özgül ağırlık (δ_g), doymuş kuru yüzey özgül ağırlık ve kuru özgül ağırlık (δ_k) gibi. Özgül ağırlıklar büyükten küçüğe doğru $\delta_h > \delta_g > \delta_{\text{DYK}} > \delta_k$ şeklinde sıralanır.

Cisimlerin özgül ağırlıkları bazen suyun özgül ağırlığına oranlanmış halde verilir. Suyun özgül ağırlığı 1 g/cm^3 olduğundan cisimlerin özgül ağırlığı genellikle birimsiz olarak verilir.

Birim Ağırlık: Agregada birim ağırlığı, belirli hacimdeki bir kabı dolduran agregada tanelerinin toplam ağırlığının kabın hacmine bölünmesiyle aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{Birim ağırlık } \Delta = \frac{W}{V}$$

Burada Δ agregada örneğinin birim ağırlığı, g/cm^3 veya t/m^3 cinsinden, W kabı dolduran agregada ağırlığı ve V kabın hacmidir.

Tanımdan anlaşılacağı gibi, birim ağırlık agregası yığınının birim ağırlığıdır. Kaba doldurulan agregası miktarının ağırlığı agregası örneğinin granülometrisine, tane şekline, agreganın nem durumuna, agreganın kaba gevşek veya sıkıştırılmış tarzda yerleştirilmiş olmasına bağlıdır.

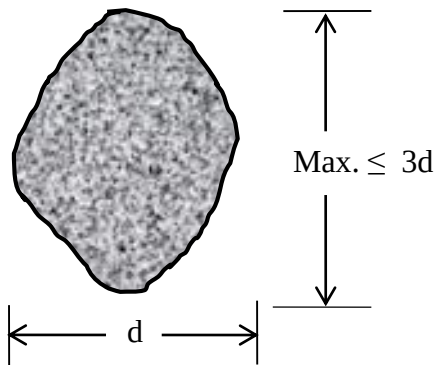
Bu nedenle “gevşek birim ağırlık” ve “sıkı birim ağırlık” diye iki birim ağırlık tanımlanır. Aksi belirtilmedikçe agregası birim ağırlığı denince kuru birim ağırlık anlaşılmalıdır.

Donma-Çözülme Direnci: Dona dayanıklılık agregası bünyesinde bulunan boşlukların miktarı, büyüklüğü ve birbirleriyle bağlantılı olup olmamasına bağlıdır. Agregası bünyesinde bulunan boşluklarda su donduğunda hacmi artar ve boşluk cidarlarına basınç oluşturur. Meydana gelen basınç boşluk içindeki su miktarıyla doğru orantılıdır. Bu bir bakıma agreganın su emme kapasitesi ile ilgili bir özelliktir.

Su emme azaltıkça, agreganın donma-çözülme direnci artar. İlgili standartlarda su emmesi %0.5’den büyük olan agregaların donma-çözülme deneyine tabi tutulmadan beton üretiminde kullanımlarının uygun olmadığı belirtilmektedir. İlgili Türk standardı (TS 3655) agreganın Na_2SO_4 ile yapılan donma-çözülme deneyinde kütle kaybını kum için %15, çakıl için %18 olacak şekilde sınırlandırmaktadır.

AGREGALARIN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ

Tane Biçimi ve Yüzey Dokusu: Agregası taneleri biçim olarak yuvarlak, köşeli, yassı, uzun ve hatta biçimsiz olabilir. Tane biçimini tanımlamak için genellikle “şekil indeksi” kullanılır. Bu değer agreganın en büyük kenar uzunluğunun en küçük kenar uzunluğuna oranı olarak belirlenir. İdeal olarak bu indisin 1.0 olması ancak 3’den büyük olmaması istenir.



Yüzey dokusu itibarıyla agregası taneleri düzgün, taneli, pürüzlü, kristalli, camsı, çok boşluklu olabilir. Biçim ve yüzey dokusu betonun işlenebilirliğini ve buna bağlı olarak betonun su ihtiyacını etkiler. Pürüzlü, köşeli ve yassı taneler içeren beton düzgün, yuvarlak ve boşluksuz taneler içeren betona göre belirli bir işlenebilirlik için daha fazla suya gereksinim duyar. Bunun yanı sıra aynı su/çimento oranı için köşeli agregası içeren beton için daha fazla çimentoya ihtiyaç duyulur.

Köşeli agregası içeren ve kötü tane dağılımına sahip betonların karıştırılması, pompalanması ve yerleştirilmesi daha zordur. Agregası taneleri yuvarlak ve düzgün biçimden köşeli ve pürüzlü biçime doğru gittikçe çimento hamuru ile agregası arasındaki aderans güçlenir.

Aderanstaki bu güçlenme doğrudan dayanıma yansır. Agregada düzgün ve yassı taneler olabildiğince az bulunmalıdır. Bu agregalar belirli bir işlenebilirlik için daha fazla suya gereksinim duyduğundan dayanımı olumsuz etkiler.

Yuvarlak tanelerden oluşan agregası belli bir hacme daha iyi ve kolay yerleşir ve daha az boşluk kalır. Bu nedenle yuvarlak agregası (çakıl) ile üretilen betonların kırmataş (mıcır) ile üretilenlere kıyasla daha az boşluklu ve dolayısıyla dayanımı daha yüksek olacağı düşünülür. Buna karşılık

kırmataş agregası daha pürüzlü yüzeye sahiptir. Bu pürüzlülük çimento hamuru ile agregası taneleri arasında daha iyi bir aderansın oluşmasını sağlar ve dolayısıyla beton mukavemeti artar. Bu nedenle kırmataş ile üretilen betonlar sıkılamadaki zorluğa rağmen çakıl ile üretilen betonlardan daha yüksek dayanım verir.

Tane Boyutu ve Tane Dağılımı: Bir agregası yığını içinde çeşitli büyüklükte taneler bulunur. Çeşitli büyüklükteki tanelerin agregası yığını içindeki oranlarının belirlenmesi işlemine *granülometri* denir. Başka bir ifadeyle, bir agregası örneği içindeki agregası tanelerinin çeşitli tane büyüklüğü gruplarına ayrılması işlemine *granülometri* adı verilir.

Agregası yığını içinde farklı tane gruplarının bulunması daha boşluksuz ve yoğun bir beton elde etmek açısından önemlidir. İşlenebilirliğe olan etkisi nedeniyle granülometrinin uygun olması kaliteli bir beton için hayati önem taşır. Granülometrisi kötü bir agregası betonun su ihtiyacını arttıracak için dayanım ve dayanıklılık üzerinde olumsuz etki yapar.

Birkaç tip granülometriden söz edilebilir. İçinde her büyüklükte agregası grupları bulunan agregalara *sürekli granülometrilili* agregası denir. En yaygın olarak kullanılanı budur. Tek tip büyüklükte agregası bulunanlara *üniform granülometrilili*, içinden bir veya daha fazla agregası grupları elenerek çıkarılmış olanlara *kesikli granülometrilili* agregası adı verilir.

ELEK ANALİZİ VE GRANÜLOMETRİNİN BELİRLENMESİ

Granülometri herhangi bir agregası ile üretilen betonun yerleştirilmesine, sıkılanmasına ve sertleşmiş betonun mukavemetine etkiyen önemli bir faktördür. Bir agregası yığınınındaki tanelerin boyutlarının en büyüğüne *en büyük agregası boyutu* denir ve D_{max} ile gösterilir. Örneğin, $D=31.5$ mm olan agregası yığını içinde 31.5 mm'den büyük boyutlu agregası bulunmaz.

D büyük değerler aldıkça genellikle betona konan su ve çimento miktarı azalır ve betonun dayanımı artar. Ancak en büyük tane boyutu betonun kullanılacağı yapıdaki elemanların boyutları ile sınırlıdır.

Elek analiz için standart elekler kullanılır. En yaygın olarak kullanılan elek takımlarından biri kare delikli elek sistemi olup bu sistem 125, 90, 63, 31.5, 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 mm eleklerden oluşur.

Bir agregası yığını tane büyüklüklerine göre gruplara ayrılabilir ve her grupta bulunan miktarlar agregası örneği çeşitli eleklerden elenerek saptanabilir. Bunu gerçekleştirmek için doğal olarak bu işleme uygun bir elek takımı gerekir. Eleme işleminde bu elekler en büyük göz açıklığına sahip elek en üstte gelecek şekilde sırasıyla üst üste yerleştirilir. En altta en küçük gözlü elekten geçen ince malzemenin toplandığı bir tepsi yerleştirilir.

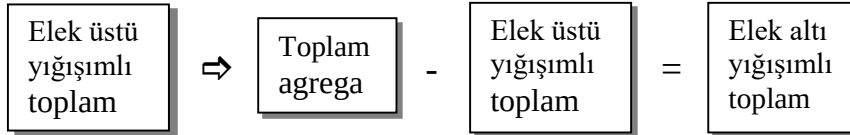
Agregası örneği en üstteki eleğe döküldüğünde agregası taneleri büyüklüklerine göre çeşitli eleklerle takılıp kalırlar ve böylece agregası gruplara ayrılmış olur. Her bir elekte kalan agregası miktarı tartılarak belirlendikten sonra bunların toplam agregası miktarına oranları hesaplanır ve sonuç bir tablo halinde verilir. Bir agregası örneğine ilişkin elek analizi aşağıda verilmiştir.

Elek göz açıklığı (mm)	Elek üstü agrega (g)	Elek üstü kalan (%)	Yığışımli kalan (%)	Yığışımli geçen (%)
31.5	0	0.0	0.0	100.0
16.0	912	19.0	19.0	81.0
8.0	1152	24.0	43.0	57.0
4.0	720	15.0	58.0	42.0
2.0	864	18.0	76.0	24.0
1.0	672	14.0	90.0	10.0
0.5	240	5.0	95.0	5.0
0.25	144	3.0	98.0	2.0
Tepsi	96	2.0	100.0	
Toplam	4800			

Agregaların granülometrisi genellikle her bir elek üzerinde kalan malzeme oranlarından ziyade belirli bir elek boyutundan daha küçük taneciklerin oranları ile tanımlanır. Örneğe bakacak olursak 1 mm'den küçük tanelerin oranı %10 iken 4 mm'den küçük tanelerin oranı %42 olduğu görülür.

Yukarıda verilen örnekten görüldüğü üzere granülometri gerçekte çeşitli tane gruplarındaki malzeme oranlarının yığışımli bir toplamıdır. Amaç bu yığışımli toplamı elde etmek olduğu için elek analizi buna uygun bir biçimde gerçekleştirilebilir. Şöyle ki, eleme işlemi daha önce anlatıldığı gibi yapıldıktan sonra en üstteki eleğe kalan agrega tartılır, daha sonra buna bir alttaki elekte kalan agrega eklenerek bir tartı daha yapılır.

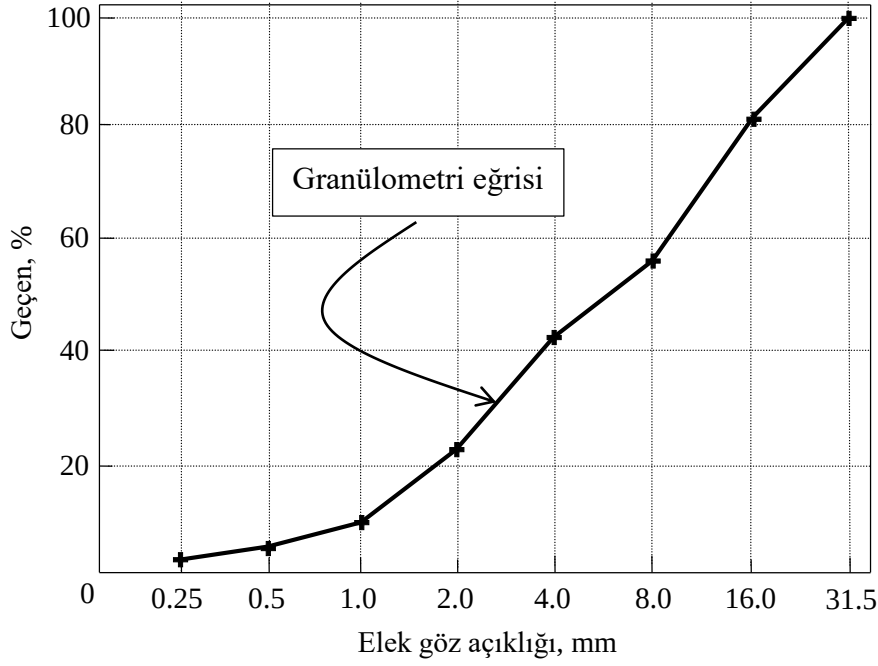
Tartma işlemi her eleğe takılan taneler üst üste eklenerek tamamlanır. Böylece elek üstünde kalan agreganın yığışımli toplamı elde edilmiş olur. Her bir elekten geçen agreganın toplamı gerekli olduğundan, bu değerler, her bir elek üzerinde kalan yığışımli toplam agrega miktarının toplam agrega miktarından çıkarılmasıyla elde edilir.



$$\text{Geçen (\%)} = \frac{\text{Elek altı yığışımli toplam}}{\text{Toplam agrega}}$$

GRANÜLOMETRİ EĞRİSİ

Agregaların granülometrisi tablolar halinde verilebileceği gibi grafik olarak da gösterilebilir. Grafikte yatay eksen elek göz açıklığını, dikey eksen ise yüzde olarak elek altına geçen malzemeyi göstermektedir. Birbirini izleyen elekler arasındaki yaklaşık 1'e 2'lik oran nedeniyle logaritmik skalalı eksenle elek göz açıklıkları sabit aralıklarla gösterilir. Yukarıda verilen agrega örneğine ait granülometri eğrisi aşağıda verilmiştir.



Granulometri eğrisinin özellikleri:

- Daima yükselen eğrilerdir. Yatay kısımları olsa dahi azalan kısımları olmaz.
- İki eleğ. göz açıklığının granulometrik değerleri arasındaki fark, bu eleğ. gözler arasında kalan malzeme oranını verir.
- Granulometri eğrisi üst kenara ne kadar yakınsa agrega o oranda ince demektir. Benzer şekilde iri agrega miktarı arttıkça granulometri eğrisi alt kenara yakın olur.

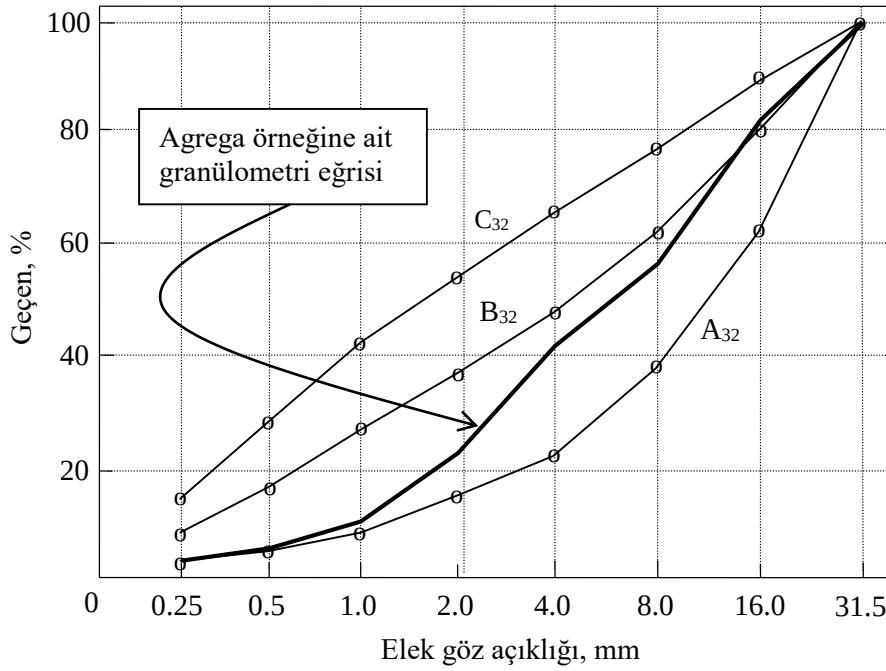
GRANÜLOMETRİ SINIR EĞRİLERİ

Beton üretiminde kullanılan agrega karışımlarının belli bir granulometriye sahip olması istenir. Granulometrinin iyi olması betonun işlenebilirliğinin iyi olması, betonun oldukça yoğun ve üniform olması ve ayrışmaması anlamına gelir. Beton üretimi için hangi granulometrinin uygun olduğu uzun araştırmalar sonucu saptanmıştır. Arzu edilen tüm özellikleri sağlayan beton üretimi için kullanılabilecek tek bir ideal granulometri eğrisi yoktur. Bu nedenle standartlar granulometri eğrileri için bazı sınırlamalar getirmiştir. Buna göre bir agreganın beton üretimi için uygun olması için agrega granulometrisi ilgili standardın belirlemiş olduğu alt ve üst sınır eğrileri arasına düşmesi gerekir. İlgili standart kare delikli eleğ. sistemine göre en büyük agrega boyutu 16 ve 31.5 mm için tanımladığı sınır eğrileri aşağıda verilmektedir:

Eleğ. göz açıklığı, mm	Sınır Eğrileri (% Geçen)					
	A ₁₆	B ₁₆	C ₁₆	A ₃₂	B ₃₂	C ₃₂
31.5	---	---	---	100	100	100
16.0	100	100	100	62	80	89
8.0	60	76	88	38	62	77
4.0	36	56	74	23	47	65
2.0	21	42	62	14	37	53
1.0	12	32	49	8	28	42
0.5	(7)	(20)	(34)	(5)	(18)	(28)
0.25	3	8	18	2	8	15

İlgili standart en büyük agrega boyutu 8, 16, 31.5 ve 63 mm için ayrı ayrı olmak kaydıyla A, B ve C diye üç sınır eğrisi tanımlamaktadır. A ve B sınır eğrileriyle çevrili bölge *ideal* granülometriyi, B ve C sınır eğrileriyle çevrili bölge *kullanılabilir* granülometriyi göstermektedir. Beton üretiminde kullanılacak agregaların tercihen A ve B sınır eğrileriyle çevrili bölgenin içinde kalması, ayrıca granülometri eğrisinin sınır eğrilerine paralel giden eğriler olması, bölge değiştirmemesi, ani inişler ve çıkışlar yapmaması istenir.

Granülometri eğrisi A ve C sınır eğrileri dışında kalan bir agrega beton üretimi için granülometri itibariyle uygun değildir ve dolayısıyla o agrega beton üretiminde kullanılması sakıncalıdır. Yukarıda verilen örnekte en büyük agrega büyüklüğü 31.5 mm dir. Bu agreganın granülometri eğrisi ile ilgili sınır eğrileri aşağıdaki grafikte verilmiştir.



D_{max} 31.5 mm için sınır eğrileri ve agrega örneğine ilişkin granülometri eğrisi

İNCELİK MODÜLÜ

İncelik modülü, agreganın ortalama tane iriliği hakkında genel bir fikir vermesine karşın granülometrisine ilişkin bir bilgi vermemektedir. Kısaca incelik modülü bir agrega yığını içindeki agrega tanelerinin ortalama iriliğini tek bir sayı ile ifade edilmesidir. Ancak farklı granülometriye sahip agregalar aynı incelik modülüne sahip olabilir. Başka bir ifadeyle, aynı incelik modülüne sahip iki agreganın granülometreleri oldukça farklı olabilir. Bir agreganın incelik modülü kullanılan elek sistemine bağlıdır. İncelik modülünün alabileceği en büyük değer elek sistemindeki elek sayısı olup alabileceği en küçük değer ise sıfırdır.

İncelik modülü, standart elekler üzerinde kalan agregaların yığılımlı yüzdelerinin toplamının 100'e bölünmesiyle elde edilir. Buna göre, önceki agrega örneğine ait incelik modülü aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$f_m = \frac{\sum \text{Elek üstü yığılımlı kalan agrega (\%)}}{100}$$

$$f_m = \frac{0.0 + 19.0 + 43.0 + 58.0 + 76.0 + 90.0 + 95.0 + 98.0}{100} = 4.79$$

Yığımda taneler incelidikçe ve küçük boyutlu tanelerin miktarı arttıkça incelik modülü küçük değerler alır. Yığın içinde iri tanelerin miktarı arttıkça incelik modülü büyük değerler alır. Buna göre, incelik modülü değerini dikkate alarak agrega tanelerinin ortalama büyüklüğünün hangi elek büyüklüğüne denk geldiğini bulmak mümkündür. Eleklere küçük gözlü elekten büyük gözlü eleğe doğru artan numaralar verilir. İncelik modülü değerinin karşılık geldiği elek numarası ortalama tane boyutunu verir.

Yukarıdaki örnekte incelik modülü değeri 4.79 olduğu için ortalama tane boyutu inceden kabaya doğru dördüncü ile beşinci elekler arasında olduğu görülmektedir. Yani ortalama agrega tane boyutu 2 ila 4 mm arasındadır. Ancak aynı ortalama tane boyutuna sahip çok sayıda granülometri eğrisine sahip agrega olabileceği unutulmamalıdır.

İncelik modülü aynı zamanda şu şekilde de hesaplanabilir:

$$f_m = \frac{\text{Elek sayısı} \times 100 - \sum \text{Geçen (\%)}}{100}$$

Yukarıda verilen agrega örneği için incelik modülü aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$f_m = \frac{8 \times 100 - (100 + 81 + 57 + 42 + 24 + 10 + 5 + 2)}{100} = 4.79$$

İncelik modülü, aynı kaynaktan temin edilen agregadaki küçük değişimleri tespit için kullanılabilir. Ancak farklı iki kaynaktan sağlanan agregaların tane dağılımlarını karşılaştırmada kullanılmaz.

EN BÜYÜK AGREGA TANE BÜYÜKLÜĞÜ ($D_{\max}$)

Bir agrega içindeki “en büyük tane büyüklüğü”, tüm agreganın geçebileceği en küçük elek göz açıklığıdır. Betonda kullanılan çimento miktarı sabit tutulduğu takdirde, kullanılan agreganın en büyük tane büyüklüğü arttıkça su/çimento oranı düşer.

Beton üretiminde mümkün olan en büyük boyutlu agrega kullanıldığında elde edilebilecek muhtemel avantajlar şu şekilde özetlenebilir:

- Beton karışımının su ihtiyacı azalır. Dolayısıyla, betonun kuruma büzülmesi azalır.
- Karışımın çimento gereksinimi azalır. Dolayısıyla, ekonomi sağlanır ve özellikle kütle beton uygulamaları için önemli olan daha az hidrasyon ısısı açığa çıkar.
- Sabit işlenebilirlik için ve sabit bir çimento miktarı ile üretilen betonun su/çimento oranı azalır. Böylece, daha yüksek dayanım elde edilir.

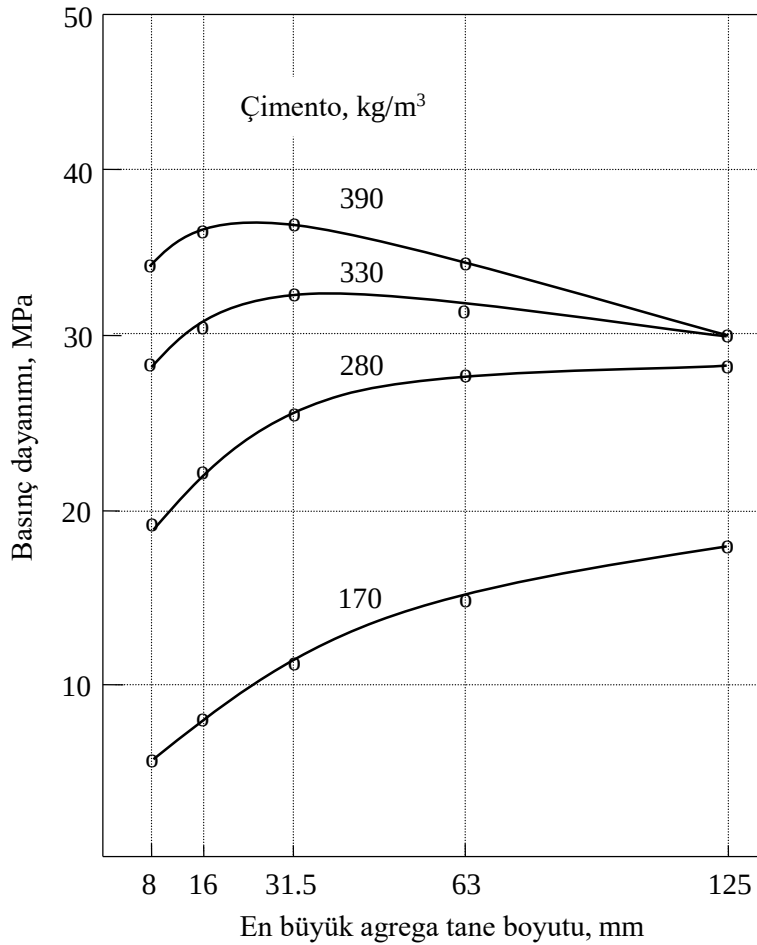
Yukarıda sıralanan avantajlar agrega en büyük tane büyüklüğü 40 mm'yi aşmaması halinde geçerlidir. Taşıyıcı beton tasarımında kullanılan en büyük agrega tane büyüklüğü genellikle 25 mm'yi aşmaz. Agregada 40 mm'yi aşan büyüklükte taneler bulunduğunda, betonun dayanımı

olumsuz etkilenmektedir. Bunun nedeni, agregâ yığmında en büyük agregâ tane boyutu büyüdükçe yığmında mevcut tanelerin yüzey alanı toplamı azalır. Dolayısıyla, çimento hamuru ve agregâ yüzeyi arasındaki aderans azalır. Çimento hamurundaki hacim değışiklikleri nedeniyle çimento hamuru ile agregâ taneleri arayüzeyinde büyük gerilmeler oluşur. Ayrıca en büyük agregâ tane boyutu büyüdükçe betonun homojenliği de azalmaktadır. Sonuçta bütün bunlar betonun dayanımı üzerinde olumsuz etki yapar ve dayanımın düşmesine neden olur.

Beton üretiminde kullanılan en büyük agregâ tane büyüklüğü genellikle beton elemanın boyutu, biçimi ve donatı miktarı ile dağılımına bağlıdır. Beton üretiminde kullanılacak en büyük agregâ büyüklüğü aşağıda verilen kriterleri sağlamalıdır.

- $D_{max} \leq 1/5 \times \text{en dar kesite sahip yapı elemanı genişliği}$
- $D_{max} \leq 1/3 \times \text{döşeme ve/veya tabliye derinliği}$
- $D_{max} \leq 3/4 \times \text{iki donatı arasındaki en küçük mesafe}$
- $D_{max} \leq 2/3 \times \text{pas payı; toprak ve atmosfer etkilerine maruz durumlar için}$
- $D_{max} \leq 1/2 \times \text{pas payı; klor etkisine maruz durumlar için}$

Aşağıda verilen grafik yukarıda ifade edilmek isteneni açıklaması bakımından önemlidir. Aşağıdaki şekilde, maksimum agregâ boyutunun farklı çimento içerikli betonun 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



En büyük agregâ tane büyüklüğünün betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Beton üretiminde kullanılan çimento miktarı, en büyük agrega tane büyüklüğü ile beton dayanımı arasındaki ilişkiyi etkileyen bir faktördür. Deneysel araştırmalar çimento miktarı az olan betonlarda mümkün olan en büyük agrega tane boyutunun kullanılmasının beton dayanımını artırdığı, ancak çimento miktarı fazla olan beton karışımlarında en büyük agrega tane büyüklüğünün 25-30 mm'yi aşmaması gerektiği belirtilmektedir. Çimento miktarı çok yüksek olan betonlarda en büyük agrega tane büyüklüğü 25-30 mm'yi aşması halinde su/çimento oranının düşmesine rağmen beton dayanımında artış olmamaktadır. Yüksek dayanımlı betonların üretiminde (50 MPa'dan daha yüksek dayanımlı) kullanılan agregada en büyük agrega tane büyüklüğü genellikle 16 mm veya daha küçük olacak şekilde olması tercih edilmektedir.

AGREGA GRANÜLOMETRİSİNİN UYGUNLAŞTIRILMASI

Şantiyede mevcut agrega bazen istenilen granülometriye sahip olmaz. Bu durumda bu agregayı başka agrega veya agregalarla karıştırmak suretiyle istenen granülometriye sahip bir karışım agregası elde etme yoluna gidilir. Bu amaç için kullanılan yöntemler aşağıda verilmektedir:

1. Deneme-Yanılma Yöntemi: Burada karışımı oluşturacak agregaların granülometrik bileşimlerine bakılarak karışım oranları için bir tahminde bulunulur. Bu oranlar kullanılarak karışımın granülometrisi hesaplanır. Karışımın granülometri eğrisi istenen sınırlar arasına düşmezse bu oranlar bir miktar değiştirilerek hesaplar tekrarlanır.

Örnek: Granülometrik bileşimleri aşağıda verilen X ve Y agregalarını kullanarak ideal bölgeye düşen (A ve B sınır eğrileri arasına düşen) bir karışım elde etmek için karışım oranlarını bulunuz.

Elek göz açıklığı (mm)	Geçen (%)		Sınır eğrileri		Karışım agregası (%60X+%40Y)	
	X	Y	A ₃₂	B ₃₂		
31.5	100	100	100	100	60+40 = 100	✓
16.0	80	40	62	80	48+16 = 64	✓
8.0	70	20	38	62	42+8 = 50	✓
4.0	60	10	23	47	36+4 = 40	✓
2.0	40	5	14	37	24+2 = 26	✓
1.0	20	0	8	28	12+0 = 12	✓
0.5	10	0	(5)	(18)	6+0 = 6	✓
0.25	5	0	2	8	3+0 = 3	✓

Demene-yanılma yöntemine göre X agregası %60, Y agregası %40 oranında olacak şekilde karıştırıldığında elde edilen karışım agregası A ve B sınır eğrileri arasına düşmektedir.

2. Bir Noktadan Geçirme Yöntemi: Burada karışımın granülometri eğrisi geçmesi istenen bir nokta seçilir. Daha sonra eğrinin bu noktadan geçmesi için karışım oranlarının ne olması gerektiği hesaplanır. Nokta seçilirken dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır:

- Nokta, karışıma giren agregaların granülometri eğrileri arasında olmalıdır.
- Seçilen nokta aynı zamanda sınır eğrileri arasında kalmalıdır.
- Sınır eğrileri ile tanımlanmış bölgenin bir kısmı agregaların granülometri eğrileriyle sınırlanmış bölgenin bir kısmı tüm tane boyutları için girişim yapmalıdır.

Örnek: Bir önceki örneği dikkate alarak, karışım agregasının 8 mm göz açıklıklı elekten %50'si geçmesi için X ve Y agregalarının karışım oranlarını bulunuz.

X ve Y agregalarının 8 mm elekten geçen oranları sırasıyla $X_X=70$ ve $X_Y=20$ dir. Benzer şekilde, aynı eleğe karşılık gelen sınır eğrilerinin granulometrik değerlerinin aralığı $X_A=38$ ve $X_B=62$ 'dir. Buradan, karışım kuralı kullanılarak agregalar için karışım oranları aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$\begin{aligned} X_m &= X_X \times \%X + X_Y \times \%Y & X+Y=100 & Y=100-X \\ 50 &= 70 \times \%X + 20 \times \%Y & 50 &= 70 \times \left(\frac{X}{100}\right) + 20 \times \left(\frac{100-X}{100}\right) \\ 5000 &= 70 \times X + 2000 - 20 \times X & X &= \%60 \quad Y = \%40 \text{ bulunur.} \end{aligned}$$

3. **İncelik Modülü Yöntemi:** Burada öncelikle karışım agregasının incelik modülü için bir değer seçilir. Karışıma giren agregaların granülometreleri ve dolayısıyla incelik modülleri bilindiğinden istenen incelik modülüne sahip bir karışım, karışıma giren agregalardan hangi oranlarda kullanılarak elde edileceği karışım kuralı yardımı ile hesaplanır.

$$f_m = f_x \times \%X + f_y \times \%Y \quad X+Y=100 \quad Y=100-X$$

Burada; f_m karışım agregasının incelik modülü, f_x X agregasının incelik modülü ve f_y Y agregasının incelik modülüdür. f_x ve f_y değerleri bilinir, f_m seçilir.

Karışım agregasının incelik modülü, f_m , seçilirken aşağıdaki hususlara dikkat edilir:

- f_m , karışıma giren agregaların incelik modülleri arasında bir değer olabilir.
- f_m , sınır eğrilerinin incelik modülleri arasında kalmalıdır.

Ancak bu hususların sağlanmış olması granülometri eğrilerinin de sınır eğrileri arasında kalmasını gerektirmez.

Örnek: Bir önceki örneği dikkate alarak ve karışım agregasının incelik modülünün 4.99 olduğunu kabul ederek A ve B sınır eğrileri arasına düşecek şekilde bir agregalar karışımı elde etmek için karışım oranlarını belirleyiniz.

$$\begin{aligned} f_m &= f_x \times \%X + f_y \times \%Y & X+Y=100 & Y=100-X & f_m=4.99 \\ 4.99 &= 4.15 \times \%X + 6.25 \times \%Y \\ 4.99 &= 4.15 \times \left(\frac{X}{100}\right) + 6.25 \times \left(\frac{100-X}{100}\right) & X &= \%60 \quad Y = \%40 \text{ bulunur.} \end{aligned}$$

Örnek: Mühendis olarak çalıştığınız bir şantiyede üç sınıf agrega bulunmaktadır. Bu agregaların granülometreleri ve ilgili sınır eğrileri aşağıda verilmektedir:

Elek göz açıklığı (mm)	Agrega granülometreleri			Sınır Eğrileri		
	X	Y	Z	A ₃₂	B ₃₂	C ₃₂
31.5	100	100	100	100	100	100
16.0	100	80	50	62	80	89
8.0	100	60	35	38	62	77
4.0	70	48	20	23	47	65
2.0	50	40	10	14	37	53
1.0	30	26	5	8	28	42
0.5	20	18	0	(5)	(18)	(28)
0.25	10	8	0	2	8	15
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.50	2.60	2.70			

- Verilen agregaların üçünü de kullanarak, A ve C sınır eğrileri arasına düşecek şekilde bir karışım elde etmek için karışım oranlarını bulunuz. Çözüm için deneme-yanılma yöntemi kullanınız.
- Agregaların tümünü kullanarak, incelik modülü 4.28 ve özgül ağırlığı 2.59 g/cm³ olan bir karışım agregası elde etmek için karışım oranlarını bulunuz.
- Agregaların tümünü kullanarak, incelik modülü 3.92 olan ve %40'ı 2 mm elekten geçen bir karışım elde etmek için karışım oranlarını bulunuz.
- Y agregasını 2 mm elekten eleyerek iki kısma ayırın ve herbir kısmın granülometrelerini hesaplayınız. Bu iki kısım eşit oranda karıştırıldığında karışımın incelik modülü ve özgül ağırlığı ne olur? Hesaplayınız.

Çözüm:

- Çözüm öğrencilere bırakılmıştır.

- Karışım oranlarını belirlemek için üç denklem kurulmalıdır. Dolayısıyla,

$$\begin{aligned}
 1 \quad & \delta_x \times \%X + \delta_y \times \%Y + \delta_z \times \%Z = 2.59 & \delta_x, \delta_y \text{ ve } \delta_z \text{ agregaların özgül ağırlıkları} \\
 2 \quad & f_x \times \%X + f_y \times \%Y + f_z \times \%Z = 4.28 & f_x, f_y \text{ ve } f_z \text{ agregaların incelik modülleri} \\
 3 \quad & X + Y + Z = 100 & X = 100 - (Y + Z)
 \end{aligned}$$

$$2.50 (X/100) + 2.60 (Y/100) + 2.70 (Z/100) = 2.59$$

$$3.20 (X/100) + 4.20 (Y/100) + 5.80 (Z/100) = 4.28 \quad f_x=3.20 \quad f_y=4.20 \quad f_z=5.80$$

3 nolu ifade 1 ve 2 nolu ifadede sağlatılırsa,

$$250 - 2.5 \times Y - 2.5 \times Z + 2.6 \times Y + 2.7 \times Z = 259$$

$$320 - 3.2 \times Y - 3.2 \times Z + 4.2 \times Y + 5.8 \times Z = 428$$

$$0.1 \times Y + 0.2 \times Z = 9 \rightarrow Y + 2 \times Z = 90$$

$$1.0 \times Y + 2.6 \times Z = 108 \rightarrow Y + 2.6 \times Z = 108 \quad 0.6 \times Z = 18 \rightarrow Z = \%30$$

$$Y + 2 \times Z = 90 \rightarrow Y + 2 \times 30 = 90 \rightarrow Y = \%30 \quad X = \%40$$

c) Karışımın %40'ı 2 mm elekten geçtiğine göre,

$$\begin{aligned}
 1 \quad X_m &= X_x \times \%X + X_y \times \%Y + X_z \times \%Z \\
 40 &= 50 \times \frac{X}{100} + 40 \times \frac{Y}{100} + 10 \times \frac{Z}{100} & 50 \times X + 40 \times Y + 10 \times Z &= 4000 \\
 2 \quad f_x \times \%X + f_y \times \%Y + f_z \times \%Z &= 3.92 \\
 3.2 \times \frac{X}{100} + 4.2 \times \frac{Y}{100} + 5.8 \times \frac{Z}{100} &= 3.92 \\
 3.2 \times X + 4.2 \times Y + 5.8 \times Z &= 392 \\
 3 \quad X + Y + Z &= 100 \quad \rightarrow \quad Z = 100 - (X + Y)
 \end{aligned}$$

3 nolu ifade 1 ve 2 nolu denklemlerde sağlatılırsa;

$$\begin{aligned}
 4000 &= 50 \times X + 40 \times Y + 10 \times Z \\
 4000 &= 50 \times X + 40 \times Y + 10 \times [100 - (X + Y)] \\
 3000 &= 40 \times X + 30 \times Y & 300 &= 4 \times X + 3 \times Y & Y &= \frac{300 - 4 \times X}{3} \\
 3.2 \times X + 4.2 \times Y + 5.8 \times [100 - (X + Y)] &= 392 & 2.6 \times X + 1.6 \times Y &= 188 \\
 2.6 \times X + 1.6 \times \frac{300 - 4 \times X}{3} &= 188 & 7.8 \times X + 480 - 6.4 \times X &= 564 & 1.4 \times X &= 84 \\
 X &= \%60 & Y &= \frac{300 - 4 \times 60}{3} = \%20 & Z &= 100 - (60 + 20) = \%20
 \end{aligned}$$

Karışım agregasının özgül ağırlığı

$$\delta_m = 0.60 \times \delta_x + 0.20 \times \delta_y + 0.20 \times \delta_z = 0.60 \times 2.50 + 0.20 \times 2.60 + 0.20 \times 2.70 = 2.56 \text{ g/cm}^3$$

d) Y agregası 2 mm elekten elenirse,

Elek göz açıklığı (mm)	Y	İnce ve iri kısımların oranı	İnce kısmın granülometrisi	İri kısmın granülometrisi	%50 ince + %50 iri
31.5	100		100	(100-40)/60=100	100.0
16.0	80	100-40=60	100	(80-40)/60 = 67	83.5
8.0	60	%60 iri	100	(60-40)/60 = 33	66.5
4.0	48		100	(48-40)/60 = 13	56.5
2.0	40	↓	(40/40)×100 = 100	0	50.0
1.0	26	%40 ince	(26/40)×100 = 65	0	32.5
0.5	18		(18/40)×100 = 45	0	22.5
0.25	8		(8/40)×100 = 20	0	10.0

Karışım agregasının incelik modülü, $f_m = (800 - 421.5)/100 = 3.785$ bulunur.

Karışım agregasının özgül ağırlığı Y agregasının özgül ağırlığına eşittir. Dolayısıyla, $\delta_m = \delta_y = 2.60 \text{ g/cm}^3$ olur.

ELENMİŞ BİR AGREGANIN GRANÜLOMETRİSİ

Şantiyede mevcut agreganın granülometri bakımından beton üretimi için uygun olmaması halinde ve şantiyede onunla kullanacak başka agregaya yoksa bu agregaya belirli bir elekten elenerek iki kısma ayrılabilir. Elek üstünde kalan ve altına geçen kısımların granülometrisi hesaplanabilir ve bu iki agregaya belirli oranlarda karıştırılarak beton üretimi için uygun hale getirilebilir.

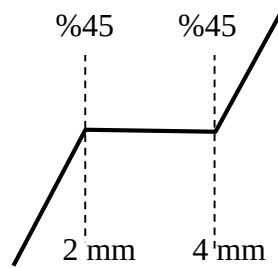
Şantiyede mevcut X agregasını 4 mm elekten eleterek iki kısma ayırılım ve sonra her bir kısmın granülometrisini aşağıdaki gibi hesaplayalım:

Elek göz açıklığı (mm)	X	Agregada ince ve iri agregaya oranları	İnce kısmın granülometrisi	İri kısmın granülometrisi
31.5	100		100	(100-50/50=100
16	85	100-50=50	100	(85-50)/50 = 70
8	65	%50 iri	100	(65-50)/50 = 30
4	50	↓	50/50= 100	0
2	35		35/50 = 70	0
1	20	4 mm elekten geçen	20/50 = 40	0
0.5	10	agrega oranı %50	10/50 = 20	0
0.25	5	%50 ince	5/50 = 10	0

KESİKLİ GRANÜLOMETRİ

Bir agregaya yığını içinde belirli agregaya tane gruplarından bulunmaması halinde agregaya granülometrisi “kesikli” veya “süreksiz” olur. Granülometri eğrisinde eksik tane gruplarına karşılık gelen bu süreksizlik “yatay çizgi” olarak gösterilir. Bu tür granülometriye “kesikli granülometri” denir.

Elek göz Açıklığı, mm	Geçen (%)
31.5	100
16	90
8	75
4	45
2	45
1	30
0.5	20
0.25	10



2 mm ile 4 mm elekler arası
agrega bulunmamaktadır.

Kesikli granülometriye sahip agregaların sürekli granülometriye sahip agregalara oranla daha az boşluklu bir yığın oluşturması beklenir. Ancak bu, hangi tane grubu veya gruplarının elenip uzaklaştırılmış olduğuna bağlıdır. Aksi takdirde herhangi bir grubun uzaklaştırılması istenen etkiyi sağlamayabilir. Genellikle orta büyüklükteki agregaya taneleri uzaklaştırılır. Kesikli granülometriye sahip agregalar için sınır eğrileri de farklıdır. İlgili standatta belirtilen U eğrileri kesikli granülometriye sahip agregalar içindir ve A sınır eğrisinin yerini alır. B ve C sınır eğrilerinde bir değişiklik yoktur.

Kesikli granülometriye sahip agregalar herhangi bir betonda kullanılabilir. Bununla birlikte daha ziyade prepakt (önceden yerleştirilmiş agregalı beton) beton uygulaması ve agreganın görünümü yüzeyler elde etmek için kesikli granülometriye sahip agreganın kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra kesikli granülometriye sahip agregaların yoğunluk, sıkıştırma, geçirimsizlik, büzülme ve dayanım gibi özelliklerde iyileştirmeler sağlama amacıyla yönelik olarak normal beton üretiminde de kullanılabilir.

Kesikli granülometri genellikle vibre edilecek özellikte kuru kıvamlı ve çok az çökmeli karışımların ayrışmasını engellemek için önerilir. Bu dikkat ve itina isteyen bir uygulamadır. En büyük agreganın tane boyutu 20 mm olan bir agreganın yığınının 5 ila 10 mm arası taneler herhangi bir ayrışma riski olmadan atılabilir. En büyük agreganın tane boyutu 40 mm olduğunda genellikle 5 ila 20 mm arası taneler atılır.

Kesikli granülometrinin özel bir hali agregada ince kısmın hiç bulunmamasıdır. Bu agreganın ile üretilen beton “inceli olmayan beton” olarak bilinir. İnce kısmı olmayan betonun dayanımı düşük olduğu gibi geçirimsizliği de yüksektir. Bu tür betonlar biraz hafif olup kuruma büzülmesi az ve ısı yalıtım özelliği olan betonlardır.

AGREGALARIN STOKLANMASI

Agregaların ayrışmayı en aza indirecek ve zararlı maddeler tarafından kirlenmesini önleyecek şekilde kullanılmalı ve depolanmalıdır. Agregaların kirlenmemesi için onlar sert ve kuru zemin üzerine, böyle zemin yoksa grobeton (çimentosu az beton) üzerinde depolanabilir. Bu amaçla hazırlanan beton döşeme kalınlığı 10 cm olmalı, suyun akması için gerekli eğim verilmeli ve yığının kaplayacağı alandan biraz daha büyük olmalıdır. Beton karışımına giren farklı sınıflardaki agreganın ayrı ayrı depo edilmeli; bunların birbirine karışmasını engellemek için yeterince yükseklikte bölme elemanlarla ayrılmalıdır.

Agregaların taşıyıcı bantlarla taşınarak depolanması halinde yığınlar ince tabakalar halinde oluşturulmalı ve yüksek tepeler şeklinde yığılmamalıdır. Çok yüksek konik biçiminde yığınlar iri taneler yığının eteğine doğru yuvarlanarak ayrışma meydana gelebilir. Agreganın içine atılmış sigara izmariti, çay atıkları, yaprak ve ahşap parçaları betona zarar verebilir. Beton dökümüne uzun süre ara verilecekse yığının üstü örtülmelidir.

Kırma taşın (mıcır) yuvarlak agregaya nazaran ayrışması zordur. Benzer şekilde ince taneler de iri tanelere kıyasla daha zor ayrışırlar. İri agreganın ayrışmasını önlemenin bir yolu, agreganın tane grupları halinde yığılır ve sonra gruplar istenildiği oranda birbirleriyle karıştırılır. Yığın uygun bir biçimde oluşturulması halinde buna gereksinim duyulmayabilir. Üniform nem içeriği için yıkanmış agreganın kullanılmadan yeterince önceden stoklanmalıdır. Islak agreganın kuru agregaya kıyasla ayrışma eğilimi çok düşüktür.

AGREGA YIĞININDAN ÖRNEK ALMAK

Agregalar üzerinde gerçekleştirilen çeşitli deneyler için alınacak örnek miktarları ilgili standartlarda belirtilmiştir. Bu miktarlar ilgili deney için gereksinim duyulabilecek miktarlardır. Ancak deneylerde kullanılan miktarlar (gerçek miktarlar) çoğu kez bu miktarların yarısından daha azdır.

Örneklemenin nasıl yapılacağı deneyle ilgili standartta açıklanmaktadır. Örnek alınırken dikkat edilmesi, gereken en önemli husus örneğin alınmış olduğu kütleyi temsil etmesidir. Bunun için agrega yığınının çeşitli yerlerinden çok sayıda örnek alınarak bunlar harmanlanır. Oluşan harman miktarı deney için gerekenden çok fazla olduğu için örnek uygun bir biçimde küçültülür. Küçültme işlemi için genellikle iki yöntem kullanılır.

Bunlardan ilki çeyrekleme-dörde bölme-yöntemidir. Burada agrega düz bir yüzeye daire biçiminde yayıldıktan sonra daire dörde bölünür ve karşılıklı iki dördte bir kısımlar uzaklaştırılır; diğer iki çeyrek alınır. Eğer bu miktar da gerekenden fazla ise tekrar benzer şekilde küçültme yapılır.

Küçültme işleminde kullanılan diğer yöntemde bölgeç denilen bir araçtan yararlanılır. Deney için kullanılan agrega örneği bu araç vasıtasıyla iki üniform kısma ayrılır. Bu kısımlardan bir tanesi uzaklaştırılır ve diğeri kullanılır. İstenen örnek büyüklüğü elde edilinceye kadar bu yöntemle işlem art arda uygulanır.