

KİMYASAL VE MİNERAL KATKILARIN KÜTLE BETONU TASARIMINDA YERİ VE ÖNEMİ

Aydın SAĞLIK

Kimya Yük. Müh.

DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı

Beton-Malzeme Lab. Şb. Md.

Ankara/Türkiye

Ergin TUNÇ

Şube Müdürü

DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı

Beton-Malzeme Lab. Şb. Md.

Ankara/Türkiye

M. Fatih KOCABEYLER

Daire Başkan Yrd.

DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı

Beton-Malzeme Lab. Şb. Md.

Ankara/Türkiye

ÖZET

Kütle betonu, çimentonun su ile reaksiyonu sırasında açığa çıkan hidrasyon ısı ve bunu takip eden hacim değişiklikleri neticesinde termal çatlak oluşumlarının en alt seviyeye çekilmesi maksadıyla tedbirler alınması gerekli olan büyük boyutlu betonlar için kullanılan bir ifadedir.

Kütle beton tasarımında termal etkiler, dayanıklılık ve ekonomi, ön planda olup dayanım sıklıkla ikincil derecede ele alınmaktadır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonun ekzotermik (ısı açığa çıkaran) olması ve betonun ısı iletim özelliğinin düşük olması nedeniyle açığa çıkan ısının transferi için büyük hacimli betonlarda çok uzun bir süreye ihtiyaç olması nedeniyle bazen oldukça yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmektedir. Beton henüz erken yaşlarda iken sıcaklığının yüksek değerlere ulaşması ve sıcaklık kayıp hızının da bu tip beton yapılarında oldukça düşük olması nedeniyle çevre sıcaklığına soğuma çok uzun bir süreyi gerektirmektedir. Soğumanın tamamlanarak çevre sıcaklığına ulaşıncaya kadar ise beton dayanımı ve elastisite modülü artmaktadır. Uzun vadede betonun soğuyarak çevre

sıcaklığına ulaşılması ile birlikte önemli çekme gerilmelerinin oluşumunu da kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle, yapıda ciddi hasar oluşumlarının önlenmesi, yapısal bütünlüğün bozulmaması, aşırı sızma riskinin önlenmesi, servis ömrünün kısalması ve estetik olarak da kabul edilemez hasar oluşumlarının meydana gelmemesi için termal etkilerin oldukça dikkatlice ele alınması zorunludur.

Bu makalede, yıllardan beri inşa edilmiş olan beton barajlardan elde edilmiş olan bilgi birikimleri ışığında kütle betonda kullanılan malzemeler ve karışım oranları tasarımı ile ilgili önemli görülen bazı bilgiler ele alınmaktadır.

GİRİŞ

Kütle betonu yapılarında termal gerilimler nedeniyle çatlak oluşumlarının engellenebilmesi oldukça önemlidir. Dolayısı ile tasarım çalışmaları bu tip çatlakların meydana gelme riskini en düşük seviyeye çekecek şekilde gerçekleştirilmeli ve tasarım aşamasında da inşaat aşamasında da belirlenen kriterlere titizlikle uyulmalıdır. Isıl çatlak oluşumları riskini etkileyen temel parametreler şöyle sıralanabilir:

- ✓ Kullanılan bağlayıcı malzemenin (çimento + uçucu kül) hidrasyon ısısı,
- ✓ Toplam bağlayıcı miktarı,
- ✓ Beton döküm ve yerleştirme sıcaklığı,
- ✓ Beton elemanın şekli ve büyüklüğü,
- ✓ Ard soğutma işlemi ile alınan ısı,
- ✓ Döküm anında ve sonrasında çevre sıcaklığı,
- ✓ Betonun ısıl özellikleri (özgül ısı, ısıl iletkenlik, ısıl genişleme katsayısı, vb.)
- ✓ Betonun çekme dayanımı,
- ✓ Betonun elastisite modülü,

Isıl çatlak oluşumları beton yapıdaki en düşük ve en yüksek sıcaklık değerlerinin arasındaki fark (yukarıda verilen parametrelere bağlıdır), betonun ısıl genişleme katsayısı, betonun çekme dayanımı ve elastisite modülü parametrelerine bağlı olarak meydana gelmektedir. Beton yapıdaki sıcaklık farkının düşük olması parametrelerinden biri/birkaçı veya tamamının bir arada etkin bir şekilde kullanılması suretiyle çatlak oluşum riskinin azaltılabilmesi/ortadan kaldırılması temin edilebilmektedir.

Literatürde ve kütle betonu ile ilgili otoritelerce kabul edildiği üzere sıcaklık farkı için aşılması gerekli olan sınır değer birçok kaynakta genellikle

20°C olarak verilmektedir. 20°C'lik fark emniyetli tarafta kalınması açısından önerilen sıcaklık farkıdır. Beton yapıdaki sıcaklık farkının belirlenen bu sınır değerinin altında tutulması önemlidir. Beton döküm ve yerleştirme sıcaklığı bunu temin edebilmek için kullanılan faktörlerden bir tanesidir. Bu sıcaklığın belirlenmesine yönelik olarak kütle betonlarında bazı termal, fiziksel ve mekanik özelliklerin tespit edilmesi gerekmektedir. Belirlenmesi gerekli özellikler genellikle zaman ve sıcaklığa bağlı faktörlerdir. Bu faktörler aşağıda özetlenmiştir;

- ✓ Adyabatik Sıcaklık Artışı (ΔT) : Örneğin şantiyede farklı bağlayıcı dozajlarında büyük ölçekli testlerin gerçekleştirilmesi ve adyabatik sıcaklıkların zamana bağlı tespit edilmesi. Adyabatik sıcaklık artışı şu şekilde hesaplanır; $\Delta T = T_p + \Delta T_a - T_{Amb} - T_{HL}$; Burada, T_p yerleştirme sıcaklığı, ΔT_a adyabatik sıcaklık artışı, T_{Amb} ortalama çevre sıcaklığı ve T_{HL} ısı kayıpları nedeniyle sıcaklık azalmasıdır. Adyabatik sistemlerde T_{HL} sıfır kabul edilebilir.
- ✓ Kısıtlanma faktörü, K_f veya K_r : Kısıtlanma faktörü 0 ilâ 1 arasında değişen bir katsayıdır. K_f betonun kendi içindeki kısıtlanma faktörü iken K_r temelden bağlanmadan dolayı oluşan kısıtlanma faktörüdür. Temel olarak kaya esas alınırsa $K_r=1,0$ alınabilir. Betonun büzülmeyle karşı herhangi bir kısıtlanması yok ise (serbest) $K_r=0,0$ dır.
- ✓ Betonun ve bileşenlerinin özgül ısıları (C) : Yaklaşık bir değer olarak 0,85 ile 1,17 kJ/kg °C değerleri arasında kullanılabilir, Bu değer büyük ölçüde agreganın özgül ısısına yakın bir değerdir.
- ✓ Termal diffüzyivite (h^2) : özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve yoğunluğa bağlı olarak hesaplanabilir, $h^2 = k/\rho C$, kütle betonunda yaklaşık 0,002 ilâ 0,007 m²/h değeri kullanılabilir.
- ✓ Isıl iletim katsayısı (k) : betonun ısı transfer etme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Bir çok beton için yaklaşık 1,5 ilâ 4,5 W/m °K arasında değişir.
- ✓ Termal genleşme katsayısı (α_c) : Sıcaklık değişimlerine karşı betonun genleşme oranıdır. Betonda ortalama $7,4 \times 10^{-6}$ ilâ 13×10^{-6} °C⁻¹ arasında değişir.

AMAÇ

Kütle betonu tasarımında mineral ve kimyasal katkı kullanılmasının önemli bir yeri vardır. Özellikle hidrasyon ısısının azaltılması ancak hidrasyon ısısı düşük çimento ve bağlayıcılar ile mümkün olabilmektedir.

Düşük hidrasyon ısı çimento bulunmadığı durumlarda ise puzolanik malzemelerden (mineral katkı) faydalanmak kaçınılmazdır. Diğer bir husus ise kimyasal katkıların gerekli durumlarda kullanılması konusudur. Kütle betonunda adyabatik sıcaklık artışını kontrol etmek amacıyla özellikle çimento hidrasyon hızını yavaşlatıcı kimyasalların kullanılması (priz geciktirici kimyasal katkı) oldukça önemlidir. Ayrıca gerekli yerlerde hava sürükleyici katkıların kullanılması da betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu makalemizde bu konularla ilgili özet bilgiler verilecektir.

MALZEMELER VE KARIŞIM ORANLARI TASARIMI

Diğer betonlarda olduğu gibi kütle betonu da çimento, agrega, su ve sıklıkla puzolanlar ve beton katkı maddeleri kullanılarak tasarlanmaktadır. Kütle beton karışım elemanları miktarı tayininde amaç; işlenebilirlik, düşük sıcaklık artışı, boyutsal kararlılık, ekonomi, çatlak oluşumlarının engellenmesi, dayanıklılık, yeterli dayanım ve özellikle su yapılarında düşük su geçirgenlik kriterlerinin sağlanmasıdır. Bu kısımda geçmiş tecrübeler çerçevesinde kütle beton inşasında başarı ile kullanılmış olan malzemeler, malzeme seçimi ve karışım oranları tasarımı ile ilgili bilgiler aktarılmaktadır.

Çimento

Kütle betonunda aşağıda belirtilen çimento türlerinin kullanılması uygun görülmektedir:

- a) Düşük hidrasyon ısı Portland çimentosu,
- b) Portland çimentosu+mineral katkı veya katkılı çimento.

Portland çimentosu, mineral katkı (puzolan) veya başka çimentolar ile birlikte kullanıldığında, malzemelerin karışımı beton santralinde ayrı-ayrı yapılmaktadır. Ekonomi ve düşük hidrasyon ısı toplam çimento miktarının sınırlandırılması ile gerçekleştirilebilmektedir. Normal Portland çimentoları beton yapıların çoğunda kullanılabilir. Ancak, kütle betonunda yüksek hidrasyon ısı ve dolayısı ile yüksek sıcaklık riski nedeni ile tek başına kullanılması önerilmez. Portland çimentosu ile birlikte mutlaka uygun bir puzolanik malzeme (mineral katkı) kullanılmalıdır.

Hidrasyon ısı orta dereceli olan portland çimentolarında erken ısı gelişimi yüksek olan trikalsiyum alüminat (C_3A) bileşeni en fazla %8 ile sınırlandırılmaktadır. Buna ilave olarak bazı şartnamelerde trikalsiyum alüminat ve trikalsiyum silikat (C_3S) toplamının en fazla %58 olması yanı sıra hidrasyon ısısının 7 günde en fazla 70cal/g olması kriteri bulunmaktadır.

Söz konusu şartnamelerde belirtilen ek kriterlerin ($(C_3A + C_3S) \leq \%58$ ve/veya 7 günlük hidratasyon ısı $\leq 70 \text{ cal/g}$) dikkate alınması durumunda 28 günlük basınç dayanımı kriteri de daha düşük bir değere çekilebilmektedir.

Kütle betonlarında hidratasyon ısısının oldukça düşük olmasının gerekli olduğu durumlarda düşük hidratasyon ısıli portland çimentolar da kullanılabilir. Ancak, düşük hidratasyon ısıli çimentoların temininin zor olması ve hidratasyon ısıli gelişiminin başka bazı yöntemler kullanılarak kontrol altına alınmasının mümkün olmasından dolayı son yıllarda kullanılmamaktadır. Bu tür çimentolarda trikalsiyum alüminat (C_3A) bileşeni en fazla %7, trikalsiyum silikat (C_3S) bileşeni en fazla %35 ve dikalsiyum silikat (C_2S) bileşeni ise en az %40 ile sınırlandırılmaktadır.

Sülfata dayanıklı portland çimentosu hem düşük alkali ve hem de düşük hidratasyon ısıli olduğundan dolayı tercih edilebilmektedir.

Katkılı çimentoların da kütle betonlarında kullanılması oldukça yaygın bir uygulamadır. Portland çimentosunun ince puzolan ile karıştırılması veya portland çimentosunun puzolan ile birlikte öğütülmesi sureti ile erken dayanımı düşük çimento elde edilebilmektedir. Bu tip çimentolarla bazı şartnamelerde belirtildiği üzere hidratasyon ısısının 7 günde en fazla 60 cal/g ve 28 günde de en fazla 70 cal/g olması kriteri sağlanabilmektedir.

Puzolanlar ve Öğütülmüş Cüruf

Puzolan silisli veya silisli-ve-alüminli malzeme olup tek başına ya hiç ya da hiç denecek kadar az bağlayıcı özelliğe sahiptir. Ancak, inceliğinin yüksek olduğu ve rutubetin de mevcut olduğu ortamlarda kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girer ve çimentonun su ile reaksiyonu sonucu oluşan C-S-H bileşenini ortaya çıkararak bağlayıcı bir özellik kazanır. Puzolanlar ASTM C 618'de N tipi veya F tipi olarak sınıflandırılmaktadır. Bazı C tipi puzolanlar çimentodakine benzer bileşenler ihtiva etmektedir. Bundan dolayı C tipi puzolanlar çimento gibi bağlayıcı özelliği olup önemli derecede beton dayanımına katkı sağlamaktadır.

Puzolanlar portland çimentosunun hidratasyonu sırasında açığa çıkan hidrate kireç veya kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özelliği olan bileşenler oluşturmaktadır. Puzolanik aktivitesinin yüksek olması için puzolanlar cam veya opal gibi amorf bir yapıya haiz olmalıdır. Kuvars gibi kristal yapıya haiz silisli malzemeler yüksek inceliğe sahip olacak şekilde öğütülmedikçe kireç ile normal sıcaklık koşullarında reaksiyon vermemektedir.

Doğal puzolanik malzemeler, obsidiyen, pumis(süngertaşı), volkanik kül, tuf, kil, şeyl ve diyatomit olarak bulunmaktadır. Doğal puzolanlar genellikle öğütülerek kullanılabilir durumda bulunmaktadır. Ancak bazı volkanik malzemeler doğal durumu itibarı ile öğütülmeden kullanılabilir inceliğe haizdir. Kil ve şeyl ise öğütülmenin ötesinde 650–980°C’de kalsinasyon işlemine tabi tutulmak sureti ile aktif hale getirilmek zorundadır.

Uçucu kül, öğütülmüş veya toz kömürün yanması sırasında açığa çıkan baca tozudur. Karbon içeriği düşük olup portland çimentosu ile yaklaşık olarak aynı inceliğe sahipse ve çok ince cam kürecikleri gibi bir yapıya haiz ise mükemmel bir puzolan olabilmektedir. Şekli ve yapısı nedeni ile betonda kullanıldığında genellikle karma suyu ihtiyacı azalmaktadır. Bir çok durumda uçucu külün daha büyük inceliğe sahip olacak şekilde öğütülmesi, puzolanik aktivitesinin artmasını sağlamaktadır. Ancak, bu işlem küresel tane yapısına sahip olan uçucu külün öğütülme sonrası yapısının bozulması sonucu beton içerisindeki yağlama kabiliyetini azaltabilmekte ve dolayısı ile karma suyu ihtiyacının artmasına neden olabilmektedir. Yüksek silisli F tipi uçucu küllerin puzolanik aktivitesi genellikle mükemmeldir. Bununla birlikte, C tipi uçucu küller yüksek oranda CaO içerebilmekte ve iyi bağlayıcı özelliklere sahip olsa da betonun sülfata karşı dayanıklılığının artırılması veya alkali-silika reaksiyonunun (ASR) önlenmesi amacıyla kullanılmamaktadır. Buna ilave olarak C tipi uçucu küllerin kütle betonda hidrasyon ısısının düşürülmesi amacıyla kullanılması daha az uygun düşmektedir.

Puzolanlar kütle betonda portland çimentosu faktörünün düşürülerek ekonomi sağlanması, hidrasyon ısısının düşürülmesi, yüksek işlenebilirlik sağlanması, sülfat ve alkali-silika reaksiyonu sonucu ortaya çıkan hasar oluşumunun azaltılması amacıyla kullanılabilir. Bununla birlikte, farklı puzolanların değişik özelliklere haiz olabileceği göz ardı edilmemelidir. Bazı puzolanlar düşük erken dayanım, yüksek kuruma rötresi ve dolayısı ile düşük dayanıklılık gibi problemleri de beraberinde getirebilmektedir. Bir puzolan kullanılmadan önce projede kullanılacak olan çimento ve agrega ile birlikte deneye tabi tutularak beton ekonomisi ve kalitesine katkı sağlayıp sağlamayacağı belirlenmelidir. Portland çimentosuna kıyasla, katkılı çimentolarda puzolanik etkiden kaynaklanan dayanım gelişimi erken yaşlarda yavaş olmakta ancak ileriki yaşlarda daha hızlı seyretmektedir. İleriki yaşlarda aynı dayanıma sahip olması tasarlanan betonlarda, puzolanlı portland çimentosu kullanılan betonun erken yaşlardaki dayanımının portland çimentosu kullanılan beton dayanımına kıyasla daha düşük olması beklenmelidir. Kütle betonunun erken dayanımının yüksek olması gerekli olan bazı kısımlarında kütle beton karışımından farklı bir beton tasarımı kullanılabilir. Kütle betonunda puzolan kullanıldığı durumlarda puzolanın

düşük dozda kullanılması veya hiç kullanılmaması sureti ile erken dayanım hedefine ulaşılabilir. Ancak, alkali-agrega reaksiyon riski mevcutsa puzolan mutlak surette kullanılmalı, erken yaşlarda yüksek dayanım portland çimentosu kullanım dozajının artırılması sureti ile sağlanmalıdır.

Özellikle doğal puzolanların, reaktif agrega kullanılan betonda alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan genleşmenin azaltılması açısından oldukça etkili olduğu saptanmıştır [2]. Genleşmedeki azalma miktarı kullanılan puzolanın kimyasal yapısı, inceliği, ve kullanım dozajı ile değişmektedir. Bazı puzolanlarda, genleşmedeki azalma %90'ı aşabilmektedir. Puzolanlar genleşmeyi çimentodaki alkalileri agrega ile reaksiyona girmeden önce tüketmesi yolu ile azaltmaktadır [3]. Alkali-reaktif agrega kullanılmasının zorunlu olduğu durumlarda, düşük alkalili çimento ve genleşmeyi azaltıcı etkisi kanıtlanmış puzolan kullanımı en iyi yaklaşım olmaktadır.

Corps of Engineers tarafından yapılan deneysel çalışmalara göre kütle betonunun gerilmelerin daha düşük olduğu iç kısımlarında daha yüksek oranda puzolan kullanılması ekonomi sağlamak ve gerekli dayanım daha ileri yaşlarda sağlanabilmektedir. Laboratuvar sonuçlarına göre, 53 kg/m³ çimento dozajlı ve uçucu kül kullanılan ve eşdeğer çimento dozajı 112 kg/m³ olan hava sürüklenmiş kütle betonunda karma suyu 60 kg/m³ olmasına karşın oldukça işlenebilir bir karışım elde edilebilmiştir. Islak elenmiş betondan $\phi=150\text{mm}$, $h=300\text{mm}$ ebatlarında silindir şeklinde alınan beton numunelerin bir yıllık basınç dayanım değerlerinin ise 21 MPa mertebesinde olduğu tespit edilmiştir [2].

Agrega tane şekli ve bunun betonun işlenebilirliği üzerindeki olumsuz etkisi, puzolan kullanımının işlenebilirliği artırma etkisi ve hava sürükleyici ve/veya diğer katkı maddeleri ile rahatlıkla çözümlenebilecek bir noktaya gelmiştir [2].

İnce öğütülmüş yüksek fırın cürufu da portland çimentosuna ilave edilmek sureti ile kütle betonunda bağlayıcı olarak kullanılabilir. Portland çimentosu ile birlikte kullanıldığında hidrasyon ısısının 7 günde 60cal/g değerinin altına düşmesi için toplam bağlayıcının en az %70'i oranında kullanılması gerekebilmektedir. Yüksek fırın cürufu hidrasyon hızının düşük olması nedeni ile hidrasyon ısısını genellikle düşürmektedir. İnce öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılması betona bir çok avantajlar da sağlamaktadır. Bunlar düşük geçirgenlik, reaktif agrega kaynaklı genleşmenin kontrolü, işlenebilirliğin artırılması, sülfata karşı dayanıklılık olarak sıralanabilir. Ancak, bu avantajlardan yararlanabilmek için tras, uçucu kül vb. puzolanlardan çok daha yüksek oranlarda cüruf kullanılması gerekmektedir.

Kimyasal Katkı Maddeleri

Kütle betonu açısından önemli etkileri olan katkı maddeleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- a) Hava sürükleyici,
- b) Su azaltıcı,
- c) Priz geciktirici,
- d) Su azaltıcı ve priz geciktirici.

Priz hızlandırıcı katkı maddeleri, erken yaşlarda yüksek dayanımın gerekli olmaması ve hidrasyon hızını artırmasından dolayı kütle betonunda kullanılmamaktadır. Kimyasal katkı maddeleri henüz plastik durumda olan kütle betonuna önemli faydalar sağlamaktadır. Bunlar; işlenebilirliği artırması ve/veya karma suyu ihtiyacını azaltması, priz başlangıcını geciktirmesi, terleme hızı ve kapasitesini geliştirmesi, ayrışmayı engellemesi, slamp kayıp hızını azaltması olarak sıralanabilir.

Kimyasal katkı maddeleri sertleşmiş kütle betonuna da önemli faydalar sağlamaktadır. Bunlar; sertleşme sürecinde hidrasyon ısısını kontrol etmesi, dayanımı artırması, çimento dozajını düşürmesi, dayanıklılığı artırması, geçirgenliği azaltması ve aşınma/kavitasyon dayanımını artırması olarak sıralanabilir.

Hava sürükleyici katkı maddeleri betona karışım esnasında küçük hava kabarcıkları sürüklemektedir. Bunun sonucunda işlenebilirlik artmakta, ayrışma azalmakta, terleme azalmakta, geçirgenlik düşmekte ve donma-çözülmeye karşı dayanıklılık artmaktadır. Hava sürüklenmesi çimento dozajı düşük olan beton karışımlarında işlenebilirliği büyük çapta arttırmakta ve tane şekli ve granülometrisi iyi olmayan agreganın kullanılmasını tolere edebilmektedir. Buna ilave olarak betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerini de kolaylaştırmaktadır. Sürüklenmiş her %1 hava işlenebilirliği artırırken slamp kaybı olmaksızın karma suyunu %2-4 mertebesinde azaltabilmektedir. Betonun donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığı hava sürüklenmiş betonda oldukça üst düzeydedir. Ancak çimento matrisindeki hiç bir noktanın en yakın hava kabarcığına olan uzaklığı 0.2 mm'den fazla olmayacak şekilde hava kabarcıkları homojen bir dağılım arz etmelidir.

Sürüklenmiş hava doğal olarak çoğu betonun dayanımını düşürmektedir. Çimento dozajı sabit tutulduğu ve aynı slamp değerinde hava sürüklenmesinin karma suyundaki azaltma etkisinden istifade edildiği takdirde düşük dozajlı kütle betonlarında dayanım üzerinde önemsenmeyecek düşüş veya hafif bir artış meydana gelmektedir. Hava sürükleyici katkı maddesi kullanım dozajı sabit tutularak gerçekleştirilen deneyler sürüklenmiş hava oranının agrega granülometrisi, agrega tane şekli, çimento dozajı, başka katkı maddelerinin

kullanılması, karıştırma süresi, slamp, ve beton sıcaklığına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir [2]. Sabit hava sürükleyici katkı dozajında, hava oranı 150mm'ye kadar artan slamp ile artmakta; ince madde miktarındaki artış, beton sıcaklığındaki artış ve karıştırma süresinin uzaması ile düşmektedir. Uçucu külün aktif karbon içermesi durumunda, daha yüksek dozajda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılması gerekmektedir. Çoğu şartname elek göz açıklığı 37,5mm olan elekten kütle betonu ıslak elendikten sonra elde edilen taze beton numunesinde yaklaşık olarak %5 hava olması gerektiğini belirtmektedir.

Su azaltıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri aşağıda belirtilen bileşenlerin bir ya da daha fazlasını içermektedir.

- a) Lignosülfonik asit
- b) Hidroksilli karboksilik asit
- c) Polimerik karbohidratlar,
- d) Naftalin ve melamin esaslı yüksek oranda su azaltıcılar.

Priz geciktirici katkı maddeleri kütle betonunun daha uzun süre plastik kıvamda kalmasını temin ederek üst tabaka yerleştirilinceye kadar geçen süre zarfında alttabakanın prize başlamasını geciktirmekte ve böylece üst tabakanın vibrasyonla sıkıştırılma işlemi esnasında alt tabaka ile daha iyi kaynaşmasını mümkün kılmaktadır. Su azaltıcı katkı maddeleri karma suyu ihtiyacını azaltmak, beton dayanımı arttırmak veya daha düşük çimento dozajında aynı dayanım değerini yakalamak amacıyla kullanılmaktadır. Yukarıdaki su azaltıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri türlerinden ilk üçü kullanıldığında %10 mertebesinde su azaltma oranı gerçekleşmekte olup priz başlangıcı en az bir saat gecikmekte (slamp kaybı olmaksızın) ve beton dayanımı kayda değer düzeyde artmaktadır. Geciktirici etkili bir katkı kullanıldığında 12 saat sonraki dayanım değeri katkı kullanılmayan şahit beton ile aşağı yukarı aynı seviyede olmaktadır. Çimento dozajı, çimentonun kompozisyonu, sıcaklık ve diğer etkenlere bağlı olarak su azaltıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri kullanılması 1, 3 ve 28 gün ve daha sonraki yaşlarda beton dayanım değerlerini önemli seviyede arttırmaktadır. Dayanımdaki artış sadece su/çimento oranındaki azalma ile açıklanamamaktadır. Katkı maddeleri hidrasyon üzerinde çok olumlu etkileri de beraberinde getirmektedir. Karboksilik asit ailesinin terlemeyi arttırdığı dikkate alınmalıdır. Venezüella'da inşa edilen Guri barajının bazı kısımlarında kullanılmış olmakla birlikte, yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleri kütle beton yapımında doğruluğu kanıtlanmış bir kayda sahip bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yüksek plastikleştirici etkisi ile, gerekli olduğu durumlarda işlenebilirliğin artırılması maksadı ile bazı özel kütle beton inşaatlarında kullanılması açısından umut verici yönünü korumaktadır.

Kütle betonu uygulamalarında agrega en büyük tane büyüklüğünün 100 mm'den daha fazla olmasından dolayı ve hidrasyon ısısının düşürülmesi amacıyla mümkün mertebe genellikle düşük çimento dozajı kullanılmaktadır. Bu nedenle kütle betonlarında süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkılar pek tercih edilmez, çünkü su azaltma oranı normal akışkanlaştırıcı kadar elde edilir. Süperakışkanlaştırıcı türü katkılar çimento dozajının yüksek olduğu ve slump değerinin de en az 13-15 cm olan betonlarda daha etkili olduğu söylenebilir. Baraj kütle betonlarında betonun dozajı ve slumpı oldukça düşük olduğundan çok süperakışkanlaştırıcı katkılar genellikle tercih edilmez. Çünkü teknik ve ekonomik avantaj sağlamaz.

Agrega

İnce agrega elek göz açıklığı #4 (4,75mm) olan elekten tamamı geçen tane sınıfıdır. Doğal şekillenmiş tanecikler veya daha büyük boyutlu agrega/ kayaların kırılması yoluyla elde edilen tanecikler veya her ikisinin karışımından oluşabilmektedir. İnce agrega, sert, özgül kütlesi yüksek, dayanıklı olmalı ve üzeri zararlı maddelerle kaplı olmamalıdır. İnce agrega zararlı miktarda kil, silt, toz, mika, organik madde içermemeli ve sınır değerlerinin üzerinde diğer zararlı maddeleri ihtiva etmemelidir. Bu zararlı maddeler karışım oranları tasarımında hedeflenen beton özelliklerinin sağlanamamasına neden olabilmektedirler. Zararlı maddelerin kütlece oranının Çizelge-1'de verilen sınır değerlerin altında olması gereklidir. Hidrolik yapılarda su dalgalanmasına maruz kalan beton yüzeylerinde bu değerler %50 mertebesinde düşürülebilir. Kütle betonunun iç kısımlarında ve sürekli olarak suya gömülü olan kısımlarda ise bu sınır değerler %50 daha arttırılabilir.

Çizelge-1 İnce Agregada İzin Verilen Zararlı Madde Yüzdeleri, En Fazla (kütlece)

Kil Topakları ve Eriyebilir Parçacıklar	3,0
#200 (75µm) Elekten Geçen İnce Madde Miktarı	
Aşınmaya Maruz Betonlar İçin	3,0*
Diğer Betonlar İçin	5,0*
Kömür ve Linyit	
Betonun Yüzey Görünümünün Önemli Olduğu Yerlerde	0,5
Diğer Betonlar İçin	1,0

*Kırmataş ince agrega için elek göz açıklığı #200 olan elekten geçen miktar kil, silt vb. zararlı madde değil de kırma agrega parçacıklarından oluşuyorsa bu sınır değer aşınmaya maruz yapılarda %5'e diğer yapılarda ise %7'ye kadar arttırılabilir.

İnce agreganın granülometrisi betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Kütle betonunda kullanılacak olan ince agreganın için iyi bir granülometri Çizelge-2'de belirtilen alt ve üst limitler arasındaki bant içerisinde olmalıdır. Laboratuvarlarda yapılan çalışmalar daha farklı bant kullanımı ile de başarılı sonuçlar alınabileceğini göstermektedir. Bu da ince agreganın için oldukça geniş bir bant kullanılabilmesinin bir göstergesidir.

Granülometri kriterleri oldukça esnek olmakla birlikte, ince agreganın granülometrisi bir kez ayarlandıktan sonra, beton işlenebilirliği üzerindeki etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla granülometrinin aşağı yukarı sabit tutulması oldukça önemlidir.

Çizelge-2 Kütle Betonunda Kullanılacak İnce Agregada Granülometri Alt ve Üst Sınırları

Elek Göz Açıklığı	Elekte Kalan, % (kütlece)
3/8" (9,5mm)	0
#4 (4,75mm)	0-5
#8 (2,36mm)	5-15
#16 (1,18mm)	10-25
#30 (600µm)	10-30
#50 (300µm)	15-35
#100 (150µm)	12-20
Pan	3-7

*U.S. Bureau of Reclamation

Büyük yapılar için iri agreganın çakıl, kırmataş çakıl veya kırmataş kaya ya da bunların bir veya bir kaçının karışımından oluşmakta olup, elek göz açıklığı #4 (4,75mm) olan elekte kalan ve elek göz açıklığı 6" (150mm) olan elekten geçen agreganın için kullanılan bir ifadedir. Santral binası, veya diğer yoğun demir donatı kullanılan ve kütle betonu kategorisinde yer alan yapılarda 3" (75mm) ve hatta 1 1/2" (37,5mm) gibi daha küçük en büyük tane boyutlu iri agreganın başları ile kullanılabilir.

Agreganın en büyük tane boyutu genellikle demir donatı aralığına bağlı olarak belirlenmekle birlikte yakın civarda bulunan en büyük tane boyutlu agregaya bağlı olarak da belirlenebilir. Agreganın en büyük tane boyutu küçüldükçe karışımda kullanılan çimento miktarı ve buna bağlı olarak hidrasyon ısısı ve termal çatlak oluşum riski artmaktadır. Bunu ortadan kaldırmak için ise çimento dozajı ve beton yerleştirme sıcaklığının düşürülmesi gibi ciddi tedbirlerin alınması zorunlu olmaktadır. Bundan dolayı, betonarme yapım

kurallarına bağlı kalmak kaydı ile en büyük agrega tane boyunun kullanılması en uygun yaklaşımdır.

İri agrega sert, özgül kütlesi yüksek, dayanıklı olmalı ve üzeri zararlı maddelerle kaplı olmamalıdır. Eriyebilen; işlem, taşıma veya depolama sırasında aşınmaya maruz kalan kayanın kullanılmasından kaçınılmalıdır. Donma-çözölmeye maruz kalan kütle beton yapılarında özgül kütlesi 2,5'tan küçük ve su emme oranı %3'ten büyük olan kayanın kullanılması genellikle uygun görülmemektedir. Kimyasal analiz sonucuna göre iri agregada SO_3 olarak hesaplanan sülfat miktarı %0,5'i aşmamalıdır. İri agrega zararlı miktarda kil, silt, toz, mika, organik madde içermemeli ve sınır değerlerinin üzerinde diğer zararlı maddeleri de ihtiva etmemelidir. Bu zararlı maddeler karışım oranları tasarımında hedeflenen beton özelliklerinin sağlanamamasına neden olabilmektedirler. Zararlı maddelerin kütlece oranının Çizelge-3'de verilen sınır değerlerin altında olması gereklidir. Zararlı maddelerden arındırmak maksadıyla iri agrega yeniden yıkamaya tabi tutulmak sureti ile temizlenebilmektedir.

Çizelge-3 İri Agregada İzin Verilen Zararlı Madde Yüzdeleri, En Fazla (kütlece)

Kil Topakları ve Eriyebilir Parçacıklar	0,5
#200 (75 μ m) Elekten Geçen İnce Madde Miktarı	0,5
Hafif Madde	2,0
Diğer Zararlı Maddeler	1,0

Teorik olarak, agrega en büyük tane boyutu arttıkça hedeflenen kalitede beton tasarımı için karışımındaki çimento miktarı azalmaktadır. Bu teori granülometrisi iyi ayarlanmış agregalar için agrega en büyük tane boyutu arttıkça agrega tanecikleri arasındaki boşluk miktarının azalmasına dayanmaktadır. Bununla birlikte, çimento ve agrega tipi aynı olmak kaydı ile en büyük çimento verimliliğine ulaşmak için her basınç dayanımı için optimum en büyük tane boyutu olduğu Higginson, Wallace ve Ore tarafından 1963 yılında ortaya konulmuştur. Agregada en büyük tane boyutu kalıp ve betonarme çelik donatı yerleşim planı ile sınırlı olarak belirlendiğinden dolayı, çelik donatı kullanılmayan bir çok beton yapıda en büyük tane boyutu neredeyse sınırsız bir şekilde belirlenebilmektedir. Elde edilebilirliğine ilave olarak, ekonomik agrega en büyük tane boyutu bu yüzden tasarım dayanımı, işleme, karıştırma, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma sırasında karşılaşılan sorunlara bağlı olarak belirlenmektedir. Düzensiz şekle sahip iri agrega tanecikleri farklı hacim değişikliklerine bağlı olarak daha iri tanecikler etrafından çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Buna ilave olarak düzensiz

şekilli agrega taneleri alt kısımlarında terleme sonucu su ve sıkıştırma esnasında hava birikimi olması nedeni ile boşluk oluşumlarına da sebep olmaktadır. Daha büyük boyutlar kullanılabilmeyle birlikte, 6" (150mm) kullanılabilecek en büyük tane boyutu olarak benimsenmektedir.

Agrega tane şeklinin işlenebilirlik ve sonuç olarak karma suyu ihtiyacı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Akarsu yatağından elde edilen doğal şekillenmiş (yuvarlak şekilli) tanecikler bu açıdan en iyi işlenebilirlik sağlanmasını temin etmektedir. Bununla birlikte, kırmataş ocaklarında kullanılan çağdaş kırıcı ve öğütücüler hem ince hem de iri agrega tane sınıfında uygun tane şekilli agrega üretimini sağlayabilmektedir. Böylece, doğal şekillenmiş agreganın karma suyu ihtiyacı biraz daha az olsa da, uzak bir kaynaktan getirilmesi yakın civardan uygun şekilde kırmataş agrega elde edilmesine kıyasla nadiren daha ekonomik olmaktadır. Ancak, kırıcı ve öğütücü ekipmanın tane şekli açısından uygun özelliklerde agrega üretimine imkan verip vermeyeceğinin saptanması gereklidir. Tane şeklinin uygun olup olmadığının kontrolünde kullanılan yöntemlerden birisi yassı ve uzun taneciklerin her tane sınıfında %20'den fazla olmamasıdır. Yassı tane, genişliğinin kalınlığına oranı 3'ten büyük olan taneler için kullanılırken; uzun tane uzunluğunun genişliğine oranı 3'ten büyük olan taneleri ifade etmektedir.

Beton karışımındaki agrega oranlarının belirlenmesi betonun işlenebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Uygun agrega granülometrisinin sağlanmasını kolaylaştırmak amacıyla agreganın farklı tane sınıflarına ayrılması gereklidir. A.B.D.'de geleneksel olarak Çizelge-4'te verilen iri agrega tane sınıfları kullanılmaktadır. Çizelge 5'te ise bu tane sınıflarının kullanım oranları verilmektedir.

Tecrübeler her tane sınıfında oldukça geniş bir granülometri bandının kullanılabileceğini göstermektedir. Doğal şekillenmiş çakıl kullanıldığında, teorik granülometrinin dışında ocaktaki mevcut agrega granülometrisinin kullanılması ekonomik bir yaklaşım olmaktadır. Bir tane sınıfında gereğinden çok fazla veya az miktarda malzeme olması durumunda, bir kısım malzemenin kullanılmaması, işlenebilirliği oldukça düşük beton üretimi yerine tercih edilmelidir. Kırmataş agrega üretimi sırasında yapılan ayarlamalar yardımı ile kullanılmayan malzeme oranı en düşük seviyeye çekilebilmektedir. İki veya üç aşamalı çağdaş kırıcı kullanılması sureti ile, işlenebilir bir agrega karışım oranı elde edilebilmesi mümkün olmaktadır.

Dünyada bazı projelerde kütle betonunda kesikli granülometri kullanılabilmektedir. Bu granülometride bir ya da daha fazla elekte kalan

malzeme miktarının %0 olması anlamına gelmektedir. A.B.D.'de yaygın olarak kullanılmakta olan sürekli granülometri yaklaşımıdır. Kesikli granülometri malzemenin doğal hali ile kesikli granülometriye sahip olması durumunda ekonomik olmaktadır. Bununla birlikte, deneysel çalışmalar sürekli granülometri yerine kesikli granülometrinin özellikle tercih edilmesinin bir avantaj yaratmadığını ortaya koymaktadır. Sürekli granülometri daha düşük slump değerinde, daha düşük çimento dozajında ve daha az karma suyu ile daha işlenebilir bir beton üretimini mümkün kılmaktadır. Kırmataş agrega tesisi kullanılması durumunda, sürekli granülometriye haiz agrega elde edilmesinde bir zorlukla karşılaşılması, doğal şekillenmiş agrega ocaklarının da mevcut durumu ile genellikle sürekli granülometri kullanılmasına olanak sağlaması da bu yüzden oldukça avantajlıdır.

Çizelge-4 Kütle Betonunda Kullanılacak İri Agregada Granülometri Alt ve Üst Sınırları

Elek Göz Açıklığı	Elekten Geçen, % (kütlece)			
	6"-3" (150-75) mm	3"-1 1/2" (75-37,5) mm	1 1/2"-3/4" (37,5-19) mm	3/4"-#4 (19-4,75) mm
7" (175mm)	100			
6" (150mm)	90-100			
4" (100mm)	20-45	100		
3" (75mm)	0-15	90-100		
2" (50mm)	0-5	20-55	100	
1 1/2" (37,5mm)		0-10	90-100	
1" (25mm)		0-5	20-45	100
3/4" (19mm)			1-10	90-100
3/8" (9,5mm)			0-5	30-55
#4 (4,75mm)				0-5

Çizelge-5 İşlenebilir Kütle Betonunu İçin İri Agregada Tane Sınırları Alt ve Üst Kullanım Sınırları

Agrega En Büyük Tane Boyutu	İri Agregada Tane Sınıfları Kullanım Miktarı, %				
	6"-3" (150-75) mm	3"-1 1/2" (75-7,5) mm	1 1/2"- 3/4" (37,5-19) mm	3/4"-#4 (19-4,75) mm	
				3/4"-3/8"	3/8"-#4
6" (150mm)	20-30	20-32	20-30	12-20	8-15
3" (75mm)		20-40	20-40	15-25	10-15
1 1/2" 37,5mm)			40-55	30-35	15-25
3/4" (19mm)				30-70	20-45

Karma Suyu

Beton karışımında kullanılan su, çimentonun hidratasyon reaksiyonu olumsuz etkileyebilecek maddeleri içermemelidir. İçilebilir özelliklere haiz olan su genellikle beton karma suyu olarak da kullanılabilir. İçme suyu analizleri klorür miktarı açısından beton için kabul edilemez değerleri dikkate almadığından dolayı, şayet beton içerisinde metal aksam ve çelik donatı kullanılması söz konusu ise klorür analizleri yapılmalı ve suyun karma suyu olarak kullanılıp kullanılmayacağı yapı tipine bağlı olarak belirlenmelidir.

Su içerisindeki maddelerin çimentonun dayanım gelişimi üzerinde önemli ölçüde etki yapıp yapmadığının saptanması istendiğinde, mukayeseli dayanım deneylerinin yapılabilmesi için distile su (şahit) ve kuşkulu su ile harç numuneleri hazırlanmalıdır. Kuşkulu su ile hazırlanan numunelerin ortalama dayanımı distile su ile hazırlanan numunelerin ortalamasının %90'ı veya daha altında olması durumunda su karma suyu olarak kullanılmamalıdır. 5000 ppm veya daha fazla miktarda yabancı madde içeren suyun dayanıklılık yönünden zararlı olup olmadığı, dayanım ve boyutsal kararlılık deneyleri yapılmak sureti ile belirlenmelidir. Birkaç ppm hidroklorik asit ve sülfürik asit vb. mineral asitler içeren su dayanım gelişimi yönünden hoş görülebilir. Az miktarda şeker veya şeker türevi maddeler içeren su ise priz süresi üzerindeki etkisi tahmin edilemeyeceği için kullanılmamalıdır.

Karışım Oranların Belirlenmesi

Kütle beton tasarımında temel hedef uygun dayanım, dayanıklılık ve geçirgenlik özelliklerine haiz olan sertleşmiş beton yapımı için bağlayıcı (çimento, puzolan, öğütülmüş cüruf), agrega, su ve katkı maddesi/katkı maddelerinin karışım oranların yeterli işlenebilirlikte ve yerleştirme sonrası en düşük sıcaklık artışı sağlamasına yönelik olarak en uygun şekilde belirlenmesidir. Bu maksatla deneme karışımları yapılarak optimum karışım oranları belirlenmelidir.

Su/çimento veya su/bağlayıcı oranı dayanım, dayanıklılık ve geçirgenlik özelliklerini belirleyen en önemli parametredir. Bunun yanı sıra yerleştirmeyi kolaylaştırmak için yeterli miktarda ince madde de bulunmalıdır. Tecrübeler en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan doğal şekillenmiş agrega kullanılması durumunda en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan kırmataş agrega kullanılmış karışıma kıyasla aynı işlenebilirliğin elde edilebilmesi için %10 daha az çimento inceliğinde malzeme kullanılmasının yeterli olduğunu göstermektedir. Hedeflenen su/bağlayıcı oranında hazırlanan deneme karışımları ve kullanılacak malzemelerin istenilen işlenebilirlikteki karma suyu ihtiyacı, bağlayıcı miktarının rahatlıkla belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Beton karışım elemanları miktarı tayininde ilk adım kütle

betonunun değişik kısımlarında hangi agrega en büyük tane boyutunun kullanılacağı belirlenmesidir. Bir sonraki aşama, istenilen slump değerinde toplam su ihtiyacının belirlenmesidir. Slump deneyi için taze beton elek göz açıklığı 1 1/2" (37,5mm) olan elekten ıslak elenmeli ve elekten geçen numune üzerinde deney gerçekleştirilmelidir. Agrega en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan düşük slamlı ve hava sürüklenmiş betonlarda su ihtiyacı doğal şekillenmiş agregalar için 70kg/m³ ile 90kg/m³ arasında, kırmataş agrega için ise 85kg/m³ ile 115kg/m³ arasında değişmektedir. Agrega en büyük tane boyutu 3" (75mm) olan betonlarda su ihtiyacı yaklaşık %20 daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte, 1 yıllık basınç dayanımının 28 MPa veya üzeri olmasının gerekli olduğu durumlarda 3" (75mm) agrega en büyük tane boyutu daha verimli olabilmektedir.

Karışımında kullanılacak olan bağlayıcı miktarı toplam su ihtiyacının su/çimento oranına bölünmesi ile elde edilebilmektedir. İşlenebilirliğin belirleyici olduğu durumlarda ise istenilen işlenebilirliği temin edebilecek en düşük çimento dozajı belirlenmektedir. Karışıma giren çimento ve karma suyunun hesaplanması ve hava miktarının %3-5 arasında tahmini bir değer olarak kullanılması ile geriye sadece agrega kalmaktadır. Bu aşamada ince ve iri agrega tane sınıflarının oranlarının bilinmesi gereklidir. Optimum oran, agrega granülometrisi ve agrega tane şekline bağlıdır. Bu oranlar arazide belirlenebilmektedir. Agrega en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan doğal şekillenmiş iri ve ince agrega içeren betonlarda toplam agregadaki ince agrega oranı %21 kadar düşük olabilmektedir. Kırmataş agregalar için ise bu oran %25-27 arasında olabilmektedir.

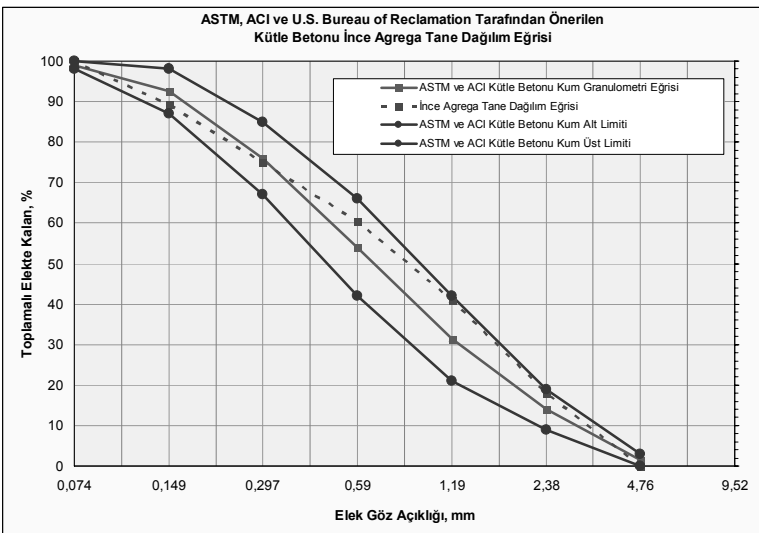
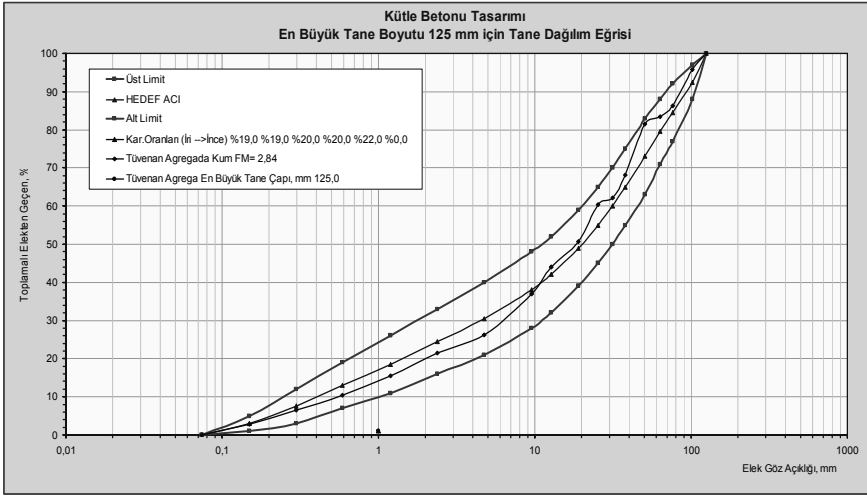
Karışımında bağlayıcı olarak puzolanın da kullanılması durumunda, karışım oranları tayini işlemi değişmemektedir. Ancak, aşağıda belirtilen maddeler dikkate alınmalıdır:

- a) Karma suyu ihtiyacının değişebileceği dikkate alınmalıdır,
- b) Erken yaşlardaki dayanımın kritik olabileceği göz ardı edilmemelidir,
- c) Karışım oranlarının en ekonomik bir şekilde tayini için daha büyük tasarım yaşı (90 veya 180 gün) kullanılması önerisi dikkate alınmalıdır.

Puzolan içeren betonlarda dayanım gelişimi, sadece portland çimentosu kullanılan betonlara kıyasla daha yavaş seyretmektedir. Bununla birlikte, kütle betonu üzerinde yükleme genellikle beton oldukça ileri yaşlarda iken yapılmaktadır. Bundan dolayı, puzolan içeren kütle betonu genellikle 90 gün ile 365 günlük dayanım değerleri dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Kütle betonunun tasarlanan fonksiyonlarını yerine getirebilmek için erken yaşlarda dayanım gereksiniminin olmamasına karşın, çoğu yapıda üst tabaka kalıpları

bir alt tabakaya ankrajla sabitlenmektedir. Bundan dolayı erken yaşlardaki dayanım, ankraj tespit sistemini taşıyabilecek kadar yeterince büyük olmak zorundadır. Bununla birlikte özel tasarım kalıp ve ankraj sistemleri yüksek puzolan veya düşük çimento dozajlı betonlar için çözüm olabilmektedir.

Aşağıda Şekil 1 ve Şekil 2'de bir beton ince kemer baraj gövdesinde kullanılan tüvenan ve ince agrega (en büyük tane boyutu = 125 mm) tane dağılım eğrileri verilmektedir. Kütle betonunda kullanılacak olan agrega tane dağılım eğrilerinin bu sınırlar içerisinde olması tavsiye edilmektedir.



Sıcaklık Kontrolü

Tamamı veya birkaçı tedbir olarak kütle betonunda kullanılabilen dört etkili sıcaklık kontrol programı şu şekilde sıralanabilir:

- a) Bağlayıcı malzeme miktarı kontrolü - bağlayıcı tipi ve miktarı hidrasyon ısısı potansiyelini azaltabilmektedir.
- b) Önsoğutma - Karışımda kullanılacak olan malzemelerin soğutulması taze beton sıcaklığının daha düşük seviyelere çekilmesini sağlamaktadır.
- c) Ard-soğutma - Hidrasyon sonucu artan sıcaklığın dengelenmesi amacıyla içerisine yerleştirilen soğutma tesisatı ile sıcaklık artışı sınırlandırılabilir.
- d) Yapı yönetimi - mükemmel planlanma, yapım yöntemleri, betonun üretiminden yerleştirilmesine kadar geçen aşamalar ile ilgili bilgi birikiminin iyi kullanılması yardımıyla aşırı sıcaklık farklılıklarının oluşması engellenebilmektedir.

Küçük yapılarda, sıcaklık kontrolü için beton işlerinin soğuk periyotlarda (geceleri, soğuk aylarda vb.) yapılması gibi tek bir tedbir alınması yeterli olabilmektedir. Bununla birlikte daha büyük yapılarda, bağlayıcı miktarının azaltılması, puzolan kullanımı, agreganın ve karma suyunun önsoğutma işlemine tabi tutulması (karma suyunun bir kısmının yerine buz kullanımı) gibi tedbirlerin alınması sureti ile beton yerleştirme sıcaklığı düşürülebilmektedir. Hava sürükleyici veya diğer katkı maddelerinin kullanımı hem taze ve hem de sertleşmiş beton özelliklerini geliştirerek betonun uygun boyutta bloklar halinde yerleştirilmesini, yerleştirme sıklığının artırılmasını, tabaka kalınlığına müdahale edilmesi sureti ile inşa programının koordine edilmesini sağlamaktadır. Özel karıştırma ve yerleştirme ekipmanları betonun karıştırılmasından yerleştirilmesine kadar geçen süreci çevre sıcaklığından fazla etkilenmeden hızlı bir şekilde tamamlamasını temin etmektedir. Su kürü sonrası buharlaşma yolu ile soğumanın sağlanması, beton içerisine yerleştirilen tesisat ile sertleşmiş betonun soğutulması ve yüzeylerin yalıtılması yolu ile iç ve dış kısımlar arasında sıcaklık farklılıklarının en alt seviyeye çekilmesi de etkili tedbirlerdir.

İnce agreganın soğutulması pratik olmamakla birlikte iri agrega rahatlıkla soğutulabilmektedir. Karma suyunun bir kısmı ya da tamamının buz olarak karışıma konulması da etkin bir yöntemdir. Sonuç olarak taze beton sıcaklığı 10°C veya altına rahatlıkla çekilebilmektedir. Daha düşük sıcaklıkların elde edilmesi genellikle çok zordur. Taze beton sıcaklığının düşürülmesi amacıyla karma suya sıvı nitrojen enjekte edilmesi işlemi de kullanılabilir. Çoğu durumda sıvı nitrojen yardımı ile taze beton sıcaklığı 18°C'nin altına başarı ile çekilebilmektedir. Sıcaklık düştükçe su ihtiyacı da azaldığından dolayı, soğutulmuş beton oldukça avantajlıdır.

Sıcaklık artışını sınırlamanın başlıca yolu, bağlayıcı malzemenin tipi ve miktarının kontrol altına alınmasıdır. Bu yüzden tasarım çalışmalarında istenilen dayanım değerinin en düşük bağlayıcı kullanılarak sağlanması hedeflenmelidir. Bağlayıcı miktarının azaltılmasındaki tek engel işlenebilir bir karışım elde edebilmek için karışımda olması gerekli olan çimento inceliğindeki en az malzeme miktarıdır. Puzolan, hava sürükleyici katkı maddesi ve diğer katkı maddelerinin yardımcı olarak kullanılmaması durumunda kütle beton tasarımı, termal çatlak oluşumlarına engel olabilmek amacıyla çimento dozajı düşük seviyede tutulurken, işlenebilirliğin de sağlanması mücadelesine sahne olmaktadır.

Bağlayıcı malzeme üzerinde 7 günde 70cal/g veya 60cal/g gibi hidrasyon ısı kriterlerinin uygulanması, sıcaklık artışını kontrol altına almaktadır. Düşük hidrasyon ısı bir bağlayıcı dozajı 140 kg/m³'ü aşmadığı durumlarda sıcaklık farkı 19°C'yi geçmemektedir.

Kütle betonunda adyabatik sıcaklık artışı ve sıcaklık gradienti

Çimento ile su arasında meydana gelen ekzotermik reaksiyon nedeniyle kütle betonunda oluşan sıcaklık artışı ve beraberinde getirdiği problemlerin anlaşılabilmesi amacıyla ısı transferi kanunlarından faydalanmak gerekmektedir. Bu amaçla oluşturulan eşitliklerin çözülebilmesi için farklı metotlardan faydalanılmaktadır. Kütle betonunda aşılması gereken problemlerden bir tanesi termal gerilimlerden dolayı beton çatlamadan ano kalınlığının artırılması ve üzerine yapılacak olan diğer anonun da hızlı bir şekilde üzerine dökülmesidir. Bu sağlandığı takdirde beton döküm hızı artacak ve proje daha hızlı bitirilecektir ve sonuçta oldukça büyük miktarda tasarruf sağlanmış olacaktır. Kütle betonlarında sıcaklık artışı sistemin adyabatik olduğu kabulü ile aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$\Delta T_a = \frac{M_c \times Q_h \times \alpha(t)}{\rho \times C}$$

Burada, M_c toplam bağlayıcı (çimento+puzolan), kg, Q_h çimentonun toplam hidrasyon ısı, kJ/kg, $\alpha(t)$ çimentonun t zamanındaki hidrasyon derecesi ve ρ betonun yoğunluğu, kg/m³ ve C ise betonun özgül ısısıdır, kJ/kg°C. Bu eşitlik ile hesaplanan adyabatik sıcaklık artışı ve kütle betonundaki gerçek sıcaklık artışı deneysel olarak da doğrulanmalıdır.

Yukarıdaki eşitlik yardımı ile bulunan ve betonun merkezinde ulaşılan adyabatik sıcaklık artışına ilâve olarak, kütle betonunda ısı transfer analizi de yapılmalıdır. Kartezyen kooordinat sisteminde kondüksiyonla ısı iletim kanunu Fourier tarafından geliştirilmiştir ve aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + w = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

burada, k , betonun ısı iletim katsayısı, w , hidrasyon ısısını, T sıcaklığı, t zamanı ve x , y ve z koordinat sistemini gösterir. Zamana bağılı hidrasyon ısısı w aşağıda gösterildiği gibi sıcaklığın ve zamanın bir fonksiyonu olarak da verilebilir;

$$w = M_c \frac{dQ_h}{dt} \text{ veya } w = \rho C \frac{dT_a}{dt}$$

buradaki T adyabatik sıcaklık artışının zamanla olan değişimini ortaya koyar. Bu durumda son eşitlik aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

veya kısaca aşağıdaki formda yazılabilir.

$$k \nabla^2 T + w = \rho C T^{\delta}$$

Bu eşitliği çözenin yollarından bir tanesi sonlu-eleman yöntemidir. Öncelikle bu amaca yönelik olarak sınır şartlarının belirlenmesi işlemi gerçekleştirilir ve daha sonra çözüme başlanmalıdır.

SONUÇ

Geçmişte kütle beton tabiri sadece beton ağırlık barajları gibi büyük boyutlu beton yapılar için kullanılmakta idi. Ancak, günümüzde kütle beton teknolojik açıdan termal etki kaynaklı çatlak oluşumlarının olabileceği tüm yapılar için kullanılmaktadır.

Bu tip yapılarda malzeme seçimi ve karışım oranları tasarımı yapılırken dayanıklılık, ekonomi, ve termal etkiler ön planda olup, dayanım sıklıkla ikincil derecede ele alınmaktadır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonun ekzotermik olması ve açığa çıkan ısının transferi için büyük hacimli betonlarda çok uzun bir süreye ihtiyaç olması nedeni ile oldukça yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılabilir. Beton henüz erken yaşlarda iken sıcaklığının yüksek değerlere ulaşması ve sıcaklık kayıp hızının da bu tip beton yapılarda oldukça düşük olması nedeniyle soğuma çok uzun bir süreyi gerektirmektedir. Soğumanın tamamlanarak çevre sıcaklığına ulaşıncaya kadar ise beton dayanımı ve elastisite modülü artmaktadır. Uzun vadede betonun soğuyarak çevre sıcaklığına ulaşması ile birlikte önemli birim boy değişimleri (kısılma) ve dolayısı ile çekme gerilmelerinin oluşumunu da kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle, yapıda ciddi hasar oluşumlarının önlenmesi, yapısal bütünlüğün bozulmaması, aşırı sızma riskinin önlenmesi,

servis ömrünün kısalması ve estetik olarak da kabul edilemez hasar oluşumlarının meydana gelmemesi için termal etkilerin oldukça dikkatle ele alınması zorunludur. Kütle betonu tasarımında dikkat edilmesi zorunlu şartlar aşağıdadır;

- ✓ Düşük hidrasyon ısısına sahip bağlayıcı kullanmak,
- ✓ Toplam bağlayıcı miktarını olabilecek en az değerde kullanmak,
- ✓ Beton döküm ve yerleştirme sıcaklığını ön-soğutma sistemleri ile 10-15°C'de tutmak,
- ✓ Çimento hidrasyon hızını yavaşlatıcı (priz geciktirici) kimyasal ve mineral katkılardan mutlaka faydalanmak,
- ✓ Beton elemanın şekli ve büyüklüğünü doğru seçmek,
- ✓ Gerektiğinde ard-soğutma sisteminin kurulmasını temin etmek,
- ✓ Beton merkez sıcaklığı ile dış sıcaklık arasındaki farkın ortalama 20°C'yi aşmamasını sağlamak,

Hem malzeme yelpazesinin geniş olması ve hem de seçilen malzemelerin karışım oranları belirlenirken çok değişik oranlar ile çalışabilmesi termal etki, dayanıklılık, dayanım, geçirgenlik, ekonomi vb. özelliklerin tamamının kriterleri sağlaması amacıyla çok boyutlu karışım oranları tayini yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu çalışmalar sonucu hem standard(lar) ve/veya şartname(ler) de belirtilen kriterlerin sağlanması ve hem de optimum karışım oranlarına ulaşılması sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] "Cement and Concrete Terminology" reported by ACI Committee 116R-90, ACI Materials Journal; 1990.
- [2] "Mass Concrete" reported by ACI Committee 207.1R-05, ACI Materials Journal; November 1996.
- [3] "Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete" reported by ACI Committee 221R-96, ACI Materials Journal; May 1996.