

3. Boğaz Köprüsü'nde Beton Pompalama Operasyonu*

Göktuğ Aktaş¹, Hayri Pirgon²,
Hüseyin Bulu³, Tarkan Büyükbaşaran⁴,
Abdullah Ceylan⁵, Seyhan Satılmış⁶,
Yılmaz Akkaya⁷

Öz

Yavuz Sultan Selim Köprüsü 322 betonarme ayakları ile dünyadaki en yüksek ve 59 metrelik genişliği ile üzerinden tren yolu geçen dünyanın en geniş asma köprüsüdür. 322 metrelik yüksekliğin 305 metresi betonarme, geri kalanı ise çelik ile imal edilmiştir.

Ayaklarda kullanılan beton, C50/60 mukavemet sınıfında olup, en az 100 yıllık servis ömrünü sağlayacak bir takım dürabilite kriterlerini sağlamaktadır. Temeller de dahil olmak üzere köprünün 4 ayağı için toplam 104.000 m³ beton üretilmiştir.

Bu bildiride, 3. Boğaz Köprüsü'nün beton tasarımının geliştirilme, test ve uygulama aşamalarında kullanılan metodlar ile birlikte beton pompalama operasyonu anlatılmaktadır.

Proje boyunca pompalama operasyonu her bir ayak için tek noktadan herhangisi bir ara transfer olmadan yapılmış ve beton pompalama operasyonunun başarılı şekilde sürdürülebilmesi için betonun yaş ve sertleşmiş beton özellikleri pompalama öncesi ve sonrasında ölçülmüştür. Ayrıca pompalama sırasında beton pompasının hidrolik basıncı ve hat içindeki betonun basıncı sürekli olarak ölçülerek kayıt altına alınmış, her bir aşamada beton dizaynının uygunluğu bu şekilde kontrol edilmiştir.

Bu sistematik çalışma sonucunda Türkiye'nin insan eliyle yapılmış en yüksek betonarme noktasına beton pompalanarak iletilmiştir.

Concrete Pumping Operations for 3rd Bosphorus Bridge Project

The reinforced concrete pylons of the 3rd Bosphorus Bridge in Istanbul, will be the tallest suspension bridge pylons in the world, standing over 322 meters tall. The tower structures are built with reinforced concrete up to a height of 305 meters, and the rest is a steel saddle for main cables. The compressive strength of the concrete used in the project is classified as C50/60 and it fulfils various durability requirements since it needs to provide at least 100 years of service life under rough environmental conditions. Including foundations, 104,000 cubic meters of concrete was used for the construction of 4 pylons of the bridge.

1. Beton Özellikleri

Projede kullanılan beton Betonsa'nın 100+Beton markası ile ürettiği C50/60 sınıfı ve minimum 100 yıllık servis ömrünü sağlamak için gerekli şartları yerine getiren özel bir betondur.

Betonun klorür ve sülfat içeriği bağlayıcı içeriğinin %0,1'ini geçmemekte ve beton NT 492 standardına göre yapılan klor geçirimsizliği testlerinde 3x10⁻¹²m²/s değerinin altında sonuçlar vermektedir.

Taze betonun sıcaklığı şartname gereği pompalama sonrasında kalıba girmeden önce 10°C'nin altına düşmemekte ve 28°C'nin üstüne çıkmamaktadır. Bunu sağlamak için Betonsa tarafından betonda kullanılan karışım suyunun sıcaklığını değiştiren ve gerektiğinde hazır beton karışımına buz ekleyen özel ekipmanlar kullanılmıştır.

Betonun priz süresi özellikle kayar kalıp kullanılan ilk 208 metrede işin gerektirdiği şekilde ayarlanmakta ve gerektiğinde geciktirilmiş, gerektiğinde ise öne alınmıştır.

Projenin maruz kalacağı çevresel etkiler gereği üretilen betonların yüksek dürabilite göstermesi gereklidir. Bu sebeple bağlayıcı kompozisyonunun %50'si öğütülmüş yüksek fırın cürufu, %50'si ise Akçansa Büyükçekmece Fabrikası'nda üretilen CEMI 42,5R LA düşük alkali değerine sahip çimentodan oluşmaktadır.

(1,2,3,4,5) Akçansa Çim. San. Tic. A.Ş.

(6) İctas-Astaldi J.V.

(7) İstanbul Teknik Üniversitesi

* Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen 17. ERMCO Kongresi'nde sunulmuştur

Karışım dizaynında doğal kum (K1) ve kırma kum (K2) ve iki tip iri agrega kullanılmıştır. (4-16 mm mıcır 1 ve 16-22 mm mıcır 2). Karışım oranları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: 1 m³ beton içindeki karışım miktarları

Su Bağlayıcı	Çimento (kg)	Cüruf (kg)	K1 (kg)	K2 (kg)	Mıcır 1 (kg)	Mıcır 2 (kg)	Kimyasal Katkı
0,37	Bağlayıcının %50’si	Bağlayıcının %50’si	457	432	540	360	(Bağlayıcının %1,1’i)

This paper describes the methods applied during development, testing and implementation stages of concrete pumping operations in the 3rd Bosphorus Bridge Project. Concrete pumping until the top height was completed with a single pump line for each pylon without any transfer point. In order to have a smooth concreting operation, properties of fresh and hardened concrete and elements of the pipe line equipment are tested before and after pumping. During the project, pumpability of the concrete was continuously monitored by checking measuring the pressure in the hydraulic system of the pump and the pipe line. This method allowed continuously recording the condition of the concrete and pumping equipment and also suitability of the mixture design. As a result of this systematic work, concrete has been delivered to the highest man made reinforced concrete structure in Turkey by pumping.

2. Proje

3. Boğaz Köprüsü 2 adeti Avrupa, 2 adeti de Asya yakasında olmak üzere toplam 4 adet betonarme kuleye sahiptir. Tüm kuleler 322 metre yüksekliğindedir. Bu yapılar 208 metrelik yüksekliğe kadar kayar kalıp metodu ile daha sonrasında da otomatik tırmanır kalıp metodu ile inşa edilmiştir.

3. Beton pompalama sistemi ve pompalama denemeleri

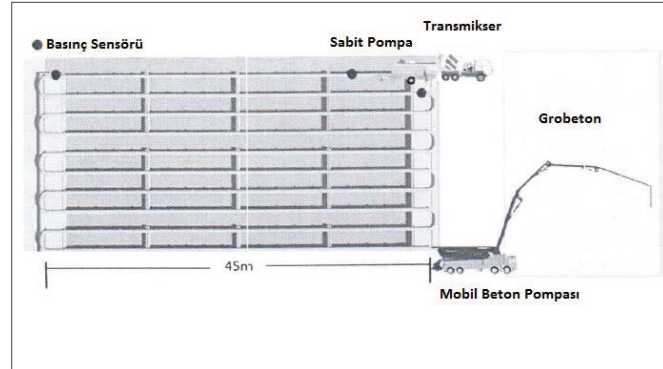
Proje başlamadan önce yüksekliğe ve beton karışım dizaynına bağlı olarak yapılan teorik hesaplamalar sonucu 330 KW motor gücüne ve 350 bar azami teorik hidrolik basınca sahip bir sabit pompa seçilmiştir. Pompalama hattı içindeki azami teorik beton basıncının ise 243 bara ulaşabileceği hesaplanmıştır. Bu sebeple güvenlik payı da hesaba katılarak betonu iletmek 400 bar basınca dayanıklı 125mm iç çaplı 8,8mm

et kalınlığında, birbirlerine iç içe geçecek bağlantılara sahip ZX borular seçilmiştir. Proje boyunca da yapılan ZX boru tercihinin operasyonel açıdan en önemli kriterlerden biri olan sızdırmazlık açısından da başarılı olduğu operasyon sırasında kanıtlanmıştır.

3.1. Test planlaması

Teorik hesaplara göre uygun ekipman ve malzeme seçimi sonrasında ilk varsayımların ve karışım tasarımlarının ope-

rasyona uygunluğunu bir deneme ile test edilmiştir. Bu denemede yapının 322 metrelik fiili yüksekliği yatayda simüle edilmiştir. Bu simülasyonun dizaynında yatay ve dikey pompalama arasında 1,5 katlık basınç farkı oluşacağı öngörülerek 322 metrelik yükseklik, 500 metre uzunluğunda yatay bir boru hattı olarak dizayn edilmiştir. Test düzeneği şeması aşağıdaki Şekil 1 altında verilmiştir. Testte kullanılan ekipmanlar ise Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Pompalama Testi Şeması



Şekil 2: Pompalama Testi Ekipmanları

3.2. Test çalışması

Denemelerde 4 farklı tasarım test edilmiştir. Bu tasarımlara ait karışım oranları aşağıdaki Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2: Pompalama testi karışım tasarımları (1 m³ için)

No.	Su Bağlayıcı	OPC (kg)	GGBS (kg)	S1 (kg)	S2 (kg)	G1 (kg)	G2 (kg)	Beton Katkı Tür ve Miktarı
1	0,37	Bağlayıcının %50’si	Bağlayıcının %50’si	457	432	540	360	Fosfonat (%1,1 Bağlayıcı)
2	0,36	Bağlayıcının %50’si	Bağlayıcının %50’si	441	451	542	361	Polikarboksilat (%1,1 Bağlayıcı)
3	0,36	Bağlayıcının %50’si	Bağlayıcının %50’si	448	440	550	385	Fosfonat+PCE (%1,1 Bağlayıcı)
4	0,36	Bağlayıcının %50’si	Bağlayıcının %50’si	485	441	551	349	Polikarboksilat (%1,1 Bağlayıcı)

Test kapsamında pompalama öncesi ve sonrasında taze beton özellikleri ölçülmüştür. Ayrıca basınç dayanımı için numuneler de yine pompalama öncesi ve sonrasında alınmıştır. Denemelerde pompanın hedef debisi 18m³/saattir. Beton, transmikserden pompaya boşaltıldıktan sonra, 500 metrelik boru hattı boyunca aktarımı yaklaşık 7 dakika sürmüştür. Test sonuçları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3: Pompalama Testi Sonuçları

Test Listesi		Karışım #1		Karışım #2		Karışım #3		Karışım #4		Notlar
		Pompalama Öncesi	Pompalama Sonrası	Pompalama Öncesi	Pompalama Sonrası	Pompalama Öncesi	Pompalama Sonrası	Pompalama Öncesi	Pompalama Sonrası	
Beton	Yayılma (mm)	500	490	540	290	640	630	630	460	
	Hava İçeriği (%)	1,7	1,8	2,5	3,8	2,5	1,3	1,4	2,5	
	Sıcaklık (°C)	26	27	27	28	26	26	26	26	
	Ayrışma	Yok		Yok		Yok		Yok		Gözle Muayene
Pompa	Boru Basıncı	-		-		-		-		Sensörler arızalanmıştır
	Pompa Basıncı (bar)	158		208		138		160		
	Boşaltım (m ³ /s)	19,2		15,5		16,1		17,1		Hedef: 12 üstü
Genel Sonuç		Uygun		Uygun Değil		Uygun		Uygun Değil		

Yapılan testlerde Karışım 1 ile Karışım 3'ün gerçek yapımda kullanılabileceği, Karışım 2 ve Karışım 4'ün ise pompalama esnasında işlenebilirlik kaybı nedeniyle uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca seçilen pompalama ekipmanının betonu kulelerin en üstüne ulaştırmak için uygun olduğu kanıtlanmıştır. Test sonunda Karışım 4 boru hattında tıkanmaya yol açmış ve boru hattının sökülerek derhâl temizlenmeye alınması gerekmiştir.

4. Çalışma

Betonun tek bir pompa ile kulenin en üst noktasına pompalanabilmesi için kule ayakları yüzeyine biri yedek olmak üzere 2 adet çelik boru hattı döşenmiştir. Projede döşenen boru hatlarının toplam yüksekliği 2,4 km'dir. Aynı zamanda bu yedek boru hatları, projedeki kuşak kirişleri ve diyafram duvarları gibi elemanların dökümünde de kullanılmıştır. Kayar kalıp metodu ile yapım hızı her 2 saatte 20cm, tırmanır kalıp için her 5 günde 4.6 metre olmuştur.

Kayar kalıp yapım yönteminde her 2 saatte bir beton sevkiyatı yapılmış ve her döküm ortalama 30 dakika sürmüştür. Bekleme sürelerinde hareketsiz kalan betonunun işlenebilirliğini kaybettiği gözlemlenmiş bu sebeple slump kaybını önlemek amacıyla boru hattındaki beton pompa haznesine geri çekilip tekrar pompalanarak hareket ettirilmiştir. Buna ek olarak pompalama işleminde durma olduğunda betonun içindeki kaba agregalar çökme ve oturma riski yaratmıştır. Bu sebeple pompalama ve durma esnasında betonun boru hattında sertleşmesini ve çökme oturma riskini önlemek için çalışan ekibin zaman çizelgesine uymaları zorunlu tutulmuştur. Kalıp üzerinde çalışmanın uzaması nedeniyle beton dökme işleminin aksaması projede karşılaşılmış olduğumuz birkaç engelden biridir.

Operasyon sırasında karşılaşılan diğer bir sorun ise beton pompalama işleminin belirli süre durmasından sonra tekrar başlamasıyla birlikte ortaya çıkmıştır. Bekleme süresi sonrasında pistonların ilk birkaç vuruşu ile pompa çıkış noktasında tıkanma gözlemlenmiştir. Bir süre sonra bu sorunun pompa basıncının boru hattındaki betonu hareket ettiremediği anda duran betonu daha da fazla sıkıştırmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Bu sorun, beton pompalamaya yeniden başlanıldığında, beton pompalama debisinin düşük seviyelerden kademeli olarak artırılmasıyla çözülmüştür.

208 metre yükseklikten sonra kalıp sistemi değiştirilerek projede otomatik tırmanır kalıp sistemine geçilmiştir. Tırmanır kalıp aşamasında köprünün geometrisinde bağlı olarak tek seferde 160 ila 185 m³ arası beton dökülmüştür.

5. Kalite Kontrol

Döküm sırasında, şantiyeye giriş yapan tüm kamyonlarda slump, yayılma ve sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Şartname gereği slump toleransı +/-30mm olmasına rağmen 200 metre yükseklikten sonra pompalama operasyonunun sağlıklı yürütülebilmesi için +/- 20mm tolerans değeri uygulanmıştır. Bazı

dökümlerde pompalama ekibinden slump değeri kabul edilebilir aralıkta olmasına rağmen pompalama sırasında sorun yaşandığı bilgisi alınmıştır. Bu konunun kontrolü için bir test planı uygulanmış ve öncelikle farklı slump değerlerine sahip betonların reolojik özellikleri yani yük, şekil değiştirme ve zaman faktörleri altındaki davranışları incelenmiştir.

Taze betonun akışı Bingham modeliyle temsil edilmektedir. Bu modelde τ_0 parametresi akışın başlatılabilmesi için gerekli kayma gerilmesini ifade eden akma dayanımıdır. Kayma gerilimi eğrisi ile deformasyon hızı arasındaki eğim de plastik viskozitesi(μ)'yi yani akışa karşı direnci göstermektedir. Bu iki parametre herhangi bir akışkanın akış davranışını açıklamada kullanılabilir.

Taze beton aynı zamanda tiksotropik bir malzemedir çünkü durağan haldeki betonun akışa başlayabilmesi için gerek duyulan kayma gerilimi, akışın sürdürülebilmesi için gerekli olan kayma gerilimine kıyasla daha yüksektir. Uygulanan gerilim statik akma dayanımına ulaştığında beton akmaya başlar ve akışın sürdürülebilmesi için gerekli olan gerilim dinamik akma gerilimi değerine düşürülür. Zamanla statik ve dinamik akma gerilimleri çökme kaybı nedeniyle artar. Reoloji testlerinin sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur;

Tablo 4: Reoloji testleri

Kamyon No.	Çökme (mm)	Reolojik Parametreler	
		τ (Akma dayanımı-Pa)	μ (Plastik viskozite-Pa/s)
41869	160	342,3	158,3
13522	170	321,6	149,0
41866	180	285,3	167,9
41862	200	215,4	107,8
41874	200	207,7	121,4

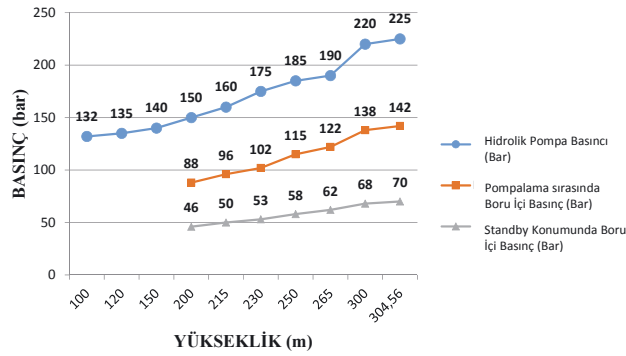
Ölçülen çökme değeri ile akma gerilimi arasında güçlü korelasyon gözlemlenmiş olmasına rağmen viskozitenin farklı bir trend izlediği görülmektedir. Buna bağlı olarak yapılan kapsamlı incelemeden sonra çökme değerinin aynı olmasına rağmen taze betonun yayılmasında farklılık olduğu ve yayılma düşük olduğunda pompaların daha büyük basınçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak farklı bir test yaklaşımı benimsenmiş ve imalat farklılıklarını simüle edebilmesi amacıyla laboratuvar karışımlarında betonun su içeriği azaltılarak su/bağlayıcı oranı düşürülmüştür. Bu testlerde slump değerinin akış gerilimi, yayılmanın ise viskozite ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Bu deneylerin test sonuçları aşağıdaki Tablo 5 altında verilmiştir. Deneylerin sonunda taze beton yayılması dikkatlice izlenerek 340mm yayılma, alt sınır değeri olarak uygulanmıştır.

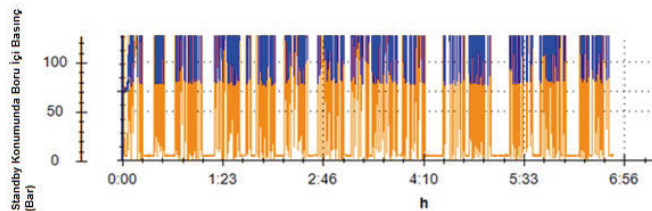
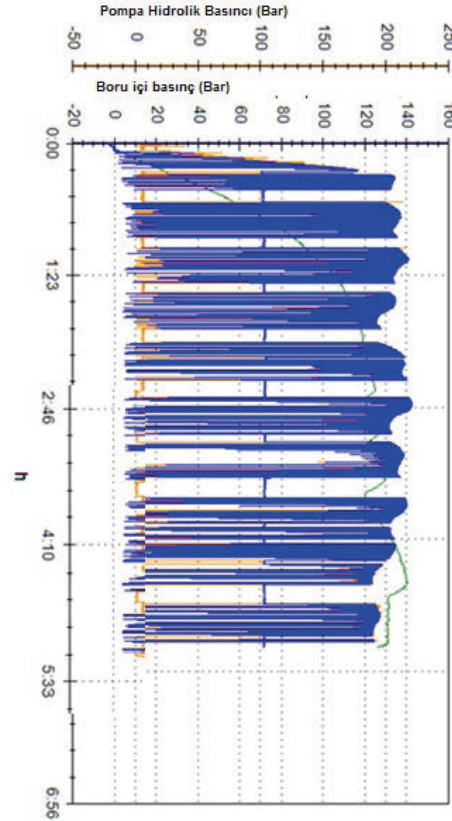
Tablo 5: Reoloji Testleri

Slump (mm)	Yayılma (mm)	Reolojik Parametreler		Su/Bağlayıcı Oranı (W/B)
		τ (Akma gerilimi-Pa)	μ (Plastik viskozite-Pa/s)	
190	310	165	82,2	W/B=0,35
210	400	117,5	47,1	W/B=0,37
220	380	103,8	62,2	W/B=0,36

Operasyon sırasındaki slump ve yayılma kısıtlamalarının sıkı kontrolleri sayesinde pompalama hattındaki boru basınçları ve hidrolik basınçlar (pompalamada ve hareketsiz haldeyken) aynı çökme değerinde (210mm) kaydedilmiştir. Bekleme ve pompalama esnasındaki hidrolik basınç ve boru basıncı değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Boru hattı basınç değerleri 200. metreden sonra yerleştirilen bir sensör yardımıyla izlenmiştir. 200. metreye kadar yalnızca hidrolik basınç kayıt altına alınmıştır.

**Şekil 3:** Yükseklik-Basınç Çizelgesi

Şekil 4 ve Şekil 5'te beton 305 metreye pompalanırken oluşan pompalama ve bekleme koşullarındaki hidrolik basınç ve borular içindeki basınç gösterilmiştir. Pompanın piston vuruş hareketleri nedeniyle piston yükleme ve salınımlarını temsil eden keskin iniş ve çıkışlar mevcuttur. Zikzaklar arasındaki düz çizgiler transmikser değişimleri esnasındaki bekleme süresini göstermektedir. Şekil 5'te bekleme esnasındaki basınç çizelgesi yakından gösterilmiştir.

**Şekil 5:** Beklemede boru basıncı**Şekil 4:** Pompalama esnasında hidrolik pompa basıncı ve boru basıncı

6. Sonuçlar

Test esnasında hidrolik basınç maksimum 160 bar olmasına rağmen, operasyon sırasında gerçek hidrolik basıncın 225 bara kadar yüksekliği gözlemlenmiştir. Bu durum, deney de olsa dikey ve yatay pompa hatlarının pompalama basıncı açısından çok farklı olabileceğinin iyi bir göstergesidir.

Gerçek koşullarla ilişkilendirildiğinde ve pompa yıpranması da dikkate alındığında hidrolik basıncın pompalama kapasitesine dair iyi bir gösterge olduğu anlaşılmıştır.

Bekleme esnasındaki basınç değeri boru hattındaki beton miktarıyla birlikte artmaktadır. Boru hattındaki her bir metrelik yükseklik artışı ile gerçekleşen basınç artışının betonun birim ağırlığı ile orantılı olduğu görülmüştür.

Hattaki her bir metrelik artış sonrasında gözlemlenen basınç artışı pompalama esnasında, durağan halin iki katı olarak gerçekleşmektedir. Bu durum artan statik beton basıncı ile beton miktarı nedeniyle artan sürtünme ile açıklanabilir.

Yayılma değeri beton viskozitesi ile ilgili iyi bir göstergedir.

Pompalama operasyonu sırasında uzun süreli ve sık duruşlar hattın tıkanması olasılığını artırmaktadır. Bu sebeple pompalamanın süreklilik arz edecek şekilde yapılması daha sağlıklıdır.