

SSB Barajlarda Birinci ve İkinci Seviye Termal Analizin Karşılaştırılmasına Yönelik Bir Sayısal Model Çalışması

İnş. Müh. Mesut Yapmış, İnş. Yük. Müh. Mustafa Selvi

E-Posta: msevi@espm.com.tr

Dr. İnş. Y. Müh. İhsan Kaş

E-Posta: ihsankas@espm.com.tr

Turan Güneş Bul. Cezayir Cad. 718.Sokak No:14 Çankaya Ankara
Eser Proje ve Mühendislik A.Ş Tel: (0312) 408 00 00

Öz

Silindire sıkıştırılmış **B**eton (SSB) malzemesi 1970'li yıllardan beri kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte hem dünya çapında hem de ülkemizde tamamlanan ve inşaatı devam eden SSB baraj sayısı giderek artmaktadır. Geleneksel betona göre düşük hidratasyon ısısına sahip olması, hızlı imalat ve daha kolay yerleştirme imkanı sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir.

Kütle betonu olarak büyük hacimlerde dökümü yapılan geleneksel betonda, hidratasyon ısısı nedeniyle ortaya çıkan yapısal çatlaklar SSB baraj tasarımında da dikkat edilmesi gereken bir husustur. İçerisinde bulunan çimentonun azlığı nedeniyle teorik olarak geleneksel betona göre daha az hidratasyon ısısı çıkarması beklenen SSB barajlarda, gövde hacminin büyüklüğü ve SSB imalat teknolojisi termal analiz ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Çevresel şartlara bağlı olarak (hava veya su sıcaklığı, temel kayası koşulları vs.) dökümü tamamlanan SSB'de ısı artışı veya ısı azalışı meydana gelir. Daha sonra zamanla soğuma başlar ve hacimsel bir azalma oluşur. Eğer bu hacimsel azalma betonu dışardan çevreleyen temel kayası, bitişik kütle betonu gibi engellerle tutulur ise betonun çatlamasına neden olabilecek çekme gerilmeleri ortaya çıkar. Çekme gerilmelerinin boyutları, barajın hangi bölgelerinde hangi yoğunlukta oldukları gibi detaylar SSB barajlarda birinci, ikinci ve üçüncü seviye olarak adlandırılan termal analizlerin yapılmasıyla ortaya çıkarılmaktadır. Bu çalışmada, katı ve uygulama projeleri tamamlanmış, inşaat aşamasındaki yüksek bir SSB baraj için yapılan birinci ve ikinci seviye termal analizlere ait detaylar hakkında bilgi verilecektir.

Anahtar sözcükler: SSB, Termal analiz, Termal çatlak, Sonlu elemanlar, Adiyabatik sıcaklık

Giriş

Hemen tüm baraj inşaatlarında doğayla olan mücadele inşaat süresinin planlanandan daha uzun olmasına sebep olabilmektedir. Dolayısıyla güvenlik tedbirlerini bir kenara bırakmadan inşaat hızı ne kadar çok artırılırsa doğayla olan mücadele süresi de o oranda azalacaktır. Buna ek olarak inşaat maliyeti de azalacak ve baraj çok daha kısa sürede faaliyete geçecektir.

Özellikle son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte SSB barajlar “yeni nesil” olarak adlandırılan barajlar arasında yerini almıştır. Bu barajlar düşük çimento dozajına sahip olması ve teknolojisi gereği daha hızlı inşa edilmeleri nedeniyle geleneksel beton barajlara göre daha çok tercih edilmektedirler. Söz konusu malzeme beton olduğu için hızlı imalat sırasında ortaya çıkacak ısı da önem kazanmaktadır. Çünkü çevresel koşullara ek olarak ortaya çıkan hidrasyon ısısı betonun dayanımını olumsuz yönde etkilemekte ve hatta ciddi çatlakların oluşmasına neden olabilmektedir.

SSB barajlar ile ilgili termal analizler, bu tip barajların sayısının artması ve gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte akademik çevrelerde, baraj tasarımı ile ilgilenen kamu kurumları ve özel sektör firmaları arasında son yıllarda güncelliğini artıran konular arasındadır. Bu çalışma termal analiz konusunda sonlu elemanlar yönteminin kullanımına bir örnek teşkil etmektedir. Ayrıca, detayları ilerleyen sayfalarda verilen termal analiz seviyelerinin tasarımcı için ne ifade ettiğinin ve kullanım amaçlarının açıklanması bu çalışmanın bir diğer amacıdır.

Isı Transferi İçin Temel Kavramlar

Beton içinde meydana gelen ısı transferini anlamak için öncelikle betonun termal açıdan sahip olduğu bazı özelliklerin anlaşılması gerekmektedir.

Termal iletkenlik

Isıyı transfer etme hızı veya transfer edebilme oranıdır. Betonun sahip olduğu su içeriği, yoğunluğu ve sıcaklık ısı iletkenliği doğrudan etkilemektedir. Betonun üretildiği agreganın kökenine göre (bazalt, kireçtaşı vs.) değişiklik göstermektedir.

Termal yayılım kapasitesi

Betonun sıcaklık değişimine uyum sağlayabilme yeteneği olarak tarif edilebilir. Termal yayılım kapasitesi iyi olan bir beton kolaylıkla sıcaklık değişimlerine eşlik etmektedir. Matematiksel olarak termal iletkenliğin özgül ısı ve yoğunluk değerlerinin çarpımına bölünmesiyle elde edilir.

Özgül ısı

Bir maddenin birim kütesinin sıcaklığını 1 °C derece yükseltebilmek için gerekli olan ısı enerjisidir. Farklı özelliklere sahip betonlar için hemen hemen aynıdır ve 0.75 kJ/kg °C alınabilir.

Termal genleşme katsayısı

Sıcaklık değişimiyle birlikte birim boyda meydana gelen değişimi veren katsayıdır. Betonun 20 °C’deki genleşme katsayısı ortalama olarak $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ’dir.

Hidrasyon ısısı

Su ve çimento reaksiyonu uzun bir periyot boyunca önemli miktarda ısı ortaya çıkmasına neden olan bir reaksiyondur. Hidrasyon ısısını asıl belirleyen bileşen çimentodur. 28 günlük bir karışımda hidrasyon ısısı 70-110 cal/g arasındadır.

Bir cisimdeki ısı transferi, sıcaklık değişiminin lineer fonksiyonu olan ve Fourier Kanunu ile açıklanan bir kavramdır. Formüle edilirse;

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{Amberg,2003})$$

Formülde q_x x doğrultusundaki ısı transferi, λ ise termal iletkenliktir. Beton içinde ortaya çıkan ısı zamanla dengeye ulaşacağından ısı akışı değişimi aşağıdaki bileşenler ile tariflenebilir;

$$cY \frac{dT}{dt} = R_h - \frac{dq_x}{dx} - \frac{dq_y}{dy} - \frac{dq_z}{dz} \quad (\text{Amberg,2003})$$

Burada R_h hidratasyon ısı değişimi olup beton gövde içindeki enerji değişimini gösterir. Y yoğunluk, c ise özgül ısıdır.

SSB Barajlarda Termal Analiz Seviyeleri

SSB baraj için yapılacak termal analiz, elle yapılabilen bir hesap olabileceği gibi kompleks bir bilgisayar programı kullanımını da gerektirebilmektedir. Temel olarak analiz seviyeleri basitten karmaşığa doğru 1., 2. ve 3. seviye olarak adlandırılmaktadır. Seviye 1 ve seviye 2 için USACE 1110-2-542 sayılı kaynak, seviye 3 için ise 1110-2-536 sayılı kaynak temel referanslar olarak kullanılabilir.

Tasarım mühendisleri açısından herhangi bir projede bu seviyelerden hangisinin kullanılacağı, aşağıda verilen iki başlığın açığa çıkarılması açısından önemlidir.

- Gövde boyunca oluşturulacak düşey derzlerin aralıkları ve yerleri,
- Maksimum SSB yerleştirme sıcaklığı.

Bu iki başlık termal çatlakların ortaya çıkış ve ilerleyiş mekanizmalarının belirlenmesi açısından önemlidir. Çünkü çatlaklar SSB bir barajda görüntünün bozulmasına, sızma problemlerine ve hatta ileri seviyede yapı bütünlüğünün bozulmasına neden olabilmektedir.

Birinci Seviye Termal Analiz

Birinci seviye termal analiz için kabullere, çeşitli basit hesaplara, proje yapımı sırasında elde edilen verilere ve basılı kaynaklardan alınacak bazı değerlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerlerin temin edilmesiyle birlikte basit matematiksel işlemlerin ardından, proje için öngörülen çatlak genişliği esas alınarak gövde boyunca maksimum derz aralığı hesaplanabilmektedir.

İkinci Seviye Termal Analiz

Birinci seviye analizden daha detaylı bir analizdir. Daha çok bilgisayar programları yardımıyla gövde içindeki sıcaklık değişimi, yüzeydeki ve gövde içindeki birim şekil değiştirmeler bu seviye analiz ile elde edilebilmektedir. Olası çatlakların, yapı üzerindeki etkisinin ciddi sorunlara neden olabileceği düşünülüyor ise ikinci seviye termal analiz yerine üçüncü seviye analize geçilmelidir.

Birinci Seviye Termal Analiz Prosedürü ve Elde Edilen Sonuçlar

Birinci seviye termal analiz için gerekli girdiler, kavramsal olarak bildirinin önceki bölümlerinde verilmiştir. Birinci seviye termal analiz sırasında yapılan işlemler son derece basittir. Fakat girdiler ne kadar sağlıklı ise alınan sonuç da o kadar hassas olmaktadır. Bu seviye analizde, SSB'un bütünsel olarak tek seferde dökülüp inşaatın tamamlandığı kabul edilmektedir.

Bu seviyedeki analiz, excel programı yardımıyla hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Analize ait çıktılar Tablo 1 ve Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1 Proje Verileri Ve Analizde Kullanılan Katsayılar.

PROJE VERİLERİ VE TEMEL KATSAYILAR								
Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Eşdeğer Çimento Miktarı Ç+0.5*P	Kret Uzunluğu (m)	Varsayılan Çatlak Genişliği (mm)	Yapı Sınırlama Etki Katsayısı	Beton Elastisite Modülü (MPa)	Temel Elastisite Modülü (MPa)	Temel Sınırlama Etki Katsayısı
Ç	P	A	Y	W	Kr	Ec	Ef	Kf
100	40	120	450,00	2,5	1	17750	13000	0,65

BİRİNCİ SEVİYE TERMAL ANALİZ															
Ortalama Aylık Sıcaklıklar / Bir Önceki Ayın Ortalama Sıcaklığı			Termal Genleşme Katsayısı Cth (millionths / °C)	Hidrasyon Kaynaklı Isı Artışı ΔTad	Birim Uzama Kapasitesi etc (millionths)	Agrega Depo Sıcaklığı (°C)	Beton Döküm Sıcaklığı (°C)	En Yüksek Beton Sıcaklığı (°C)	Maksimum Stabil Beton Sıcaklığı (°C)	Uzun Dönem Sıcaklık Değişimi Δt (°C)	Toplam Birim Deformasyon (mm)	Toplam Birim Uzama (mm)	Toplam Çatlak Genişliği (mm)	Çatlak Sayısı	Derz Aralığı (m)
Aylar	Ort. Sic. (°C) T	Bir Önceki Ay Ort. Sic. (°C) T	N	C=36.1*(A) / 223	D	F=-0.67*(B-T) +B+1.1	G=0.67*(T'-F) +F+1.1	H=(C+G)	(B)	J=(H-B)	E=(J*N*K*Cr)	K=(E-D)	L=(V*K)/1000	M=(L/W)	N=(Y/M)
Ocak	5,30	7,5	10	19,43	90	10,81	8,22	27,64	14,2	13,44	86,96	-3,04	0,00	0,00	0,00
Şubat	5,80	5,3	10	19,43	90	9,34	8,07	27,49	14,2	13,29	85,98	-4,02	0,00	0,00	0,00
Mart	7,60	5,8	10	19,43	90	9,67	9,38	28,81	14,2	14,61	94,49	4,49	2,02	0,81	556,66
Nisan	12,10	7,6	10	19,43	90	10,88	12,80	32,22	14,2	18,02	116,57	26,57	11,95	4,78	94,11
Mayıs	16,70	12,1	10	19,43	90	13,89	16,87	36,30	14,2	22,10	142,93	52,93	23,82	9,53	47,23
Haziran	21,30	16,7	10	19,43	90	16,98	20,97	40,40	14,2	26,20	169,44	79,44	35,75	14,30	31,47
Temmuz	23,70	21,3	10	19,43	90	20,06	23,60	43,02	14,2	28,82	186,42	96,42	43,39	17,36	25,93
Ağustos	23,70	23,7	10	19,43	90	21,67	24,13	43,55	14,2	29,35	189,85	99,85	44,93	17,97	25,04
Eylül	20,20	23,7	10	19,43	90	21,67	21,78	41,21	14,2	27,01	174,69	84,69	38,11	15,24	29,52
Ekim	15,60	20,2	10	19,43	90	19,32	17,93	37,35	14,2	23,15	149,75	59,75	26,89	10,75	41,84
Kasım	10,90	15,6	10	19,43	90	16,24	13,76	33,19	14,2	18,99	122,81	32,81	14,76	5,90	76,21
Aralık	7,50	10,9	10	19,43	90	13,09	10,44	29,87	14,2	15,67	101,35	11,35	5,11	2,04	220,25
Ortalama	14,2														

Şekil 1 Birinci seviye termal analiz özeti

Kullanılan Bilgisayar Programı Ve Sayısal Analiz

Bilgisayar Programı

Sonlu eleman modeli ile yapılan termal analizde TNO DIANA isimli bilgisayar programı kullanılmıştır. TNO DIANA Versiyon 9.4, inşaat mühendisliğinin farklı disiplinlerinde etkin olarak kullanılabilen çok amaçlı bir sonlu eleman programıdır. Yazılım kendi içinde çok sayıda malzeme modeli barındırmaktadır. Benzer şekilde analiz çeşitliliği ve modelde kullanılacak eleman tipleri açısından da oldukça geniş bir kütüphaneye sahiptir.

Analiz Modeli, Program Girdileri ve Malzeme Parametreleri

Analiz modeli projelendirilen barajın maksimum kesiti kullanılarak iki boyutlu olarak hazırlanmıştır. Baraj maksimum kesitinde temelden yükseklik 92.20 m, kret genişliği 8.00 m, taban genişliği 73.50 m'dir. Memba yüzeyi düşey, mansap yüzeyi ise 0.8 Yatay/1Düşey eğime sahiptir. Hazırlanan model ve kullanılan bilgisayar programı aşamalı imalatın analize yansıtılmasına olanak sağlamaktadır. Fakat birinci seviye analiz ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla, aşamalı imalat opsiyonu kullanılmamış; tek bir aşamada inşaatın tamamlandığı kabul edilerek analiz yapılmıştır. Modelde ön yüzde bulunan geleneksel beton (GB), SSB, SSB+Yastık Betonu (YB) ve Temel Kayası ayrı ayrı modellenmiştir. Dış yüzeylere baraj gövdesinin mevsimsel hava sıcaklıklarıyla etkileşime girebilmesi için ara yüz elemanları tanımlanmıştır.

Malzeme Parametreleri

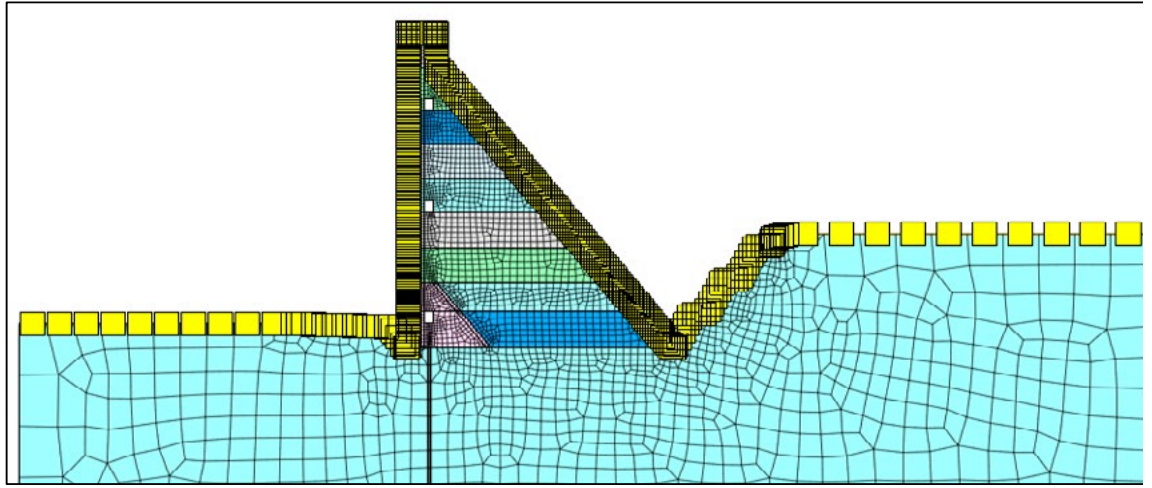
Yapılan analiz sıcaklık akışı ve değişimlerine karşı oluşan birim şekil değiştirmeleri çözümleneceği için, kullanılan modele malzeme - sıcaklık ilişkisini tanımlayacak parametreler girilmiştir. Tablo 2'de de görüleceği üzere ısı sığası, ısıl genleşme katsayısı, yayılım ve iletim katsayıları SSB ve temel elemanları için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Bununla birlikte zamana bağlı beton sıcaklığı artışı da malzeme parametreleri içinde tanımlanan bir diğer değişkendir. Zamana bağlı hidrasyon ısısı artışının maksimum 20 °C olacağı belirlenmiştir. Şekil 3'de gösterildiği gibi ısı artışının büyük kısmı ilk 10 gün içinde gerçekleşecek; ilerleyen zamanda ısı artışı devam edecek ve uzun dönemde 20 °C'nin önemsiz bir miktar daha üzerinde olabileceği öngörülmüştür.

Tablo 2 Modelde Kullanılan Malzeme Parametreleri.

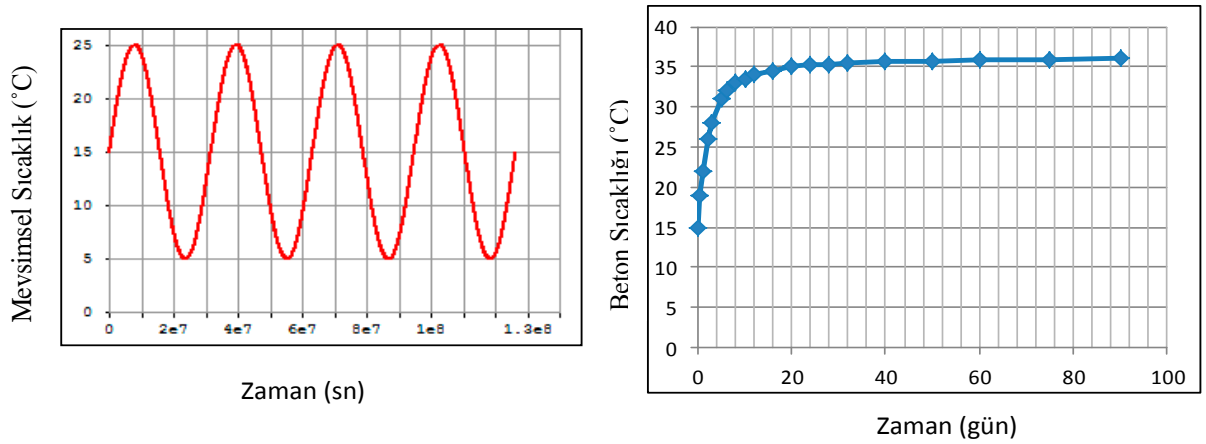
MALZEME PARAMETRELERİ		
	SSB	TEMEL KAYASI
Termal Isı İletim Katsayısı (W/°C)	2.5	2.5
Isı Sığası (J/M ³ °C)	1840000	1840000
Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)	0.00001	0.00001
Birim Ağırlık (KN/m ³)	2.45	2.7
Konveksiyon Katsayısı (W/°C)	7.1	7.1
Poisson Oranı (ν)	0.2	0.2
Basınç Dayanımı (Mpa)	14	4
Elastisite Modülü (Gpa)	17.78	13

Yükler

Yapılan analiz ve değerlendirme sıcaklık etkileri üzerinden olacağı için, dikkate alınan yüklerde sadece sıcaklık kaynaklı yükler olacaktır. Sıcaklık yükleri verilirken, temel kayası için iç sıcaklık sabit ve 10 °C alınmıştır. Beton döküm sıcaklığı ise 15 °C kabul edilmiştir. Projelendirilen baraj yerinde ölçülen meteorolojik veriler kullanılarak elde edilen mevsimsel sıcaklıklar, 1. aşama analizle uyumlu olacak şekilde 5 °C ile 25 °C arasında, her çevrimi 1 yıl süren ve toplamda 4 kez tekrarlayan bir sinüs fonksiyonu olarak verilmiş; başlangıç değeri olarak ise 15°C kabul edilmiştir (bkz. Şekil 3). Analiz 4 yıllık bir zamanı kapsamaktadır.



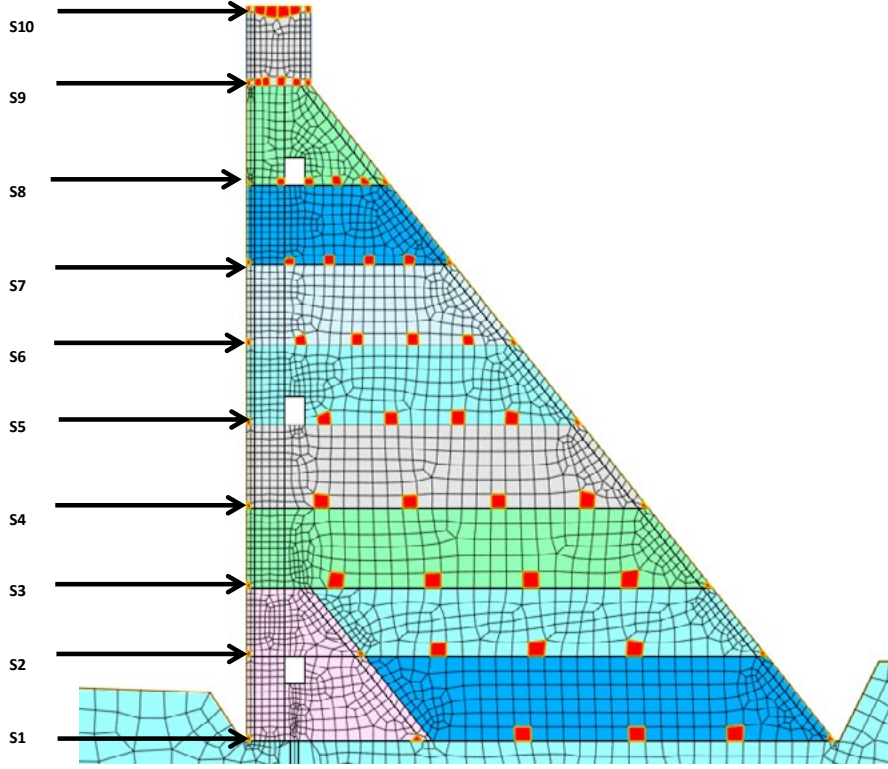
Şekil 2 Sayısal analiz modeli ve mevsimsel sıcaklık yükü.



Şekil 3 Mevsimsel sıcaklık değişimi ve betondaki sıcaklık artış grafikleri

Analiz Sonuçları

Analiz sonuçları değerlendirilirken düşey yönde 10 farklı seviyeden (S1, S2,,S10) birim şekil değiştirmeler ve sıcaklıklara ait değer okuması yapılmıştır. Her seviyede 6 farklı nokta seçilmiştir. Yapılan okumalara ait zaman – birim şekil değiştirme ve zaman - sıcaklık grafikleri çizilmiştir; seçilen dört farklı noktaya ait zaman – sıcaklık grafikleri de burada verilmiştir. Tüm okumaların yapıldığı noktalar Şekil 4’de gösterilmektedir.



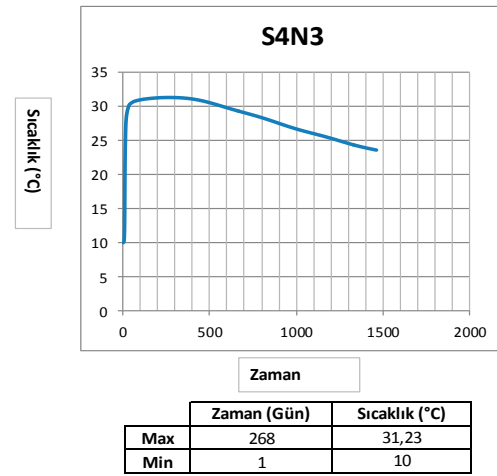
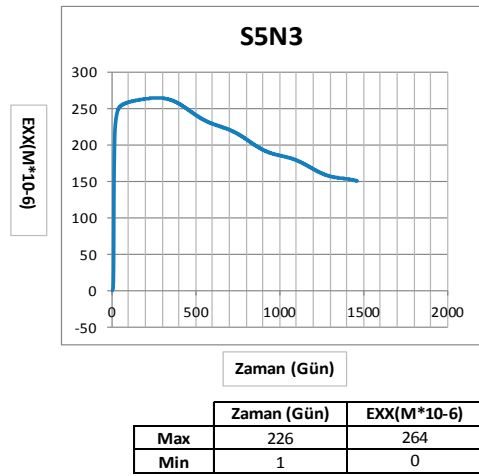
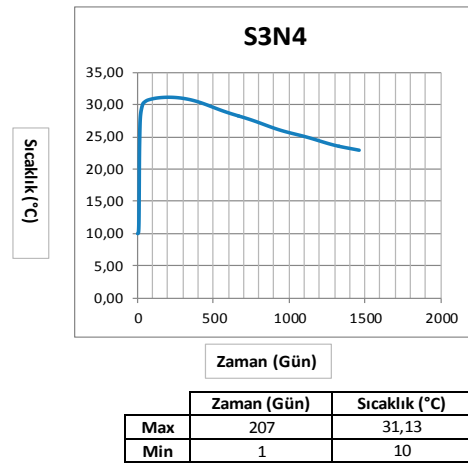
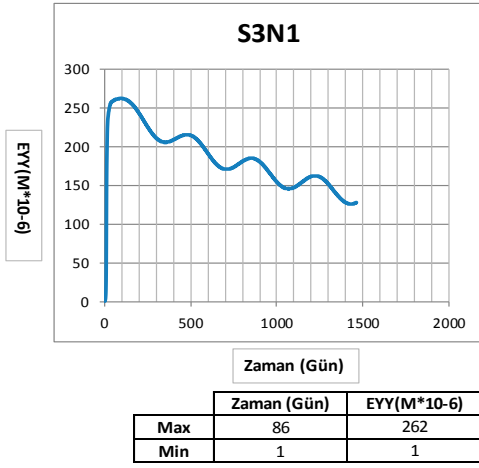
Şekil 4 Okumaların yapıldığı seviyeler ve noktalar.

Analiz sonuçları incelendiğinde, maksimum sıcaklığın 268. günde S4N3 noktasında $31.23\text{ }^{\circ}\text{C}$, maksimum birim şekil değiştirmenin 226. günde Y yönünde S5N3 noktasında $264 \cdot 10^{-6}\text{ m}$ ($264 \cdot 10^{-3}\text{ mm}$) değerinde olduğu görülmüştür. 226. günde gövde içinde oluşan sıcaklık dağılımı ve birim şekil değiştirmeler kütle beton davranışına uygundur. Gerilme artışı sıcaklık farkının en fazla olduğu dış yüzeylerde meydana gelmekte ve bu bölgelerde yüzeysel çatlaklar oluşmaktadır. Dış yüzeyde oluşan birim şekil değiştirmelerin gövde ortasında elde edilen birim şekil değiştirmelere göre çok çok küçük değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Kret boyunca uygulanacak derz aralığı, öngörülen çatlak genişliğinin maksimum birim şekil değiştirmeden betonun birim şekil değiştirme kapasitesinin çıkarılması sonucu bulunan değere bölünmesiyle elde edilmiştir.

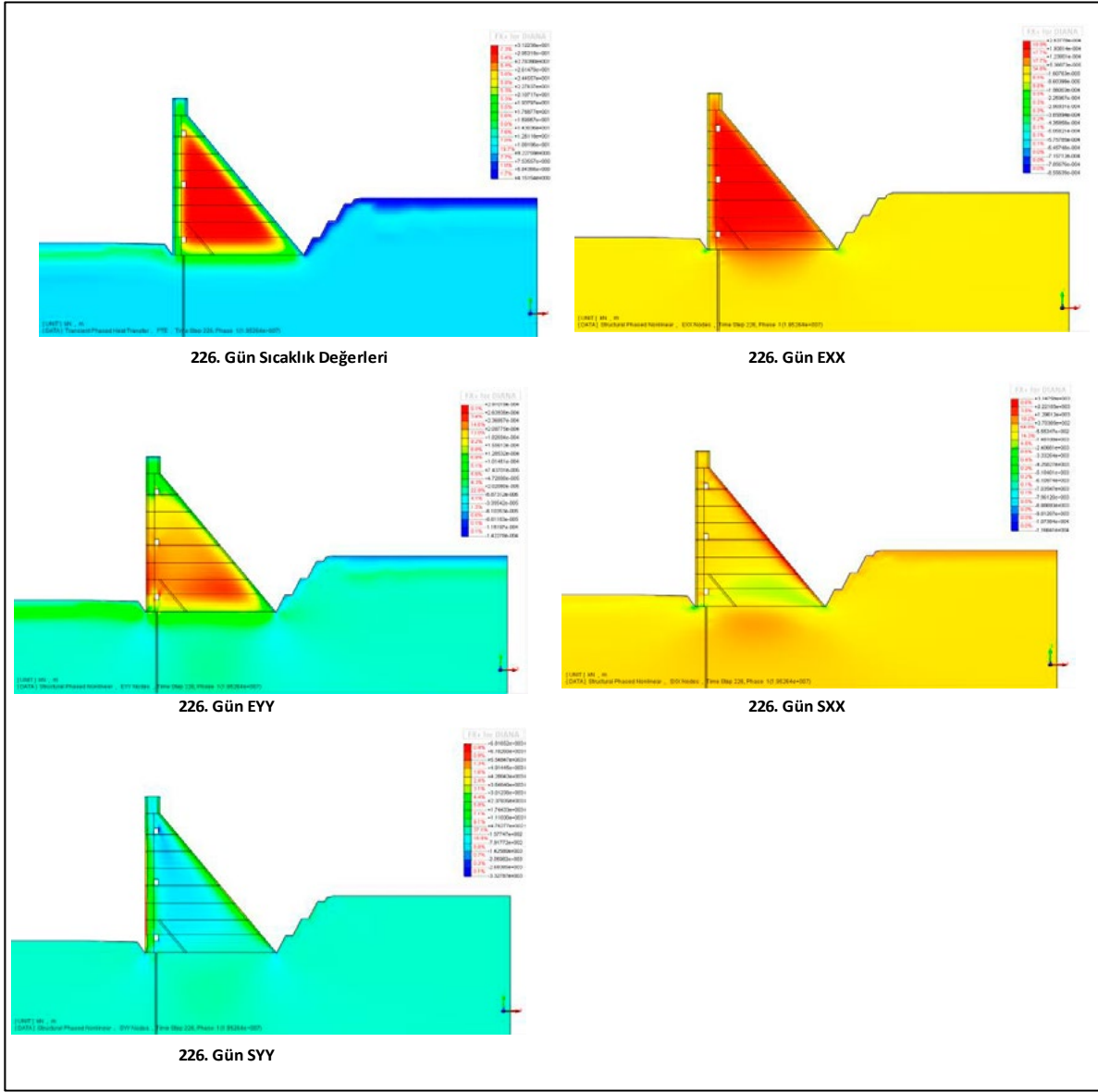
Derz Aralığı = Öngörülen çatlak genişliği / (Maksimum birim şekil değiştirme – Betonun birim şekli değiştirme kapasitesi)

Derz Aralığı = $2.5\text{ mm} / (264 \cdot 10^{-3} - 90 \cdot 10^{-3})\text{ mm} / \text{m} = 2.5 / 0.174 = 14.36\text{ m}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 5 Maksimum birim şekil değiştirme ve sıcaklık değerlerinin alındığı noktalara ait sonuç grafikleri

Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, Şekil 5’de görüldüğü gibi S5N3 noktasında maksimum birim şekil değiştirmenin 226. günde ortaya çıktığı belirlenmiştir. 226. gündeki sıcaklık, birim şekil değiştirme ve gerilme değerleri model üzerinde Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6 226. günde elde edilen veriler.

Sonuç ve Öneriler

Elde edilen sonuç birinci seviye analiz ile mertebe olarak uyumludur. Fakat sonlu eleman modeli ile daha hassas bir çalışma yapıldığından, beklendiği üzere derz aralıklarının daha da azaltılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Mevsimsel sıcaklığın değişken olması ve analiz 4 yılı kapsamı maksimum etkinin elde edilmesini sağlamıştır. Sıcaklık artışı ve sıcaklık değişiminin birinci ve ikinci seviye analizde kullanış biçimleri sonuçların farklı olmasında temel etkenlerdir. Ayrıca betonun sahip olduğu termal özellikler de sonuçlara direkt olarak etki eden bir diğer faktördür.

Birinci ve ikinci seviye termal analiz sonuçları mertebe olarak birbirine yakın sonuçlar vermekle beraber; proje bazında özel koşullar var ise termal analizlerde sonlu eleman modellerinin kullanılması daha hassas sonuçların elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Projelendirilen barajın bulunduğu bölgenin iklimsel koşulları, SSB karışım tasarımı ve istenen dayanımın yüksek olması (çimento oranının yüksek olması) gibi parametreler

nedeniyle birinci seviye termal analiz yerine ikinci ve hatta gerekli görülmesi durumunda üçüncü seviye termal analize geçilmelidir. Birinci seviye termal analiz ön projelendirme aşamasında kullanılmalıdır.

Diğer taraftan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak aşamalı beton dökümünün modele yansıtılması, betonun termal açıdan sahip olduğu gerçek davranışa daha yakın sonuçlara ulaşılmasına imkan verecektir. Çünkü dökümler arasında geçen zaman ve dolayısıyla betonda meydana gelecek soğuma gövde içinde, beton dış yüzeylerinde ve temelde ısı yayılımının daha farklı olmasına neden olacaktır. Bu çalışmada, birinci seviye analizde beton dökümü açısından herhangi bir işlem tanımlanmadığından, ikinci seviye analizde de beton gövdenin tek seferde inşa edildiği varsayılarak çözüm yapılmıştır. Böylece sonuçların birbiri ile aynı düzlemde karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Kaynaklar

Amberg, Francesco. (2003) Thermal analysis of a rcc dam during construction.
7. ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, Bucarest, Romania

Eser Proje ve Mühendislik (2012) Kirazlıköprü Barajı Proje Yapımı: Gövde Analiz Raporu, Ankara

Hansen, Kenneth D. (2012) Thermal induced cracking performance of rcc dams.
6. International Symposium On Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Zaragoza, Spain

U.S Army Corps of Engineers (1997) ETL – 1110 – 2 - 542: Thermal Studies of Mass Concrete Structures. Washington

U.S Army Corps of Engineers (1995) EM 1110 – 2 – 2200: Gravity Dam Design. Washington