

GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN BASTIRILMASI

Mehmet ÖZENÇ
DSİ 12. Bölge Müdürlüğü KAYSERİ
ozencmehmet@hotmail.com

(Makalenin geliş tarihi: 10.07.2014, Makalenin kabul tarihi: 11.07.2016)

ÖZ

Harmonikler ulusal şebekenin sinüzoidal olarak değişen geriliminin ve tüketicilerin çektiği akımların bozulmasına sebep olur. Bunun önlenmesinin bir yolu harmonik mertebelerinin tespiti ile filtre devrelerinin kurulmasıdır. Buna bir misal verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harmonikler, Filtreler

SUPPRESSION OF HARMONICS IN POWER SYSTEMS

ABSTRACT

Harmonics disrupt sinusoidal alternating voltage of the national power lines and reduces the quality of the currents received by the consumers. One way to prevent this is to measure the level of harmonics and set up filtering circuits. Here is an example of this kind of set up.

Keywords: Harmonics, Filters

1 GİRİŞ

İnsanlığın teknolojiye bu günkü seviyeye ulaşmasında elektrik enerjisi çok mühim bir yere sahiptir. Refah seviyesinin artması ile enerjiye ihtiyaç ta artmıştır. Bu enerji üretimi kolay, en temiz, kolay dağıtılan enerji şeklidir. Elektrik enerjisi daima olması gereken yüksek evsafda bulunmalıdır ki tüketiciler tarafından bir müşkülât olmadan kullanılabilirsin. Elektrik enerjisinin kaliteli olması, üretildiği santrallerde ve iletim dağıtım sistemlerinin münasip olması gibi hususlarda gerekli tedbirler alınarak sağlanır. Buna mukabil tüketicilerin elektrik enerjisini kullanmaları bazı şartlara bağlanır. Bu bize enerji kalitesinin tüketiciler tarafından bozulmamasını temin eder. Tüketicilerin işletme şartları enerji kalitesinde bozulmalara sebep olabilir. Ancak bunların belli sınırlar içinde kalması şartı aranır.

2 FİLTRELER

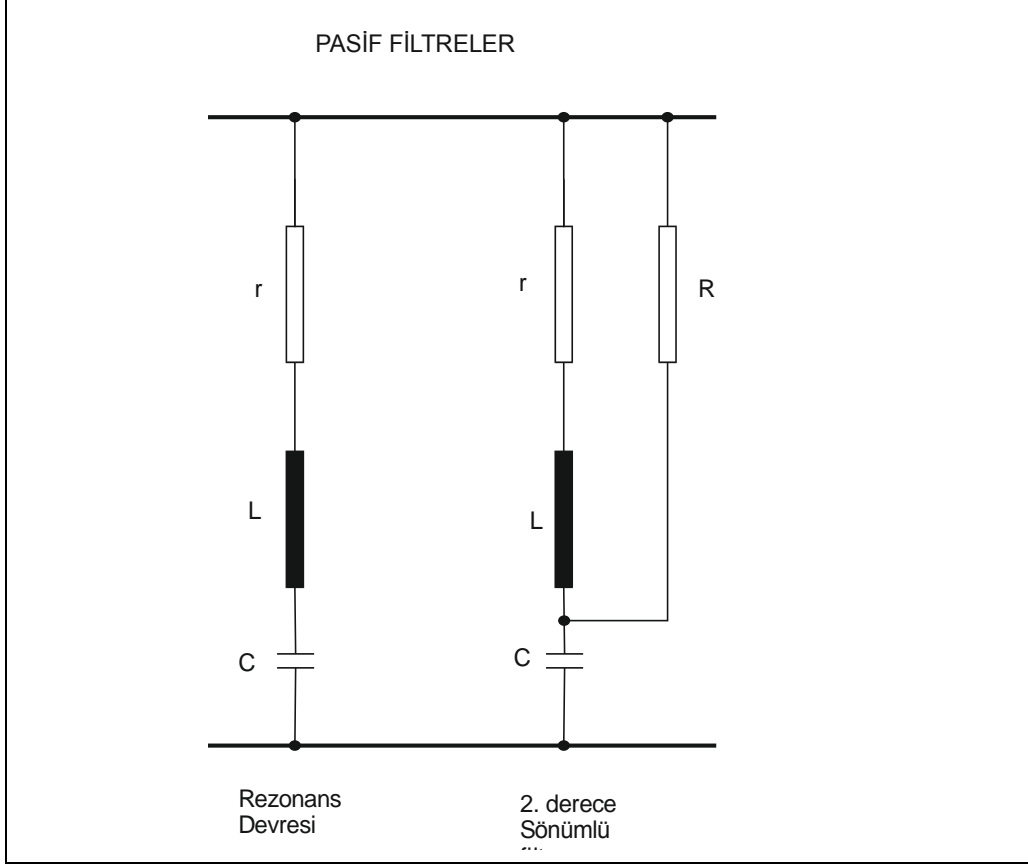
Bir tesiste bulunan harmoniklerin olumsuz tesirleri tesisin bağlantı şekline göre değişmektedir [Özenç 2014]. Harmoniklerin şebeke ve cihazlar üzerindeki etkilerini ortadan kaldırmak, saf sinüzoidal halde çalışmalarını temin etmek, sisteme bağlanacak filtre devreleri ile mümkündür. Filtreler sisteme

bağlanma şekline göre seri ve paralel filtre olmak üzere ikiye ayrılır. Ayrıca çalışma prensibine göre direnç, demir çekirdekli bobin (reaktör), veya hava çekirdekli bobin ve kondansatörden ibaret pasif filtre; devrenin davranışına göre sistemi düzeltici yönde hareket eden aktif filtreler olmak üzere iki çeşittir. Faz ve nötr arasına bağlanmış iki pasif filtre şematik olarak şekil 1 de gösterilmiştir. Pasif filtre devrelerinden ilki yok edilmek istenen harmonik frekansına akort edilen bir seri rezonans devresidir. Rezonans halinde filtre empedansı sadece r direncinden ibarettir. Filtrenin kalitesini belirleyen kalite faktörü Q , (1) nolu formülde gösterildiği gibi reaktörün rezonans reaktansının X_0 reaktörün direncine r oranıdır. Reaktörün direncinin rezonans frekansında reaktörün reaktansına göre çok küçük olması gerekir. Ancak o zaman reaktör kalite faktörü büyük olur. Hava ve demir çekirdekli bobinlerde bu değer 75 den daha büyüktür. Filtreden toprağa akan akımın maksimum olduğu rezonans frekans değerinin f_0 altında ve üstünde f_1 ve f_2 gibi iki frekans arasındaki uzaklık olan filtre bant genişliği ele alınırsa filtrenin ayar keskinliğini belirten kalite faktörü

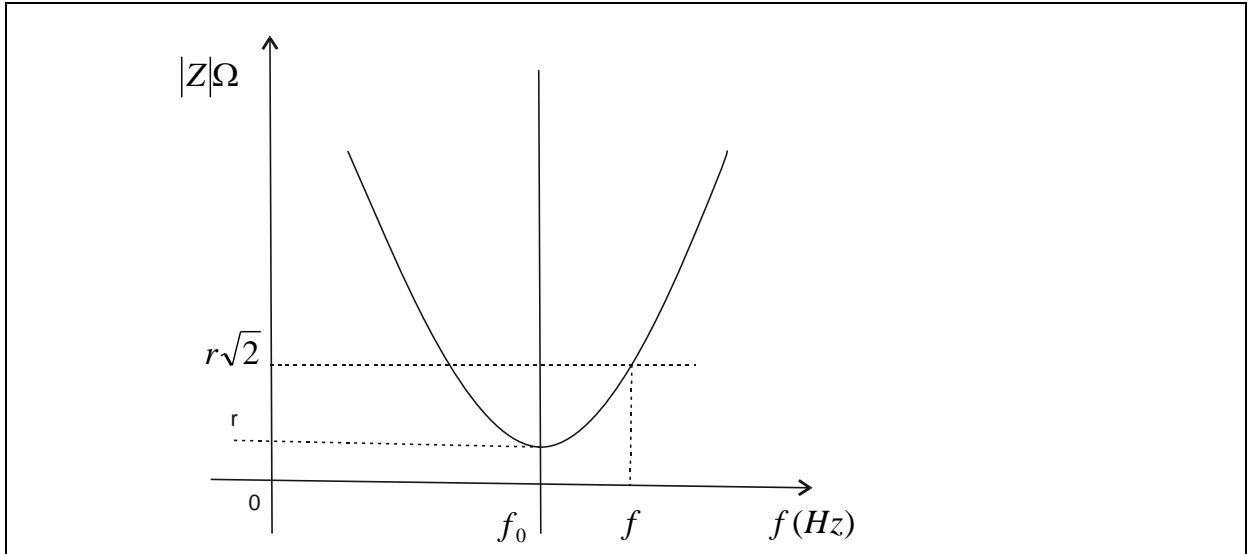
$$Q = \frac{X_0}{r} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (1)$$

münasebeti ile verilir. Küçük harmonik frekanslarında kalite faktörü yüksek olan filtreler, mertebesi yüksek harmonikler için kalite faktörü düşük olan, geniş bir frekans

bandında düşük empedansa sahip filtreler kullanılır. Şekil 1 de gösterilen ikinci pasif filtre tipi, yüksek geçiren filtre olarak tanımlanan sönümlü filtre devresinden ikinci derece olanıdır.



Şekil 1 - Pasif filtre şemaları

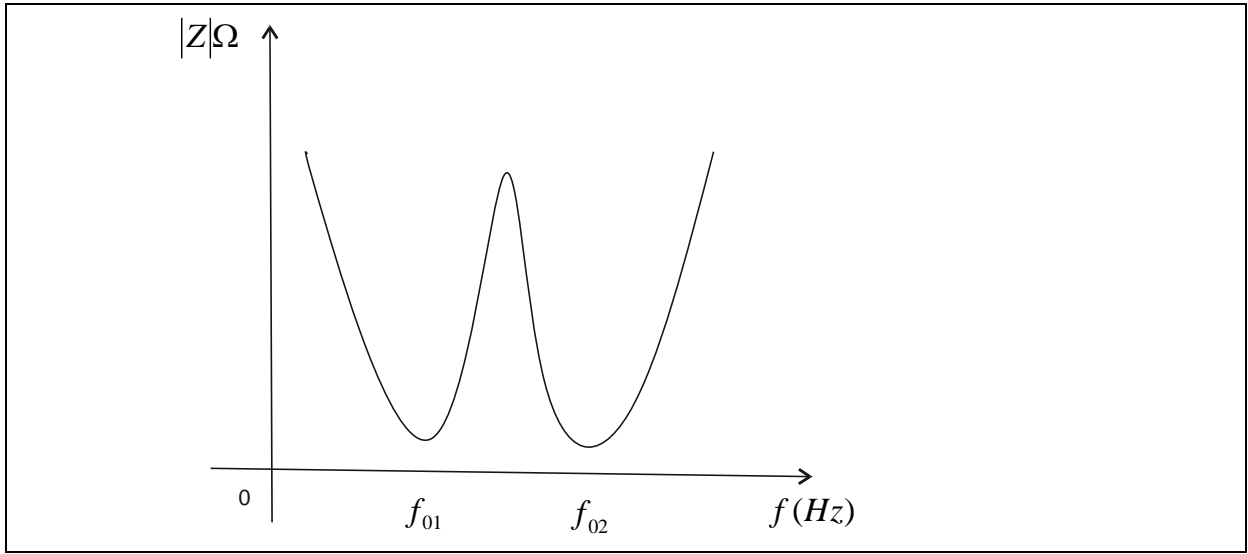


Şekil 2 - Pasif filtre karakteristiği

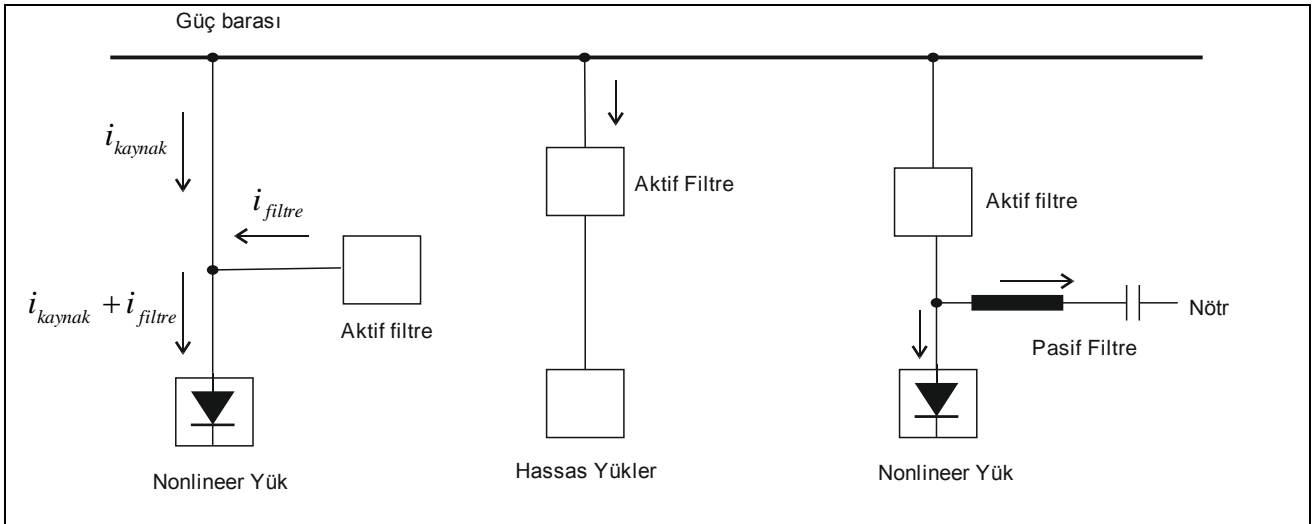
Mertebesi yüksek harmoniklerin zararlı etkilerini yok etmek, belli bir frekanstan sonra düşük empedansa sahip sönümlü filtrelerin kullanılması ile mümkündür.

Filtre kayıpları yönünden bu tipler avantajlı değildir. Kalite faktörü düşüktür. Frekansı yüksek olan harmoniklerin ifna edilmesinde sönümlü filtre o yüksek frekans için dizayn edilen tek ayarlı rezonans devresi olan pasif filtreden daha çok başarılı neticeler verir. Şekil 2 de rezonans pasif filtresinin empedansının frekansa göre değişimi çizilmiştir. f_0 rezonans frekansında filtre empedansının minimum olduğu ve r den ibaret olduğu görülmektedir.

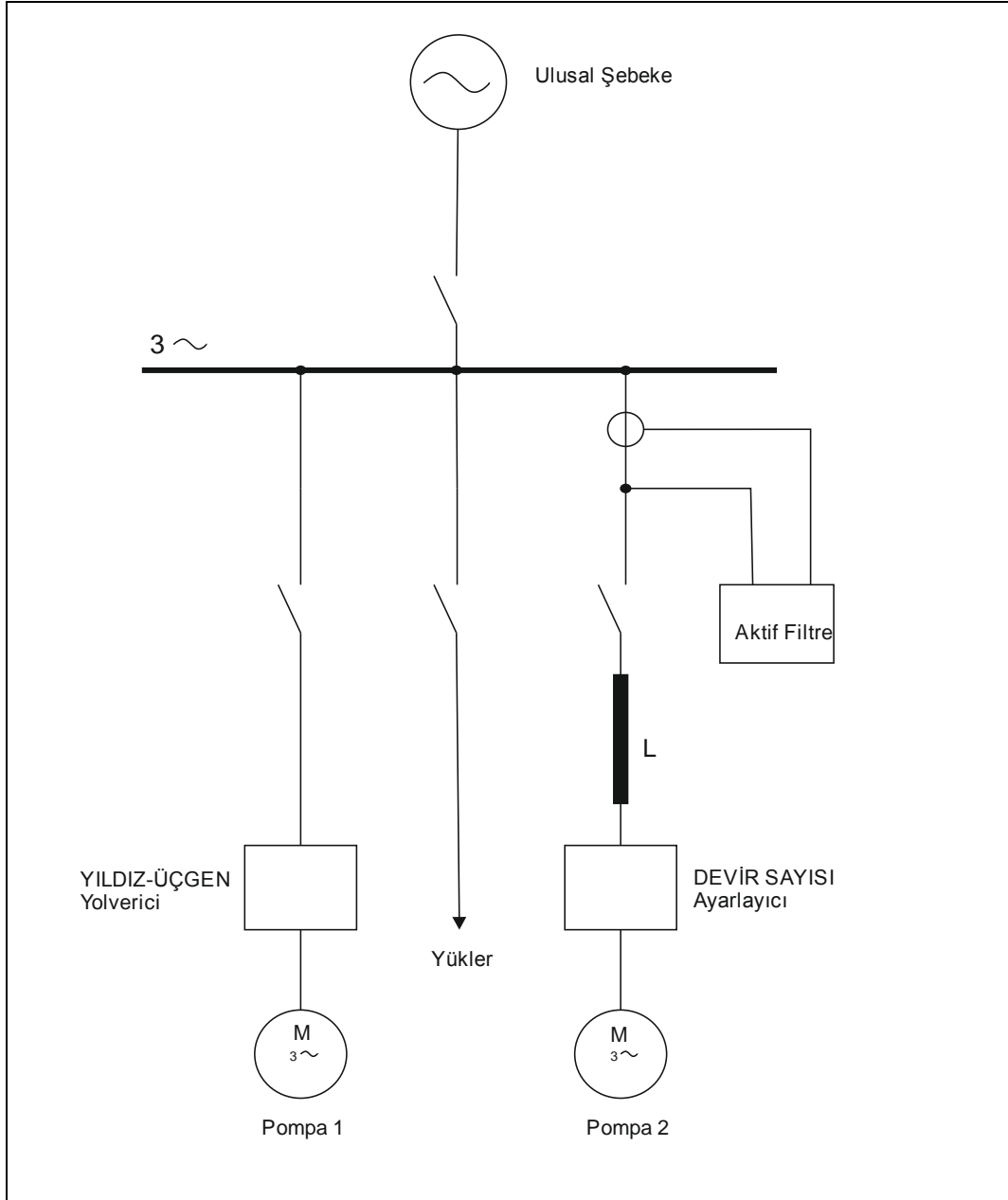
Pasif filtreler her harmonik için ayrı olarak tesis edilirler. Filtre elemanları, harmonik frekansında endüktif ve kapasitif reaktanslar birbirine eşit olacak şekilde seçilir. Şekil 3 de iki rezonans frekansına sahip çift ayarlı filtrenin frekansa göre empedansının değişim eğrisi çizilmiştir. Ayarlandıkları frekansta rezonansa gelerek akort edildikleri bu iki frekanstaki harmonikleri, sadece omik direnç değeri göstererek şebekeden uzaklaştırırlar. Tabii ki filtreler bağlı buldukları kaynaktan bir güç çekerler. Bu kayıp güç bakımından tek ayarlı filtre ile çift ayarlı filtre mukayese edilirse, çift ayarlı filtrenin daha ekonomik olduğu görülür.



Şekil 3 - Çift ayarlı pasif filtre karakteristiği



Şekil 4 Aktif filtre ve yük bağlantı şeması



Şekil 5 Pompa istasyonu aktif filtre ağılantısı

Şekil 4 de aktif filtrelerin sisteme bağlanması görülmektedir. Eğer tesisin güç faktörü yüksek ve tesis çok aşırı miktarda bozulmaya maruz ise bu durumda aktif filtre kullanılması uygundur. Aktif filtreler bağlı oldukları şebekenin artan veya azalan yük durumuna göre kendini ayarlayan, tesise yapılan yeni ilaveler için tekrar programlanan elektronik düzeneklerdir (Şekil 4). Yine şekil 5 de bir pompa istasyonuna ait aktif filtre ilavesi ile beraber şalt şeması çizilmiştir. [Bettega ve Fiorina 19

99]

3 ÖRNEK ÇÖZÜM

Aşağıda bir tesis üzerinde, olumsuz etkileri olan harmoniklerin, tesise filtreler dahil edilerek nasıl yok edildiği ve müspet neticeler alındığı tabiki olarak izah edilecektir.

Hesaplamalara geçmeden önce kısaca takip edilecek yolu gözden geçirmekte fayda vardır. Tesisin hesabında, tesis frekansları farklı gerilimlerin tesiri altında olduğundan süperpozisyon metodunun kullanılması gerekmektedir [Irwin ve Nelms 2013]. Harmonik filtresinin empedansının imajiner kısmı, hesaplanmakta olan filtrede bu harmonik için sıfır mertebesinde olmalıdır. Bir üçgen bağlı kondansatör bataryasının toplam

reaktif gücü Q_C ise kondansatörün faz başına X_C kapasitif reaktansı

$$X_C = \frac{U_n^2}{Q_C} [\Omega] \quad (2)$$

dur. U_n nominal faz arası gerilimidir. Dairesel frekansı ω olan şebekede kondansatörün C kapasitesi ise

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \rightarrow C = \frac{1}{\omega X_C} [F] \quad (3)$$

formülünden elde edilir.

Harmoniklerin akım değerleri mertebelerine nazaran değiştiğinden her bir harmonik için tesis edilen filtre ait olduğu harmonik akımının genlik değerini taşıyabilecek kapasitede olmalıdır. Bu sebeple tesise bağlanması gereken toplam kondansatör kapasite değerinin her filtre için aşağıdaki (4) nolu formüle göre paylaşılması lazımdır [Duman, Ferik, Albayracı, Yörükeren].

$$C_k = C \frac{I_k}{\sum_{k=2}^k I_k} [F] \quad (4)$$

Bu formülde C_k mertebesi k olan harmoniğe ait kondansatörün kapasitesini, I_k k ıncı harmonik akımını belirtmektedir. Her pasif filtre kolunun kondansatörlerinin kapasitesi belli olduğuna göre artık bunlara seri bağlanacak bobinlerin nominal şebeke frekansındaki endüktansları hesaplanabilir.

$$X_{L1(k)} = X_{C(k)}$$

$$kX_{L1} = \frac{X_{C1}}{k} \rightarrow X_{L1} = \frac{X_{C1}}{k^2}$$

Son formülü yeni notasyonlarla yazalım.

$$X_{L1(k)} = \frac{X_{C1(k)}}{k^2} \quad (5)$$

Bu (5) nolu formül k ıncı harmonik için kondansatörlere seri bağlanacak demir

çekirdekli bobinlerin reaktansını verir. $X_{L1(k)}$ k ıncı harmoniğe ait bobinin temel frekanstaki reaktansını, $X_{C1(k)}$ ise filtre kondansatörünün temel frekanstaki reaktansını gösterir. Şimdi reaktansı yukarıdaki gibi belli olan bobinin endüktansını veren formül yazılabilir.

$$X_{L1(k)} = \omega L_{1(k)}$$

$$L_{1(k)} = \frac{X_{L1(k)}}{\omega} = \frac{X_{C1(k)}}{\omega k^2} = \frac{1/\omega C_{1(k)}}{\omega k^2}$$

$$L_{1(k)} = \frac{1}{\omega^2 k^2 C_{1(k)}} [H] \quad (6)$$

Bu (6) nolu formül k ıncı harmonik için kondansatörlere seri bağlanacak demir çekirdekli bobinlerin $L_{1(k)}$ endüktansını verir.

Kimyasal madde üreten doğrultuculu bir tesisin 0,4 kV luk ana barasına 150 kVar lık kondansatör bağlıdır. Tesiste 5. ve 7. mertebeden harmonikler mevcuttur. Bu harmonik akımlarının zararlı etkilerini bertaraf etmek için filtre devreleri tesis edilecektir. Filtre elemanlarını belirleyelim [Özenç 2000].

Primeri üçgen sekonderi zigzag bağlantılı bir üç fazlı köprü tipi doğrultucunun şebekeden çektiği hat akımının Fourier serisi (hat akımının ani değerini gösterir)

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} (\sin\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \dots) \quad (7)$$

dır. Serideki I_{dc} doğru akım bileşenini gösterir. Seriden görüldüğü üzere bu tip bir doğrultucuda mertebesi en küçük harmonik 5. harmoniktir. 7. harmonikten sonraki yüksek harmonikler ihmal edilecektir.

Tesiste 5. ve 7. harmonik bulunduğu göre harmonik akımlarının değerleri

$$I_k = \frac{I_1}{k} m \quad (8)$$

formülüne göre hesaplanacaktır [Bayram 1985]. Formülde m bir katsayı olmak üzere I_1 akımın temel harmoniğini temsil eder.

5. harmonik filtresinin empedansının imajiner kısmı bu harmonik için sıfır mertebesinde olmalıdır. Bu filtrede kullanılacak olan kondansatörün gücü 100 kVar alınarak kondansatörün kapasitif reaktansı

$$X_C = \frac{U_n^2}{Q_C} = \frac{(0,4)^2}{0,1} = 1,6\Omega$$

bulunur. Kapasitif reaktans kondansatör U_n uç geriliminin karesinin Q_C gücüne oranına eşittir. Kondansatörün 5. harmonik için X_{C5} kapasitif reaktansı ($k=5$)

$$X_{C5} = \frac{X_C}{k} = \frac{X_C}{5} = \frac{1,6}{5} = 0,32\Omega$$

olacağından filtre devresinin empedansının imajiner kısmı sıfıra eşitlenerek filtre bobininin reaktansı X_{L5} için

$$X = 0$$

$$X_{L5} - X_{C5} = 0 \rightarrow X_{L5} = 0,32\Omega$$

değeri elde edilir. Bulunan bu değer bobinin 5. harmonik frekansı olan $5 \cdot 50 = 250\text{Hz}$ için göstereceği reaktans olacağından bobinin normal şebeke frekansındaki reaktansı (temel harmonik reaktansı)

$$X_{L5} = kX_{L1} \rightarrow X_{L5}/k = X_{L1} = 0,32/5 = 0,064\Omega$$

dur. Bobinin değeri

$$X_{L1} = \omega L \rightarrow L = \frac{0,064}{2\pi \cdot 50} = 0,2\text{mH}$$

bulunur. Aynı şekilde 7. harmonik için de bu hesaplar yapılırsa 7. harmonik filtresinde kullanılacak olan kondansatörün gücü 50 kVar alınarak ($k=7$)

$$X_C = \frac{U_n^2}{Q_C} = \frac{(0,4)^2}{0,05} = 3,2\Omega$$

$$X_{C7} = \frac{X_C}{7} = \frac{3,2}{7} = 0,46\Omega$$

$$X_{L7} - X_{C7} = 0 \rightarrow X_{L7} = \frac{(0,4)^2}{7 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 0,46\Omega$$

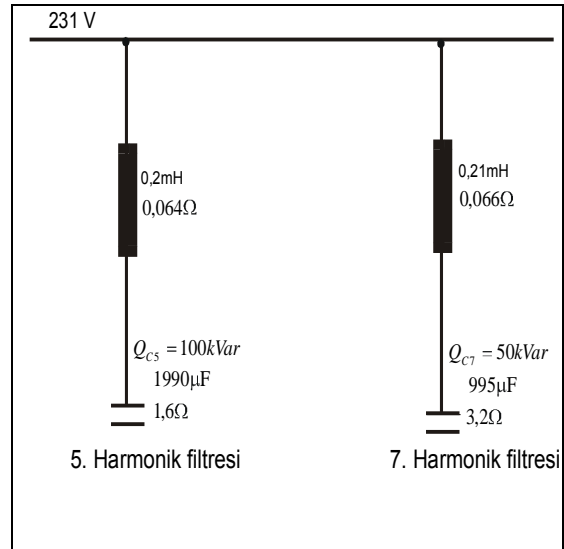
$$X_{L7} = kX_{L1} \rightarrow X_{L7}/k = X_{L1} = 0,46/7 = 0,066\Omega$$

$$X_{L1} = \omega L \rightarrow L = \frac{0,46}{7 \cdot 2\pi \cdot 50} = 0,21\text{mH}$$

değerleri elde edilir. 100kVar ve 50kVar gücündeki kondansatör bataryalarının kapasiteleri için

$$C = \frac{Q_C}{\omega U^2} = \frac{100000}{(400)^2 \cdot 314} = 1990\mu\text{F}$$

$$C = \frac{50000}{(400)^2 \cdot 314} = 995\mu\text{F}$$



Şekil 6 - Pasif filtre şemaları

yazılır. Baraya bağlı filtre devrelerinin faz başına reaktans değerleri ile L ve C değerleri Şekil 6 da gösterilmiştir.

Şekil 6 da 5. ve 7. harmonikler için hesaplanarak gösterilen kondansatör ve reaktör değerlerinin doğruluğu aşağıdaki gibi kontrol edilecektir.

$$k = 5$$

$$X_{L5} = kX_L = 5.0,064 = 0,32\Omega$$

$$k\omega L = 5.314.0,2.10^{-3} = 0,32\Omega$$

$$X_{C5} = \frac{X_C}{k} = \frac{1,6}{5} = 0,32\Omega$$

$$\frac{1}{k\omega C} = \frac{1}{5.314.1990.10^{-6}} = 0,32\Omega$$

$$k\omega L = 7.314.0,21.10^{-3} = 0,46\Omega$$

$$X_{C7} = \frac{X_C}{k} = \frac{3,2}{7} = 0,46\Omega$$

$$\frac{1}{k\omega C} = \frac{1}{7.314.995.10^{-6}} = 0,46\Omega$$

$$X_5 = X_{L5} - X_{C5} = 0$$

$$X_7 = X_{L7} - X_{C7} = 0$$

Nominal şebeke frekansında, filtre devrelerinin çektiği akımlar ile uçlarına isabet eden gerilimler hesaplanırsa 5. harmonik filtresi empedansı

$$\mathbf{\hat{Z}} = j0,064 - j1,6 \Omega'$$

$$Z = 1,536\Omega$$

dur. Bu filtreden geçen akım ise

$$I_{5(1)} = \frac{231}{1,536} = 150,4A$$

dir. Aynı şekilde 7. harmonik filtresinin empedansı ve çektiği akım

$$\mathbf{\hat{Z}} = j0,066 - j3,2 \Omega'$$

$$Z = 3,134\Omega$$

$$I_{7(1)} = \frac{231}{3,134} = 73,7A$$

$$k = 7$$

$$X_{L7} = kX_L = 7.0,066 = 0,46\Omega$$

dir. Reaktör ve kondansatör uçlarındaki gerilimler de

$$U_{L1} = I_{5(1)} \cdot X_{L1} = 150,4.0,064 = 9,6V$$

$$U_{C1} = I_{5(1)} \cdot X_{C1} = 150,4.1,6 = 240,6V$$

$$U_{L1} = I_{7(1)} \cdot X_{L1} = 73,7.0,066 = 4,86V$$

$$U_{C1} = I_{7(1)} \cdot X_{C1} = 73,7.3,2 = 235,8V$$

bulunur. Bobinlerin boyutlandırılmasında filtrelerden geçen 5. ve 7. harmoniklere ait akım değerleri ve bobinlerin uçlarındaki gerilimlerin bilinmesi gerekir. 5. harmonik filtresi 250 Hz için bir seri rezonans devresi olduğuna göre rezonans halinde kondansatörün uçlarına gelen gerilimin kondansatör nominal geriliminin % 10 undan büyük olmaması lazımdır. Aynı şekilde 7. harmonik filtresinde de 350 Hz için rezonans meydana geleceğinden kondansatör uçlarındaki gerilimin sınır değeri aşmadığı tahkik edilmelidir. Kısacası filtre elemanları hesaplandıkları harmonik için akım ve gerilim bakımından zorlanmaya maruz kalmayacak şekilde boyutlandırılmalıdır.

Bir filtre için aşağıdaki katsayıyı tarif edelim [Tunçalp ve Sucu 2006].

$$p = 100 \frac{X_L}{X_C} \quad (9)$$

Bu katsayı 5. harmonik için ve 7. harmonik için hesaplanırsa

$$p_5 = \frac{0,064}{1,6} 100 = \%4 \quad p_7 = \frac{0,066}{3,2} 100 = \%2,06$$

bulunur. U_{Cn} nominal uç gerilimi değerine ve Q_{Cn} anma gücüne sahip bir kondansatörün önüne yukarıda hesaplanan p değerlerine göre konulan reaktör ile meydana getirilen filtre, nominal gerilimi U_n ve nominal frekansı f_r olan bir şebekeye ilave edildiğinde şebekeye verilen reaktif güç Q_C olsun. Bu durumda

$$Q_{Cn} = \frac{Q_C U_{Cn}^2 \left(1 - \frac{p}{100}\right)}{U_n^2} \quad (10)$$

formülü yazılır [Hilkar]. Bu formüle göre 5. ve 7. harmonik için

$$Q_{C5} = \frac{100.(400)^2 \left(1 - \frac{4}{100}\right)}{(400)^2} = 96kVar$$

$$Q_{C7} = \frac{50.(400)^2 \left(1 - \frac{2,06}{100}\right)}{(400)^2} = 49kVar$$

bulunur. Kondansatörün $U_n=400V$ olan bir şebekede, $U_{Cn}=400V$ luk bir kondansatör uç gerilimine sahip olması ve gücünün $Q_{Cn}=96kVAr$ dan büyük olması gerektiği anlaşılır. Aynı şekilde kondansatörün $U_n=400V$ olan bir şebekede $U_{Cn}=400V$ luk bir

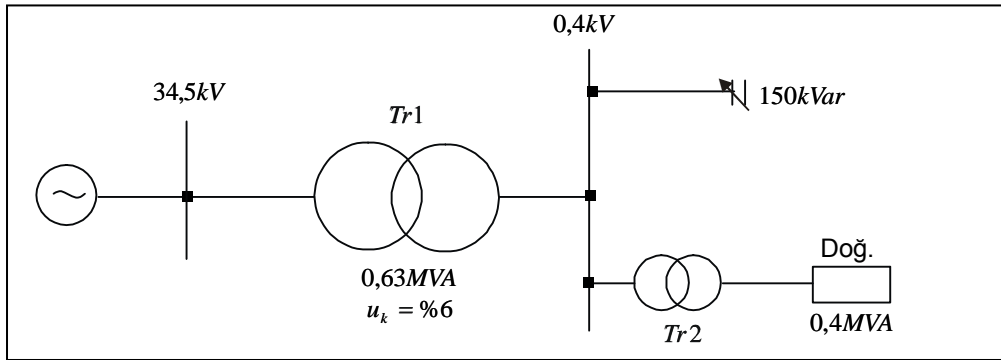
kondansatör uç gerilimine sahip olması ve gücünün $Q_{Cn}=49kVAr$ dan büyük olması gerektiği anlaşılır. Kondansatörlerin uç gerilimleri

$$U_{C5} = \frac{U_n}{1-p} = \frac{400}{1-0,04} = 416,7V$$

$$U_{C7} = \frac{U_n}{1-p} = \frac{400}{1-0,0206} = 408,4V$$

olur. Bir kondansatör $1,1U_{Cn}=1,1.400=440V$ a devamlı dayanabileceğinden uygulama gerilimi ve kondansatör gücü bakımından seçilen kondansatör ve bobinler uygundur.

Bahsi geçen tesisin şalt şeması şekil 7 deki gibidir. Tesisin tam yükteki güç faktörü 0,8 dir.



Şekil 7 - Hesaplanan tesisin şalt şeması

Güç faktörünün düzeltilmesi maksadı ile 150 kVar lık kondansatör bataryalarının tesise ilave edilmesinden sonra harmonikler bakımından tesisin etüdü yapılacaktır. Sonra hesaplanan filtreler ilave edilmek suretiyle tekrar harmoniklerin tesirleri araştırılacaktır. Doğrultucunun çektiği akımı bulalım.

$$\cos \varphi_1 = 0,8 \rightarrow \varphi_1 = 36,87^\circ$$

Doğrultucunun görünen gücünü veren ifade aşağıda verilmiştir.

$$N = \sqrt{3}UI \quad (11)$$

$$0,4 \cdot 10^6 (0,8 + j0,6) = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot \bar{I}$$

$$\bar{I} = \frac{320000}{\sqrt{3} \cdot 400} + j \frac{240000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 462,4 + j346$$

$$\bar{I} = \sqrt{(462,4)^2 + (346,8)^2} \angle 36,87^\circ$$

$$\bar{I} = 578 \angle -36,87^\circ [A]$$

Kondansatörün akımı

$$I_{C1} = \frac{150}{\sqrt{3.0,4.1}} \angle 90^\circ = 216,8 \angle 90^\circ$$

$$= 216,8(\cos 90^\circ + j \sin 90^\circ) = j216,8$$

$$I_{C1} = 216,8A$$

dir. Güç trafosunun nominal sekonder akımı

$$I_{sek.} = \frac{630}{\sqrt{3.0,4}} = 910A$$

dir. Aşağıda tesisin temel harmonikteki empedans şeması çizilmiştir (Şekil 8). Tesis tam yüklü çalışırken güç faktörü 0,8 olduğuna göre kondansatör bataryası tam değerine eriştiğinde yeni güç faktörünü hesaplayalım. İlk hal olan filtreler yokken tesisin görünen gücü

$$\dot{N}_1 = P_1 + jQ_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \angle \varphi_1 \quad (12)$$

olup filtreler bağlandıktan sonra tesisin görünen gücü

$$\dot{N}_2 = P_1 + jQ_2 = \sqrt{P_1^2 + Q_2^2} \angle \varphi_2 \quad (13)$$

olur. Bunu şu şekilde yazabiliriz.

$$\dot{N}_2 = \dot{N}_1 + \dot{N}_{kond}$$

$$\dot{N}_2 - \dot{N}_1 = \dot{N}_{kond} = P_1 + jQ_2 - P_1 - jQ_1$$

$$\dot{N}_{kond} = j(Q_2 - Q_1) = jQ_{kond} \quad (14)$$

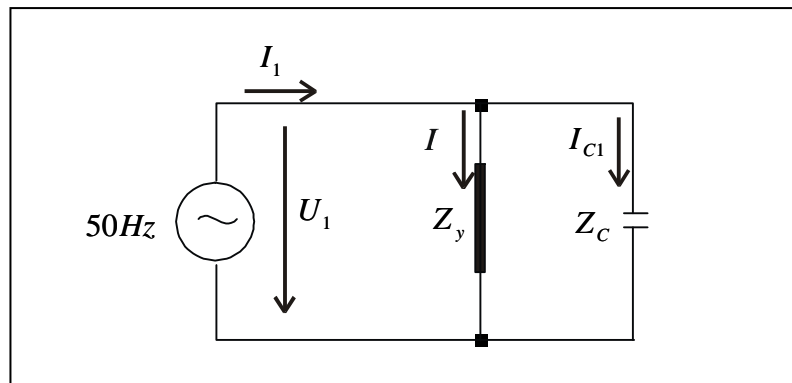
$$\dot{N}_1 = 400 \angle 36,87^\circ = 320 + j240 [kVA]$$

$$\dot{N}_{kond} = -j150 kVar$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{Q_1 - Q_{kond}}{P_1}$$

$$= \arctg \frac{240 - 150}{320} = \arctg 0,28125 = 15,71^\circ$$

$$\cos \varphi_2 = 0,9626$$



Şekil 8 - Temel harmonik empedans şeması

Tesisin tam yükteki güç faktörü $\cos \varphi_1 = 0,8$ iken kondansatör bataryaları bağlanarak güç faktörü $\cos \varphi_2 = 0,96$ ya yükseltilmiştir.

Şekil 8 e göre devrede gösterilen akımları hesaplayalım.

$$\begin{aligned}
I_1 &= I + I_{C1} = 578 \angle -36,78^\circ + 216,8 \angle 90^\circ \\
&= 578(0,8 - j0,6) + j216,8 \\
&= 462,4 - j346,8 + j216,8 \\
&= 462,4 - j130
\end{aligned}$$

$$\dot{I}_1 = \sqrt{(462,4)^2 + (-130)^2} \angle \arctg \frac{-130}{462,4}$$

$$\begin{aligned}
\varphi_2 &= \arctg \frac{-130}{462,4} = \arctg(-0,2811) \rightarrow \varphi_2 = -15,7^\circ \\
\cos \varphi_2 &= 0,9627
\end{aligned}$$

$$\dot{I}_1 = 480 \angle -15,7^\circ \rightarrow I_1 = 480 A$$

(8) nolu formüle göre tesiste bulunan 5. ve 7. harmonik akımlarının değerleri, temel harmonik akımının harmonik mertebesine bölümünün m katsayısı ile çarpımından ibarettir. Ölçülerek bulunan değere göre, temel harmonik akımının harmonik mertebesine bölünmesi ile bulunan değer daha büyük olduğundan bir tashih faktörü ilave edilmektedir. Doğrultucularda bu hesap tarzı oldukça doğru neticeler verir.

$$I_5 = \frac{578}{5} 0,92 = 106,3 A \quad I_7 = \frac{578}{7} 0,82 = 68,5 A$$

Aslında harmonikleri haiz tesislerde, harmonik ölçüm cihazı ile yapılan ölçme sonucu, harmonik akımlarının mertebeleri ve değerleri tespit edilir. Bundan sonra hesaplamalara geçilir.

Daha önce 5. harmonik filtresi için 100 kVar ve 7.harmonik filtresi için ise 50 kVar lık kondansatörler seçilmiştir. Burada harmonik akımlarının değerleri belli olduğuna göre (4) nolu formüle göre bu husus tahkik edilecektir. Kondansatörlerin toplam reaktansını ve kapasitesini bulalım.

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{(400)^2}{150 \cdot 10^3} = 1,07 \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 1,07} = 2976 \mu F$$

5. ve 7. harmonik kondansatörlerinin değerleri

$$C_5 = 2976 \frac{106,3}{106,3 + 68,5} = 1809 \mu F$$

$$C_7 = 2976 \frac{68,5}{106,3 + 68,5} = 1166 \mu F$$

dır. Bu kapasitelere göre 5. harmonik için kapasitif reaktans

$$Q_{C5} = \omega C_5 U^2 = (400)^2 (2\pi \cdot 50) 1809 \cdot 10^{-6} = 91 kVar$$

olur. Seçilen kondansatör bataryası 100 kVar dir. 7. harmonik için kapasitif reaktans

$$Q_{C7} = \omega C_7 U^2 = (400)^2 (2\pi \cdot 50) 1166 \cdot 10^{-6} = 58 kVar$$

olur. Seçilen kondansatör bataryası 50 kVar dir. Yapılan kondansatör batarya seçimlerinin uygun olduğu görülmektedir.

5. ve 7. harmonik filtrelerinin reaktörleri formül (6) dan şekil 6 gözönüne alınarak hesaplanırsa

$$L_{1(5)} = \frac{1}{\omega^2 k^2 C_{1(5)}} = \frac{1}{(314)^2 \cdot 5^2 \cdot 1990 \cdot 10^{-6}} = 0,20 mH$$

$$L_{1(7)} = \frac{1}{\omega^2 k^2 C_{1(7)}} = \frac{1}{(314)^2 \cdot 7^2 \cdot 995 \cdot 10^{-6}} = 0,21 mH$$

değerleri bulunur. Daha önce bulunan değerlerin aynısı olduğu görülmektedir.

Trafonun reaktansı ve kondansatör gurubunun reaktansı

$$X_{T1} = \frac{u_k \cdot U_N^2}{100 \cdot N_T} = \frac{6 \cdot (0,4)^2}{100 \cdot 0,63} = 0,0152 \Omega$$

$$X_{C1} = \frac{U_n^2}{Q_C} = \frac{(0,4)^2}{0,15} = 1,067 \Omega$$

dur. Kondansatörün empedansı belli olduğuna göre çektiği akımı hesaplırsak daha önce bulunan değer elde edilir.

$$\dot{Z}_C = -j1,067 \quad I_{C1} = \frac{U_1}{Z_C} = \frac{231}{1,067} = 216,8 A$$

5. ve 7. harmonik için trafo reaktansı ile kondansatör reaktansı

$$X_{L5} = k \cdot X_{T1} = 5,0,0152 = 0,076\Omega$$

$$X_{L7} = 7 \cdot X_{T1} = 7,0,0152 = 0,1064\Omega$$

$$X_{C5} = \frac{X_{C1}}{k} = \frac{1,067}{5} = 0,2134\Omega \quad X_{C7} = \frac{1,067}{7} = 0,152\Omega$$

dur. Bulunan bu değerlere göre tesisin 5. harmonik ve 7. harmonik için eşdeğer empedans şemasının çizilmesi kolaydır. Paralel bağlı olan trafo reaktansı ile kondansatör reaktansının eşdeğeri

$$\dot{Z}_C = -j \frac{1}{\omega C} = -jX_C = -j0,2314\Omega$$

$$\dot{Z}_T = j\omega L_T = jX_T = j0,076\Omega$$

$$\frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{\dot{Z}_T} + \frac{1}{\dot{Z}_C} = \frac{1}{jX_T} - \frac{1}{jX_C}$$

$$\frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{j0,076} - \frac{1}{j0,2314} = \frac{1}{j} \left(\frac{1}{0,076} - \frac{1}{0,2314} \right)$$

$$= -j \left(\frac{1}{0,076} - \frac{1}{0,2314} \right)$$

$$\dot{Z} = \frac{1}{-j \left(\frac{1}{0,076} - \frac{1}{0,2314} \right)} = j \frac{1}{\frac{1}{0,076} - \frac{1}{0,2314}}$$

$$jX = j \frac{1}{\frac{1}{0,076} - \frac{1}{0,2314}} \rightarrow X = \frac{1}{\frac{1}{0,076} - \frac{1}{0,2314}}$$

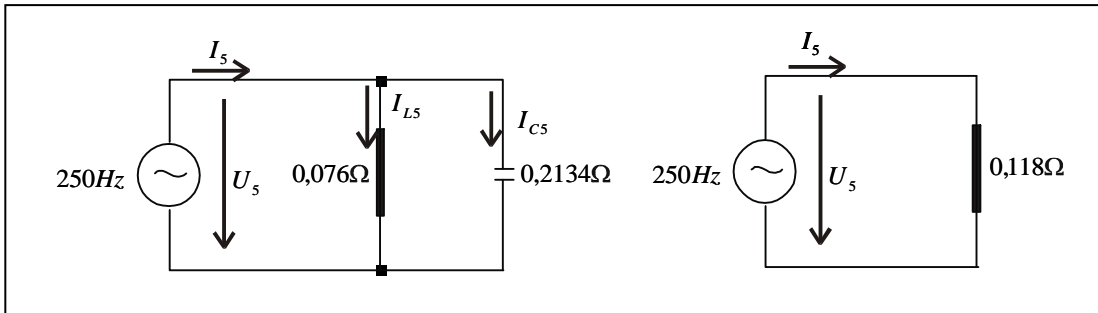
$$X = 0,118\Omega$$

bulunur. 5. harmonik geriliminin efektif değeri
 $U_5 = X_5 I_5 = 0,118 \cdot 106,3 = 12,54V$

dur. Bu gerilimin nominal gerilime göre yüzdesini bulalım.

$$u_5 = \frac{\sqrt{3}U_5}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 12,54}{400} \cdot 100 = \%5,42$$

5. harmonik için tesisin eşdeğer empedans şeması aşağıdaki gibidir (Şekil 9).



Şekil 9 - Beşinci harmonik empedans şeması

Şemaya göre I_{L5} ve I_{C5} akımları

$$I_{C5} = \frac{\dot{U}_5}{\dot{Z}_{C5}} = \frac{\dot{U}_5}{-jX_{C5}} \quad (15)$$

$$I_{L5} = \frac{\dot{U}_5}{\dot{Z}_{L5}} = \frac{\dot{U}_5}{jX_{L5}} \quad (16)$$

$$I_{C5} = \frac{U_5}{X_{C5}} = \frac{12,54}{0,2134} = 58,76A$$

$$I_{L5} = \frac{U_5}{X_{L5}} = \frac{12,54}{0,076} = 165,26A$$

olur. I_5 akımı bu iki akımın toplamıdır.

$$I_5 = I_{C5} + I_{L5} = \dot{U}_5 \left(\frac{1}{\dot{Z}_{L5}} + \frac{1}{\dot{Z}_{C5}} \right)$$

$$= 12,54 \left(\frac{1}{j0,076} - \frac{1}{j0,2134} \right) = -j12,54 \frac{0,1374}{0,016} = -j106,6A$$

$$I_5 = 106,6A$$

$$I_5 = I_{L5} - I_{C5} = 165,26 - 58,76 = 106,5A$$

Aynı şekilde 7. harmonik için tesisin eşdeğer empedans şemasını çizerek akımları bulalım. Paralel bağlı olan trafo reaktansı ile kondansatör reaktansının eşdeğerini 7. harmonik için hesaplırsak

$$X = \frac{1}{\frac{1}{0,1064} - \frac{1}{0,152}} = 0,354\Omega$$

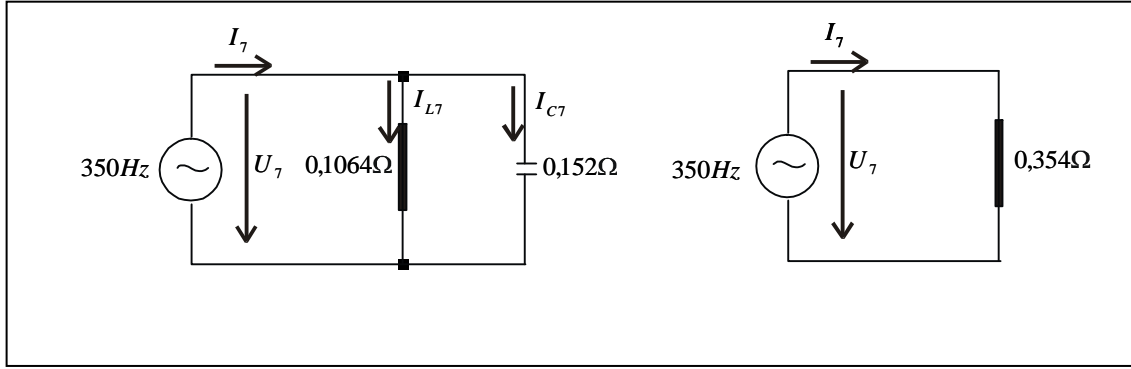
bulunur. 7. harmonik geriliminin efikas değeri

$$U_7 = X_7 I_7 = 0,354 \cdot 68,5 = 24,25V$$

dur. Bu gerilimin nominal gerilime göre yüzdesini bulalım.

$$u_7 = \frac{\sqrt{3}U_7}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 24,25}{400} \cdot 100 = \%10,49$$

7. harmonik için tesisin eşdeğer empedans şeması aşağıdadır (Şekil 10).



Şekil 10 Yedinci harmonik empedans şeması

Şemadan I_{L7} ve I_{C7} akımları hesaplanırsa

$$I_{C7} = \frac{\dot{U}_7}{\dot{Z}_{C7}} = \frac{\dot{U}_7}{-jX_{C7}} \quad (17)$$

$$I_{L7} = \frac{\dot{U}_7}{\dot{Z}_{L7}} = \frac{\dot{U}_7}{jX_{L7}} \quad (18)$$

$$I_{C7} = \frac{U_7}{X_{C7}} = \frac{24,25}{0,152} = 159,5A \quad I_{L7} = \frac{U_7}{X_{L7}} = \frac{24,25}{0,1064} = 228A$$

bulunur ve I_7 akımı bu iki akımın toplamından ibarettir.

$$I_7 = I_{C7} + I_{L7} = \dot{U}_7 \left(\frac{1}{\dot{Z}_{L7}} + \frac{1}{\dot{Z}_{C7}} \right)$$

$$= 24,25 \left(\frac{1}{j0,1064} - \frac{1}{j0,152} \right) = -j24,25 \frac{0,0456}{0,016} = -j68,5A$$

$$I_7 = 68,5A$$

$$I_7 = I_{L7} - I_{C7} = 228 - 159,5 = 68,5A$$

5. harmonik frekansında tesiste rezonans meydana gelmesi için kondansatör reaktansı $X_{C5} = X_{C1}/k = 0,076\Omega$ değerinde olmalıdır, yani $X_{C1} = kX_{C5} = 5 \cdot 0,076 = 0,38\Omega$ olmalıdır. Şekil 9 dan görüldüğü gibi kapasitif reaktansın endüktif reaktansa ($0,076\Omega$) eşit olması lazımdır.

Kondansatör reaktansının bu değeri alabilmesi için gücünün ne olması gerektiği hesaplanırsa

$$Q_C = \frac{U_n^2}{X_{C1}} = \frac{(0,4)^2}{0,38} = 0,42MVar$$

bulunur. Kullanılan kondansatör batarya gücü bu değer çok uzağındadır. 7. harmonik frekansında tesiste rezonans oluşması için kondansatör reaktansı $X_{C7} = 0,1064\Omega$ olmalıdır. Şekil 10 dan görüldüğü gibi kapasitif reaktansın endüktif reaktansa ($0,1064\Omega$) eşit olması lazımdır. Kondansatör reaktansının bu değeri alabilmesi için gücünün

$$Q_C = \frac{U_n^2}{X_{C1}} = \frac{(0,4)^2}{7 \cdot 0,1064} = 0,215MVar$$

olması gerekir. Kondansatör batarya gücü bu değer çok uzağındadır. Demek ki gerek 5. harmonik frekansında, gerekse 7. harmonik frekansında tesiste rezonans oluşması mümkün değildir. Ancak tesiste zayıflama ve gerilim düşümüne sebep olan 5. ve 7. harmonik akımları dolaşmaktadır. Bu akımların dolaşmasını önlemek için tesise filtre devrelerinin ilave edilmesi ile bu akımların kolayca akabileceği bu kısa devre yolları tesis edilmelidir.

Kondansatörün çektiği akımın efikas değeri, akımın temel harmonik ve yüksek harmoniklerinin kareleri toplamının kare köküne eşittir.

$$I_C = \sqrt{(I_{C1})^2 + (I_{C5})^2 + (I_{C7})^2} \quad (19)$$

$$I_C = \sqrt{(216,8)^2 + (58,76)^2 + (159,5)^2} = 275,5A$$

dir. Bu akım kondansatörün temel harmonikte çektiği akımın 1,27 katıdır. (275,5/216,8=1,27) Bu suretle kondansatörün çektiği akımın, kondansatörün nominal akımının 1,30 katını geçmediğinden zorlanmadığı anlaşılır.

$$I_1 = \omega C U_1 = 314 C U_1$$

$$U_5 = 0,0542 U_1 \quad I_5 = 5 \omega C U_5 = 5 \omega C \cdot 0,0542 U_1 = 85,1 C U_1$$

$$U_7 = 0,1049 U_1 \quad I_7 = 7 \omega C U_7 = 7 \omega C \cdot 0,1049 U_1 = 230,6 C U_1$$

değerleri

$$I_C = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2} \quad (20)$$

ifadesinde yerine konularak ta kondansatör akımı hesaplanabilir.

$$I_C = C U_1 \sqrt{(314)^2 + (85,5)^2 + (230,6)^2} = 398,85 C U_1$$

$$\frac{I_C}{I_1} = \frac{398,85 C U_1}{314 C U_1} = 1,27 \rightarrow I_C = 1,27 I_1$$

Kondansatör uçlarındaki gerilimin efikas değerini ve kondansatör gücünün nominal gücüne oranını bulalım. Temel ve yüksek harmonikleri haiz şebekede kondansatörün toplam gücü

$$Q_C = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \omega C \sum_{k=1}^{\infty} k U_k^2 \quad (21)$$

formülünden hesaplanır. Bu formül çözümüne çalıştığımız probleme göre

$$Q_C = \omega C U_1^2 + 5 \omega C U_5^2 + 7 \omega C U_7^2 \quad (22)$$

şeklini alır. Gerilimdeki harmonikler sebebiyle kondansatörün gücü de artar. Bir güç kondansatörünün ısınma bakımından zorlanması ve yalıtkanının sebep olduğu dielektrik kayıplarının hesabında bu toplam kondansatör gücü geçerlidir.

Kondansatörün uçlarındaki gerilimin efikas değeri, gerilimin temel harmonik ile yüksek harmoniklerinin karelerinin toplamının kare köküdür.

$$U_C = \sqrt{U_1^2 + U_5^2 + U_7^2} \quad (23)$$

$$U_C = U_1 \sqrt{1^2 + (0,0542)^2 + (0,1049)^2} = 1,007 U_1$$

dir. Kondansatör toplam gücü ise

$$\frac{Q_C}{Q_{Cn}} = \frac{\omega C U_1^2 + 5 \omega C U_5^2 + 7 \omega C U_7^2}{\omega C U_1^2}$$

$$= \frac{\omega C U_1^2 + 5 \omega C (0,0542)^2 U_1^2 + 7 \omega C (0,1049)^2 U_1^2}{\omega C U_1^2} \quad (24)$$

$$= 1 + 5(0,0542)^2 + 7(0,1049)^2 = 1,092$$

$$Q_C = 1,092 Q_{Cn}$$

olur. Bu iki değer de standartların kondansatörler için öngördüğü limitleri aşmamaktadır ve herhangi bir olumsuzluk söz konusu değildir [TSE 804 1969].

Kondansatörler gerek sinüzoidal, gerekse sinüzoidal olmayan kondansatör anma geriliminin 1,1 katını aşmayan sürekli hal gerilimine, sinüzoidal anma gerilimi ve frekansı ile çalıştıklarında, geçen akımın efikas değerinin 1,3 katını aşmayan sürekli hal faz akımına dayanmalıdır. Gerilimin 1,1U_n ve akımın da 1,3I_n ile sınırlandırılması reaktif gücün 1,35Q_n civarında sınırlandırılması demektir [Bayram 1977].

Mertebesi k olan bir yüksek harmoniğe ait gerilim ifadesini aşağıdaki gibi temel harmoniğin n katsayısı ile çarpımı şeklinde yazalım.

$$U_k = n U_1 \quad (25)$$

Q_C/Q_{Cn}=1,35 olması için n katsayısı

$$n = \frac{0,59}{\sqrt{k}} \quad (26)$$

olmalıdır. 5. ve 7. harmonikler için n katsayısı hesaplanırsa

$$n_5 = \frac{0,59}{\sqrt{5}} = 0,26 \quad n_7 = \frac{0,59}{\sqrt{7}} = 0,22$$

bulunur ve gerilimler için

$$U_5 = 0,26 U_1 \quad U_7 = 0,22 U_1$$

yazılır. Demek ki Q_C/Q_{Cn}=1,35 olması için 5. harmonik geriliminin değeri ve 7. harmonik geriliminin değeri yukarıda bulunan U₅ ve U₇ gerilimlerinden büyük olmamalıdır.

Güç trafoları aşırı doymadan dolayı ekseriya 5. ve 7. harmonik ürettiklerinden, doğrultucunun devreden çıkması durumunda rezonans tehlikesinin olup olmadığını araştıralım. Bunun için

$$\frac{Q_C}{N_T} \leq \frac{1}{k^2 u_k} \quad (27)$$

şartı tahkik edilmelidir. Burada u_k trafonun kısa devre gerilimini, N_T ise trafonun gücünü göstermektedir.

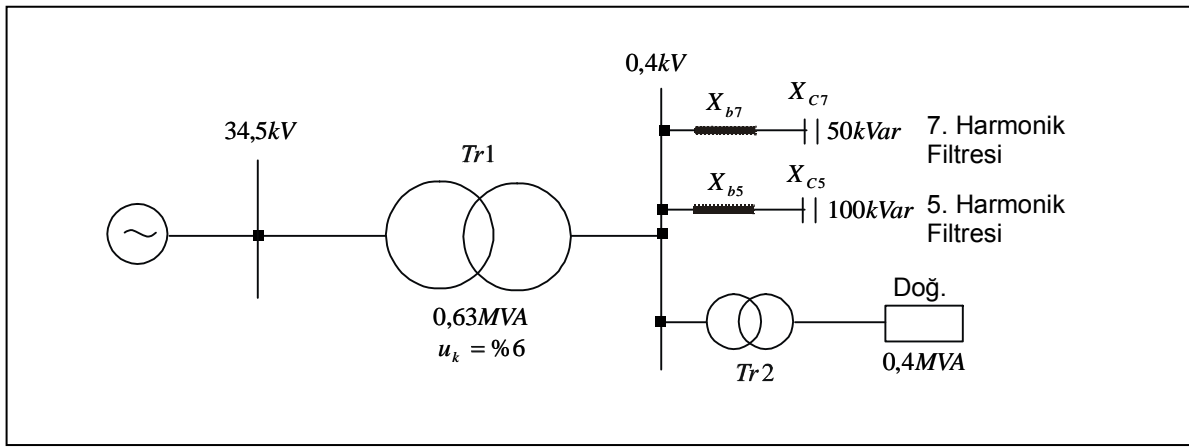
$$\frac{Q_C}{N_T} = \frac{150}{630} = 0,238$$

$$\frac{1}{k^2 \cdot u_k} = \frac{1}{5^2 \cdot 0,06} = 0,67 \quad \frac{1}{k^2 \cdot u_k} = \frac{1}{7^2 \cdot 0,06} = 0,34$$

Tesis bu şarta uygundur. Trafodaki gerilim artışı ve gerilimin alacağı değer

$$\% \varepsilon = (\% u_k) \frac{Q_C}{N_T} = 6 \frac{150}{630} = \% 1,43V \quad 400 + 400 \cdot \frac{1,43}{100} = 405,72V$$

bulunur. Bir trafoya bağlanacak kondansatörün en fazla gücünün ne olması gerektiği bulunurken sadece trafonun reaktansının değil, kondansatörden önce bulunan bütün reaktansların da hesaba katılması lazımdır. Hesaplanan filtre devrelerinin tesise dahil edilmesi ile tesisin şalt şeması şekil 11 deki gibi olur. Şekil 11 de filtre reaktörlerinin reaktansları bobin manasına gelmek üzere b indisi ile gösterilmiştir.



Şekil 11 - Filtre bağlantı şeması

Yeni durumda tesisin temel harmonikteki şemasını çizelim (Şekil 12). Şemada 5. harmonik ve 7. harmonik filtrelerinin eşdeğer empedansını bularak şemayı basitleştirelim (Şekil 13).

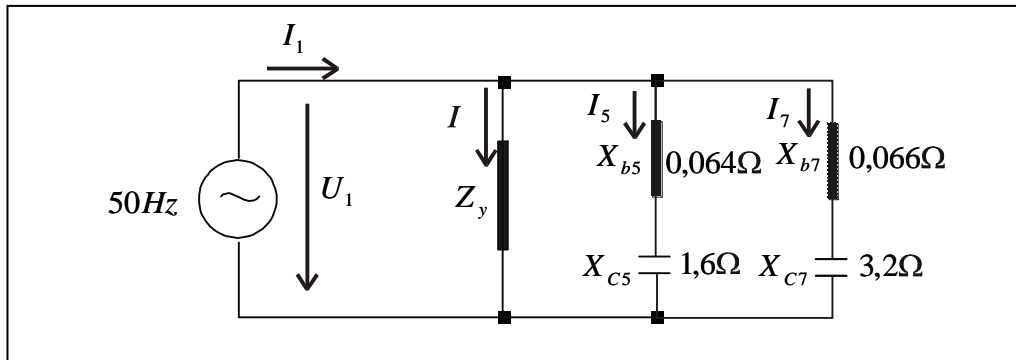
$$X_5 = X_{b5} - X_{C5} = 0,064 - 1,6 = -1,536\Omega$$

$$X_7 = X_{b7} - X_{C7} = 0,066 - 3,2 = -3,134\Omega$$

$$X_{fil.} = \frac{1}{\frac{1}{-1,536} + \frac{1}{-3,134}} = -1,031\Omega$$

Daha önce I₅ ve I₇ akımları için

$$I_{5(1)} = \frac{231}{\sqrt{(0,064)^2 + (1,6)^2}} = \frac{231}{1,536} = 150,4A$$



Şekil 12 - Temel frekansta filtreler dahil empedans şeması

$$I_{7(1)} = \frac{231}{\sqrt{(0,066)^2 + (3,2)^2}} = \frac{231}{3,134} = 73,7A$$

bulunmuştur. $I_{fil.}$ akımı

$$I_{fil.} = \frac{231}{\sqrt{(1,031)^2}} = 224A$$

olur. I_1 akımı ve güç faktörü

$$\begin{aligned} I_1 &= 462,4 + j346,8 - j150,4 - j73,7 = 462,4 + j346,8 - j224 \\ &= 462,4 + j122,8 \end{aligned}$$

$$I_1 = \sqrt{(462,4)^2 + (122,8)^2} = 478,4A$$

$$\theta = \arctg \frac{122,8}{462,4} = \arctg 0,26557 = 15^\circ$$

$$\cos \theta = 0,966$$

bulunur. Burada tesisin harmoniklerinin yok edilmesine matuf olmak üzere yapılan filtre ilavesinin diğer bir olumlu tesiri zikredilecektir.

Görünen gücü N_1 olan bir tesisin güç faktörü $\cos \varphi_1$ den $\cos \varphi_2$ ye çıkarıldığı zaman (görünen güç N_2 olur) tesisin görünen gücünün ilk görünen güce göre yüzde olarak azalmasını veren formül

$$n = 100 \frac{N_1 - N_2}{N_1} = 100 \left(1 - \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right) \quad (28)$$

dir. Azalma hesaplanırsa

$$n = 100 \left(\frac{0,8}{0,966} \right) = \%82,81$$

bulunur. Güç gereksinimi 630 kVA lık gücün

$$\frac{630.82,81}{100} = 521,8kVA$$

lık güce düşer. Ayrıca görünen güç sabit tutulmak suretiyle tesiste aktif güçteki artma

$$P_{aktif} = 100 \left(\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} - 1 \right) \quad (29)$$

$$= 100 \left(\frac{0,966}{0,8} - 1 \right) = \%20,75$$

bulunur. Bu durumda tesise %20,75 lik bir aktif güç daha ilave edilebilecektir.

Bobinlerin ve kondansatörlerin uçlarına isabet eden gerilimler aşağıda verilmiştir.

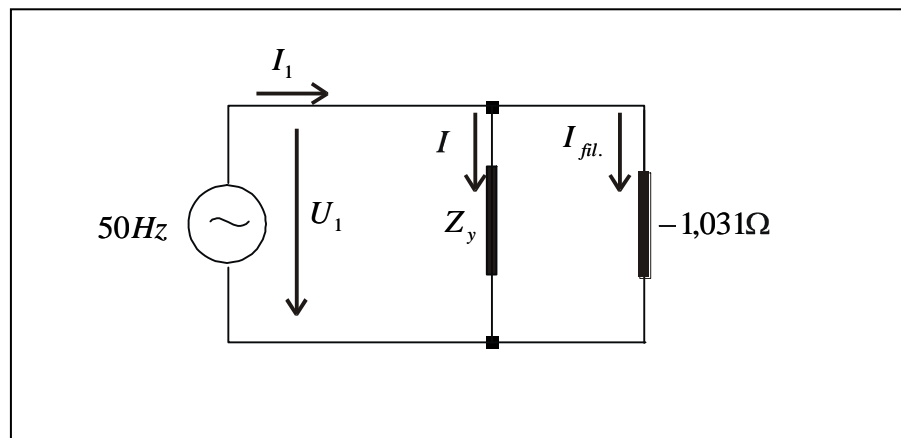
$$U_{b5(1)} = I_{5(1)} \cdot X_{b5(1)} = 150,4 \cdot 0,064 = 9,6V$$

$$U_{b7(1)} = I_{7(1)} \cdot X_{b7(1)} = 73,7 \cdot 0,066 = 4,86V$$

$$U_{C5(1)} = I_{5(1)} \cdot X_{C5(1)} = 150,4 \cdot 1,6 = 240,6V$$

$$U_{C7(1)} = I_{7(1)} \cdot X_{C7(1)} = 73,7 \cdot 3,2 = 235,8V$$

Tesise ait 5. harmonik ve 7. harmonik frekansındaki empedans diyagramlarını çizelim. Önce 5. harmoniğe ait eşdeğer empedans şemasinin elemanlarının değerlerini hesaplayalım. Filtre devreleri trafo reaktansına paralel bağlıdır ve dolayısıyla birbirlerine de paralel bağlıdır. 7. harmonik filtresinin 5. harmoniğe ait empedans şemasindeki değeri



Şekil 13 - Eşdeğer empedans şeması

$$X'_{b7(5)} = kX_{b7(1)} = 5 \cdot 0,066 = 0,33\Omega$$

$$X'_{C7(5)} = \frac{X_{C1}}{k} = \frac{3,2}{5} = 0,64\Omega$$

$$X' = X'_{b7(5)} + X'_{C7(5)} = 0,33 - 0,64 = -0,31\Omega$$

olup bu reaktans trafo reaktansı ile paralel bağlıdır. Buna göre eşdeğer reaktans

$$X = \frac{1}{\frac{1}{5,0,0152} - \frac{1}{0,31}} = \frac{1}{\frac{1}{0,076} - \frac{1}{0,31}} = 0,1\Omega$$

bulunur. Şimdi de 7. harmoniğe ait eşdeğer empedans şemasının elemanlarının değerlerini hesaplayalım. Aynı şekilde trafo reaktansı ile 5. harmonik filtresi reaktansı birbirine paralel

bağlıdır. 5. harmonik filtresinin 7. harmoniğe ait empedans şemasındaki değeri

$$X'_{b5(7)} = kX_{b5(1)} = 7,0,064 = 0,448\Omega$$

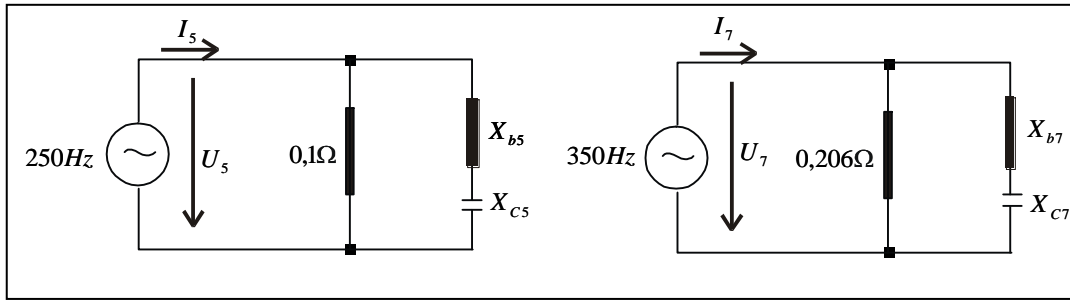
$$X'_{C5(7)} = \frac{X_{C1}}{k} = \frac{1,6}{7} = 0,228\Omega$$

$$X' = X'_{b5(7)} - X'_{C5(7)} = 0,448 - 0,228 = -0,22\Omega$$

olup buna göre eşdeğer reaktans

$$X = \frac{1}{\frac{1}{7,0,0152} - \frac{1}{0,22}} = \frac{1}{\frac{1}{0,1064} - \frac{1}{0,22}} = 0,206\Omega$$

bulunur. Bu değerlere göre eşdeğer empedans şemaları çizilirse aşağıdaki gibi olur (Şekil 14).



Şekil 14 - Harmonik eşdeğer şemaları

Bu şemalara göre, 5. harmonik gerilimi 5. harmonik filtresi uçlarına geleceğinden ve $X_{b5} - X_{C5} = 0$ olduğundan I_5 akımı bağlantı iletkenlerinin omik direnci üzerinden kolayca devresini tamamlar. Aynı şekilde 7. harmonik akımı da $X_{b7} - X_{C7} = 0$ olduğundan 7. harmonik filtresi üzerinden akar.

Filtre elemanlarının uçlarındaki gerilimleri hesaplayalım. Filtre devreleri seri rezonans devreleri olduğuna göre 5. harmonik filtresi bobini ve kondansatörü uçlarındaki gerilimler birbirine eşit olup

$$U_{b5} = U_{C5} = I_5 \sqrt{\frac{L}{C}} = 106,3 \sqrt{\frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{1990 \cdot 10^{-6}}} = 106,3 \sqrt{\frac{0,2 \cdot 10^3}{1990}} = 33,7V$$

bulunur. 7. harmonik filtresi bobini ve kondansatörü uçlarındaki gerilimler ise

$$U_{b7} = U_{C7} = I_7 \sqrt{\frac{L}{C}} = 68,5 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^{-3}}{995 \cdot 10^{-6}}} = 68,5 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^3}{995}} = 31,51V$$

dur. Kondansatörlerin uçlarındaki gerilimlerin efikas değerleri

$$U_{C5} = \sqrt{U_1^2 + U_5^2} = \sqrt{(240,6)^2 + (33,7)^2} = 243V$$

$$U_{C7} = \sqrt{U_1^2 + U_7^2} = \sqrt{(235,8)^2 + (31,5)^2} = 238V$$

dur. Aşılmaması gereken gerilimin standart sınır değeri hesaplandığında bu değer $1,1U_n/\sqrt{3} = 1,1 \cdot 1400/\sqrt{3} = 254V$ olduğu ve yukarıda bulunan değerlerin bu sınır değerden küçük olduğu anlaşılır. Bu gerilimlerin nominal gerilimlere göre yüzdesini bulalım.

$$u_5 = \frac{33,7}{231} \cdot 100 = \%14,59$$

$$u_7 = \frac{31,5}{231} \cdot 100 = \%13,63$$

Kondansatör toplam gücü sırası ile

$$\frac{Q_C}{Q_{Cn}} = \frac{\omega C U_1^2 + 5\omega C U_5^2}{\omega C U_1^2} = 1 + 5(0,1459)^2 = 1,1$$

$$Q_C = 1,1Q_{C_n}$$

$$\frac{Q_C}{Q_{C_n}} = \frac{\omega C U_1^2 + 7\omega C U_7^2}{\omega C U_1^2} = 1 + 7(0,1363)^2 = 1,13$$

$$Q_C = 1,13Q_{C_n}$$

olur. Kondansatörlerin çektikleri akımların değerleri

$$I_{C5} = \sqrt{I_{5(1)}^2 + I_5^2} = \sqrt{(150,4)^2 + (106,3)^2} = 184A$$

$$I_{C7} = \sqrt{I_{7(1)}^2 + I_7^2} = \sqrt{(73,7)^2 + (68,5)^2} = 100,6A$$

dir. Buna göre bu akımların, kondansatörlerin temel harmonikte çektikleri akımlara oranı 5. harmonik filtresine ait kondansatörde 184/150,4=1,22 ve 7. harmonik filtresine ait kondansatörde 100,6/73,7=1,36 dır. Standart değer 1,3I_C olduğundan 7. harmonik filtresindeki kondansatörün zorlandığı açığa çıkmaktadır. Bunun bertaraf edilmesi için 7. harmonik için tesis edilen filtrenin bağlantı iletkenlerinin omik direncinin büyük olması temin edilmelidir. Bu suretle yukarıda bulunan I_{C7} değeri küçüleceğinden oran 1,3I_C nin altına iner. R=0,05Ω luk bir bağlantı direnci yukarıda hesaplanan oranın 1,29I_C olmasını temin eder.

5. harmonik filtresi bobininin uçlarındaki gerilimin efikas değeri

$$U_{b5} = \sqrt{(9,6)^2 + (33,7)^2} = 35V$$

dur. Bobinden geçen akımın efikas değeri bu filtrenin kondansatöründen geçen akıma eşittir. 7. harmonik filtresi bobininin uçlarındaki gerilimin efikas değeri

$$U_{b7} = \sqrt{(4,86)^2 + (31,51)^2} = 32V$$

dur. Yine bu filtrenin bobininden geçen akım bu filtrenin kondansatöründen geçen akıma eşittir.

Bobinler hesap edilen bu akım ve gerilim değerlerine göre boyutlandırılmalıdır. Bobinler sırası ile 0,2mH değerinde 184A ve 0,21 mH değerinde 101A i kolayca geçirebilmeli, demir çekirdekleri ve sargıları ısınmamalı, geçici rejim halinde zorlanmamalıdır.

Kondansatörler ekonomik sebeplerden üçgen olarak bağlanırlar. Filtre kondansatörlerinin esas bağlantıları olan üçgen bağlantı halinde kapasiteleri

$$Q_C = 3U_f I_f = 3U_f \frac{U_f}{X_C} = 3U_f^2 \omega C = 3\omega C U_n^2$$

$$C = \frac{Q_C}{3\omega U_n^2} = \frac{100000}{3.314.(400)^2} = 663\mu F$$

$$C = \frac{50000}{3.314.(400)^2} = 330\mu F$$

olacaktır. Bu değerler aşağıda yapıldığı gibi yıldız bağlı iken ki kapasiteleri 3 e bölünmek suretiyle de bulunabilir.

$$C_{\Delta} = \frac{C_{\star}}{3} = \frac{1995}{3} = 663\mu F$$

$$C_{\Delta} = \frac{C_{\star}}{3} = \frac{990}{3} = 330\mu F$$

Filtrelerin üç kutuplu bağlantı şeması aşağıda gösterilmiştir (Şekil 15).

Son olarak 0,20 mH lik demir çekirdekli bobinin hesabı yapılacaktır (şekil16).

Bobinden geçen akımın değeri I=184A dir. Akım yoğunluğu j=6A/mm² olmak üzere iletken kesitini 3x10mm² lik bakır lama seçelim. Sarım sayısı 7 olursa toplam ampersarım θ=πI=7.184=1288 Aπ olur. Demir çekirdeğin ölçüleri resimdeki gibi olup F kesiti 40x90 mm² dir.

184/6=30,67 mm² hesaplanan iletken kesitine karşılık, sargı tek kat ve 7 sarımdan ibaret ve soğuma bakımından müsait olduğundan 30 mm² lik norm bakır iletken seçilmiştir. Demir çekirdeğin inşasında 0,5 mm kalınlığında 200 adet silisyumlu saç kullanılacaktır. Ampersarım belli olduğuna göre magnetik alan şiddeti

$$\theta = Hl \quad (30)$$

$$\theta = Hl = 1288 \rightarrow H = \frac{1288}{0,36} = 3577A/m$$

dir. Burada θ toplam ampersarımı, H magnetik alan şiddetini I demir yolu boyunu gösterir. Buna tekabül eden magnetik endüksiyonunun değeri, silisyumlu saçın mıknatıslanma eğrisinden bulunur. Bu suretle eğriden magnetik endüksiyon için B=1,5 Wb/m² değeri okunur. O halde demir çekirdeğin μ magnetik geçirgenliği

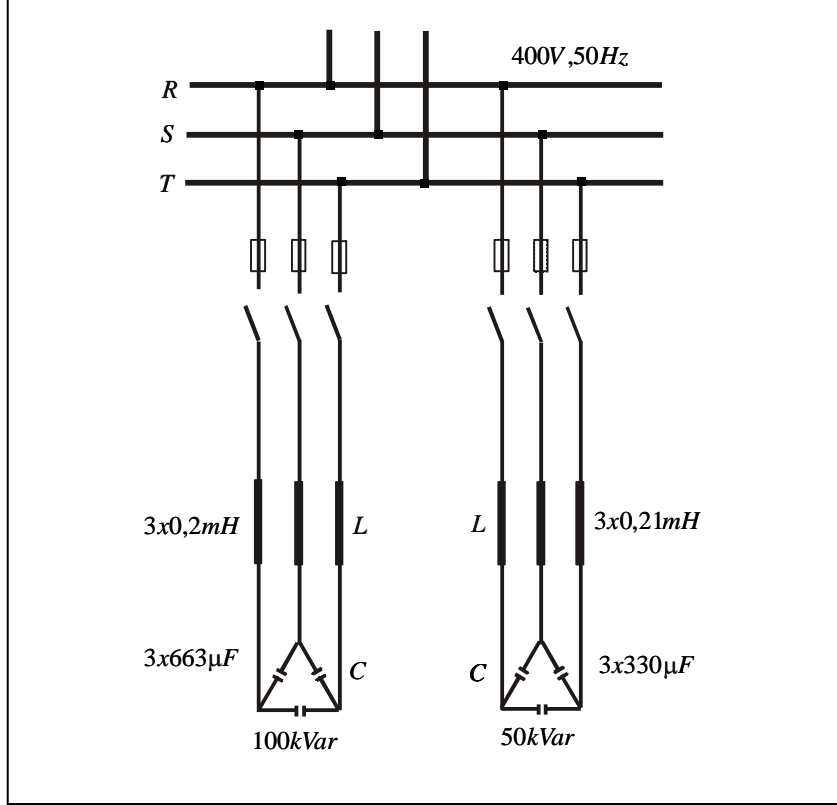
$$\mu = \frac{B}{H} \quad (31)$$

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{1,5}{3577} = 0,0004193 \text{Wb/ Am}$$

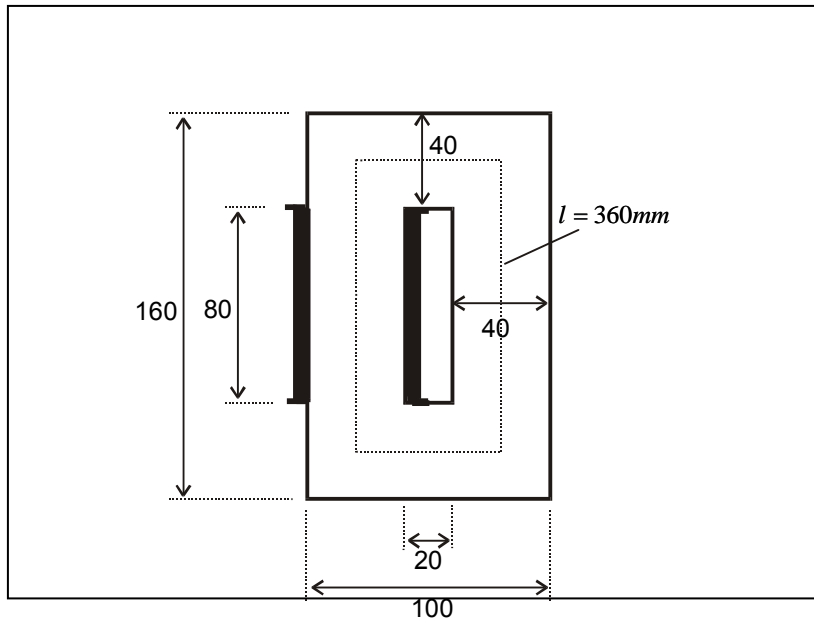
$$L = \frac{\omega^2}{R_m} = \frac{\omega^2}{\frac{l}{\mu F}}$$

(32)

olacağından demir çekirdekli bobinin endüktansı



Şekil 15 Pasif filtrelerin üç kutuplu bağlantı şeması



Şekil 16 Reaktörün yapısı

$$L = \frac{\omega^2}{R_m} = \frac{\omega^2}{\frac{l}{\mu F}} = \frac{(7)^2 \cdot 0,0004193 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3}}{0,36} = 0,205 \cdot 10^{-3} H$$

$$= 0,2mH$$

olarak hesaplanır. Bu ifadede ω sarım sayısını, R_m magnetik direnci, F demir kesitini, l demir boyunu, μ magnetik geçirgenliği temsil eder. Sargı demir üzerine $3 \times 10 \text{ mm}^2$ lik yassı bakırdan tek kat olarak 7 siper sarılacaktır. Demir ağırlığı 10 kg, bakır ağırlığı 0,6 kg dır. Diğer filtre reaktörü için de benzer yolla hesaplanan bobin kullanılır. Piyasada üç fazlı demir çekirdek üzerine her bir fazı ayrı ayrı sarılmış altı uçlu reaktörler bulunmaktadır.

4 SONUÇ

Harmonikleri haiz şebekelerde bunların olumsuz etkilerinin bertaraf edilmesinde kullanılan filtrelerden bahsedilmiş, filtre çeşitlerine kısaca temas edilmiştir. Bir tesiste 5. ve 7. harmoniklerin filtrelerle yok edilmesi örnek olarak gösterilmiş, örnek problemin oldukça tafsilatlı çözümü yapılmıştır. Burada incelenen ve bahsi geçen filtre tipi en basit olan pasif filtre tipidir. Pasif filtre bir seri rezonans devresinden ibaret olup, hangi harmonik için hesaplanmışsa o harmonik frekansında rezonansa gelir ve harmonik akımını toprağa akıtır. Böylece harmonik akımının şebekenin empedansı düşük olan yerlerinde dolaşarak ilave kayıplara, ısınmalara, gerilim düşümüne, şalterlerin patlamasına, kondansatörler gibi yüksek frekanslarda empedansı düşük olan elemanların yanmasına sebep olması önlenir. Şebeke gerilimindeki bozulmalar az olur.

Aslında bütün tesislerde, proje aşamasında harmoniklerin oluşmaması için alınacak tedbirler vardır. Bunlar doğrultucuların veya invertör besleme trafolarının çift sekonderli ve çok fazlı yapılması gibi daha birçok teknik çareler olup, harmoniklerin genlik değerlerinin küçük olmasını, mertebelerinin yüksek olmasını temin ederler. Daha ucuz filtreler bu suretle söz konusu olur. Tesislerde kullanılan motorların iş makinesinin gücüne nazaran fazla büyük seçilmemesi, motorların tam gücünde ve güç plakalarında yazan güç faktöründe çalışmalarını sağlar. Bu hususa dikkat edilmesi oldukça büyük miktarda ekonomi sağlar. Yine çok miktarda küçük güçlü motor kullanılması tesisin güç faktörünü kötüleştirir. Çünkü küçük motorların güç faktörü ve randımanı çok düşüktür. Bunlar yerine kullanılacak az miktarda büyük güçteki motorların güç faktörü ve randımanı büyüktür. Bu suretle güç kompanzasyonu için gerekli kondansatör bataryaları için daha küçük güçlerden bahsedilir. En önemlisi ise ilk inşa maliyetinin

küçük olması haricinde elektrik enerjisi için daha az ücret ödeneceğidir. Trafoların primerinin üçgen bağlanması, 3. harmoniğin şebekeye intikal etmesini önler. Harmonik bu sargı içinde kalır. Primeri yıldız bağlı trafolarla üçüncü harmonik akımlarının şebekeye intikalini önlemek bakımından bir tersiyer sargı bulunmalıdır.

Elektrik tesislerinde daha çok yarı iletken elemanların kullanılması, pasif filtrelerin daha çabuk reaksiyon göstermemesi, aktif filtrelerin kullanılmasını zaruri kılmıştır. Ancak ekonomik olması koşulu aranmalıdır. Aktif filtreler çok pahalı ve kıymetli elemanlardır. Ark ocakları gibi çabuk değişen yüklerde, çabuk reaksiyon veren elektronik düzeneklerin tesis edilmesi zaruridir. Buna benzer yüklerde kondansatör bataryalarının devreye girip çıkmasında, artık büyük güçte imal edilmeleri mümkün olan, oldukça güvenilir yarı iletken şalterler kullanılır. Reaktörlerin kontrolünde birbirine ters paralel bağlı tristörler kullanılır.

5 KAYNAKLAR

- [1] Özenç M. "Sinüzoidal olmayan alternatif akımlar, harmonik akım kaynakları ve olumsuz etkileri" Kayseri, Nisan 2000 (yayınlanmamış)
- [2] Özenç M. "Sinüzoidal olmayan alternatif akımların analizi" DSİ teknik bülteni sayı 117 nisan 2014
- [3] Bayram M. Prof Dr "Kompanzasyon tesislerinde rezonans olayları ve bunların önlenmesi" Elektroteknik mecmuası İTÜ temmuz, ağustos, eylül 1985
- [4] Bayram M. Prof Dr "Güç katsayılarının düzeltilmesi ve güç kondansatörleri" Elektroteknik mecmuası İTÜ Mart 1977
- [5] Duman S., Ferik Y., Alboyacı B., Yörükeren N., "Doğru akımla çalışan ark ocaklarında harmonik analizi" Düzce Üniversitesi, Kocaeli Üniversitesi. 2011
- [6] Tunçalp K., ve Sucu M. "Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinde pasif filtre ve filtreli kompanzasyonun kullanımı ve simülasyon örnekleri" Politeknik dergisi cilt 9 sayı 4 2006
- [7] Hilkar "power resistors, reactors, testing systems" www.hilkar.com
- [8] Irwin J.D. Nelms R.M. "Temel mühendislik devre analizi" Nobel akademik yayıncılık Ltd. Şti 2013
- [9] TS 804 "Güç kondansatörleri" TSE 1.Baskı Aralık1969
- [10] Bettage E. and Fiorina N.J. Activ harmonic conditioners and unity power factor rectifiers Schneider electric teknik tebliği 1999

BARAJ İZLEMEDE YENİLİKÇİ ARAÇLAR: BARAJLARDA FİBER OPTİK SENSOR UYGULAMALARI

Hakan SOLAK
(DSİ Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı 06100 Yücetepe ANKARA)
hakansolak@dsi.gov.tr

(Makalenin geliş tarihi: 06.10.2015, Makalenin kabul tarihi: 25.04.2016)

ÖZ

İnşaat mühendisliği işlerinin özellikle de büyük ölçekli yapıların işletilmesi ve güvenliği bir hayli önem arz etmektedir. Tünel, köprü ve baraj gibi pek çok inşaat yapısında yapılacak olan periyodik izlemeler bu yapıların güvenliklerini artırmakta ve oluşabilecek büyük tehlikeleri önceden görmemize imkân sunmaktadır. Erken teşhis sayesinde daha az bir maliyetle ve her hangi bir can kaybı yaşanmadan problemleri çözmek mümkün olabilmektedir. Bu yapıların izlenmesindeki tekniklerin büyük bir bölümü deformasyon, yer değiştirme, gerilme ve sıcaklık ölçümü temeline dayanmaktadır. İlgili bu büyüklükleri fiber optik sensorlerle ölçerek, hem yapının inşaat aşamasında hem de uzun vadede kullanılacak bilgiler elde edilmektedir. Barajların yapısal durumlarının izlenmesinde baraj gövdesine veya çeşitli noktalarına yerleştirilen ölçüm cihazları kritik önem taşımaktadır. Baraj ölçüm cihazları arasında fiber optik sensorlerin ayrı bir yeri vardır. Pek çok açıdan fiber optik sensorler, inşaat yapılarının izlenmesi için ideal dönüştürücülerdir. Dayanıklı, sabit ve dış aksaklıklara karşı duyarsız olmaları açısından özellikle inşaat yapılarının uzun vadeli değerlendirilmeleri için çok önemlidirler.

Bu çalışma, yukarıda sıralanan büyüklüklerin ölçümünde kullanılan fiber optik sensorleri ve bu fiber optik sensorlerin kullanımına yönelik örnek uygulamaları sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon Sensorü, Gerilme Sensorü, Yer Değiştirme Sensorü, Fiber Optik Sensorler, Baraj İzleme, Dağıtılmış Isı Ölçümü, Kaçak Sezme, Sızıntı Akış Hızı Ölçümü, İç Erozyon, CFRD, Baraj Aleti, DFOT.

INNOVATIVE TOOLS FOR MONITORING DAM: FIBER OPTIC SENSOR APPLICATIONS IN DAMS

ABSTRACT

Operation and safety, especially in the large-scale structure of the civil engineering works is of considerable importance. Periodic monitoring made in many construction structures such as tunnel, bridges and dams increases the safety of these structures and it offers us the opportunity to see great dangers that may occur in advance. Thanks to early diagnosis is possible to solve problem with a lesser cost and without experienced any loss of life. A large part of the technical considerations of in observation of these structures are based on deformation, displacement, strain and temperature measurement. Both construction period of structure and long term information which can be used is obtained by measuring with fiber optic sensors related these magnitudes. Measurement devices placed at dam body or various points in the monitoring of the structural condition of the dams is of critical importance. Fiber optic sensors have a separate importance among the dam measurement devices. In many aspects fiber optic sensors are ideal transducers for monitoring of building structures. They are very important in terms of being durable, stable and insensitive to external disruptions especially for long-term evaluation of the building structures.

This study provides fiber optic sensors used in measuring of magnitudes listed above and example applications for the use of these fiber optic sensors.

Key Words: Deformation Sensor, Strain Sensor, Displacement Sensor, Fiber Optic Sensors, Dam Monitoring, Distributed Temperature Measurement, Leakage Dedection, Seepage Flow Velocity Measurement, Internal Erosion, CFRD, Dam Instrument, DFOT.

1 GİRİŞ

Bir yapısal durum izleme sistemi, yapının ve çevresinin durumuna ilişkin parametreleri ölçen sensorler açısından meydana gelir. Genellikle baraj izleme sistemleri; farklı fiziksel büyüklüklerin miktarlarındaki değişiklikler hakkında önemli bilgiler sağlayan elektrik, hidrolik veya pnömatik prensiplere dayalı alışlagelmiş aletleri kullanır. Alışlagelmiş aletler içeren ölçümlerin aksine dağıtılmış fiber optik ölçümler, çok yüksek bilgi yoğunluğu ile kablo boyunca sürekli ölçümleri güvenli bir şekilde ortaya koyar[1]. Mekanik ve/veya elektrikli dönüştürücülere dayalı geleneksel sensorler, aşağıdaki parametrelerin çoğunu ölçebilmektedir.

- İvme
- Akış
- Güç
- Ses
- Mesafe
- Sıcaklık
- Hareket
- Kimyasal Maddeler/Gazlar
- Manyetik/Elektrik Alanlar
- Yüzey Koşulları
- Viskozite
- Yakınlık (Proximity)
- Konum(Lineer, Açısal)
- Renk
- Nem
- Hız
- Basınç
- Radyasyon
- Sıvı seviyesi
- Titreşim

Son yıllarda fiber optik sensorler, sensor panoramasına yavaş ancak önemli bir giriş yapmıştır. Basit bir fiber optik sensor, bir ışık kaynağı, fiber optik, duyarlı bir eleman ve bir algılayıcıdan oluşur. Fiber optik sensorler yukarıdaki parametrelerin tamamını rahatlıkla algılayabilmektedir[2]. Algılama kabiliyetine ilave olarak, ölçümlerin daha iyi kalitede, daha güvenilir bir şekilde olması, manuel okumaların ve operatör görüşünün otomatik ölçümlerle değiştirilme olasılığı, daha kolay kurulum ve bakım ya da daha düşük hizmet ömrü maliyetleri, fiber optik sensorlerin avantajları olarak karşımıza çıkmaktadır[3].

Fiber optik sensorlerin inşaat yapılarının izlenmesi kapsamındaki ilk başarılı endüstriyel uygulaması, bu teknolojinin artık rutin bir kullanım için yeterince olgun olduğunu ve geleneksel aletlerle yarışabileceğini göstermiştir. İzleme, bir yapının ve kullanıcılarının güvenliğini sağlamak açısından temel bir gerekliliktir. Ayrıca bakım müdahalesinin planlanmasına yardımcı olur ve yapının gerçek davranışına ilişkin bilgiyi artırarak gelecekteki benzer yapıların optimizasyonuna imkân tanır. Ayrıca izleme;

hidroelektrik yapıların, ekonomik, sosyal ve çevresel önemi nedeniyle uygun baraj yönetiminde çok önemli bir aşamadır. Barajlarda yapılan bir dizi garantiye alma tedbirleri, sadece yapıların ve işletmecilerin güvenliği için olmayıp aynı zamanda işletme ve baraj bakımını optimize etmek için de önemlidir. Fiber optik sensorler, mevcut ve yeni yapılarda deformasyon ve/veya yer değiştirme ölçümlerinin her ikisinin de ölçülmesinde kullanılabilir. Baraj gövdelerinde, gövde çatlaklarının tespiti ve su sızıntılarının algılanabilmesinde en etkin algılama sistemi fiber optik sensorlerin kullanımlarıyla yapılabilir[4]. Kısaca dağıtılmış fiber optik ölçümler, bir kablo boyunca her türlü ölçüm şartlarını dikkate alan ve son derece yüksek bir bilgi yoğunluğunu garanti eden ölçümlerdir.

2 FİBER OPTİK TEMELLERİ

Optik fiberlerin kullanımında en önemli faktörlerden birisi ışık kaynağı ve alıcı arasında ışığın yol aldığı ortamın saflığıdır. Işığı fiber içerisine sokmak ve oradan çıkmamasını sağlamak için kullanılacak en basit yol eş eksenli ve kırılma katsayısı farklı katmanları optik dalga kılavuzu olarak kullanmaktır. Bu yüzden bir fiber optik çekirdek, yansıtıcı ve kılıf olmak üzere üç kısımdan oluşur. Öz bölgesi kılıfa göre daha yüksek kırılma katsayılı maddeden yapılır. Bilindiği üzere bir maddenin kırılma katsayısı, ışığın boşluktaki hızının o maddedeki hızına oranı olarak tanımlanır.

$$n_i = C/C_i \dots 1$$

C: Işığın boşluktaki hızı,

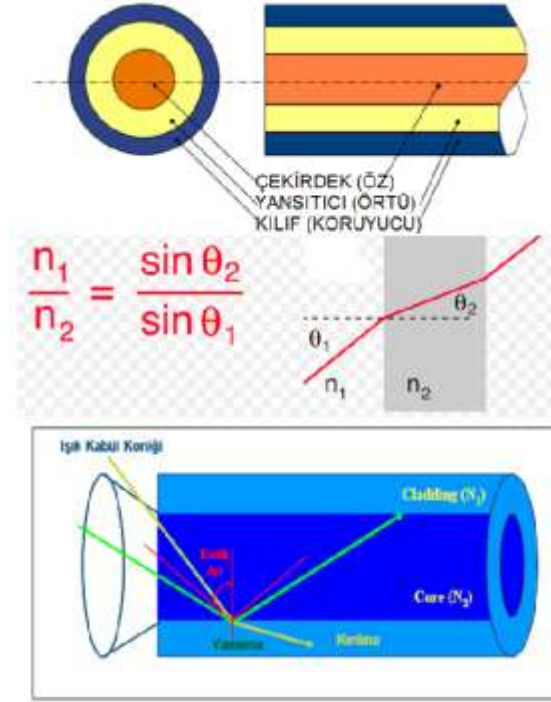
C_i: Işığın madde içerisindeki hızı.

Eğer ışık kırılma katsayısı “n” olan ışık geçiren bir maddeden geçiyorsa ilerleme hızı “n”kere azalır. Şekil 1’ de fiber optiğin temel yapısı ve Snell Kanunu gösterilmiştir. Çekirdek, silindirik çubuk şeklinde ve genellikle de cam olan bir dielektrik malzemeden yapılmıştır. Işık ağırlıklı olarak çekirdek boyunca yayılır[5].

Fiber optik teknolojisi, büyük avantajlarıyla haberleşme ve sensor teknolojisinde büyük bir çığır açmıştır. Fiber optik haberleşmenin avantajlarını şöyle sıralamak mümkündür;

- Yüksek veri iletim kapasitesi,
- Uzun tekrarlayıcı aralığı,
- Kanal başına maliyetin düşük olması,
- Bilgi güvenliği,
- Elektromanyetik girişimlerden etkilenmemesi,
- Diyafoni olmaması,
- Değişik çevre şartlarına uyumluluk,
- Tesis kolaylığı.

Bu avantajlarının yanı sıra çok azda olsa maliyet gibi). Tek modlu ve çok modlu olmak üzere fiber optikler iki gruba ayrılırlar. Kırılma profiline göre indeksine bağlı olarak sınıflandırıldığında ise basamak indisli fiber optikler ve dereceli indisli fiber optikler olmak üzere yine ikiye ayrılırlar (Şekil 2).

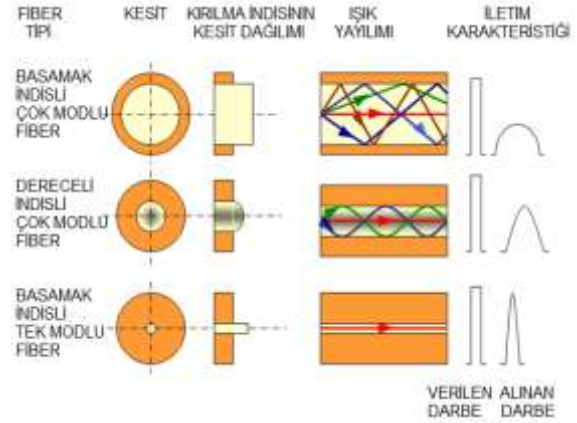


Şekil 1- Bir Fiber Optiğin Temel Yapısı ve Snell Kanunu[6].

3 FİBER OPTİK SENSOR PRENSİPLERİ

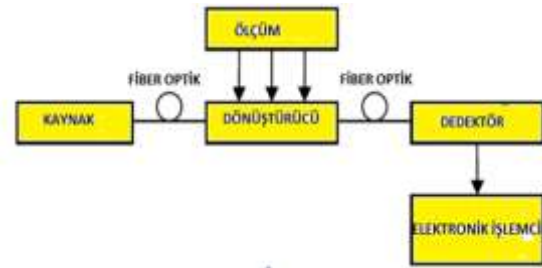
Fiber optik sensorler, ışık enerjisini elektriksel sinyallere dönüştüren cihazlardır. Fiber optik kablolar ise ışığı uzak yerlere taşıyan mekaniksel parçalardır. Fiber optik sensor sistemi ise uzaktaki bir sensöre veya yükseltece bağlı fiber optik kablodan oluşur. Fiber optik kablunun içerisinde ışığın iletimi tam yansıma prensibine dayanır. Bu prensip sayesinde ışık enerjisi kayba uğramadan uzak mesafelere kolayca ulaşabilir. Ancak bu işlemin olabilmesi için yeter ve gerek şartlar, kritik açının gelme açısından küçük olması ve kılıf maddesinin yoğunluğunun çekirdek maddesinin yoğunluğundan az olmasıdır.

dezavantajları da vardır (ek yapma zorluğu ve



Şekil 2- Üç Ayrı Fiber Optiğin Karakteristik Özellikleri[6].

Bir fiber optik sensor sisteminin genel yapısı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 3). Şekilden de anlaşılacağı üzere bir optik kaynak (lazer, LED, lazer diyodu vb.), fiber optik, algılama veya modülatör elemanı, bir optik dedektör ve bir elektronik işlemciden oluşur. Kaynak elektriksel enerjiyi ışık enerjisine dönüştürerek fiber sensöre ışık sağlar. Optik modülatör/dönüştürücü optik fiber sistemlerde faz, genlik, frekans ve polarizasyon modülasyonu gibi fonksiyonları yerine getirir. Optik dedektörler ise yer aldıkları optik haberleşme sisteminin performansını yönlendiren elemanlardan birisidir. Dedektörler optik sinyali elektriksel sinyale dönüştürürler[5].



Şekil 3- Fiber Optik Sisteminin Temel Bileşenleri.

4 FİBER OPTİK SENSOR TİPLERİ

En genel anlamda fiber optik sensorler; algılama konumu, çalışma prensibi (modülasyon biçimi bakımından) ve uygulama alanı olmak üzere üç kategori altında sınıflandırılabilir[5]. Bu sınıflandırmanın alt içerikleri ise şöyle olmaktadır [22, 23].

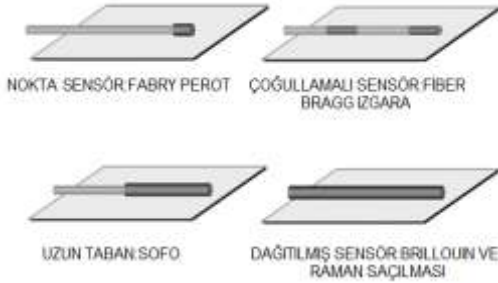
- Algılama konumu
(1) İntrinsic (2) Ektrinsic
- Modülasyon tekniği
(1) Yoğunluk (2) Faz

- (3) Frekans (4)Polarizasyon
- (5) Dalgaboyu

- Uygulama alanı
 - (1) Fiziksel (2) Kimyasal
 - (3) Biyomedikal

Hem akademik hem de endüstriyel alanlarda yapısal izlemeye yönelik değerlendirme yapıldığında ise şöyle bir çeşitlilik karşımıza çıkar [7]. Bu sensorler Şekil 4' de gösterilmiştir.

- Nokta sensorler, benzer pek çok elektrik sensorlerinde olduğu gibi, fiber optik bağlantı kablosunun ucunda tek bir ölçüm noktası mevcuttur.
- Çoğullamalı sensorler, tek bir fiber hat boyunca çok sayıda noktada ölçüm yapılmasına izin verir.
- Uzun-tabanlı sensorler, ölçümü; uzun bir ölçüm tabanı boyunca yaparlar. Bunlar aynı zamanda uzun-ölçekli sensorler olarak da bilinir.
- Dağıtılmış sensorler, tek bir fiber hattı boyunca, herhangi bir noktada tipik olarak birkaç kilometrelik uzunluk boyunca her bir metrede algılama becerisine sahiptirler.



Şekil 4- Fiber Optik Sensor Tipleri.

Fabry Perot interferometrik sensorler, tipik nokta sensörlere örnekler ve fiber optik bağlantı kablosunun ucunda tek bir ölçüm noktasına sahiptir. Aralarında birkaç mikronluk bir hava boşluğu bırakılan, birbirine bakan iki adet kısmi yansımali fiber optik ihtiva eden bir cam tüpten oluşur. Jeoteknikte, piezometre olarak, gerilme ölçer, sıcaklık sensörü, basınç sensörü ve hareket sensörü olarak kullanımları vardır. Kısa uzunluklarından dolayı, Fiber Bragg ızgaralar geleneksel gerilme ölçerlerin karşılığı olarak kullanılabilir. Metaller ve diğer pürüzsüz yüzeyler üzerine yapıştırmak suretiyle montajları yapılır. Yeterli paketlemeyle betondaki standart 100mm ölçüm boyu üzerindeki gerilmeleri ölçmek için de kullanılabilirler.

SOFO sistemi, fiber optik yer değişimi sensorüdür, mikrometre aralığında bir çözünürlüğe ve mükemmel uzun süreli stabiliteye sahiptir. Ölçüm fiberi, kurulumu izlenecek yapı üzerine döşenen iki optik fiber arasındaki uzunluk mesafesini ölçmek için düşük-uyumlu interferometre kullanır. Ölçüm fiberi ön germelidir ve mekanik olarak yapıya deformasyonları izlemek amacıyla iki ankraj noktasından bağlanır, referans fiberi ise serbesttir ve sıcaklık referansı olarak hareket eder. Her iki fiber aynı boru içerisine yerleştirilir ve ölçme mesafesi 200mm ve 10m arasında seçilebilir. Sistemin çözünürlüğü ölçme esasından bağımsız olarak 2µm' dir ve ölçülen deformasyonun %0.2 oranında hassasiyeti vardır. SOFO sistemi köprüler, tüneller, kazıklar, ankrajlı duvarlar, barajlar, tarihi anıtlar, nükleer enerji tesisleri ve ayrıca laboratuvar modelleri dâhil, 150' den fazla yapıda izleme amacıyla başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Brillouin saçılım sensorleri, dağıtılmış gerilme ve sıcaklık izleme için çok uygundur. Sıcaklık ölçümleri için, Brillouin sensör, Raman saçılmasına dayanan sistemlere güçlü bir rakiptir ve gerilme ölçümleri için de pratik olarak hiç rakibi yoktur. Dağıtılmış gerilmelerin ölçümü özel olarak tasarlanmış sensorler gerektirir. Fiberin toplam uzunluğu boyunca sensör ve ana yapı arasındaki mekanik bağlantının garanti edilmesi gerekmektedir. Sıcaklık değişimlerine karşı çapraz hassasiyeti çözmek için gerilme sensörü boyunca bir referans fiberi yerleştirilmesi de ayrıca gereklidir[7]. Özet olarak inşaat yapılarında kullanılan sensör tipleri ve ölçtükleri parametreler Çizelge 1' de verilmiştir.

Şimdi bu sınıflandırmaların ardından inşaat yapılarını izlemede kullanılan fiber optik sensorleri örnekleriyle ve çalışma prensipleriyle daha yakından tanıyalım.

4.1 Fiber Optik Deformasyon Sensorü

Daha öncede bahsedildiği üzere son yıllarda fiber optik sensorlerle yapısal izleme büyük bir önem kazanmıştır. Çünkü kullanımı kolay, yalıtkan, EM bozulmalarına dayanıklı ve deformasyonlara çok hassas olup pek çok uygulama için ideal bir seçimdir. IMAC (EPFL) laboratuvarı, çeşitli köprü, tünel, baraj ve diğer inşaat mühendisliği yapılarına başarılı bir şekilde uygulanan, düşük bağdaşımli girişimölçer temelli uzun vadeli bir izleme sistemi geliştirmiştir. Bu sistemin adı SOFO' dur. SOFO, "Surveillance d'Ouvrages par

Fibres Optiques” (fiber optiklerle yapısal izleme) ifadesinin kısaltmasıdır[8, 15]. Şekil 5’ de bir

SOFO sisteminin açık şekli verilmiştir.

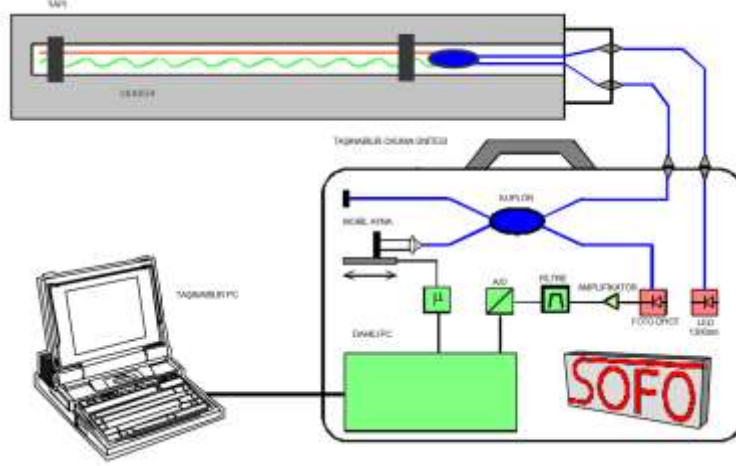
Çizelge 1- İnşaat Yapılarını İzlemede Kullanılan Fiber Optik Sensorler[31].

FO Sensor Tipi	Ölçülen Parametreler	Ünitelerin Durumu	Montaj	Olgunluk
SOFO	Yer değiştirime	1300+		Ticari
Microbending	Yer değiştirime	Yüzler mertebesi		Ticari
Bragg Gratings	Gerilme, sıcaklık, (yer değiştirime)	Yüzler mertebesi		Saha denemeleri
Fabry- Perot	Gerilme	Onlar mertebesi		Saha denemeleri
Raman	Dağıtılmış sıcaklık	Onlar mertebesi		Ticari
Brillouin	Dağıtılmış sıcaklık ve gerilme	Birler mertebesi		Saha denemeleri
Hydrogel	Nem, su girişi	Birler mertebesi		Saha denemeleri

4.1 Fiber Optik Deformasyon Sensorü

Daha öncede bahsedildiği üzere son yıllarda fiber optik sensorlerle yapısal izleme büyük bir önem kazanmıştır. Çünkü kullanımı kolay, yalıtkan, EM bozulmalarına dayanıklı ve deformasyonlara çok hassas olup pek çok uygulama için ideal bir seçimdir. IMAC (EPFL) laboratuvarı, çeşitli köprü, tünel, baraj ve diğer

inşaat mühendisliği yapılarına başarılı bir şekilde uygulanan, düşük bağdaşımli girişimölçer temelli uzun vadeli bir izleme sistemi geliştirmiştir. Bu sistemin adı SOFO’ dur. SOFO, “Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques” (fiber optiklerle yapısal izleme) ifadesinin kısaltmasıdır[8, 15]. Şekil 5’ de bir SOFO sisteminin açık şekli verilmiştir.

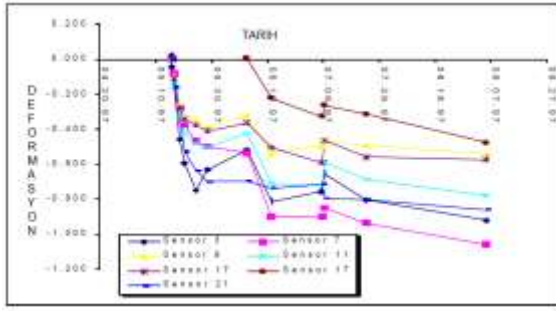


Şekil 5- SOFO Sisteminin Kurulumu.

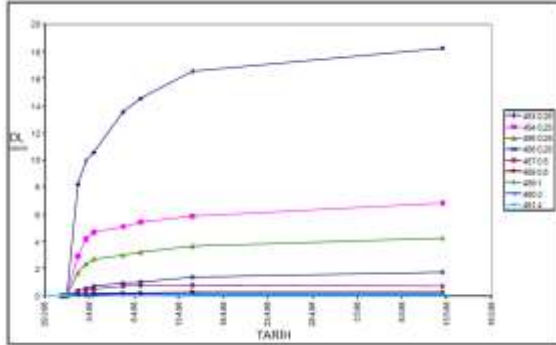
Sensor, izlenecek yapı içerisine monte edilmiş bir çift tek modlu fiberden meydana gelir. Ölçüm fiberi denilen fiberlerden biri ölçümü yapılacak yapının kendisi ile mekanik bir temas içerisindedir; referans fiberi denilen diğer fiber ise bitişikteki boruya gevşek bir şekilde yerleştirilmiştir. Yapıdaki tüm deformasyonlar bu iki fiber arasındaki uzunluk farkının değişmesi prensibine dayanan metotla ölçülecektir[8]. SOFO sensorlerinin ana özelliklerinden birisi de beton, püskürtme beton ve harç içerisine gömülebilir olmasıdır. Bu durum, dökümden hemen sonra ve uzun vadede beton deformasyonlarının ölçülmesine imkân tanır. Sensorler ortam reaksiyonu nedeniyle oluşan termal kabarma, termal büzülme, kuruma büzülmesi ve harici yükler nedeniyle oluşan yükleri ölçülebilir[15]. SOFO sensorleri ayrıca kaya-beton, tuğla duvar-püskürtme beton, eski-yeni beton ve çelik-beton gibi farklı özelliklere sahip malzeme ve yaşları

arasındaki bağıllığı değerlendirmek için de kullanılır. Ölçümler, kendinden gerilme ve çatlakların oluşumunu azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla, beton karışımını optimize etmek üzere kullanılabilir. Şekil 6’ da, bir uygulamadaki beton dökümünden itibaren ilk birkaç ay boyunca elde edilen ölçümleri göstermektedir[8]. Beton büzülmesi ve ayrıca en kesitteki farklı bölgelerin farklı davranışları da net bir şekilde tanımlanmıştır. Nem ve sıcaklık değişimleri gibi çevresel değişiklikler de kolaylıkla tespit edilmektedir[15, 25].

Şekil 7, gözlemlenen gerilmeleri (sensorün aktif uzunluğu ile bölünmüş ölçülen deformasyonlar ile elde edilmiştir) göstermektedir. İlk 4-5 sensörde geniş gerilmeler ölçülmüş, diğerlerinde ise daha küçük (ancak hala kolayca ölçülebilir) gerilmeler göstermiştir. 453 sensorü üzerinde kayıtlı geniş değer, bir çatlağın oluşumu ile açıklanabilir.



Şekil 6- Büzülme Ölçümü.



Şekil 7- Deformasyon Ölçümü[9].

Standart deformasyon sensorleri(Şekil 8), 0.2 ile 6m uzunluğundadır ve hem uzama hem de kışalmaya ilişkin %0.5'e kadarki deformasyonları ölçebilmektedir. Standart sensorler yerel birleştirme prensibine dayalıdır. Beton, harç ve sıvaya doğrudan gömülebilir ya da mevcut ve metalik yapıların yüzeyine monte edilebilir. Bu sensorler özellikle beton dökümünden hemen sonra başlayan beton prizleşmesi sırasında deformasyonun ölçümüne izin veren beton yapıların izlenmesi için uygun hale getirilmiştir[10].

4.2 Dağıtılmış Isı Ölçüm Tabanlı Baraj İzleme Araçları

Dağıtılmış sensorün elektrikli ve yerel fiber optik sensorlerden farklılığı, tekli dönüştürücü kullanarak binlerce noktanın ölçümünü yaparak tüm uzunlukları boyunca fiziksel parametreleri ölçebilme özelliğine sahip olmasıdır. Dağıtılmış fiber optik sensor teknolojilerinde en gelişmiş teknolojiler, Raman ve Brillouin saçılımı prensibine dayanır. Her iki sistemde, standart fiber optiğin imal edildiği ışık ve silika

malzemesi arasında doğrusal olmayan bir etkileşimi kullanmaktadır. Dalga boyu bilinen bir ışık, fiber içerisine gönderildiğinde fiberin her noktasından çok küçük bir miktarı geri yansır. Yansıyarak bu dağılan ışık, orijinal sinyalden farklı dalga boylarında bileşenler içerir. Bu değişen bileşenler başta gerilme ve sıcak olmak üzere birçok yerel özelliklerden bize bilgi verirler[12,16].

Kısaca Brillouin saçılması, fiber içerisinde ilerleyen ışık dalgası ile ısıl olarak meydana gelen akustik dalgaların etkileşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Brillouin saçılmasında, ilerleyen ışık fotonları ile geri saçılan fotonlar arasında bir frekans kayması meydana gelir[18]. Akustik dalganın hızı, optik fiberin sıcaklığına ve maruz kaldığı gerilmeye bağlı olduğu için tespit edilen frekans kayması, her iki parametre hakkında bilgi vermektedir. Geri saçılan Raman işaretinin gücünden sıcaklık bilgisine, sıcaklık bilgisi ve saçılmanın olduğu noktadaki Brillouin frekans kayması bilgisi kullanılarak da gerginlik bilgisine ulaşılmaktadır[21].

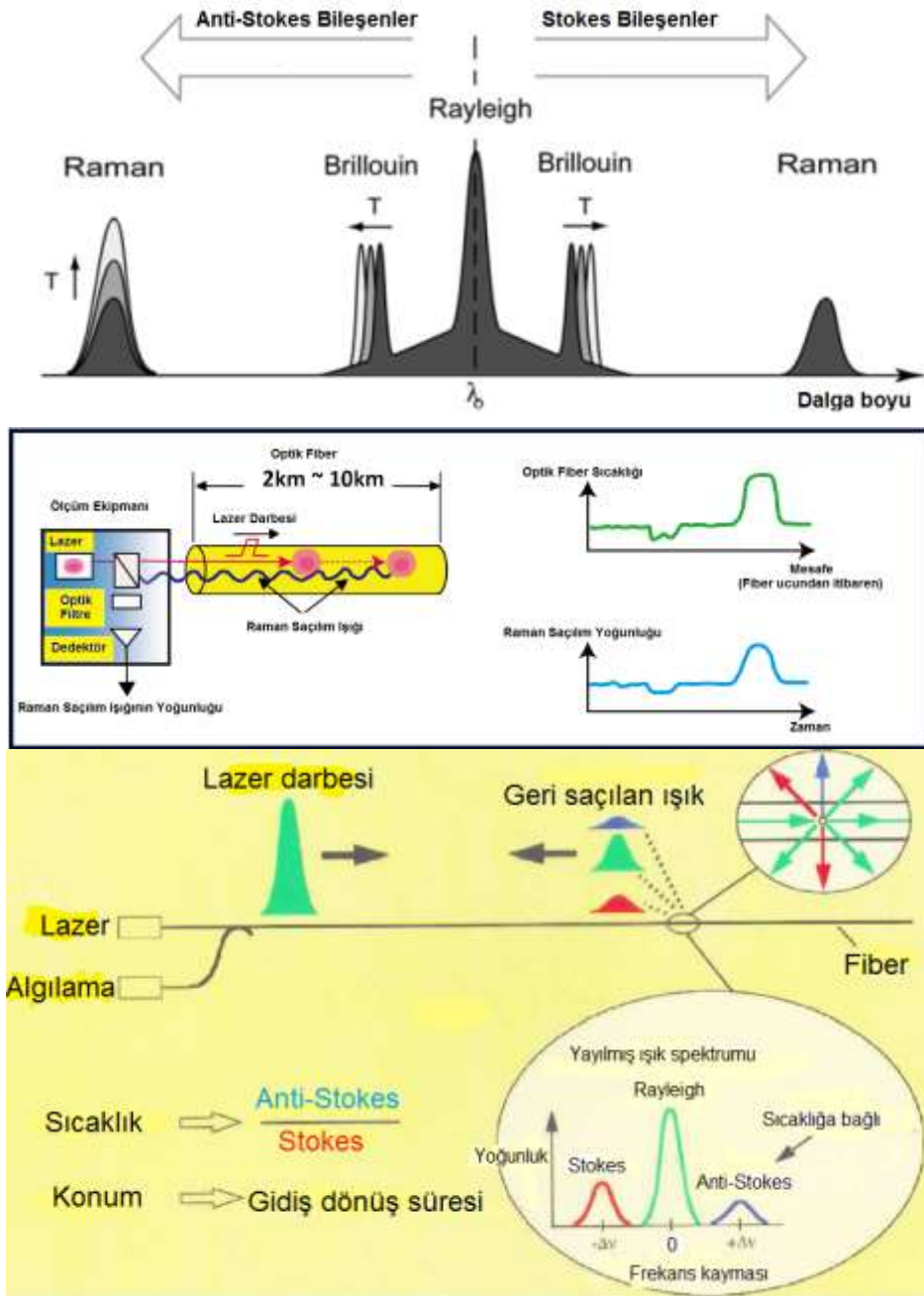
Çizelge 2' de DTS teknolojilerinin karşılaştırılması ve Şekil 8' de de Raman saçılımı gösterilmiştir.

Barajlarda dağıtılmış fiber optik ölçümleriyle izlenen en ilgi çekici parametre sıcaklıktır. Büyük yapılar sıcaklık değişiklikleri açısından çok yavaş davranışlar gösterirler. Beton barajlar sıcaklık ölçümleri açısından hidrasyon ısısının gelişimini gözlemlemek amacıyla en uygun yerlerdir. Ayrıca sızıntı akımları barajların ve temellerinin içerisindeki sıcaklık alanını etkilemektedir. Dağıtılmış fiber optik sıcaklık (DFOT) ölçümü, barajların sıcaklık alanlarını izlemek suretiyle hem sızıntı (kaçak) tespiti hem de beton sıcaklıklarını gözlemlemek adına biçilmiş kaftandır.

Hidrolik yapılarda, son on beş yıldır DFOT ölçümüyle kaçak yerlerinin tespiti başarılı bir şekilde yapılmış ve bu konuda güçlü bir araç olduğunu kanıtlamıştır. Dağıtılmış fiber optik kablolar -40°C ile +80°C arasında ki sıcaklıkları algılamak için kullanılmaktadır. Bu kablolar dış etkilerden çok iyi korunmak üzere tasarlanmıştır.

Çizelge 2- Farklı DTS Teknolojilerinin Karşılaştırılması[30].

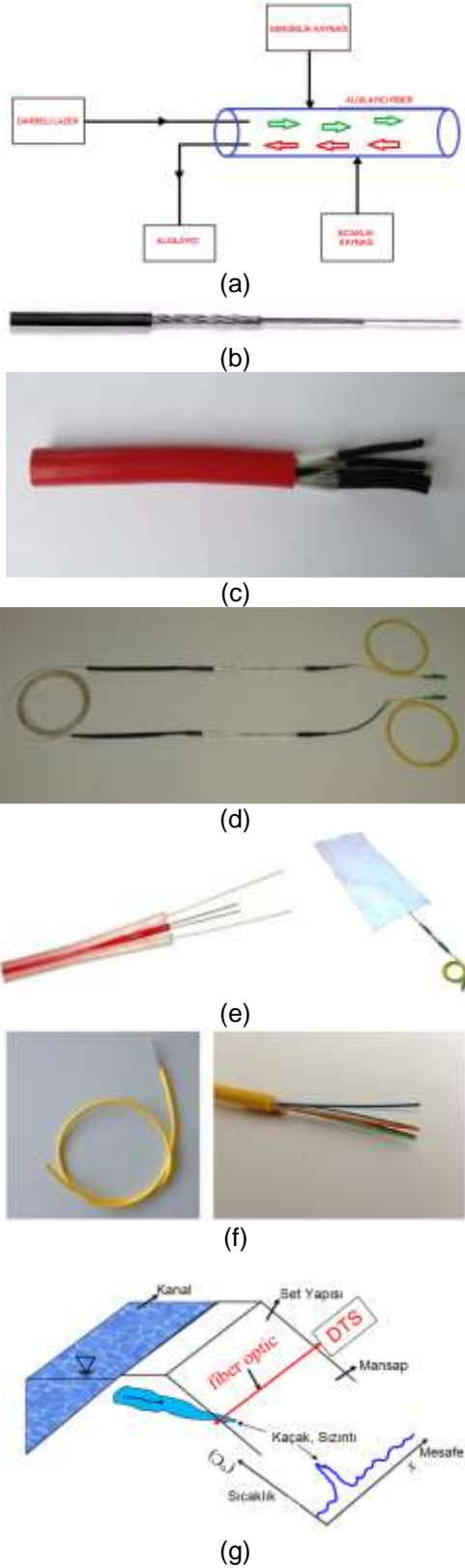
	Rayleigh	Raman	Brillouin
Sıcaklık duyarlılığı(%°C)	0.54	0.8	0.01
Sıcaklık aralığı(°C)	5-110	0-70	(-30)-60
Doğruluk(°C)	1	10	1
Uzaysal çözünürlük(m)	1	3	3-5
Fiber boy uzunluğu(m)	170	1000	51000
Ölçüm zamanı(s)	2.5	40	4
Gerilme(µm)	-	-	100



Şekil 8- Raman Saçılımı[30].

Tüm fiber optik kablo sensor olarak kullanılmaktadır. Uygulamalarda gerilme ve sıcaklık ölçümleri için iki ayrı kablo paralel olarak yerleştirilmektedir. Şekil 9' da optik fiber algılamasına ait temel prensip ve farklı ihtiyaçlara hitap eden kablo tasarım örnekleri mevcuttur[12,16]. DiTemp zırhlı algılama kablolarının montajları zemin veya beton içerisine direkt gömülme, boruya bağlanma, ankrajlama ve yapıştırma suretiyle yapılır. DiTemp kendiliğinden ısıtmalı algılama kablosu 1,5km' ye kadar olan mesafelerde dağıtılmış sıcaklık algılamada eşsiz çözümler üretir. İzlenecek olan yer ve kaçak sıvı arasındaki

sıcaklık farkının güvenilir bir tespit yapmak için yeterli olmadığı dağıtılmış sıcaklık algılaması gerektiren hidro ve jeoteknik uygulamalar dizininde kullanılmaktadır. SmartTape II sensorü genellikle inşaat ve jeoteknik mühendislik uygulamalarında kullanılır. SmartProfil kablosu ise jeo-tekstil içerisine yerleştirilir. Gerilme ve sıcaklık sensorlerini tek bir paket içerisinde bir araya getirir. Hibrit dağıtılmış algılama kablosu olan Hydro&Geo birkaç kilometre boyunca dağıtılmış gerilim ve sıcaklığın değerlendirilmesi için çok iyi bir sensördür[12].



Şekil 9- (a) Optik Fiberli Algılama Prensipleri (b) DiTemp zırhlı algılama kablosu. (c) DiTemp kendiliğinden ısıtmalı sıcaklık algılama kablosu. (d) SmarTape II. (e) SmartProfil kablosu. (f) Hibrit dağıtılmış algılama kablosu[12]. g) Dağıtılmış fiber optik sensör kullanarak sızıntı ölçüm prensibi[29].

DFOT ölçüm yöntemleriyle kaçak tespiti tipik iki ana yaklaşım metoduyla yapılmaktadır. Bu metotlardan birincisi gradyan metottur ki bu metot akış alanındaki anormallikleri sezmek için sıcaklık izlerini kullanan metottur. İkinci metot ise ısıtma metodudur. Bu metot harici ısı indüklendikten sonra termal maruziyetin varlığı ve hareketinin tespit edilmesine imkân sağlar. Gelecekte toprak malzeme içerisindeki sızıntı hızı gibi önemli parametreler de DFOT teknolojisi kapsamında ölçülecektir[1]. DFOT teknolojisi baraj izlemenin kilit teknolojilerinden birisidir. DFOT ölçümlerinde, güçlü bir lazer kullanarak bir kablo içerisine yerleştirilmiş fibere optik atım gönderilir. Sinyal her fiber konumunda düşük yoğunlukta geri yansıtılır ve geriye saçılan ışığın (Rayleigh) ana parçasının yanında ek düşük yoğunluk pikleri bulunur (Raman ve Brillouin). Geniş kapsamlı olarak kullanılan Raman – sistemleri Raman ışığında anti Stokes parçaları olarak adlandırılan yoğunluğun yansıtma noktasındaki sıcaklığa bağlı olduğu olgusunu kullanmaktadır. Burada, fiberde herhangi bir gerilime izin verilmez. Ölçülen noktada lazere olan mesafe, çalışma süresi (OTDR zaman alanı) veya ışık atımının frekansı ile tespit edilebilir (OFDR frekans alanı). Bir dağıtılmış sıcaklık ölçümü için çevrim zamanı saniyelerle dakikalar arasında değişir. Bir ölçüm, 0.25 ila 1.0m boşluğunda kablo boyunca dağıtılmış sıcaklık değerlerini verir. Ortaya çıkan sıcaklık okuma değerleri $\pm 0.2C^{\circ}$ ye kadar doğruluğa ulaşabilir [1, 17].

4.3 Metotlar-DFOT Kullanarak Kaçak Tespiti

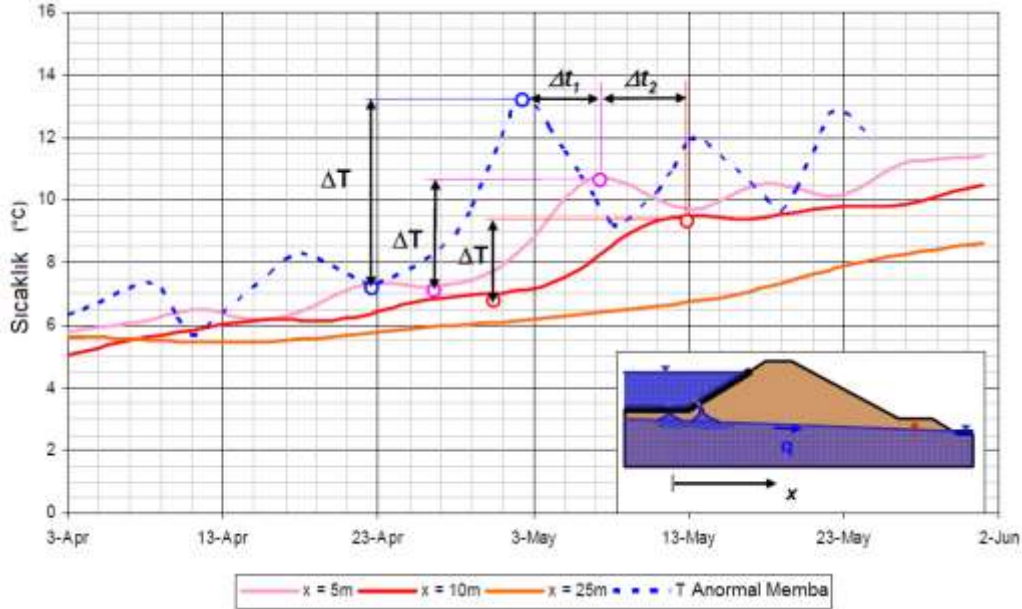
4.3.1 Gradyan Yöntemi- Pasif Yöntem

Toprak dolgu barajları ve setleri gibi topraktan yapılmış hidrolik yapılarda, iç sıcaklık alanı akış alanının bir fonksiyonudur. Gradyan metot doğal olarak meydana gelen sıcaklık değişimlerini ve dalgalanmalarını kullanarak sızıntıların tespiti, konumlandırılması ve miktarının belirlenmesi için kullanılan DFOT ölçüm uygulamalarıdır. Sensörler direkt olarak mevcut sıcaklığı ölçtüğünden ve çevrelerinin termal koşullarını aktif olarak değiştirmediklerinden pasif bir yöntemdir. Kanal toprak dolguları veya barajları, DFOT kullanarak kaçak sezmenin tipik uygulamalarıdır. Ayrıca onların sızdırmazlık elemanlarının işlevleri izlenmelidir[1, 19].

Sıcaklık gradyanları kalıcı veya sezonluk sıcaklık farkları şeklinde oluşabileceği gibi olası sızıntı kaynaklarındaki belirgin sıcaklık dalgalanmaları olarak da belirebilir. Sızıntı varsa, sıcaklık anormallikleri yatay iletim yolu ile yapıya aktarılır ve sıcaklık alanını bozarak toprak gövde boyunca yayılır. Ölçümün dağıtımlı karakteri sızıntıdan etkilenen alanı

hassas bir şekilde sınırlandırmak sureti ile anormalliklerin hassas konumlandırılmasına izin verir. Yöntem aynı zamanda anormal sıcaklığı dış sıcaklık geçmişine dönüştürmek sureti ile

anormal kaynağın tespitine olanak sağlar. Sızıntının büyüklüğü ve uzantısı gecikme ve verilen konumdaki sıcaklık yoğunluğu ile tahmin edilebilir (Şekil 10)[1].



Şekil 10- Kanal Dolgularındaki Kaçaklarda Termal Anormalliklerin İzlenmesi İçin Sıcaklık Dalgalanmalarının Kullanımı ve Sızıntı Hızlarının Tahmin Edilmesi[1].

Gradyan Yöntemi sızıntı tespiti için bir standart içermektedir. Fakat yöntemi geliştirebilmek adına uygulama ve kurulum kriterinin tanımlanması için başvurulması gereken konular halen bulunmaktadır. Gradyan Yönteminin geliştirilmesi için Münih Teknik Üniversitesinde yürütülen araştırma çiftleştirilmiş sızıntı kullanımına ve sensorlerin optimum konumlarının ve dizilimlerinin tespit edilmesi ve ölçümlerin tanımlanabilmesi için anormalliklerin yayılımlarına öngörü sağlamak için ısı aktarımına odaklanmıştır. 3D-sınırlı eleman, yer altı suyu akımı kullanılan ana araçtır.

karşılaştırılabilir bir hızda hareket ettiğini göstermektedir. Simülasyonların yardımıyla sızıntıyla üretilen sıcaklık alanı anormalliklerinin baraj gövdesinde yayılabileceğinden ve bu durumun yapının ilgili noktasından tespit edilebileceğinden, baraj tabanının sızıntı tespiti için etkin bir konum olduğu da doğrulanmış olmaktadır [1, 19].

4.3.2 Isıtma Metodu-Aktif Metot

4.3.2.1 Isıtma Metodunun İşlevselliği

Isı atım metodu gradyan metodunun uygulanmadığı yerlerdeki uygulamalar için geliştirilmiştir. Rezervuar suyu ve sıcaklık ölçüm konumu arasında yeterli sıcaklık gradyanları ya da rezervuar suyunun yeterli sıcaklık değişimleri yoksa bu metot uygulanır.

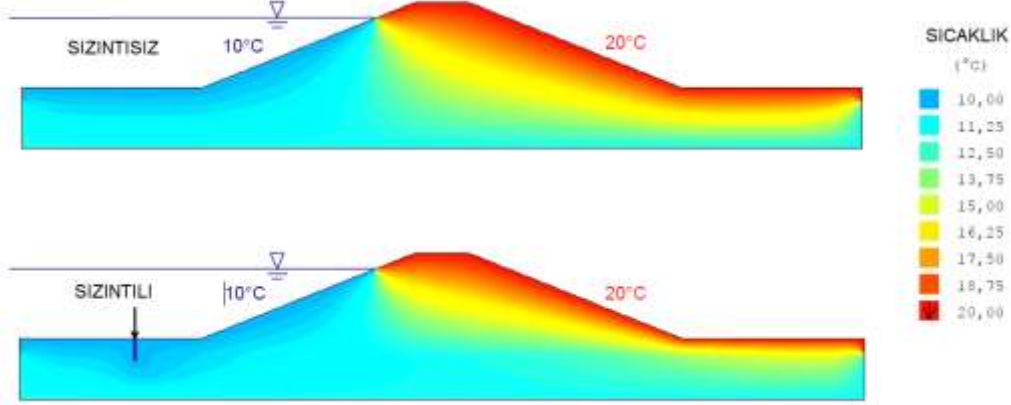
Şekil 11 sızıntıya maruz kalan homojen bir barajdaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Sıcaklık dağılımları, normal sızıntı koşulları ve baraj altındaki geçirimsiz katmanın kırıklarından dolayı endüklenen sızıntı burada açıkça gösterilmiştir. Barajın memba tarafındaki sızıntının mansap topoğundaki sıcaklık dağılımını etkilediği aşikârdır. Sayısal simülasyonlarla elde edilen tecrübeler, termal anormalliklerin karakterize edilmesine ve süreçte rol alan kilit hidrolik ve termal parametrelerin tanımlanmasına imkân tanır. Sayısal simülasyonlar ve saha ölçümleri, sıcaklık anormalliklerinin sızıntı akım hızıyla Son araştırmalar DFOT ısı atım yönteminin, su içeriği ve kablonun direkt çevresindeki hareketler hakkında hassas bilgiler verdiğini ortaya koymuştur. Buna göre toprak dolgu barajların sızıntı tespitiyle ilgili kritik ihtiyaçları, sızıntı ve akım hızıyla ilgili bilgileri almak suretiyle gidermek mümkündür.

Bu yöntem, yaklaşık olarak bir saat içerisinde kablo için yeterli ısı dağılımı gerektirmektedir. A.C. veya D.C. kablo içerisine entegre edilmiş olan bakır iletken sayesinde bir doğrusal ısı girişi üretilir. Özel sızıntı tespiti için 3 ila 5 W/m ısı girişi yeterlidir, dağıtımlı akım hız ölçümü yaklaşık olarak 10 W/m gerektirir.

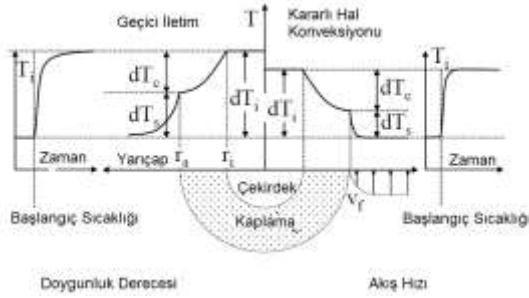
Birkaç kilometre boyundaki kablo kesitleri için, yeterli enerjinin yanında, yüksek gerilim (trafo) veya büyük bakır çapraz kesit alanı (kablo çapı

ile kısıtlı) gerekmektedir. Kablo dTi' nin termal cevabı, kablo en kesitine (çap, malzeme) ve kısmi veya tamamen doymuş topraklarla domino edilen kablo duvarından iletilen ısıya veya 10-5m/s' den daha hızlı akış hızının varlığına bağlıdır (Şekil 12).

Buna göre başlangıç durumu T^∞ ve ısıtılmış durum T_i arasındaki dTi sıcaklık farkı, kablo çekirdeği ve duvarı arasındaki sıcaklık farkı dTc ile kablo duvarı ve sonsuz arasındaki sıcaklık farkı dTs' den oluşmaktadır[1, 19].



Şekil 11- Sızıntılı ve Sızıntısız Olmak Üzere Homojen Hendek Kesitinde Sayısal Model Kapsamında Sıcaklık Dağılımı (FEFLOW Simülasyonu).



Şekil 12- Geçici İletim ve Kararlı Hal Konveksiyonu ile Şematik Kablo En Kesiti Üzerinden Sıcaklık Dağılımı.

4.3.2.2 Doygunluk Derecesinin Dağıtılmış Tespiti

Kablo içerisindeki geçici termal tepkime kısmi veya tam doymuş topraktaki iletimle domino edilmekte ve toprak ısıl iletimi yolu ile yönetilmektedir. Toprak termal iletkenliği termal iletim, gözenekliliği (n) ve Jessberger(1990) veya teorik yaklaşımlardan sonra gösterilen doyumluk derecesine (S) bağlıdır. Johansen(1975), kuru toprağın termal iletkenliğinden $\lambda_{eff,d}$, kısmen doymuş toprağın efektif termal iletkenliği λ_{eff} , türetmek için Şekil 13' de gösterildiği gibi (2) denklemini geliştirilmiştir ve tamamıyla doymuş toprak termal iletkenliği $\lambda_{eff,s}$, aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

$$\lambda_{eff} = (\lambda_{eff,s} - \lambda_{eff,d})Ke + \lambda_{eff,d} \quad \dots 2$$

$$Ke=0.68\ln(S)$$

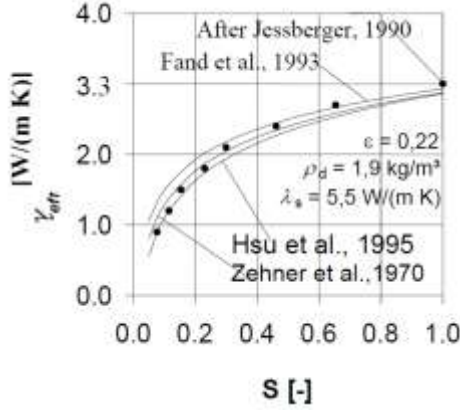
Toprak içerisinde ısıtılmış bir kablo içerisindeki geçici iletim sınırlı yüzey iletimi H ile çevreye bağlanan sınırlı termal iletkenlikle yedek silindirik sistemi kullanarak tanımlanmaktadır. Kristiansen (1982)' den sonra uzun ısıtma dönemleri için geçerli olan yaklaşık çözümleri kablo duvarı ve çevreleyen dTc arasındaki sıcaklık farkının kolay bir açıklamasına imkân sağlar (Şekil 13).

$$dT_c \cong \frac{q_l}{4\pi\lambda_{eff}} \left(\ln(t) + \ln \left(\frac{4\kappa_{eff}}{r_a^2} \right) - 0.58 \right) \dots 3$$

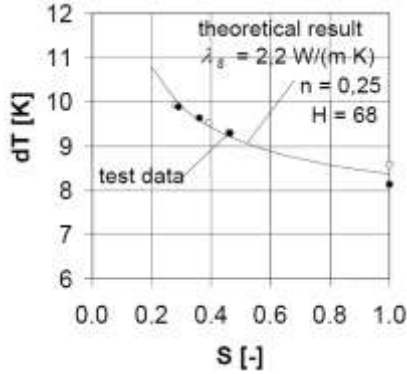
K_{eff} etkin termal yayılma ve r_a kablo yarıçapı ve t zamandır. Yedek sistemlerin detaylı açıklaması ve ısıtılmalı kablodan geçici iletimin analitik formülasyonu (Perzmaier ve diğerleri, 2004)' de verilmiştir. Teorik termal tepkiye karşı (2) ve (3) tarafından tarif edilen teorik termal tepkime aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere Münih Teknik Üniveristesi Hidrolik ve Su Araştırma Mühendisliği Enstitüsü' nün laboratuvarında gerçekleştirilen DFOT ısı atım testlerinden elde edilen test verilerine çok iyi uymaktadır (Şekil 14).

Doygunluk derecesi S, DFOT ısı atım yönteminde mevcut diğer yöntemlerden daha az doğrulukla görüntülenir. Sonra diğer metotlar uygulanır (örn. TDR prob, dielektrik akuometre). Bununla birlikte metot kuru, nemli ve doymuş toprak şartlarını ayırt etmek için yeterlidir. Daha da ötesi yoğunluk hakkındaki bilgi bakımından üstündür. Bu nedenle metot baraj mühendisliği

uygulamaları için etkindir (kaba topraklarda sızıntı hattının yeri gibi). Ek olarak jeotekstil fiber kablo kaplama (kalınlığı s , birkaç mm) nem ve doymuş toprağın ayrıştırılmasını daha zorlaştırmaktadır (daha fazla güvenli).



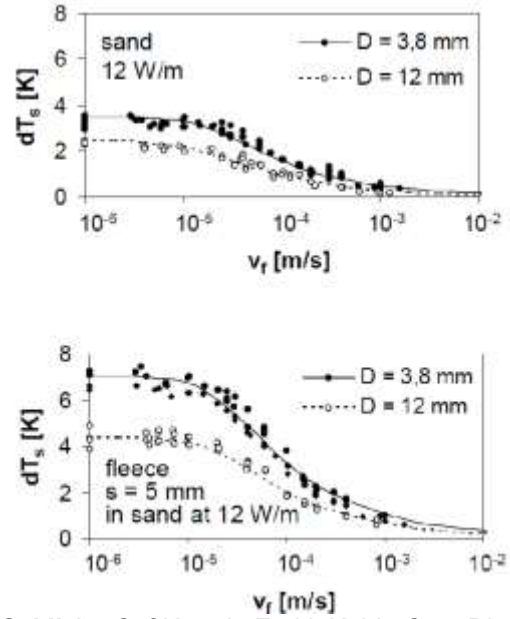
Şekil 13- Kısımlı Olarak Doymuş Toprak İçin Johansen' den Sonra Değiştirilen Literatürden Alınmış İki Fazlı Karışımların Etkin Termal İletkenliği (λ_{eff}).



Şekil 14- 12 W/m Isı Atımına Karşı S Doygunluk Derecesi İçin 110 Dakika Sonrası dT Termal Tepkimesi.

4.3.3 Dağıtılmış Akış Hızı Ölçümü

Sızıntı varlığında toprakta ısıtmalı silindirik için geçerli olan akım hızı ile duvarda ısı aktarım katsayısı DFOT ısı atım yönteminin Darcian akım hızının ölçülmesini sağlamaktadır. Akım sınır katmanı ve buna göre duvar üzerindeki ısı sınır katmanı artan hızla birlikte kalınlık olarak azalır. Bu takviyeli konveksiyon ısıtmalı kablunun termal tepkimesini akım hızına bağlı kılmaktadır. Çok geçirimli topraklarda ($k_f \geq 10^{-2}$ m/s) ve yavaş hızlarda iletim yolu ile serbest konveksiyonla bastırılmaktadır [1]. Kablo etkisi dTc testlerle miktar belirlenebilirken ısı aktarım katsayısı ve dTs deneyel denklemlerle boyutsuz ısı aktarım katsayıları kullanarak (Nusselt sayısı) hesaplanabilir. Teorik termodinamik temeller son on yılda Münih Teknik Üniversitesi laboratuvarında gerçekleştirilen testlerle kanıtlanmıştır (Şekil 15).



Şekil 15- Saf Kumda Farklı Kablo Çapı D' de Min 60 dak. Akım Hızı ve Ek Kaplama ile dTs :Test Verisi (Noktalar) ve Teori (Çizgi).

Termodinamik arka plan üzerine detaylı bilgilerle birlikte farklı kabloların, DTS cihazları ve su ve toprakta (silt, kum, akçıl) ısı girişi için dikeye doğru ve içerisinde kablo bulunan akım hızları ve farklı akım yönleri için ek jeo-tekstille veya olmadan birkaç yüz test gerçekleştirilmiştir (Perzlmair ve diğerleri., 2004) ve (Perzlmair, 2006). Bu, dağıtılmış akım hızı ölçümleri şu öngörülerini vermiştir.

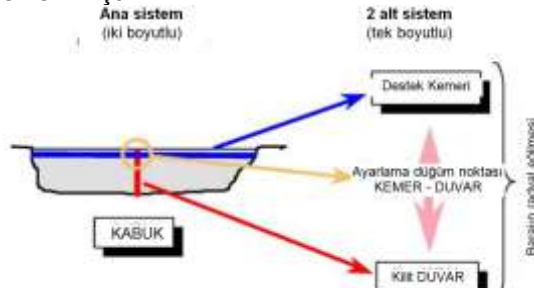
- Dağıtılmış yerinde hız ölçümleri ilk seferde DFOT ısı darbe metoduyla gerçekleştirilmiştir.
- Geçirgenliği 10-2m/s' ye eşit veya daha az farklı toprak malzemeler akış hızı üzerine bağımlılık hakkında sadece küçük değişiklikler göstermektedir (Kalibrasyon).
- Ölçüm aralığı 10-5 m/s ile 10-3m/s arasında değişir, iç erozyon ve yayılma başlatmak için şüphe edilen hızları sezmede uygundur.
- Kabloya doğru akımın açısı dikeyden $\pm 30^\circ$ den fazla akım hızının, termal etki bağımlılığı üzerine ihmal edilebilir etkiye sahiptir.
- Dağıtılmış akış hızı ölçümü, azalan kablo çapı, artan ısı girişi, DTS aletlerinin artan doğruluğu ve kalın jeotekstil kaplamasının ek kablosu ile artar (3-8mm).
- Günümüz DTS cihazlarının büyük bir kısmının (sıcaklık cevabı 0.1 ÷ 0.2 K) doğruluğu, gerilimin 1000V' a dönüştürülmesi halinde 400V veya 3 ÷ 4km kullanan sınırlayıcı mesafesi 10W/m' den az olamaz. Daha iyi sıcaklık doğruluğu ile her türlü mevcut ve gelecekte kullanılacak

cihazlar, daha az ısı girişine veya daha yüksek dağıtılmış akış hızı ölçümü sağlayacaktır[1].

5 FİBER OPTİK SENSOR UYGULAMALARI

5.1 Schiffenen Çift Eğrilikli İnce Beton Kemer Barajı

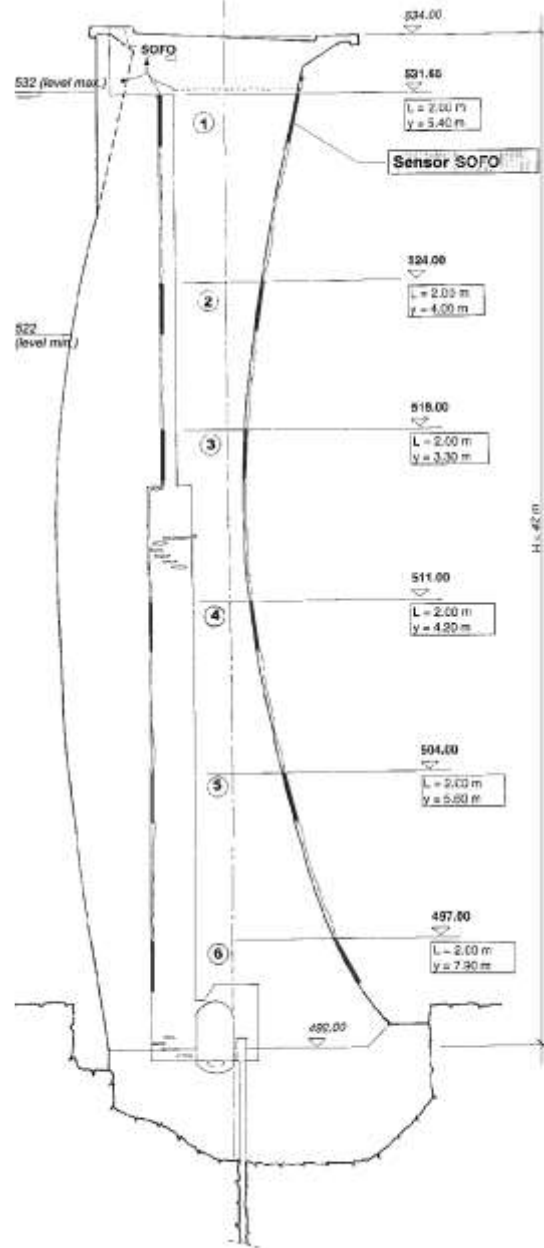
Bu kısımda İsviçre'de Fribourg yakınındaki Schiffenen çift eğrilikli ince beton kemer barajının iç radyal eğilmesini konumsal bir fiber optik deformasyon sensorü ağıyla izlemenin fizibilite çalışması verilmiştir. Schiffenen barajı, tepesinin ekseninde 200m sabit yarıçapa sahip, 42m yüksekliğinde ve 370m uzunluğunda dairesel yapılı bir barajdır. Enine kesiti kıvrımlı, 7m (tepe) ile 13m (taban) kalınlığında ve sınırlara kadar değişmeyen sınırlarda kuvvetleri temele daha iyi dağıtmak için geliştirilmiş bir yapıya sahiptir. Buradaki amaç kemer eğriliğini farklı noktalara yerleştirilmiş bir çift fiber optik sensorle tespit etmektir[11]. Ardından, bu eğrilik bilgisinin çift integralini uygun sınır koşullarını dâhil ederek alıp barajın radyal eğilmesini çıkarmaktır. Bu uygulama için seçilen sensor, sadece barajın iç deformasyonunu verir (Şekil 16). Bu deformasyonu bir dış referansa bağlamak için eğimölçerler, jeodezi / GPS veya (fiber optik) genişlemeölçerler gibi diğer izleme sistemlerinden alınan sınır koşulları kullanılır. Burada kemer, yatay, kısmen sabit uçlu bir kiriş şeklinde hareket eden, tepedeki bir adet kemer şeridiyle ve bir dikey konsol kiriş şeklinde hareket eden, kilitteki tek bir duvar şeridiyle modellenmiştir. İki alt sistemi sadece dağıtılmış yükler (su, sıcaklık, ...) gerektirdiğinden, her bir alt sistemi sadece tek bir kesit (sürekli yük, eksenin geometrik devamlılığı ve sürekli katılık) şeklinde ele alarak matematiksel modeli basitleştirilir. Önerilen fiber optik sensor düzenekli Schiffenen Barajının kesiti Şekil 17' de verilmiştir.



Şekil 16- Eğilmeyi Ortaya Çıkarmak İçin Kiriş Modellerini Kullanmak Amacıyla Geliştirilmiş Kemer Yapısı[11].

SOFO sensorleri, betona tutturulmuş köşebentlere basitçe yerleştirmek suretiyle montajlamak mümkündür. Yapının eğriliğini izleyebilmek için, her hücre bir membaa ve bir mansap tarafında sensore ihtiyaç duyar. Dikey hücre hattı için mansap sensorleri barajın

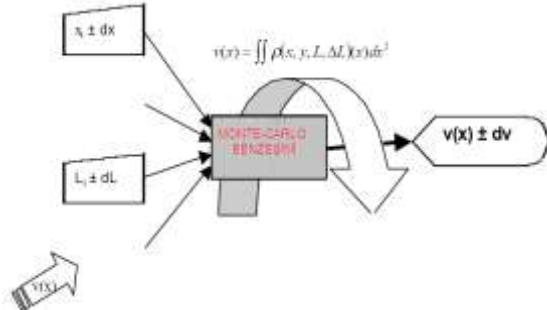
mansap yüzünde, membaa sensorleri ise merkezi galeride yer alacak şekilde düzenlenmiştir[26].



Şekil 17- Önerilen Fiber Optik Sensor Düzenekli Schiffenen Barajının Kesiti[11].

Yatay hücre hattının sensorleri, tepenin hemen altında, barajın herhangi bir yüzünde yer alır. Bu yapılandırma, iki sensor arasındaki büyük konsoldan faydalanmamıza imkân tanır. Her bir ağ dalının sensor hatları, tepenin altındaki merkezi izleme bölmesinde bir optik anahtar üzerinde, barajın yanında yer alan okuma ünitesine bağlı olan tek bir fiber optik kabloya monte edilebilir. Bu yapılandırmayı kullanarak, bütün yapının izlenmesi mümkündür üstelik baraja herhangi bir manüel müdahaleye gerek bile duyulmaz[11].

Monte Carlo benzeşimi, baraj eğilmesinin doğruluğunu ortaya çıkarmak için yapılan hata analizini ele almaktadır. Eğilmenin standart sapmasını analiz etmek için, giriş değerlerini standart sapmalarıyla tanımlanan bir aralıkta keyfi olarak değiştirir. Matematiksel bağıntısı Şekil 18’ de verilmiştir.

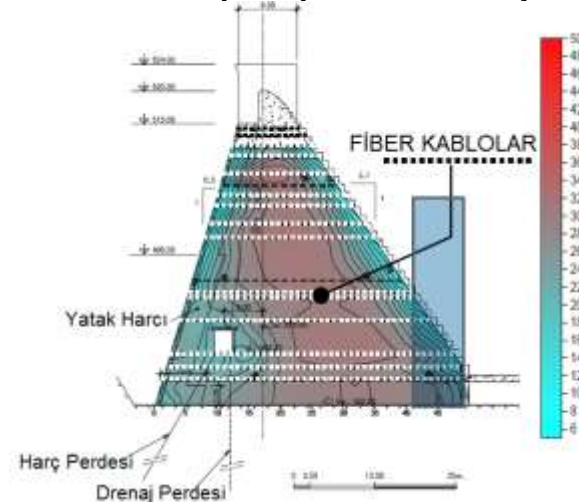


• **Şekil 18-** V(x)'in Standart Sapmasını Ortaya Çıkarmak İçin Hata Simülasyonunun Şeması[11].

X_i : Her bir hücrenin apsis koordinatı, Y_i : bir hücrenin 2 sensörü arasındaki konsol mesafesi, L_i : Hücrenin uzunluğu, ΔL_i : Sensorün deformasyonu, $V(x)$: Eğilme' dir. Bu benzeşim, x ve L serbest giriş değerlerini değiştirerek, belli bir ortalama eğilme için gerçekleştirilmiştir; y , barajın geometrisiyle sabittir, ΔL , maruz kalınan ortalama eğilmeye bağlıdır. dx , dy , dL ve $d\Delta L$ standart sapmalarının sabit olması, her bir değişkenin ölçülebileceği doğruluğa uyması gerekmektedir.

5.2 RCC Barajlarda Sıcaklık İzleme

Brezilya, Çin ve Ürdün' deki çeşitli projelerde DFOT, RCC barajlarda yüksek oranda başarılı



Şekil 19- DFOT' la Baraj İzlemede 2D Sıcaklık Dağılımları[1].

5.3 Nam Ngum 2 Barajında Kaçak İzleme

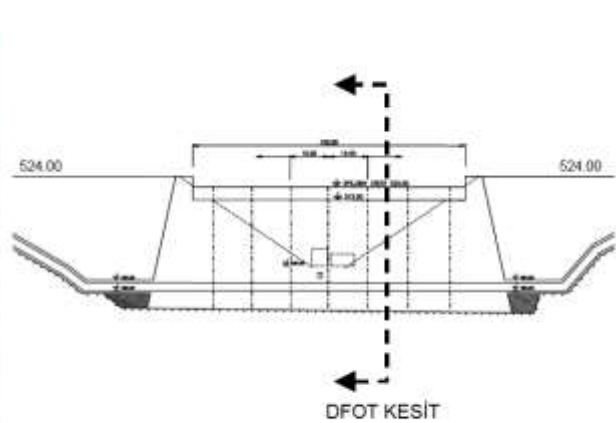
Laos' da bulunan Nam Ngum 2 barajı rezervuar alanı olarak dünyanın en büyük barajlarından olup bir hidroelektrik projesidir. Ayrıca taşkın koruma amaçlıdır. Mekong nehrinin ana

bir şekilde kullanılmıştır. DFOT ölçümleri genel olarak kütle betonu için talep edilen farklılaştırılmış kalite kontrolünü temsil etmektedir.

Genellikle kütle beton sıcaklıkları alışımlı termokulplar ve termistörler tarafından izlenir ve bunlar sadece nokta ölçümlerine izin verir. Bunun aksine fiber optik kablolar baraj yapısında entegre edilen fiber kablolarla sürekli çevrim içi sıcaklık ölçümleri yapılmasını sağlamaktadır. Doğruluğu ve yüksek bilgi yoğunluğu nedeniyle DFOT ölçümleri, RCC yapılar içindeki sıcaklık değişimlerinin ayrıntılı ve güvenilir şekilde görüntülenmesine izin vermektedir. Sıcaklık dağılımından ve dağıtılmış sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan özgün gerilim kapsamındaki bir sonuç direkt olarak elde edilebilir. İnşaat sırasında barajda sıcaklık gelişiminin izlenmesinin bir parçası olarak hidrasyon ısı baraj içerisindeki beton mahallinden alınan net bir resim ile tespit edilebilir. Baraj tasarımında birçok inşaatla ilgili parametrelerin varlığı bu şekilde kontrol edilebilir. Ayrıca kafamızda oluşabilecek soruların cevaplarını da bu şekilde bulabiliriz[1].

- Doğru beton karışımı uygulandı mı?
- Kürlenme tedbirleri yeterli mi ve soğutma sistemleri yeterince etkili mi?
- Maksimum baraj sıcaklığı kontrol altında mıdır?
- Baraj optimum hızda mı yükseliyor?

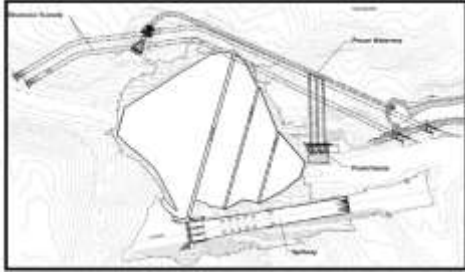
DFOT ölçüm sisteminin diğer bir avantajı da sensor sağlamlığıdır. Ağır inşaat şartlarında hem güvenilirdir hem de kurulum kolaylığına sahiptir.



2007 ve 2010 yılları arasında Pöyry gözetimi altında Ch. Karnchang (Lao) tarafından inşa edilmiştir. Şimdi baraj Nam Ngum 2 Power Şirketi tarafından işletilmektedir(Şekil 20). 615 MW gücünde, baraj yüksekliği 182m olup kret uzunluğu 485m' dir. Baraj sitesi oldukça dik yamaçlı dar bir vadide yer almaktadır. Isı atım yöntemi kullanarak aktif tespit ile temel seviyesindeki sızıntılar izlenmektedir[12].



Şekil 20-Nam Ngum 2 Barajında Sıcaklık Algılama Kablo Tesisatı ve Memba Tarafı[12].



Şekil 21- Genel Proje Yerleşimi.

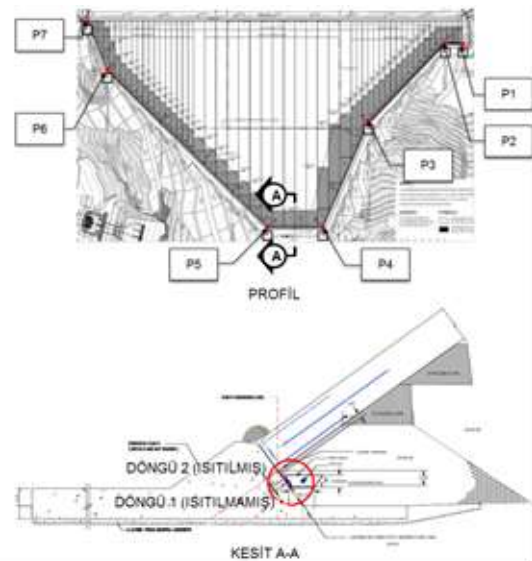
Kaçak doğrudan toplam enerji üretimini etkilemez ancak baraja zarar verir. Sızdırmazlık elemanı boyunca su tarafından başlatılabilir ve sonra derişik sızıntı oluşturur. Olası akışa, birleşim yerleri açıklıklarından veya kolon tabanı boyunca, ön döşeme çatlakları gibi farklı yollar tarafından oluşturulan sebepler neden olur. Sızıntı hasarı malzeme dizilimindeki tane boyut dağılımı diğer bir filtre olmadığında mansap kaya dolgusu sürekli olarak geliştirilebilir. İnce parçacıklar kaçak güce karşı koyamayabilir, bir boru geliştirilebilir ve büyük kaçaklar sürekli gelişirler. Geniş kaçak, mansap kaya dolgu şevinde büyük bir basıncı tetikler. Şev veya aşırı kret oturmalarının istikrarsızlığı

nedeniyle oturmalar meydana gelir. Sonunda barajda çatlamlar oluşur. Baraj ve temel boyunca sızıntı izleme bu yüzden çok önemlidir. Çeşitli jeoteknik yapısal aletler kaçak kaynaklarını ve mansap tarafında baraj topuğundaki boşaltım miktarını göstermek için monte edilmiştir. NN2(Nam Ngum 2)' de kaçak tespiti için DFOT kullanılmıştır. Baraj aletlerinin çeşitli türleri mansap tarafı baraj topuğunda ön şevdeki sızıntı yollarını izlemek için seçilmiştir ve monte edilmiştir. Perimetrik bağlantı ve diğer bağlantılar boyunca DFOT' un iki kablosu sıcaklık izlemek için kolon tabanına yerleştirilmiş ve bu şekilde büyük kaçaklar sezilmiştir[12].

5.3.1 DFOT Konfigürasyonu

Ölçüm noktasından lazere olan mesafe ışık darbesinin çalışma zamanı veya frekansıyla açıklanabilir. Bir yayılmış sıcaklık ölçümü için devir zamanı dakika saniye aralığında değişir. NN2 için, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi sağ mesnet P1' den sol mesnet P7' ye kolon tabanı boyunca 2 döngülü DFOT kablo monte edilmiştir.

DFOT kablolar 10cm aralıklı kolon tabanına tutturulur. Sensörü çevreleyen sıcaklık her 12 dakikada ölçülmüştür ve her okuma 6 dakika boyunca alınır. Her döngünün birinci okuması gece yarısı civarında başlar. Ölçüm karallığını veren bu okuma konfigürasyonu 2m uzunluğunda 0.005°C' dir. Çünkü DFOT kablolar arasındaki mesafe çok kapalıdır, pasif(gradyan) metot uygulanamayabilir fakat ısınan kablo yerine ihtiyaç duyar. Bu nedenle diğer kablounun (döngü1) ölçüm sıcaklığında hiçbir artış olmazken paslanmaz çelik telli kablo(döngü 2) ısınmıştır. Elektrikli ısıtma her 2 saat müddetle 1 saat için işlenmiştir[12, 13].

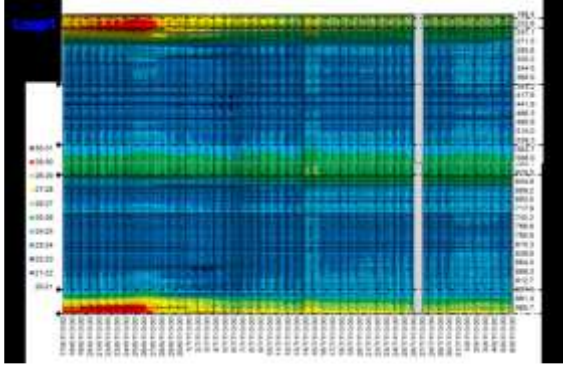


Şekil 22- NN2 Barajın DFOT Konfigürasyonu.

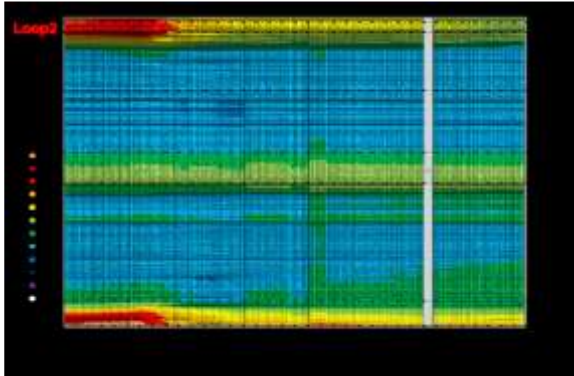
5.3.2 İzleme Sonuçları

5.3.2.1 DFOT

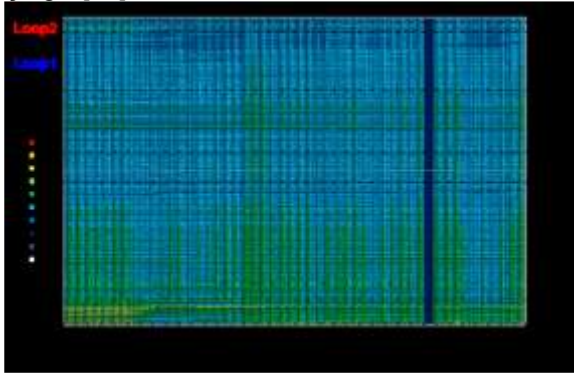
Döngü 1, döngü 2 ve farklı iki döngü arasında ölçülen sıcaklık aşağıdaki üç şekilde görüldüğü gibi sırasıyla eğrilerle tarif edilmiştir. Bu eğriler baştaki sağ mesnet (P1) ve dipteki sol mesnet (P7)' den zamanla sıcaklığın nasıl değiştiğini gösterir. Şekil 23 ve 24 aynı dağılıma sahip ısıtılmış ve ısıtılmamış döngülerin sıcaklık ölçümlerini gösterir. Her iki kenar ayakları en düşük sıcaklıktan en yüksek sıcaklığa olan fark +340' in üzerindedir. Derin kısmında nispeten yüksek sıcaklığa sahiptir (P4 ve P5 arasında). Şekil 25' de gösterildiği gibi sıcak ve soğuk döngüler farkı sıcaklığı 1°C içinde değişir.



Şekil 23- Isıtılmış Döngüden Sıcaklık Çevre Çizgisi[12].



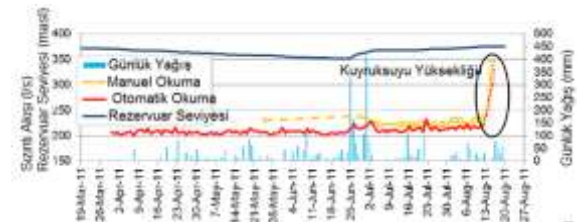
Şekil 24- Isıtılmamış Döngüden Sıcaklık Çevre Çizgisi[12].



Şekil 25- Farklı Sıcaklıkların Çevre Çizgisi[12].

5.3.2.2 Sızıntı Ölçüm Eşiği

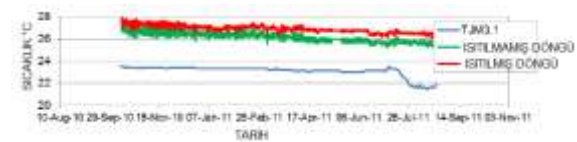
Aşağıdaki şekilde de görüldüğü üzere, deşarjın 210 lt/sn' de uzun bir süre sabit olduğu görülmektedir. Günlük yağış yoğunluğunun 100mm' ye ulaşması sonrasında bazı tepe noktalarının oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu miktar her iki birleşim yerinden gelen yan akışın ortaya çıkması için yerlidir[27]. Deşarjın büyük bir kısmının sebebi kaya temelden ve birleşim yerlerinden gelen sızıntılardır. Muson yağmurları su seviyesini hızla bu bölgede yükseltir. Şekilden de görüleceği üzere 2011 yılının Ağustos ayında su dolusavaktan atılmaya başlanmıştır ve kuyruk suyu seviyesi yükselmiştir. Bu durum sızıntı eşiğinde rahatsızlığa neden olmaktadır (Şekil 26) [13].



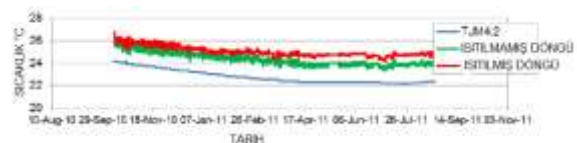
Şekil 26- Mansap Eşiğinden Deşarj[13].

5.3.2.3 DFOT Tarafından Ölçülen Sıcaklığı Etkileyen Faktörler

DFOT tarafından ölçülen rezervuar su sıcaklığı ve baraj iç sıcaklığının karşılaştırılmasından sonra Şekil 27 ve 28' de gösterildiği gibi baraj içerisindeki sıcaklık, özellikle su seviyesinin altında bir bölümü için rezervuar su sıcaklığından 2°C daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat su seviyesi üzerinde DFOT tarafından ölçülen sıcaklık çevre sıcaklığı ile biraz ilişkilidir. Bu durum Şekil 29' da gösterilmiştir[13]. Kuşkusuz kaçağın sezilememesine rağmen, rezervuar su sıcaklığı DFOT tarafından ölçülen baraj gövde sıcaklığı ile güçlü bir şekilde ilişkilidir dememiz mümkündür. Isıtılmış ve ısıtılmamış kablolarda ölçülen sıcaklıklar arasındaki fark tüm kablo mesafesi için 1°C' den daha azdır.



Şekil 27- Rezervuar ve Baraj Nehir Yatağı İçindeki Su Sıcaklığı[13].



Şekil 28- Rezervuar ve Orta Boy Baraj İçerisindeki Su Sıcaklığı.



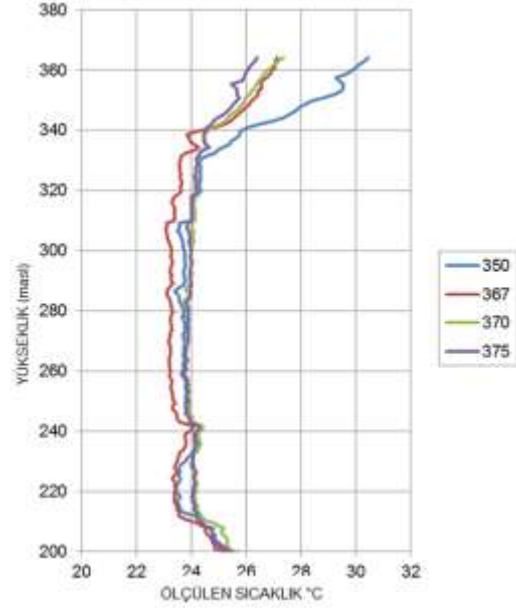
Şekil 29- Rezervuar ve Rezervuar Seviyesinin Üzerindeki Baraj İçerisindeki Su Sıcaklığı.

Depolanmış su seviyesinin etkisini dikkate alarak rezervuardan ve ısıtılmış ve ısıtılmamış kablolardan ölçülen baraj iç sıcaklığı şekillerde gösterilmiştir (Şekil 30, 31, 32). Rezervuar su sıcaklığı profili baraj iç sıcaklık profillerine benzemektedir. 320 rakımının üzerinde, baraj iç sıcaklığı çeşitlidir. Bunun sebebi güneş ışınlarının depolanmış su üzerindeki etkisidir. Fakat 320 rakımının altında derinlik boyunca sıcaklık değişmez. Bu profiller, beton yüzey plakasının termal iletkenliğinin bile nispeten düşük olduğunu göstermektedir. Yüzey plakası boyunca iletkenlik göz ardı edilemez. Eğer kaçak gerçekleşmiş ise DFOT kablolardan ölçülen sıcaklık ve yatay iletim nedeniyle rezervuar suyunun düşük sıcaklığı rezervuar suyu ve baraj iç sıcaklığı arasındaki farkı düşürecektir[12].

Sıcaklığın azalması ve kaçak deşarj miktarı arasındaki ilişki sayısal modelle tahmin edilebilir[13]. 1 Denklemi bir boyutlu enerji denge denklemidir. Bu denklem bir çift termal modeli tarif etmek için kullanılır. Denklemin sol tarafı birim hacim başına ortalama iç enerjinin değişiminin zaman oranıdır. Bu, T sıcaklık değişimine, t iç sıcaklığa, C hacimsel ısı kapasitesine bağlıdır. İletim için ısı akışı, λ ortalama termal iletkenliğine bağlıdır, yatay iletim için ısı kaybı v akış hızına ve Cf su kapasitesinin hacimsel ısısına bağlıdır. Akı nedeniyle ısıtılmış kablo Q sınır akısıyla temsil edilir. Tahmin edilen sıcaklık söz konusu sayısal modele dayalı değerlendirilir. Sızıntıyı göstermek amacıyla toplam karesel hata 2 denklemiyle hesaplanır. DFOT tarafından ölçülen sıcaklık y_i ile beklenen sıcaklık \hat{y}_i arasındaki fark toplam karesel hatadır (i zamanında). Eğer sızıntı yoksa toplam karesel hata DFOT sistemin doğruluğundan daha az olmalıdır. Büyük toplam karesel hata büyük sızıntıları ima eder.

$$C \frac{\delta T}{\delta t} = \lambda \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} - v C_f \frac{\delta T}{\delta x} + Q \quad 4$$

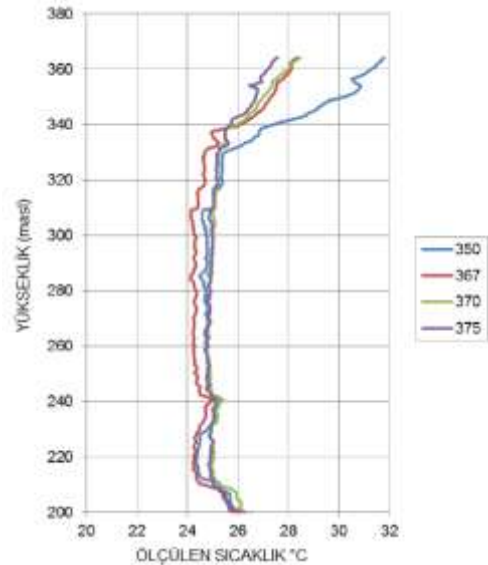
$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad 5$$



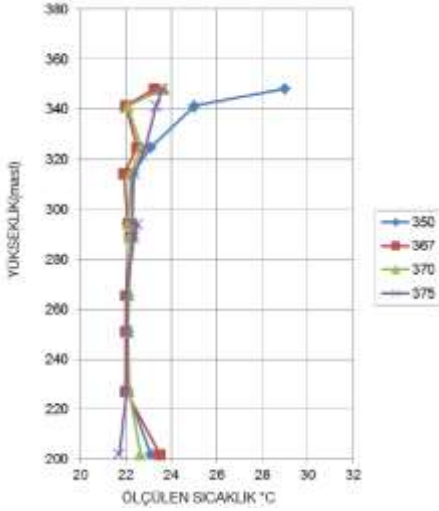
Şekil 30- Isıtılmamış Kablodan Ölçülen Baraj İç Sıcaklığının Profili[13].

5.4 Mujib Barajı, Mujib Vadisi, Ürdün

Mujib Vadisinde, Amman'ın yaklaşık olarak 60km güneyinde yüksekliği 60m ve RCC yapısının toplam hacmi 720.000 m³ olan bir barajdır. Aşağıdaki şekil DFTM izleme sisteminin özetini göstermektedir. Baraja tam olarak 4000m fiber optik kablo döşenmiştir. Ayrıca barajın merkezinde ve memba yüzünde toplamda yedi adet gerilimölçer mevcuttur [14].



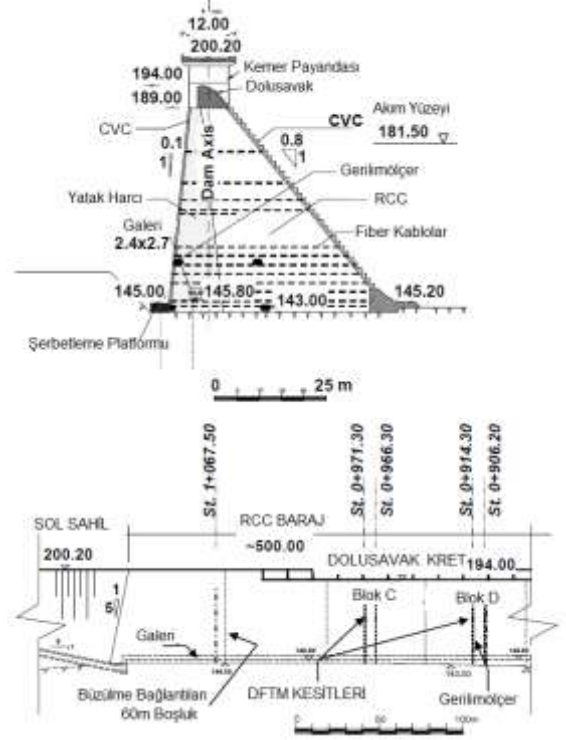
Şekil 31- Isıtılmış Kablodan Ölçülen Baraj İç Sıcaklığının Profili[13].



Şekil 32- Rezervuar Su Sıcaklığının Profili[13].

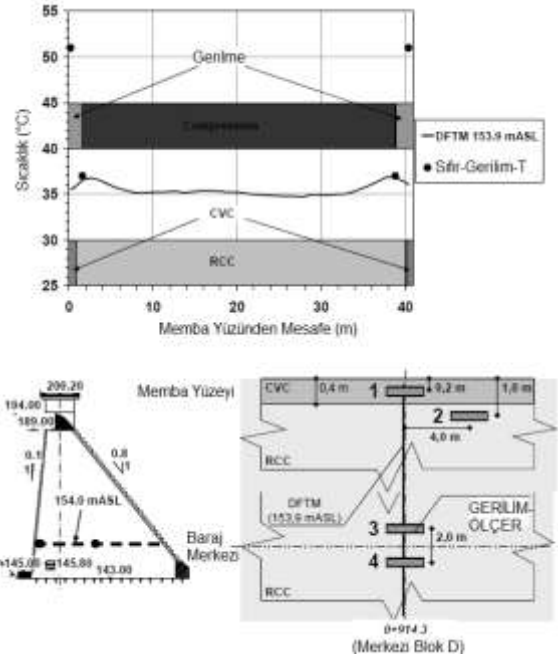
5.5 Shimenzhi Kemer Barajı, Xinjiang, China

Shimenzhi Kemer Barajı, Çin' in kuzey batısında Sincan Uygur Özerk Bölgesinin Xinyang, Urumçi' de bulunmaktadır. Çok merkezli kemer baraj 109m yüksekliktedir ve 2001 yılında tamamlanmıştır. Dünyanın en büyük barajlarından biridir. Shimenzhi Kemer Barajı tabandan yaklaşık 30m kalınlıkta çok ince bir yapı olarak tasarlanmış olup 15m orta yüksekliktedir ve aşırı kıtsal iklimden ötürü aşırı sıcaklık farklarına maruz kalmaktadır (Yaz: + 30 C°; Kış: - 20 C°). Bu nedenle, RCC' nin inşaat aşamasında sıcaklık kontrolü çatlakların önlenmesinde büyük bir rol üstlenmektedir. 300m fiber optik kablonun yerleştirilmiş durumu aşağıda gösterilmektedir. CVC yüzlerinin RCC çekirdeği ile karşılaştırılan daha yüksek çimento

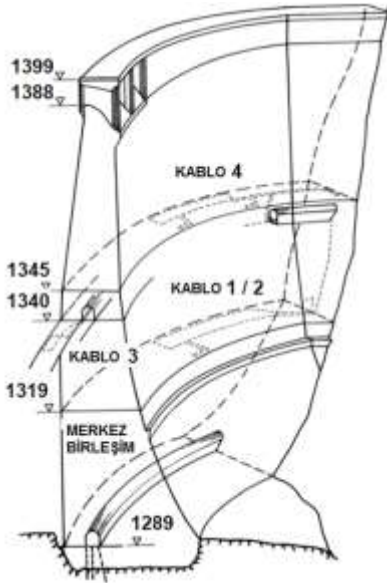


çerçinden ötürü sıcaklıklar CVC' de daha hızlı yükselmektedir [14].

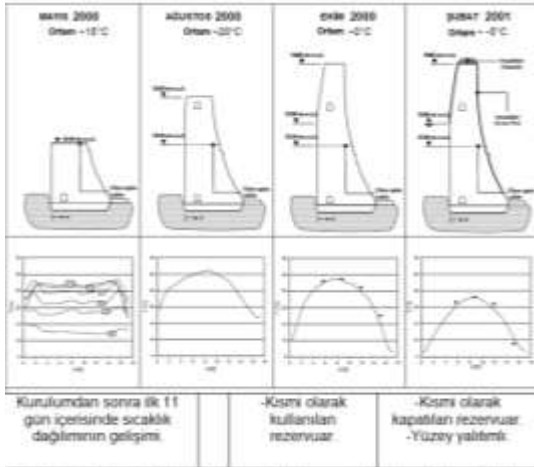
Şekil 33- Mujib Barajı: Sol Sahilin En Kesiti ve Boy Kesiti[14].



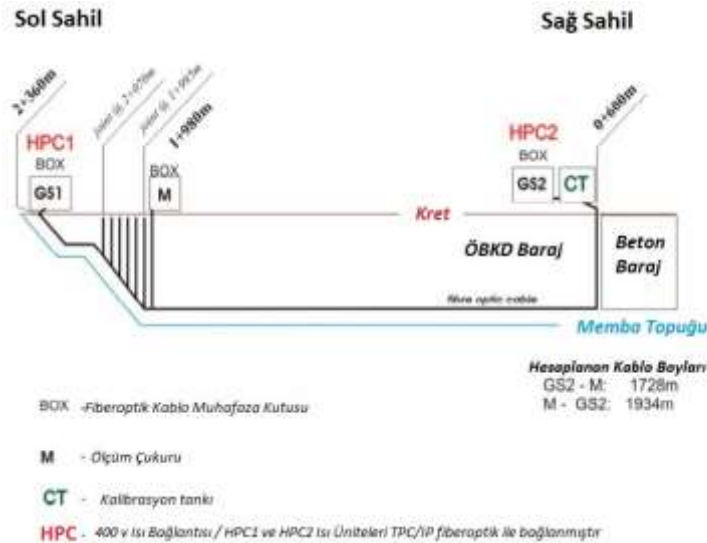
Şekil 34- Mujib Barajı: Blok D Merkezinde Sıfır-Gerilim-Sıcaklık Dağılımı ve DFTM, kot 154.0 mASL 2.2[14].



Şekil 35- Shimenzhi Kemer Barajın İzometrik Görüntüsü[14].

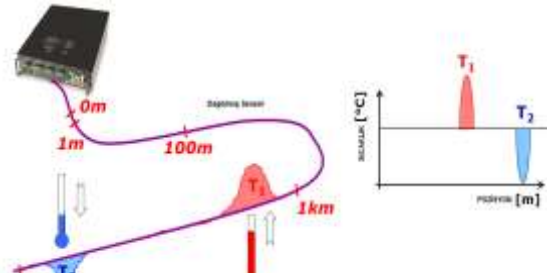


Şekil 36- Dağıtılmış Fiber Optik Sıcaklık Ölçümü (Shimenzi Kemer Barajından DFTM



Şekil 38- Fiber Optik Sızıntı Tespit Sisteminin Şematik Planı[24].

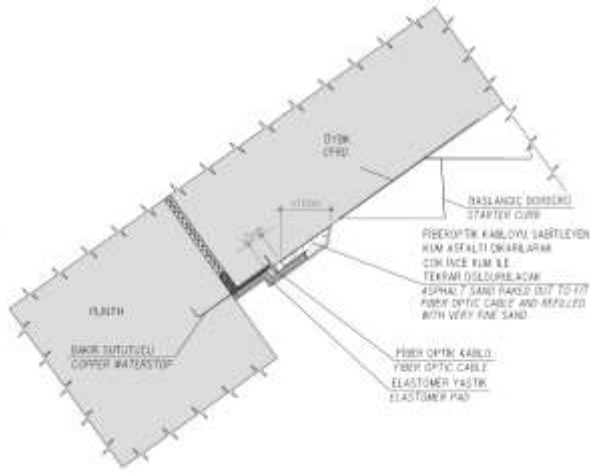
Sonuçları). Fiber optik kablo altında konvansiyonel sıcaklık göstergesi 4m [14].



Şekil 37- Dağıtılmış Fiber Optik Sıcaklık Ölçüm Cihazı[9].

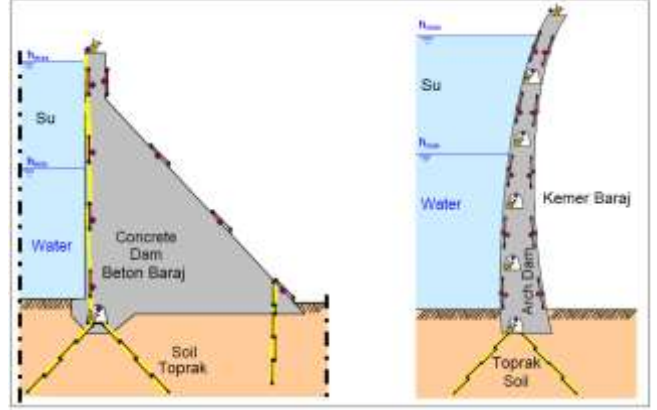
6 ÜLKEMİZDEN UYGULAMA ÖRNEĞİ

Ülkemizde daha önce Derince Barajında başarılı bir şekilde fiber optik sızıntı tespit sistemi kullanılmıştır. Şuan da ise inşaatı devam eden İlısu Barajı ve Hidroelektrik Santrali inşaatında fiber optik sızıntı tespit sistemi uygulanmaktadır. İlısu Barajı ve Hidroelektrik Santrali inşaatında fiber optik sızıntı tespit sistemi, topuk plağı boyunca bakır su tutucu altına yerleştirilen fiber optik kablo ile dağıtılmış ısı algılama ve ısı atımı metotları kullanılarak kaçakların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Fiber optik sıcaklık ölçümüne dayanan izleme sistemi içeriğinde hibrit fiber optik kablolar kullanılmıştır. Böylece sızma akış oranının yerel dağılımı ısı basınç metodu ile hesaplanacak olup yapılacak değerlendirmelerin derinleştirilmesi için de termal iletkenilerin hesaplanması düşünülmüştür. Kullanılan sağ sahil rulosu 1728m ve sol sahil rulosu ise 1934m' dir(Şekil 38).



Şekil 39- Çevre Derzi Altına Fiber Optik Kablo Yerleştirmeye Ait Detay.

Yer değiştirme, kayma ve gerilme dağılımlarını ölçmek için kullanılan sonlu elemanlar yapısal izleme (FESMC)' ye ait örnek Şekil 39' da gösterilmiştir[28].



Şekil 40- Baraj İzlemede Kullanılan Sensor Ağlarına Örnek[28].

7 MALİYET MUKAYESESİ ÖRNEKLEMESİ

Geleneksel ölçüm tekniği ile fiber optik ölçümün maliyet karşılaştırmasını Ennepe barajı örneği üzerinden aşağıdaki şekilde vermek mümkündür.

Çizelge 3- Ennepe Baraj Sistemindeki Sıcaklık Ölçüm Sisteminin Fiyatı ve Parametreleri[20].

	Geleneksel Ölçüm Tekniği	Fiber Ölçüm Tekniği
Ölçüm Noktası Miktarı	40	434 Ölçüm Noktalı 217m Ölçüm Bölümü
Doğruluk	0,02°C	0,3°C
Sıcaklık Ölçüm Aletinin Fiyatı(PT100)	140EUR	-
Sıcaklık Ölçüm Aletlerinin / Fiber Kablonun Toplam Fiyatı	5600EUR	4000EUR
Sıcaklık Ölçüm Sisteminin Toplam Fiyatı(Aletler, İlave Ekipmanlar, Montajsız)	7500EUR	5800EUR
Tek Bir Ölçme Fiyatı	550EUR	1100EUR
PC Dâhil Sabit Ölçüm Fiyatı	15500EUR	Yaklaşık 25000EUR

8 SONUÇ

Fiber optik gerilme ve sıcaklık sensor sistemi, optik fiber uzunluğu boyunca optik fiber içerisindeki Brillouin saçılımını kullanarak hem sıcaklık hem de gerilmeye olan değişimleri ölçen çok ileri bir sensor sistemidir. Baraj yapılarının içerisine fiber yerleştirilerek yapının ne zaman gerildiğini veya ısınıp soğuduğunu tespit etmek mümkündür. Bu verilerin tespit edilmesi, çok büyük hataların oluşumundan önce sorunun giderilebilmesi için bir erken uyarı hizmeti sunar. Sorunların zamanında tespit edilmesi, hem maddi yönden hem de canlı hayatı açısından çok büyük önem arz eder.

Küçük gerilme ve sıcaklık değişimlerinin, çok küçük bir yanılma payıyla saniyeler içinde belirlenmesi ve raporlanması fiber optik sensor sistemleriyle mümkün olabilmektedir. Dağıtılmış fiber optik ölçümleri, yüksek bilgi

yoğunluğu, zor site şartları için uygunluk, kabloların basit ve esnek montajı gibi bir dizi önemli teknolojik avantajlara sahiptir. Bu ölçüm sistemi, çok hızlı ve kolay bir kurulumla sahip olduğu gibi çevre ve zor şantiye ortamlarına uyumludur.

Dağıtılmış fiber optik ölçümler farklı metotlarda yapılabilmektedir. Metot tespitinde işlerin, verilerin ve çalışma ortamlarının durumu önemlidir. Isı atım metodunun gradyan metodunun uygulanmadığı yerlerdeki uygulamalar için geliştirildiği unutulmamalıdır. Rezervuar suyu ve sıcaklık ölçüm konumu arasında yeterli sıcaklık gradyanları ya da rezervuar suyunun yeterli sıcaklık değişimleri yoksa ısı atım metodu uygulanır. Ülkemizde İlisu Barajında da ısı atım metodu kullanılmaktadır. Bugün için DFOT, RCC barajlarda sıcaklık izleme için en ideal metottur. Kanal toprak dolgu ve CFRD' ler de

sızıntı algılama uygulamalarındaki artışla baraj izlemede büyük gelişmeler kaydedilmektedir. Dağıtılmış sıcaklık sezmek için aletlerin daha da geliştirilmesi ve bununla ilgili yeni metotların oluşturulmasında, DFOT teknolojisi anahtar olarak kullanılmaktadır ve kullanılmaya da devam edilecektir. Özellikle ısıtma metodunun daha da geliştirilmesi topraklarda akış hızlarının ölçülmesine imkân tanıyabileceği gibi su içeriğinin dağıtılmış kararlılığı için de yeni bir eşsiz sistemin gelişiminde rol alacaktır. Dağıtılmış fiber optik sıcaklık sistemiyle fiber optik kablo boyunca dağıtılmış sıcaklıkların gayet doğru bir şekilde ölçümü yapılmakta ve bu sayede detaylı sıcaklık kontrolü imkanı ortaya çıkmaktadır. RCC barajlarında zor şantiye ortamlarında dağıtılmış fiber optik sıcaklık ölçümlerinin örnekleri bu çalışmada sunulmuştur. Sayısal analiz yolu ile termal çatlama için RCC barajlarının termal davranışlarının derinlemesine analizini yapmak mümkün olmuştur. Muşib barajı günümüze kadar dünyadaki en kapsamlı DFTM teçhizli barajlardandır. Bu baraj örneği aynı zamanda gerilim ölçerlerin ilk defa kullanıldığı RCC baraj uygulamasıdır. DFTM; RCC barajlarının termal davranış etkilerin değerlendirilmesine olanak tanıyan detaylı sıcaklık dağılımlarının görüntülenmesini sağlamaktadır. Kısıtlı gerilim ölçerleri (gerilim ölçerler) tarafından görüntülenen dağıtılmış sıfır gerilim sıcaklıkları bilgisi ile baraj bünyesinde belli başlı kesimlerde termal gerilim dağılımlarını tespit etmek mümkündür. Böylece barajdaki mevcut çatlama potansiyellerinin daha iyi değerlendirilmesine imkan tanınmaktadır. İlgili örneklerimizde açıkça anlaşılacağı üzere fiber optik, barajların izlenmesinde büyük öneme sahiptir. Fiber optik teknolojisinin hızlı gelişimiyle inşaat yapılarında daha etkin kullanımları gelecekte bizlere daha da ışık tutacaktır.

9 KAYNAKLAR

- [1] Aufleger M., Conrad M., Goltz M., Perzmaier S', Porras P., 2007, "Innovative Dam Monitoring Tools Based on Distributed Temperature Measurement", Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 1, No. 1.
- [2] Öğ.Kd.Yzb. YAGIMLI M. (Elektrik Elektronik Müh. Böl. Deniz Harp Okulu, myagimli@dho.edu.tr), Müh.Atgm. Emrah YÜRÜKLÜ (Elektrik Elektronik Müh. Böl. Deniz Harp Okulu, eyuruklu@dho.edu.tr), "Fiber Optik Sensorler ve Optik Jireskop".
- [3] Solak H., Haziran 1995, "Optik Fiberlerin Extrinsic Sensor Uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üni. Fen Bil. Ens.
- [4] Right Team Danışmanlık, Turksens.
- [5] Fidanboylu, K., Efendioğlu, H. S., May 13-15, 2009, "FIBER OPTIC SENSORS AND THEIR APPLICATIONS", 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), Karabuk, Turkey.
- [6] Prof. Dr. ALTUNCU A., "Fiber Optik Haberleşme Sistemlerinde Yeni Teknolojiler", Elektrik-Elektronik Müh. Fotonik Araştırma Lab., <http://eem.dumlupinar.edu.tr/~fotonik>.
- [7] Inaudi D., Del Grosso A., October 12-17, 2008, "FIBER OPTIC SENSORS FOR STRUCTURAL CONTROL", The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [8] Inaudi D., Casanova N., Steinmann G., Mathier J.F., Martinola G., 7-8.12.1998, "SOFO: Tunnel Monitoring with Fiber Optic Sensors", Reducing Risk in Tunnel Design and Construction, Basel Switzerland.
- [9] Inaudi D., Casanova N., Vurpillot S., Kronenberg P., Martinola G., Steinmann G., Mathier J.F., 12-13.2.1999, "SOFO: Structural Monitoring With Fiber Optic Sensors". FIB,"Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures", Vienna, Austria.
- [10] Inaudi D., Casanova N., Kronenberg P., Marazzi S., Vurpillot S. 5-6.03.1997, "Embedded and surface mounted fiber optic sensors for civil structural Monitoring". SPIE Conference on Smart Structures and Materials, San Diego, USA.
- [11] Kronenberg P., Casanova N., Inaudi D., Vurpillot S., 5-6.03.1997, "Dam monitoring with fiber optics deformation sensors". SPIE Conference on Smart Structures and Materials, San Diego, USA
- [12] Inaudi D., Cottone I., Figini A., 9-11 December 2013, . " Monitoring Dams And Levees With Distributed Fiber Optic Sensing", The 6th International Conference on Structural Health

- Monitoring of Intelligent Infrastructure Hong Kong. SMARTEC SA, Manno, Switzerland
- [13] C. Thongthamchart, June 5, 2012, "Monitoring of Leakage through Face Slab of Nam Ngum 2 CFRD", International Symposium On Dams For A Changing World, Neede for Knowledge Transfer across the Generations&the World Kyoto, Japan.
- [14] M. Aufleger, A.I. Husein Malkawi, Y. Duan, "Distributed Fibre Optic Temperature Measurements in RCC-Dams in Jordan and China",
- [15] Inaudi D., Vurpillot S., August 25-27, 1999, "Bridge Deformation Monitoring with Fiber Optic Sensors". IABSE Symposium - Rio de Janeiro.
- [16] Inaudi D., Glisic B., 16 - 19 July 2006, "Distributed Fiber optic Strain and Temperature Sensing for Structural Health Monitoring". IABMAS'06 The Third Int'l Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, Portugal. SMARTEC SA, Manno, Switzerland.
- [17] Hoffmanna I., Müller M. S. , Krämer S., Giebel M., Schwotzerc G., Wieduwilt T., 2007, 13, 4, "Applications of fibre optic temperature measurement". Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 363–378.
- [18] Nikles M., Vogel B., Briffod F., Grosswig S., Sauser F., Luebbecke S., Bals A, Pfeiffer T., March 14-18, 2004, "Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring", Reprinted from the Proceedings of the 11th SPIE Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, California, USA, pp.18 -25.
- [19] Ph.D. Radzicki K, "The Thermal Monitoring Method – A Quality Change in the Monitoring of Seepage and Erosion Processes in Dikes and Earth Dams". Eng. (Cracow University of Technology) Tel: +48 12 628 28 53, radzicki@hotmail.fr.
- [20] Bettzieche V., 2000, "Temperature Measurement In A Masonry Dam By Means Of Fibreoptical Sensores", Commission Internationale Des Grands Barrages. Vingtième Congrès Des Grands Barrages Beijing, Dr.-Ing. Ruhr River Association, Essen Germany.
- [21] Günday A.*, Yılmaz G.*, Karlık S.E.*. 2007, "Optik Fiberli Dağılık Algılama Yöntemiyle Enerji Kablosunda Sıcaklık Ve Gerginliğin Algılanması". Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 12, Sayı 2.
- [22] Ghetia S., Gajjar R., Trivedi P^b, July 2013, "Classification of Fiber Optical Sensors", International Journal of Electronics Communication and Computer Technology (IJECCCT) Volume 3 Issue 4
- [23] Mahdikhani M. and Z. Bayati Z, October 12-17, 2008 "Application And Development Of Fiber Optic Sensors In Civil Engineering", The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [24] Gökmenoğlu A. H.(Iısu Mühendislik ve Müşavirlik Hizmetleri Konsorsiyumu (ECS) Üyesi Rast Mühendislik), Gündüz İ. (DSİ Iısu Projesi 16. Bölge Müdürlüğü Bölge Müdür Yardımcısı), 2014, "Iısu Barajı Ve Hidroelektrik Santrali Öbkd Baraj Gövdesi Kayadolgu Ölçüm Cihazları Tasarım Ve Uygulaması".
- [25] A. E. Del Grosso (Dicat, University of Genoa, 1 Via Montallegro, Genoa, Italy - delgrosso@dicat.unige.it), D. Inaudi, I. Cottone (SMARTEC S.A., 11 Via Pobiette, Manno, Switzerland - (inaudi, cottone)@smartec.ch.), "Measuring Deformations Of Large Structural Systems"
- [26] G. Branko, D. Inaudi and V. Samuel, 7-12.4.2002, "Structural Monitoring of Concrete Structures", Third World Conference on Structural Control, Como, Italy, SMARTEC SA, Switzerland.
- [27] Klug F., Lienhart W. And Woschitz H., 2014 "High resolution monitoring of expansion joints of a concrete arch dam using fiber optic sensors", Proc. 6th World Conference on Structural Control and Monitoring (6WCSCM), Barcelona, Spain: 3164-3176.
- [28] Glišić, B., Inaudi, D., June 5-8, 2006, "Finite Element Structural Monitoring Concept", Fédération Internationale du Béton Proceedings of the 2nd International Congress, Naples, Italy.
- [29] Courivaud J.R., Pinettes P., Guidoux C., Fry J.J., Beck Y.L., April 11-15, 2011. "Fiber Optics Based Monitoring Of Levees And Embankment Dams". 31st Annual USSD Conference San Diego, California.
- [30] Ukil A., Member S., IEEE, Braendle H., and Krippner P., "Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications".
- [31] Inaudi D., Casanova N., Glisic B., Vurpillot S., Kronenberg P., Lloret S., August 2001, "Lessons learned in the use of fiber optic sensor for civil structural monitoring", International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Issue 3-4, Pages 301-320,

BAYES MODEL ORTALAMASI YÖNTEMİYLE KAVRAMSAL YAĞIŞ-AKIŞ MODELİ ÇIKTILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Umut OKKAN
Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 10145, Merkez-BALIKESİR
umutokkan@balikesir.edu.tr

Umut KIRDEMİR
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35430, Urla-İZMİR
umutkirdemir@iyte.edu.tr

(Makalenin geliş tarihi: 16.11.2015, Makalenin kabul tarihi: 20.06.2016)

ÖZ

Hidrolojik modeller yağış-akış ilişkisinin eldesi, akım tahmini, meteorolojik değişkenliğin akışa olan etkilerinin ölçümünde etkili bir rol oynamaktadır. Herhangi bir havzada tek bir hidrolojik model kullanmak diğer modellere kıyasla daha iyi sonuçlar vermeyebilir. Hazırlanan çalışmada Gediz Havzası'nın toplam drenaj alanını büyük ölçüde temsil eden Gediz Nehri üzerindeki Muradiye akım gözlem istasyonunda gözlenen akımlar altı farklı kavramsal yağış-akış modeli ile modellenmiştir. Elde edilen çoklu model çıktıları Bayes Model Ortalaması (Bayesian Model Averaging (BMA)) yöntemi ile değerlendirilmiş ve havzayı temsil edebilme performanslarına göre ağırlıklandırılmışlardır. Ağırlıklandırma işlemi ile her bir modelin katkısı değerlendirilip yeni akış serileri türetilmiştir. BMA yöntemi ile elde edilen çıktılar tekil kavramsal yağış-akış modeli çıktıları ile karşılaştırıldığında, BMA yöntemiyle elde edilen sonuçların daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kavramsal yağış-akış modelleri, Bayes model ortalaması, Gediz Havzası

EVALUATION OF CONCEPTUAL RAINFALL-RUNOFF MODEL OUTPUTS BY MEANS OF BAYESIAN MODEL AVERAGING METHOD

ABSTRACT

Hydrologic models play an effective role on acquisition of rainfall-runoff relationship, prediction of flow and measuring of the impacts of meteorological variability on runoff. Using single hydrologic model in any basin may not give satisfied results when it is compared to other models. In the study prepared, the flows observed at Muradiye streamflow gauging station located at the Gediz River, which represents the drainage area of Gediz Basin considerably, were modeled by means of six different conceptual rainfall-runoff models. The acquired multi-model outputs were assessed by means of Bayesian model averaging (BMA) method, and then weighted depending on representability performances of basin. By weighting process the contribution of each model was evaluated and the new runoff series were reproduced. When the outputs derived from BMA application was compared to those of single conceptual rainfall-runoff models, it was observed that the results related to BMA method were more reliable.

Keywords: Conceptual rainfall-runoff models, Bayesian model averaging, Gediz Basin

1 GİRİŞ

Akarsu havzalarındaki yağış-akış ilişkisinin elde edilmesi, akım rasatlarında eksiklik olan bölgelerde akım tahmini, iklim değişikliğinin akarsu akışlarına olası etkilerinin irdelenmesi gibi konular kapsamında su bütçesi esaslı kavramsal türden hidrolojik modellerden yararlanılmaktadır. Hidroloji literatüründe araştırmacılar yaygın olarak belli bir hidrolojik model tercih ederek analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Mevcut çalışmalar içerisinde herhangi bir modelin diğer modellerden her zaman çok daha iyi sonuç verebileceği iddia edilmemiştir (Duan vd., 2007). Çünkü söz konusu sonuçlar havzanın büyüklüğüne, klimatolojik rejimine, diğer fiziki coğrafya özelliklerine, toplanan verilerin kalitesine ve rasat uzunluğu gibi etkenlere bağlı değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca tekil bir hidrolojik model referans alınarak yapılan analizler belirsizlik öğeleri taşıyabilir ve modelden üretilen tahminler yeterli güvenilirlikte olmayabilir. Bu nedenle çoklu model çıktılarının sonuçlarını değerlendiren stratejilerin (multi-model ensemble) ortaya konması hidrolojik tahmin türetme safhasında daha tutarlı bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Söz konusu yaklaşım ile herhangi bir modelin sistematik hatasının tahminlere yansıma ihtimali de en aza indirgenmektedir. Shamseldin vd., (1997) çoklu model kullanımı kapsamında ilk uygulamayı yapan araştırmacılar. Shamseldin and O'Connor (1999) farklı yağış-akış modeli çıktıları yapay sinir ağları kullanarak ağırlıklandırmışlardır. Raftery vd. (2005) ise bu tarz regresyon esaslı yöntemler ile tahmin edilen ağırlıkların yorumlanmasının güç olduğunu savunmuştur. Bu bakımdan model çıktılarının ağırlıklandırılması aşamasında Bayesian Model Ortalaması (Bayesian Model Averaging (BMA)) yönteminin kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Söz konusu yaklaşım modeller arası varyansı hesaba katmakta ve tahmini belirsizliğin tanımlanmasında daha gerçekçi sonuç üretmektedir. Yöntemde ağırlıklar pozitif ve toplamı 1 olacak şekilde kalibre edilmekte ve bu ağırlıklar göreceli model performanslarını yansıtmaktadır. Çeşitli bilimsel çalışmalarda BMA yönteminin diğer çoklu model yöntemlerine göre üstünlüğü vurgulanmıştır (Clyde, 1999; Viallefont vd., 2001; Raftery ve Zheng, 2003; Raftery vd., 2005; Ellison, 2004). Bu çalışmada Gediz Havzası'nda yer alan Muradiye akım gözlem istasyonunda gözlenen akımlar 6 farklı kavramsal özellikte yağış-akış modeli vasıtasıyla modellenmiştir. Bu

modellerin çıktıları BMA yöntemi ile değerlendirilerek sonuçların performansı karşılaştırılmıştır.

2 ÇALIŞMADA KULLANILAN KAVRAMSAL YAĞIŞ-AKIŞ MODELLERİ

2.1 Modifiye Thornthwaite Su Bütçesi Modeli (TW-WBM)

Bu model, belli varsayımlar altında akarsu havzasını temsil eden biriktirme sistemleri ile bu sistemlerin girdilerine ve çıktılarına hidrolojik süreklilik ilkesinin uygulanması ile geliştirilmiş bir modeldir. Modelin kavramsal akış şeması Şekil 1 de görülmektedir. Excel ve Visual Basic Programlama dili kullanılarak geliştirilen (Fıstıkoğlu ve Harmancıoğlu, 2001; Fıstıkoğlu ve Okkan, 2010; Okkan, 2013) parametrik su bütçesi modelinde θ ve Ω parametreleri yardımı ile aylık ortalama sıcaklık değerleri (T) kullanılarak aylık potansiyel evapotranspirasyon tanımlanabilmektedir (Denklem 1). Ancak sunulan çalışmada potansiyel evapotranspirasyon Thornthwaite'in ampirik denkleminde türetilmiştir. Böylece modeller parametre bakımından daha ekonomik hale getirilmiştir.

$$E_{pot} = \theta e^{\Omega T} \quad (1)$$

Yüzeğe düşen aylık toplam yağışın (P), α yüzeysel akış katsayısına bağlı olarak $\alpha.P$ kadarlık kısmı yüzeysel (dolaysız) akışa yönlendirilmektedir (Denklem 2).

$$Q_{s,t} = \alpha P_t \quad (2)$$

Geriye kalan kısım ise sızma (infiltrasyon) ile yüzey altı depolama sistemine katılmaktadır (Denklem 3).

$$Inf_t = (1 - \alpha)P_t \quad (3)$$

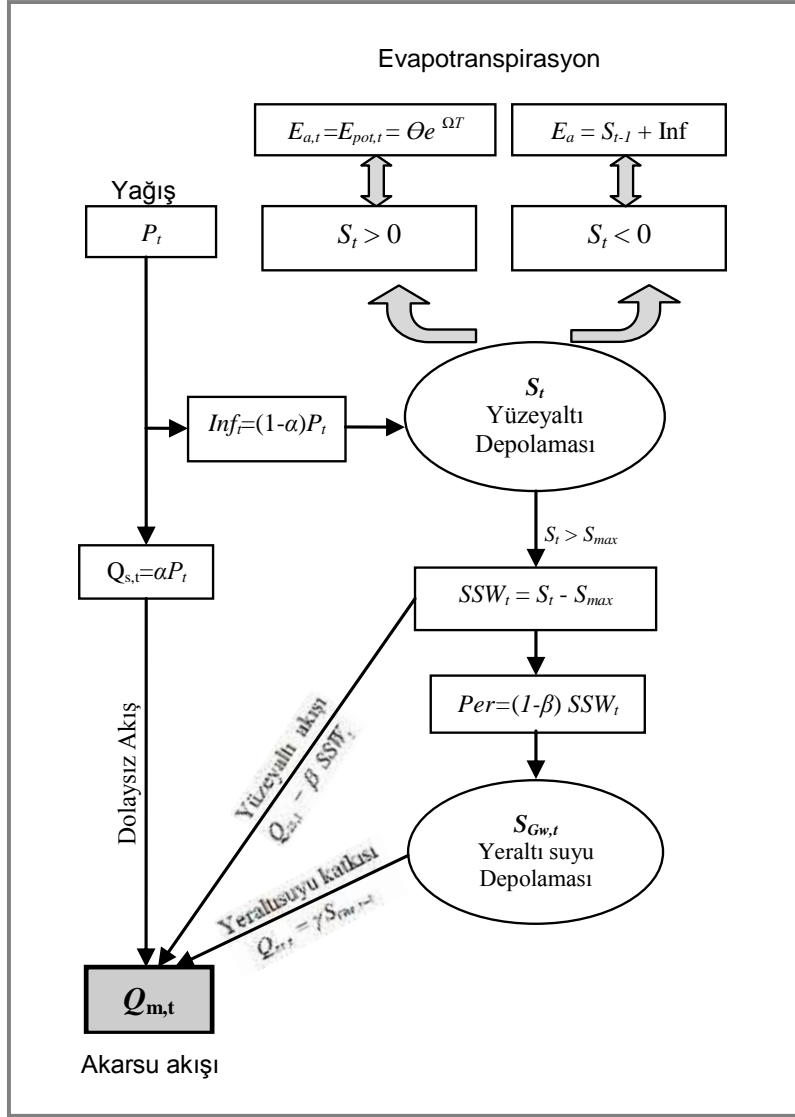
Sızma (Inf_t) ve potansiyel evapotranspirasyon ($E_{pot,t}$) hesaplandıktan sonra genel süreklilik ilkesi uyarınca, t ayında biriktirme sistemindeki depolama durumu aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir (Denklem 4).

$$S_t = S_{t-1} + Inf_t - E_{pot,t} \quad (4)$$

$S_t > 0$ ise, t ayındaki gerçek evapotranspirasyon ($E_{a,t}$) değeri potansiyel evapotranspirasyona ($E_{pot,t}$) eşit olmaktadır (Denklem 5). $S_t < 0$ ise, t ayındaki gerçek evapotranspirasyon ($E_{a,t}$) önceki aydan kalan zemin nemi ve t ayındaki sızma toplamı ile sınırlı kalmaktadır (Denklem 6).

$$S_t > 0; E_{a,t} = E_{pot,t} \quad (5)$$

$$S_t < 0; E_{a,t} = S_{t-1} + Inf_t \quad (6)$$



Şekil 1 - TW-WBM Modelinin İşleyişi (Fıstıkoğlu ve Okkan, 2010)

Yüzev altı depolamasının maksimum değeri olan ve aynı zamanda modelin bir parametresi olarak tanımlanan S_{max} değerinin aşılması durumunda $SSW_t = S_t - S_{max}$ kadar depolama fazlalığının β oranındaki kısmı yüzev altı bileşeni olarak (Q_{ss}) akarsu yatağına katılmaktadır (Denklem 7). Denklem 7'de $\beta < 1$ yüzev altı akış parametresidir.

$$Q_{ss,t} = \beta SSW_t = \beta (S_t - S_{max}) \quad (7)$$

Depolama fazlalığının geri kalan kısmı perkolasyon yoluyla yeraltı suyu depolama sistemine aktarılmaktadır (Denklem 8).

$$Per_t = (1-\beta)SSW_t = (1-\beta)(S_t - S_{max}) \quad (8)$$

Akarsu akışlarının yeraltı suyundan beslenen kısmı doğrusal hazne varsayımı uyarınca, bir önceki ayın aktif yeraltı suyu depolamasına ($S_{Gw,t-1}$) bağlı olarak elde edilmektedir.

$$Q_{Gw,t} = \gamma S_{Gw,t-1} \quad (9)$$

Bu eşitlikte γ doğrusal yeraltı suyu haznesi parametresidir.

Yeraltı biriktirme sisteminin t ayındaki aktif kapasitesi $S_{Gw,t}$ Denklem 10 ile tanımlanmaktadır.

$$S_{Gw,t} = (S_{Gw,t-1} + Per_t)\xi - Q_{Gw,t} \quad (10)$$

Bu denklemde ξ , yeraltı biriktirme sistemi parametresidir.

Böylece, herhangi bir t ayında akarsu yatağındaki toplam akış Denklem 11'den;

$$Q_{m,t} = \alpha P_t + \beta SSW_t + \gamma S_{Gw,t-1} \quad (11)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir.

2.2 abcd ve abcde Modeli

2.2.1 abcd Modeli

Parametrik abcd modeli belli varsayımlar altında ikisi dolaysız akışı, diğer ikisi yeraltı suyu akışını temsil eden dört parametreye sahiptir. Thomas (1981) tarafından önerilen modelin yüzeye düşen aylık toplam yağış (X_i) ve aylık potansiyel evapotranspirasyon (V_i) olmak üzere iki temel girdisi bulunmaktadır. Şekil 2'de ifade edilen su bütçesi yaklaşımına göre, aylık toplam yağış (X_i) girdisinin akış (dolaysız-dolaylı), evapotranspirasyon, zemin nemi- yeraltı suyu depolaması bileşenlerine paylaşılması yağışın niceliğine (X_i), potansiyel evapotranspirasyona (V_i), önceki aydan kalan zemin nemi (S_{i-1}) ve önceki aydan kalan yeraltı suyu depolaması (G_{i-1}) bağlı olarak belirlenmektedir. Denklem 12 söz konusu paylaşımı kontrol etmektedir.

$$y_i = \frac{x_i^* + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{x_i^* + b}{2a}\right)^2 - \frac{b x_i^*}{a}} \quad (12)$$

Burada y_i aylık evapotranspirasyon (E_i) ve zemin nemi depolamasının (S_i) toplamıdır. ($y_i = S_i + E_i$). x_i^* ise aylık yağış ve bir önceki aydan kalan zemin neminin toplamıdır ($x_i^* = X_i + S_{i-1}$). b parametresi yeraltı suyu tablasının üzerindeki doymamış bölgedeki depolamanın üst limitidir. x_i^* arttığında y_i değeri b parametresine yakınsar. a ise zemin tamamen doygunluğa erişmeden akışın oluşma eğilimini temsil eder ($0 < a \leq 1$). b parametresine bağlı olup aralarında $a=2b/y(b)-(b/y(b))^2$ ilişkisi bulunmaktadır. Havzanın topografyası büyük drenaj yoğunluğuna olanak sağlıyorsa a parametresi de küçük değerler alacaktır. $x_i^* - y_i$ farkı yüzeysel (dolaysız) akış ve yeraltı biriktirme sistemine katılan suyun toplamını temsil etmektedir. Modelde ($x_i^* - y_i$) miktarındaki suyun $(1-c)$ kadar kısmı yüzeysel (dolaysız) akışı oluşturmaktadır (Denklem 13.a). Geriye kalan kısmı ise yeraltı biriktirme sistemine ($G_{recharge}$) geçmektedir (Denklem 13.b).

$$Q_{d,i} = (1-c)(x_i^* - y_i^*), \quad (0 < c \leq 1) \quad (13.a)$$

$$G_{recharge,i} = c(x_i^* - y_i^*) \quad (13.b)$$

Modelde zemin neminin zamana karşı azalışının zemin neminin doygunluk derecesini temsil eden "S/b" oranına ve potansiyel evapotranspirasyona (V_i) bağlı olduğu varsayılmaktadır (Denklem 14).

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{V_i}{b} \times S \quad (14)$$

Denklem 14, Denklem 15, Denklem 16'deki şekliyle düzenlendikten sonra modeldeki zemin nemi bileşeni Denklem 17 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\int_{y_i}^{S_i} \frac{dS}{S} = -\frac{V_i}{b} \times \int_{i-1}^i dt \quad (15)$$

$$\ln\left(\frac{S_i}{y_i}\right) = -\frac{V_i}{b} \quad (16)$$

$$S_i = y_i \times \exp\left(-\frac{V_i}{b}\right) \quad (17)$$

Modelde, doğrusal hazne kabulü ile yeraltı suyu depolamasının (G_i) d kadar kısmı ise yeraltı suyu akışını oluşturmaktadır (Denklem 18).

$$Q_{Gv,i} = d \times G_i, \quad (0 < d \leq 1) \quad (18)$$

Yeraltı suyunda kütle korunumu ilkesine göre Denklem 19.a'da gösterilen eşitlik yazılabilir ve Denklem 19.b'deki şekliyle düzenlenebilir.

$$G_i = G_{i-1} + G_{recharge,i} - Q_{Gv,i} \quad (19.a)$$

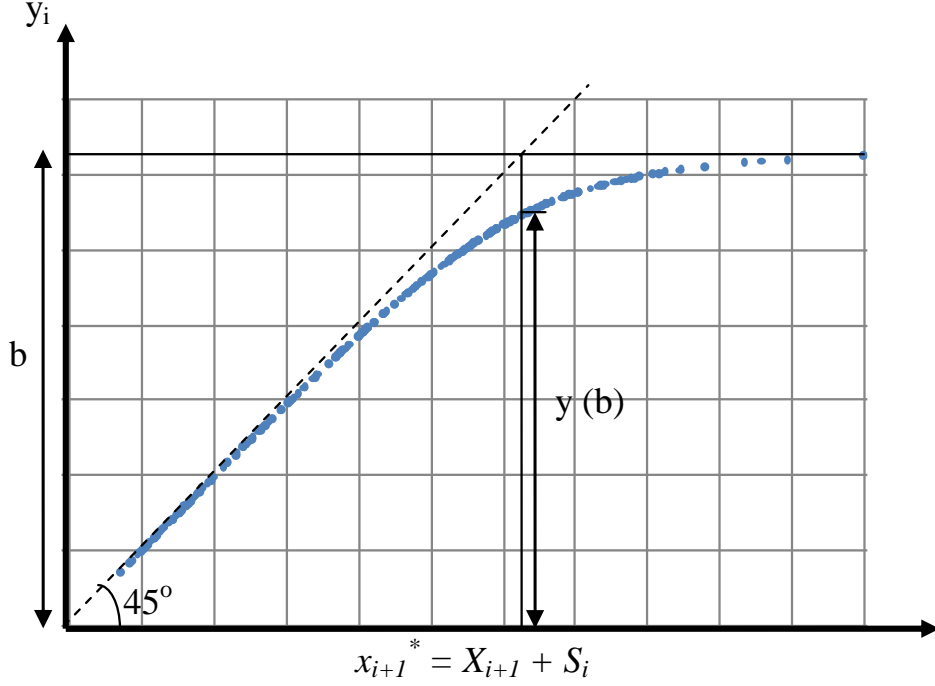
$$G_i + dG_i = G_{i-1} + G_{recharge,i} \quad (19.b)$$

Böylece, yeraltı suyu depolaması (G_i) yeraltı suyu depolamasına katılan suya ve bir önceki aydan kalan yeraltı suyu depolamasına bağlı olarak elde edilebilmektedir (Denklem 20).

$$G_i = \frac{G_{i-1} + G_{recharge,i}}{(1+d)} \quad (20)$$

Modelde havza çıkışındaki toplam akış ise Denklem 21 ile elde edilmektedir.

$$Q_{m,i} = Q_{d,i} + Q_{Gv,i} \quad (21)$$



Şekil 2 - abcd modelinde su bütçesi elemanlarının tanımlanması

2.2.2 abcde Modeli

abcd modelindeki $0 \leq d \leq 1$ tanım aralığında olan d parametresi model kalibrasyon sürecinde hatayı düşürmek için 0 değerine oldukça yakınsamakta, yeraltısuyu depolamasındaki suyun akışa geçme mekanizması bir gecikme ile tanımlanmadığından d parametresinin küçük değerleri için yeraltısuyu depolaması kümülatif olarak artmaktadır. Bu nedenle Denklem 18 için bir modifikasyon önerilmiş (Denklem 22) ve modele bir parametre daha atanarak yeraltısuyu depolaması G_i Denklem 23'deki haliyle tanımlanmıştır.

$$Q_{Gw,i} = d \times G_{i-1}, \quad (0 < d \leq 1) \quad (22)$$

$$G_i = [G_{i-1} + G_{recharge,i}] \cdot e - Q_{Gw,i} \quad (23)$$

Burada e , yeraltı biriktirme parametresidir. $e=1$ değeri için G_i ifadesi Denklem 19.a eşitliği ile aynıdır. Su bütçesi elemanları söz konusu modifikasyona göre elde edildikten sonra modellenmiş toplam akış yine Denklem 21 yardımıyla hesaplanmaktadır.

2.3 ASG-WB Modeli

Abulohom vd. (2001) su bütçesi elemanlarını regresyon esaslı fonksiyonlar halinde tanımlayarak (Vandewiele vd., 1992) ve akışın oluşma rutini yani diğer bir tanımla gecikme (lag) faktörünü de dikkate alarak bir havzadaki yağış-akış ilişkisini modellemeye yarayan pratik bir parametrik model (ASG-WB) önermişlerdir. Model, yazarların baş harfleri dikkate alınarak kısaltılmıştır. Modelde akış,

dolaysız ve taban akışı olmak üzere iki aşama ele alınmıştır. Dolaysız akış (R_d) modelde Vandewiele vd. (1992) referans alınarak tanımlanmıştır (Denklem 24).

$$(R_d)_j = a_1 \times (m_{j-1})^{b_1} \times (P_a)_j \quad (24)$$

Burada a_1 ve b_1 dolaysız akış fonksiyonuna ait regresyon parametreleridir. m_{j-1} j. aydan önceki aya ait zemin nemi depolama miktarıdır. $(P_a)_j$ ise j. aya ait etkili (efektif) yağış olarak tanımlanmakta ve Denklem 25 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$(P_a)_j = P_j - (E_a)_j \left\{ 1 - \exp \left[-P_j / (E_a)_j \right] \right\} \quad (25)$$

Burada P_j ve $(E_a)_j$ sırasıyla j. ayın yağış ve gerçek evapotranspirasyon değerleridir.

Modelde taban akışı $(R_g)_j$ ise önceki aydan kalan zemin nemi depolamasının fonksiyonu şeklinde tanımlanmıştır (Denklem 26).

$$(R_g)_j = a_2 \times (m_{j-1})^{b_2} \quad (26)$$

Vandewiele vd. (1992) (a_1 , b_1) ve (a_2 , b_2) parametre çiftlisinin aralarında yüksek korelasyona sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu nedenle bu parametreler $b_1 = \{ 0, 0.5, 1 \text{ veya } 2 \}$ ve $b_2 = \{ 0.5, 1 \text{ veya } 2 \}$ değerlerinden birini alacak şekilde sabit değerler alabilecek ve bu bakımdan kalibre edilen parametre sayısı azalacaktır.

Modelde j. ayın sonundaki zemin nemi içeriği (m_j) ise Denklem 27 yardımıyla tahmin edilmektedir.

$$m_j = m_{j-1} + P_j - (E_a)_j - (R_c)_j \quad (27)$$

Burada $(R_c)_j$ havza çıkışındaki toplam akışı temsil etmektedir.

Modelde gerçek evapotranspirasyon, potansiyel evapotranspirasyon $(E_p)_j$ ve mevcut su içeriği w_j değerlerine bağlı olarak tahmin edilmektedir (Denklem 28).

$$(E_a)_j = \min \left[(E_p)_j \left(1 - a_3^{w_j/(E_p)_j} \right), w_j \right] \quad (28)$$

Vandewiele ve Win (1998) tarafından da kullanılan denkleme göre mevcut depolanan su miktarı $(w_j = P_j + m_{j-1})$ potansiyel evapotranspirasyona bağlı olarak hesaplanan değerden daha az ise gerçek evapotranspirasyon mevcut su içeriğinden karşılır. w_j değeri daha büyük ise gerçek evapotranspirasyon $(E_p)_j(1 - a_3^{w_j/(E_p)_j})$ fonksiyonu ile bulunan değere eşit alınmaktadır.

Havza çıkışındaki akışı belirlemek için Abulohom vd. (2001) akış bileşenlerinin gecikme (lag) faktörü dikkate alınarak hesaplanması gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmada doğrusal hazne yaklaşımı esas alınarak Muskingum metodu ile gecikme etkisi hesaba katılmıştır (Denklem 29).

$$Q_j = c_0 \times I_j + c_1 \times I_{j-1} + c_2 \times Q_{j-1} \quad (29)$$

Burada Q_j j. ayın sonundaki akışı, Q_{j-1} bir önceki aya ait akışı, I_j j. ayın sonundaki tahmini akışı, I_{j-1} bir önceki aya ait tahmini akışı temsil etmektedir. c_0 , c_1 ve c_2 katsayıları ise gecikme zamanına (k) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Denklem 30, Denklem 31 ve Denklem 32).

$$c_0 = \frac{0.5}{k + 0.5} \quad (30)$$

$$c_1 = c_0 \quad (31)$$

$$c_2 = \frac{k - 0.5}{k + 0.5} \quad (32)$$

Modelde yüzeysel akışı ve taban akışı bileşenleri ayrı ayrı Denklem 29' da verilen ifadeye tabi tutularak havza çıkışındaki toplam akış hesaplanmaktadır. Modelin işleyiş mekanizması Abulohom vd. (2001) tarafından özetlenmiştir. Burada k_1 yüzeysel akışı, k_2 taban akışını temsil eden gecikme zamanları olarak modelde kalibre edilir parametreler olarak tanımlanmıştır. Özetle modelde a_1 , a_2 , a_3 , k_1 ve k_2 olmak üzere 5 adet parametrenin kalibrasyonu gerekmektedir.

2.4 PMS ve GR2M Modelleri

PMS (Parent Model Scheme) modeli, Makhlof ve Michel (1994) tarafından geliştirilen aylık modelden ve günlük GR4J (Perrin vd., 2003) isimli modelden türetilmiştir. Zemin nemi fonksiyonu GR4J modeline oldukça benzemekte olup modelin işleyiş mekanizması Şekil 3' de verilmektedir. Modelde X_1 , X_2 , X_3 , X_4 ve X_5 ile simgelenen 5 parametre mevcuttur.

Yağışa ve zemin nemi (su tutma) kapasitesine bağlı olan S_1 aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}}; \quad \varphi = \tanh \left(\frac{P}{X_1} \right) \quad (33)$$

Burada X_1 mm cinsinden maksimum depolama kapasitesidir. Böylece artık yağış değeri (dolaysız akış yüksekliği) P_1 hesaplanabilmektedir.

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (34)$$

Potansiyel evapotranspirasyonun (E_{pot}) da sistemde hesaba katılması ile S_1 bileşeni S_2 formuna dönüştürülmektedir.

$$S_2 = \frac{S_1(1 - \psi)}{1 + \psi \left(1 - \frac{S_1}{X_1} \right)}; \quad \psi = \tanh \left(\frac{E_{pot}}{X_1} \right) \quad (35)$$

Başlangıç zemin nemi değerinin ilk ay için model ve gözlenmiş akım değerlerinin birbirine yakın olması şartıyla belirlenmesinden sonra, yeni zemin nemi değeri diğer aylar için aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1} \right)^{X_2} \right]^{1/X_2}} \quad (36)$$

Burada X_2 pozitif bir katsayı olmak üzere bir diğer bileşen olan (zemin nemi biriktirme sistemindeki fazla su) P_2 ise

$$P_2 = S_2 - S \quad (37)$$

denkliği ile hesaplanmaktadır.

Şekil 3 incelendiğinde P_1 ve P_2 değerlerinin toplamının net yağışı (P_3) temsil ettiği görülmektedir. Modelde net yağışın X_3 kadar bir kısmı akışın ilk bileşenini oluşturmakta ($Q_1 = X_3 P_3$), geriye kalan kısım ise kapasitesi R olan ikincil hazneye yönlendirilmektedir. Başlangıç zemin neminde olduğu gibi ikincil haznenin başlangıç depo değeri de ilk ay için

model ve gözlenmiş akım değerlerinin birbirine yakın olması şartıyla belirlenmektedir.

$$R_1 = R + (1 - X_3)P_3 \quad (38)$$

İkinci debi bileşeni Denklem 38 ile hesaplanan R_1 bileşenine ve X_4 parametresine bağlı olarak belirlendikten sonra (Denklem 39), ikinci haznenin yeni depolama değeri (R), süreklilik ilkesinden hesaplanabilmektedir (Denklem 40).

$$Q_2 = \frac{R_1^2}{R_1 + X_4} \quad (39)$$

$$R = R_1 - Q_2 \quad (40)$$

Q_1 ve Q_2 debi bileşenlerinin X_5 oranındaki kısmı model akışlarını oluşturmakta; geri kalan kısmın havza dışına boşaldığı kabul edilmektedir.

$$Q = X_5(Q_1 + Q_2) \quad (41)$$

Mouelhi vd. (2006) PMS modelinin birçok havzada uygulanmasıyla birlikte model parametrelerinin azaltılabileceğini göstermişlerdir. Bazı istatistiksel performans kriterlerinin karşılaştırılması sonucu X_2 , X_3 ve X_4 parametreleri modelden atılmıştır. Bazı kabuller ve bileşenlerin birleştirilmesi ile elde edilen basitleştirilmiş GR2M modelinin işleyiş mekanizması Şekil 4' de verilmektedir. Modelin başka bir havza üzerindeki uygulaması Okkan ve Fistikoglu (2014) tarafından da sunulmuştur.

2.5 Budyko Yaklaşımına Dayanan Dinamik Su Bütçesi Modeli (Dyn-WBM)

Budyko (1958), yağıştan tahmin edilen su içeriğine ve evapotranspirasyona bağlı yıllık zaman ölçekli bir su bütçesi eşitliği önermiştir (Denklem 42).

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^{1-\alpha} \right]^{1-\alpha} \quad (42)$$

Burada E_0 potansiyel evapotranspirasyonu (=EPOT), P yağışı, α tanım aralığı (0,1) olan model parametresini temsil etmektedir. Buradaki E_0/P ifadesi ise kuraklık indeksi (aridite) olarak bilinmektedir. Denklem 42'ye göre sabit bir E_0/P oranı için α arttıkça evapotranspirasyon etkinliği de artar. Denklem 42 i .zaman için Denklem 43'teki şekliyle yazılarak F_u eğrisi olarak tanımlanmaktadır (Fu, 1981).

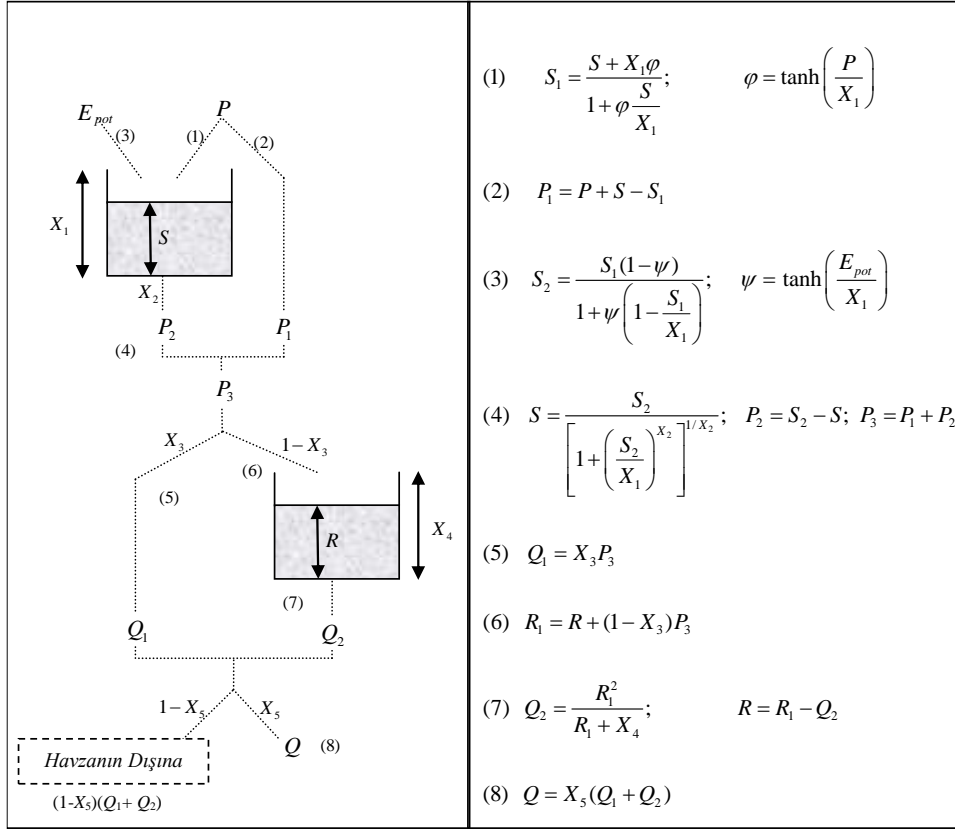
$$\left(\frac{ET}{P} \right)_i = F \left(\left(\frac{E_0}{P} \right)_i; \alpha \right) \quad (43)$$

Denklem 42 düzenlenerek Denklem 44'teki ifade yazılabilir. Kararlı hal kabulüne göre havzadaki yıllık akım için $Q=P-ET$ kabul edilirse, Denklem 44'deki ifadede her iki tarafın $(1-\alpha)$ ile üssü alınıp $(P-ET)$ fark ifadesi yerine Q yazıldığında yıllık akım (Q) eşitliği elde edilmektedir (Denklem 45).

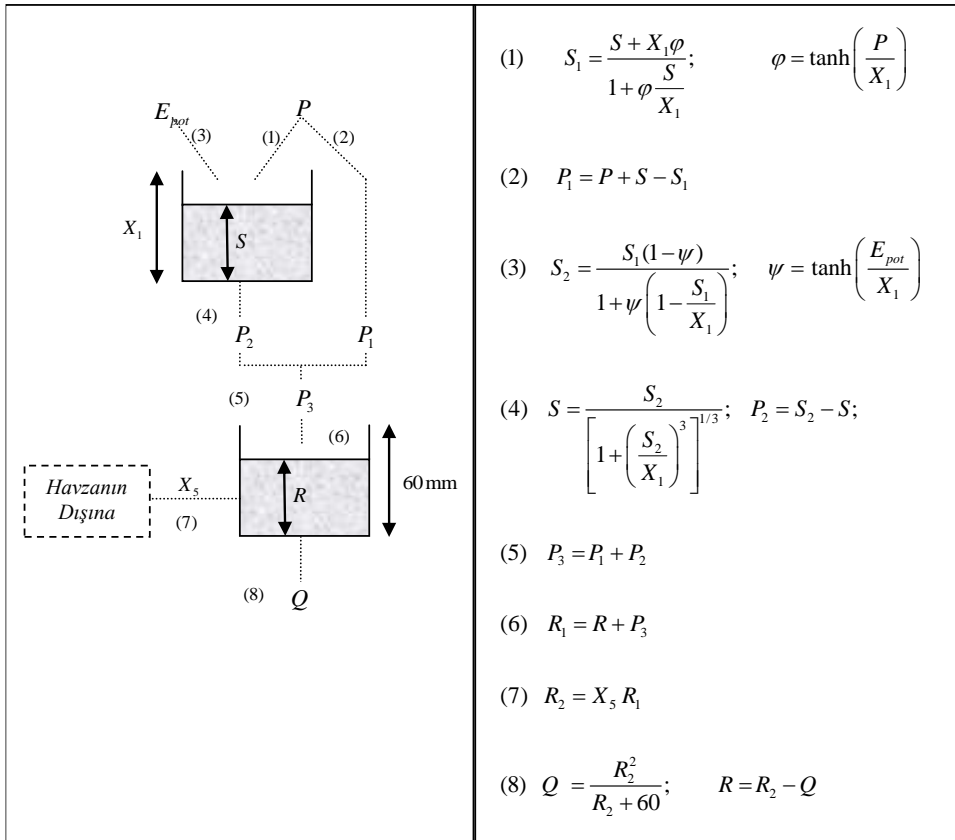
$$P^{1-\alpha} + E_0^{1-\alpha} = (P + E_0 - ET)^{1-\alpha} \quad (44)$$

$$Q_i = \left[P_i^{1-\alpha} + E_{0,i}^{1-\alpha} \right]^{1-\alpha} - E_{0,i} \quad (45)$$

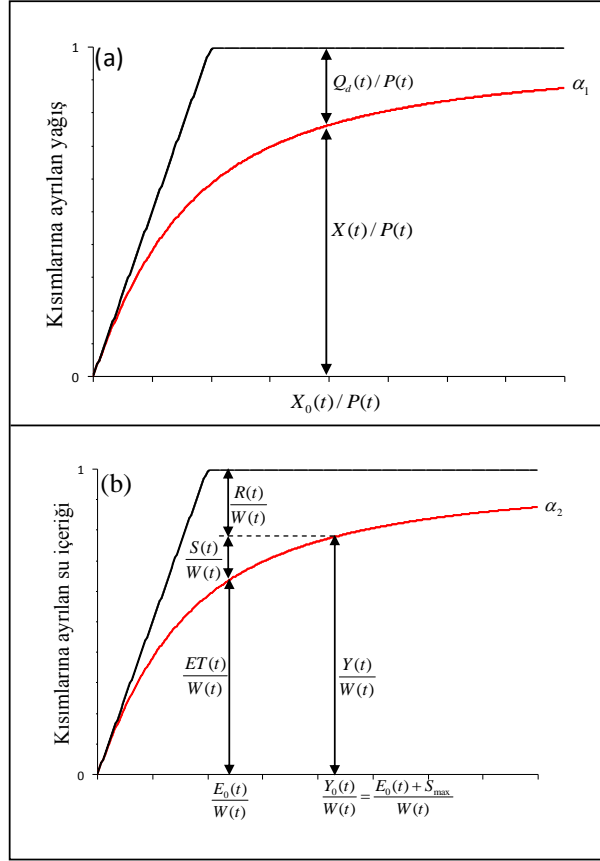
Yıllık zaman ölçeğinden aylık zaman ölçeğine geçildiğinde yağıştaki, potansiyel evapotranspirasyondaki ve depolamadaki değişkenliklerin dikkate alınması gerekmektedir. Zhang vd. (2008) bu durumu kanıtlamak için Denklem 45'de verilen yıllık su bütçesi eşitliğini aylık verilere uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, aylık verilere uygulanan yıllık su bütçesi modelinin aylık akımları temsil etmedeki başarısı zayıf kalmıştır. Tahmini akımların yağışlara oldukça duyarlı olduğu tespit edilmiş; model tahminleri gözlenen akımlara kıyasla oldukça büyük çıkmıştır. Bu sonuçlar, ilave süreçlerin de model işleyişine yansıtılmasını gerekli kılmıştır. Bu maksatla, Zhang vd. (2008) Budyko eğrisini esas alarak dinamik su bütçesi modeli olarak adlandırdıkları modeli ortaya koymuşlardır. Bu yöntem Okkan ve Kırdemir (2016) tarafından da kullanılmıştır.



Şekil 3 - PMS modelinin işleyiş mekanizması (Mouelhi vd., 2006)



Şekil 4 - GR2M modelinin işleyiş mekanizması (Mouelhi vd., 2006)



Şekil 5 - Yağışın bileşenlerine ayrılması (a), mevcut suyun kısımlarına ayrılması (b)

Bu modelde havza, zemin nemi ve yeraltı suyu depolaması olmak üzere iki aşamada kavramsallaştırılmıştır. t . zamanda havzaya düşen yağış ($P(t)$), dolaysız akışa $Q_d(t)$ ve havza tarafından diğer su bütçesi elemanları için tutulan su miktarına ($X(t)$) paylaştırılmaktadır (Denklem 46, Şekil 5a).

$$P(t) = Q_d(t) + X(t) \quad (46)$$

Burada, gerçek evapotranspirasyon $ET(t)$, zemin nemindeki değişim $S(t)-S(t-1)$ ve yeraltı suyu biriktirme sistemine boşalan su $R(t)$ bileşenlerinin toplamı $X(t)$ 'yi temsil etmektedir. Zemin nemi depolaması $S(t)$ maksimum doygunluğa eriştiğinde ($S(t)=S_{max}$) $X(t)$ için beklenen üst limit $X_0(t)$ aşağıdaki şekliyle tanımlanmaktadır (Denklem 47).

$$X_0(t) = S_{max} - S(t-1) + E_0(t) \quad (47)$$

Budyko (1958)'de savunulan görüşe benzer olarak $X_0(t)/P(t) \rightarrow \infty$ için (aşırı kurak) $X(t)/P(t) \rightarrow 1$ çıkarımını yapmak mümkündür.

$X_0(t)/P(t) \rightarrow 0$ için (aşırı sulak) ise $X(t) \rightarrow X_0(t)$ limit değerine yakınsar. F_u fonksiyonu

$X_0(t)/P(t)$ oranına uyarlanarak $X(t)$ hesaplanabilmektedir (Denklem 48, Şekil 5a).

$$X(t) = P(t) \cdot F\left(\frac{X_0(t)}{P(t)}; \alpha_1\right) \quad (48)$$

Burada α_1 dolaysız akış haricindeki su bütçesi elemanları için tutulan su miktarını kontrol eden model parametresidir. $X(t)$ hesaplandıktan sonra akımın dolaysız bileşeni Denklem 46'dan elde edilmektedir.

Bir önceki aydan kalan zemin nemi ile $X(t)$ toplamı t . ayda havzada mevcut bulunan su miktarını ($W(t)$) temsil etmektedir (Denklem 49).

$$W(t) = S(t-1) + X(t) \quad (49)$$

Bu mevcut suyun bir kısmı evapotranspirasyona ayrılacak, bir kısmı zemin nemi depolamasında kalacak, geri kalan kısmı ise yeraltı suyu depolama sistemini besleyecektir (Denklem 50, Şekil 5b).

$$W(t) = ET(t) + S(t) + R(t) \quad (50)$$

t .ayda gerçekleşen evapotranspirasyon ve depolanan zemin nemi toplamı $Y(t)$ ile gösterilirse ($Y(t)=ET(t)+S(t)$), $Y(t)$ için beklenen üst limit değeri $Y_0(t)$ ise $S(t)=S_{\max}$ ve $ET(t)=E_0(t)$ için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$Y_0(t) = S_{\max} + E_0(t) \quad (51)$$

Budyko (1958)'e benzer biçimde, $Y_0(t)/W(t) \rightarrow \infty$ için (aşırı kurak) $Y(t)/W(t) \rightarrow 1$, aksi durum (aşırı sulak) için $Y_0(t)/W(t) \rightarrow 0$ için $Y(t) \rightarrow Y_0(t)$ çıkarımı yapılmaktadır.

$Y(t)$ F_u eğrisi ile α_2 evapotranspirasyon etkinlik parametresine bağlı olarak tahmin edilmektedir (Denklem 52).

$$Y(t) = W(t) \cdot F(Y_0(t); \alpha_2) \quad (52)$$

$Y(t)$ hesaplandığında yeraltısuyu depolamasına boşalan su Denklem 53 ile hesaplanmaktadır.

$$R(t) = W(t) - Y(t) \quad (53)$$

$ET(t)$ bileşeninin beklenen limit değeri ise potansiyel evapotranspirasyon $E_0(t)$ 'dir. Benzer şekilde, $ET(t)$ F_u eğrisinden α_2 parametresine bağlı hesaplanabilmektedir (Şekil 5b, Denklem 54).

$$ET(t) = W(t) \cdot F\left(\frac{E_0(t)}{W(t)}, \alpha_2\right) \quad (54)$$

Denklem 52 ve Denklem 54 aynı α_2 parametresini kullanmaktadır. α_2 arttıkça $ET(t)$ ve $Y(t)$ artmakta ve buna bağlı olarak $R(t)$ azalmaktadır.

$Y(t)$ ve $ET(t)$ hesaplandıktan sonra t . aya ait zemin nemi depolaması elde edilebilmektedir ($0 \leq S(t) \leq S_{\max}$).

$$S(t) = Y(t) - ET(t) \quad (55)$$

Son aşamada, yeraltısuyu depolaması lineer hazne kabulü ile ele alınmakta ve taban akışı bir önceki aydan kalan yeraltısuyu depolama miktarına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Denklem 56).

$$Q_b(t) = \beta \cdot G(t-1) \quad (56)$$

Burada $Q_b(t)$ taban akışını, β doğrusal yeraltısuyu haznesi parametresidir. $G(t-1)$ bir önceki ayın aktif yeraltısuyu depolamasıdır. Yeraltı biriktirme sisteminin t ayındaki aktif

kapasitesi $G(t)$ ise Denklem 57 ile hesaplanmaktadır.

$$G(t) = [G(t-1) + R(t)] \cdot \xi - Q_b(t) \quad (57)$$

Burada ξ , yeraltı biriktirme sistemi parametresidir. Bu parametre modelin 4 parametrelili versiyonunda bulunmamaktadır. Su bütçesi elemanları tanımlandıktan sonra modellenen toplam akış Denklem 58'den hesaplanmaktadır.

$$Q_m(t) = Q_d(t) + Q_b(t) \quad (58)$$

3 BMA YÖNTEMİ

T adet veriye sahip gözlemlere $D=[y_{göz1}, y_{göz2}, \dots, y_{gözT}]$ ve K tane model tahmini f_k 'ya bağlı olarak y 'nin posteriori dağılımı $p_k(y | f_k, D)$ koşullu olasılığı ile gösterilmektedir. Toplam olasılık kuralına göre, BMA'nın probabilistik tahmini Denklem 59'daki olasılık yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilir (Raftery vd,2005; Duan vd 2007).

$$p(y|D) = \sum_{k=1}^K p(f_k|D) \cdot p_k(y|f_k, D) \quad (59)$$

Bu terim model tahminlerinin gözlemleri ne kadar yansıtılabildiğinin bir ölçütüdür. $p_k(y | f_k, D)$ için pratikte normal dağılım tercih edilir ve $g(y | f_k, \sigma_k^2)$ olarak gösterilir. $W_k = p(f_k | D)$ şeklinde tanımlanırsa söz konusu model ağırlıklarının toplamı 1'e eşit olacaktır.

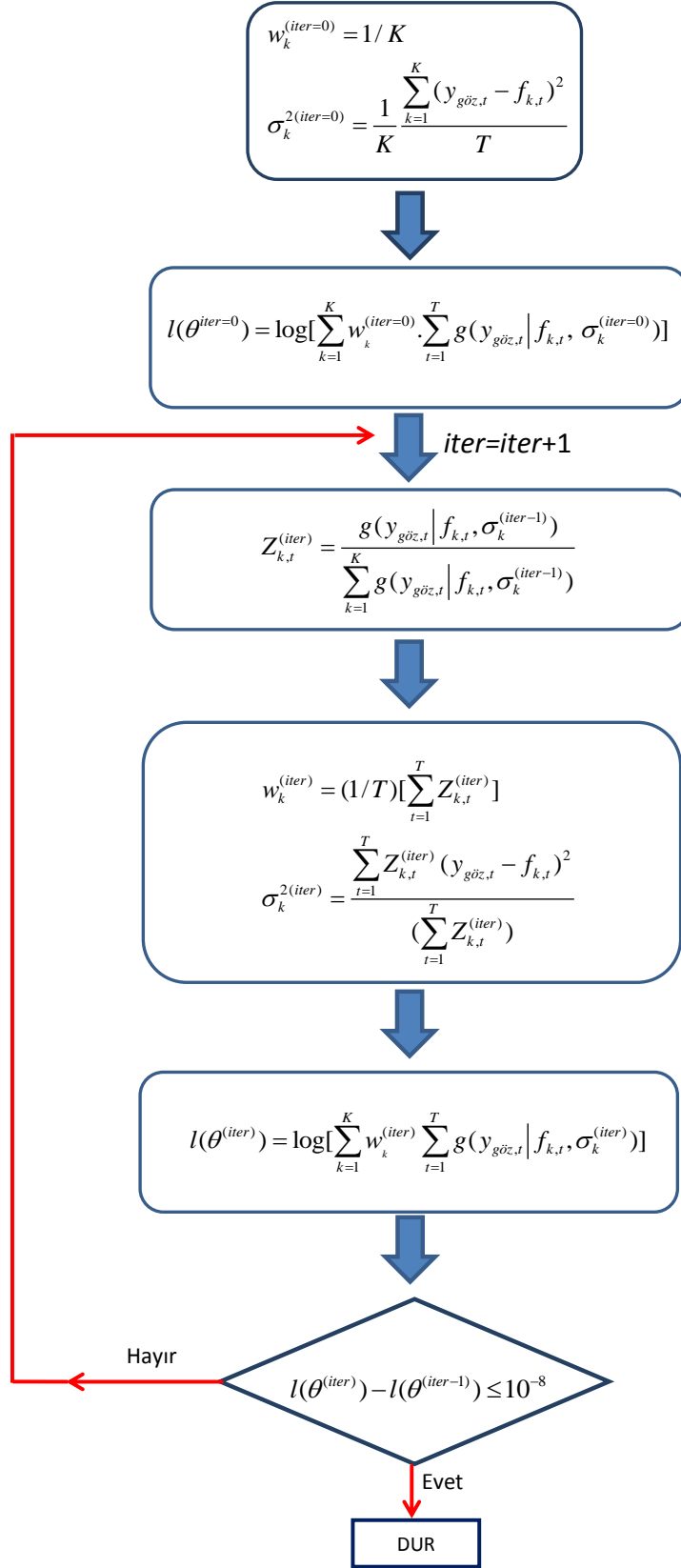
BMA tahmininin beklenen değeri Denklem 60'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} E[y|D] &= \sum_{k=1}^K p(f_k|D) \cdot E[p_k(y|f_k, D)] \\ &= \sum_{k=1}^K w_k \cdot f_k \end{aligned} \quad (60)$$

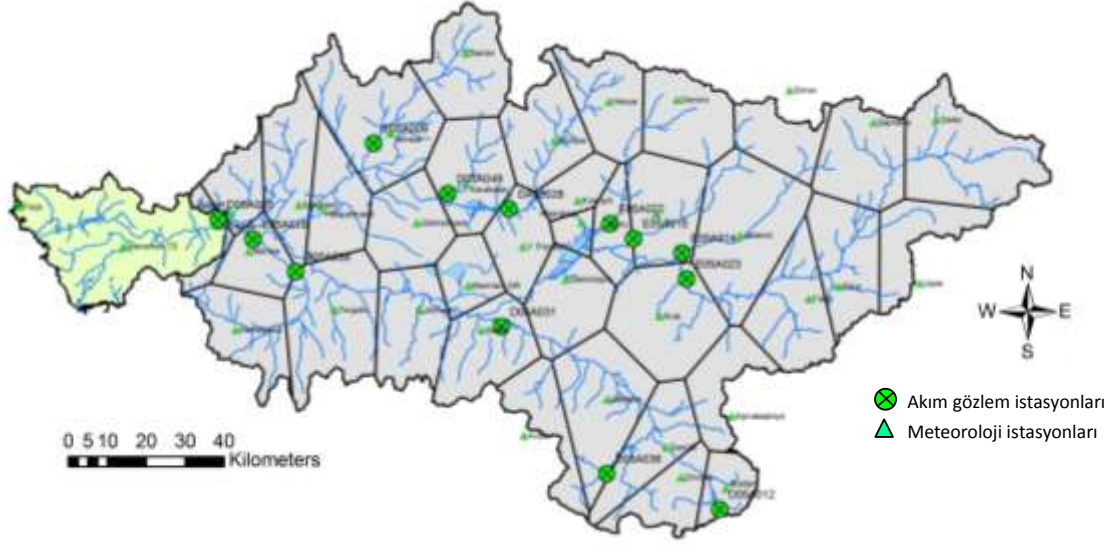
BMA yöntemini uygulamak için ağırlıklar (w_k) ve model tahmininin varyansı (σ_k^2) tahmin edilmelidir. Raftery vd.(2005) tarafından önerilen logaritmik-olabilirlik (log-likelihood) fonksiyonunun maksimizasyonu bu aşamada kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} l(\theta) &= l(w_1, \dots, w_k; \sigma_1, \dots, \sigma_k) \\ &= \log\left[\sum_{k=1}^K w_k \cdot g(y|f_k, \sigma_k)\right] \end{aligned} \quad (61)$$

Fonksiyonun maksimizasyonun basit analitik yöntemler ile gerçekleştirilmesi güç olup Şekil 6'da verilen iteratif prosedür uygulanmaktadır (Duan vd.,2007).



Şekil 6 - BMA İşleyişi (Burada $g(\cdot)$ merkezi $a_k + b_k \cdot f_{k,t}$, standart sapması σ_k olan normal dağılımı temsil etmektedir (a_k ve b_k regresyon katsayılarıdır)).



Şekil 7 - Muradiye alt havzasına ait Thiessen poligonları ve havzadaki hidro-meteoroloji istasyonları

4 VERİLER

Sunulan çalışmada, su bütçesi modeli Gediz Havzası'nda yer alan yaklaşık 15849 km² yağış alanına sahip Muradiye Akım Gözlem İstasyonuna uygulanmıştır (Şekil 7). DSI tarafından işletilen D05A025 numaralı akım gözlem istasyonunda gözlenen akışların 01.10.1976-01.09.2010 dönemine (1976-2010 su yılları) ait verileri kullanılmıştır. Uygulama havzasını temsil eden yağış ve sıcaklık verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen 37 istasyonda ölçülmektedir. Çalışmada bölge için Thiessen poligonu oluşturularak alansal ortalama yağışlar kullanılmıştır. Elde edilen poligonlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Tahmini potansiyel evapotranspirasyon (EPOT) değerleri ise Thornthwaite ampirik denkleminde hesaplanmıştır. 01.10.1975-01.09.2010 ortak dönemine ait yıllık ortalamalar ise yağış, potansiyel evapotranspirasyon ve akış için sırasıyla 533 mm/yıl, 825 mm/yıl ve 96.5 mm/yıl olarak hesaplanmıştır.

5 UYGULAMA

Detayları yukarıda verilen su bütçesi modelleri, MS Excel ve Visual Basic programlama dili kullanarak geliştirilmiştir. Söz konusu modeller kurulurken havzada modellenen tüm süreçlerin homojen olarak yayıldığı, bütün yüzeyin geçirimli olduğu kabul edilmiştir. Modellerde fiziksel olarak direkt ölçülmeyen ve bu bağlamda kavramsal olarak nitelendirilen parametreler yer almaktadır (Maksimum zemin doygunluğu, evapotranspirasyon etkinlik katsayısı vb.). Modellerde tanımlı ve kalibre

edilen parametrelerin fiziksel şartları benzeştirebilirliği bu çalışma kapsamında irdelenmemiştir. Zemin nemi, yeraltı suyu gibi değişkenlerin gözlenmesi ve özellikle coğrafi bilgi sistemi kullanılarak gerekli incelemelerin yapılması (arazi eğimi, yükselti, toprak haritaları vb dikkate alarak) durumunda söz konusu kıyaslamalar yapılabilir.

Yukarıda bahsi geçen kabuller ile hazırlanan modeller, zemin nemi ve yeraltısuyu başlangıç depolama değerleri gibi başlangıç değerlerini okuyarak işleme başlamakta ve her bir ay için su bütçesi bileşenlerini hesaplamaktadır. Başlangıç koşulları, model sonuçları ilk aylarda ölçülmüş akımlara yakın olacak şekilde seçilmiştir. Çalışmada, uygulama havzasının 35 yıllık gözleminin ilk 18 yılı (1976-1993) kalibrasyon aşamasında, diğer 17 yıllık kısmı (1994-2010) verifikasyon aşamasında kullanılmıştır. Kalibrasyon için Newton'un teğetler algoritması tercih edilmiştir. Çalışmada hata kareler ortalaması (HKO) amaç fonksiyonu olarak seçilmiş ve HKO değerinin minimizasyonu esas alınmıştır. Kalibre edilen model parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Modellerin performansları ise bazı istatistiksel kriterler ile irdelenmiştir (Tablo 2). Bunlar hata kareler ortalamasının karekökü olan RMSE, determinasyon katsayısı (R^2), düzeltilmiş determinasyon katsayısı (Adj. R^2) ve Nash-Sutcliffe ölçütü (NS) gibi istatistiklerdir.

Modellerin kalibrasyonundan ve model çıktılarının derlenmesinden sonra BMA ile modellerin ağırlıklandırılması işleme

geçilmiştir. Bu işlem modellerin kalibrasyon dönemi çıktıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ağırlıklandırma işlemi sulak (Ekim-Mart ayları) ve kurak (Nisan-Eylül) dönemler için ayrı ayrı yapılmıştır (Şekil 8). Modellerin kurak ve sulak dönemlerdeki etkinliklerinin değişkenliği Şekil 8'de görülebilmektedir.

Kavramsal yağış-akış modellerinin havzadaki farklı zamansal periyotları farklı performanslarda modelleyebileceği düşünüldüğünden, BMA analizinin kurak ve sulak dönemler için ayrı ayrı uygulanmasının tutarlı bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir (Raftery vd., 2005).

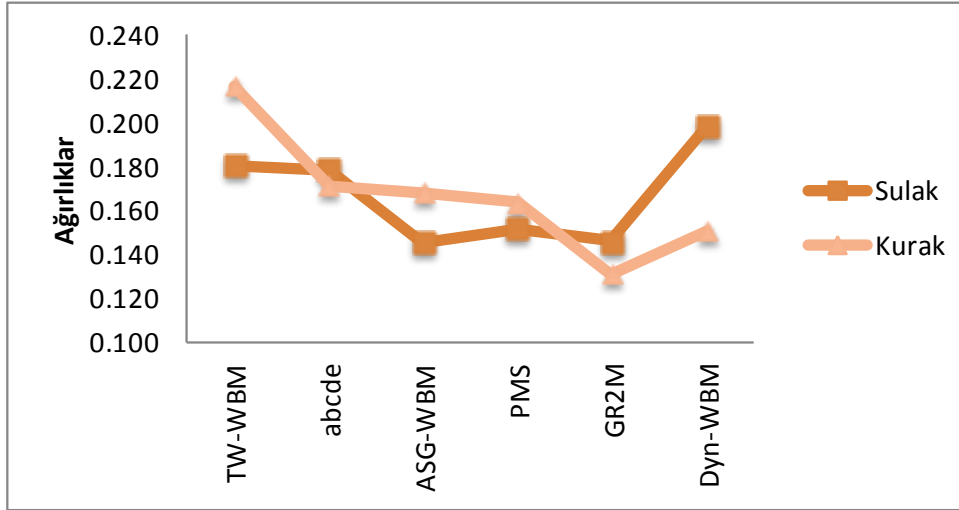
Tablo 1 - Modellerin kalibrasyondan sonra elde edilen parametreleri

(a)	$S_{o,t}$	$S_{o,Gwt}$	α	S_{max}	β	γ	ξ	
	0.0	16.0	0.067	159.485	0.282	0.091	0.907	
(b)	S_0	G_0	a	b	c	d	e	
	100	100	0.985	253.587	0.654	0.014	0.969	
(c)	m_0	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	k_1	k_2
	10	0.001	0.017	0.631	1.00	1.00	0	4
(d)	S_o	R_o	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
	109	50	265.632	4.120	0.616	1036.7	0.524	
(e)	S_o	R_o	X_1	X_2				
	100	19	267.153	0.620				
(f)	S_0	G_0	S_{max}	α_1	α_2	d	ξ	
	5.0	5.0	297.406	0.637	0.649	0.607	0.563	

a: TW-WBM; b: abcde; c:ASG-WBM; d: PMS; e:GR2M; f: DYN-WBM

Tablo 2 - Kavramsal yağış-akış modellerinin ve ENSEMBLE modelin performansları

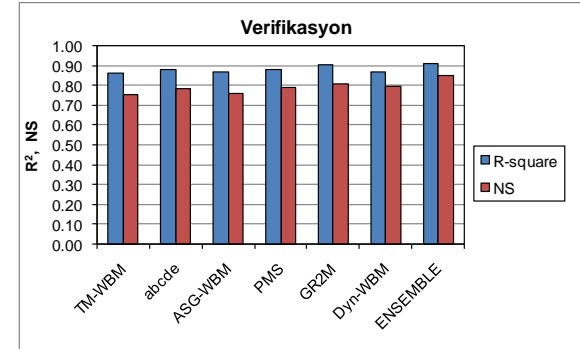
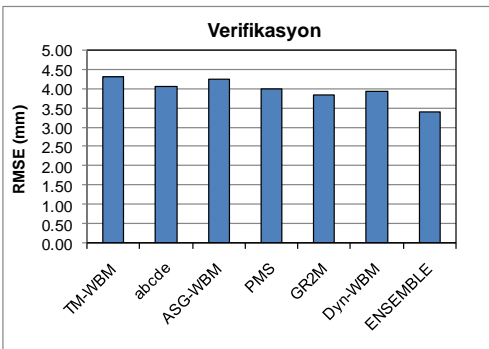
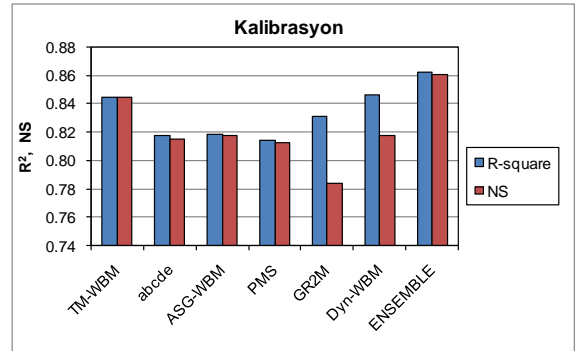
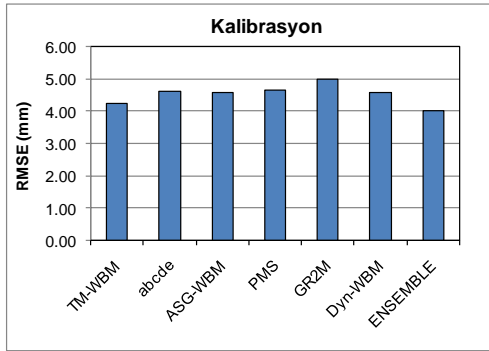
(a)				
Kalibrasyon				
Model	RMSE (mm)	R^2 (-)	Adj. R^2 (-)	NS (-)
TW-WBM	4.22	0.8450	0.8435	0.8449
abcde	4.60	0.8178	0.8161	0.8154
ASG-WBM	4.57	0.8188	0.8171	0.8180
PMS	4.64	0.8142	0.8125	0.8127
GR2M	4.98	0.8310	0.8294	0.7838
Dyn-WBM	4.58	0.8459	0.8444	0.8174
ENSEMBLE	4.00	0.8622	0.8609	0.8609
(b)				
Verifikasyon				
Model	RMSE (mm)	R^2 (-)	Adj. R^2 (-)	NS (-)
TW-WBM	4.30	0.8603	0.8589	0.7546
abcde	4.06	0.8809	0.8797	0.7805
ASG-WBM	4.25	0.8659	0.8645	0.7597
PMS	4.00	0.8769	0.8757	0.7874
GR2M	3.83	0.9036	0.9026	0.8046
Dyn-WBM	3.94	0.8688	0.8675	0.7936
ENSEMBLE	3.40	0.9110	0.9101	0.8467



Şekil 8 - BMA ile hesaplanan ağırlıklar

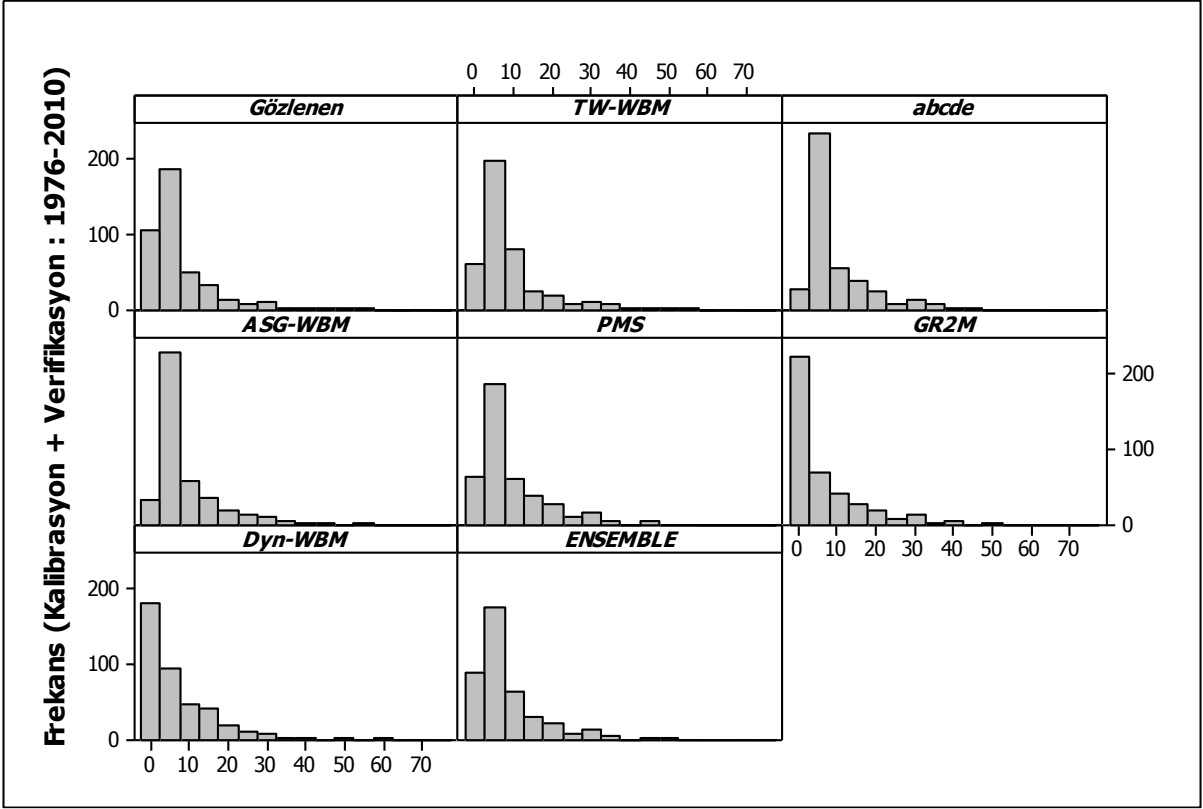
Ağırlıklar hesaplandıktan sonra model çıktıları ile çarpılıp toplanarak ENSEMBLE tahminler elde edilmiştir. ENSEMBLE tahminlerinin istatistiksel performansı da Tablo 2'de verilmiştir. Bulgular incelendiğinde hem kalibrasyon hem de verifikasyon dönemlerinde BMA işlemi ile elde edilmiş ENSEMBLE tahminlerin performansları daha başarılı bulunmuştur. Bu işlem sayesinde hata mertebesi azalmış (Şekil 9), R^2 ve NS etkinlikleri ise artmıştır (Şekil 10).

Kalibrasyon ve verifikasyon sonuçları birleştirilerek elde edilen frekans histogramlarında da ENSEMBLE tahminlerin gözlenmiş veri setini daha iyi yansıttığı görülebilmektedir (Şekil 11). Ayrıca ENSEMBLE modelden elde edilen akımlara ait debi-gidiş grafiği Şekil 12'de sunulmuştur.

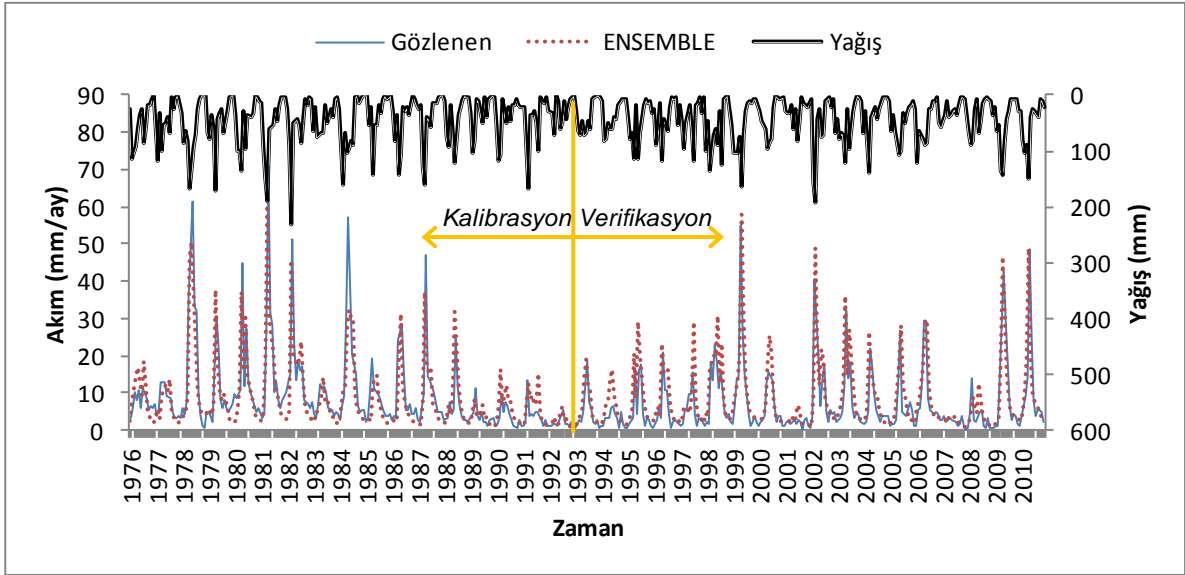


Şekil 9 - Kavramsal yağış akış modellerinin çıktıları ve ENSEMBLE tahminleri kullanılarak hesaplanan RMSE istatistikleri

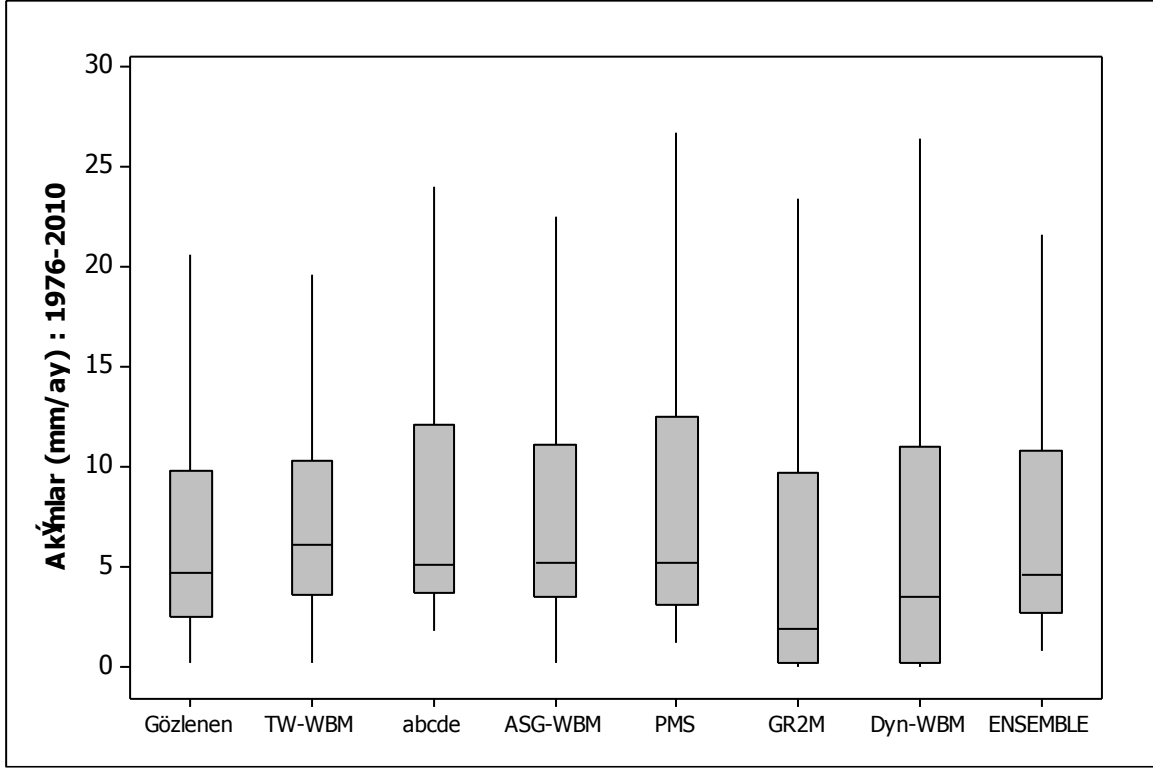
Şekil 10 - Kavramsal yağış-akış modellerinin çıktıları ve ENSEMBLE tahminleri kullanılarak hesaplanan R^2 ve NS değerleri



Şekil 11 - Farklı modellere ait frekans histogramları



Şekil 12 - ENSEMBLE çıktıklarına ait debi-gidiş grafiği



Şekil 13- Farklı modellerden elde edilen serilerin box-plot ile gösterimi

Tablo 2'de farklı model uygunluk kriterleri göz önüne alındığında, verifikasyon döneminde kalibrasyon dönemine göre daha yüksek uygunlukları gösteren ölçütlerin varlığına rastlanmıştır. Bu durum uygulama havzalarına göre değişkenlik taşıyabilir. Yağış-akış modellerinin kalibrasyonu mevcut periyodun genellikle yarısı alınarak gerçekleştirilir. Kalibrasyon ve verifikasyon dönemlerindeki yağış evapotranspirasyon ve akımların temel istatistikleri ve frekansları benzerlik taşıyabilir. Zaten kalibre edilen bir modelde verifikasyon dönemindeki farklı koşulları simüle edebilme yetisi aranmaktadır. Kalibrasyon ve verifikasyon dönemlerinde yağış 45 mm/ay mertebelerinde iken verifikasyon döneminde potansiyel evapotranspirasyon 71 mm/ay ile kalibrasyon dönemine göre daha büyük bir ortalama seyretmiştir. Verifikasyon döneminde, yağış ve evapotranspirasyon değişimlerinden etkilenen akım kalibrasyon dönemine kıyasla %24 azalma göstermiştir. Kalibre edilen modelin saçılımı esas alındığında düşük tahmin (under-estimation) verdiği gözlenmiş ve daha düşük akım ortalamalı verifikasyon döneminde performans ölçütlerince biraz daha makul sonuç vermesi kaçınılmaz olmuştur.

Akım gibi çarpık dağılımlı serilerin medyan, kartil gibi dağılım ve sıra istatistiklerini yansıtan

parametreler ile tahkiki de önem taşımaktadır. Bu maksatla çizilen box-plot (kutu diyagram) vasıtasıyla da BMA uygulamasından elde edilen ENSEMBLE sonuçlarının gerek medyan gerekse kartiller arası mesafe bakımından daha uygun olduğu gösterilmiştir (Şekil 13).

6 SONUÇLAR

Çalışmada Gediz Havzası'nda bulunan Muradiye akım gözlem istasyonu verileri 6 farklı kavramsal hidrolojik model ile modellenip elde edilen çoklu model çıktıları daha güvenilir akım serilerinin elde edilmesi amacıyla BMA yöntemiyle değerlendirilmiştir. Hidrolojik model çıktıları BMA yöntemiyle kurak ve sulak dönemde ağırlıklandırılarak model performansları ayrı periyotlarda değerlendirilmiştir. Buna göre uygulama havzasında kurak dönemde en iyi performansı modifiye Thornthwaite su bütçesi modeli gösterirken sulak dönemde ise Budyko yaklaşımına dayanan su bütçesi göstermiştir. Daha sonra ENSEMBLE çıktıları kullanılan hidrolojik model çıktıları ile karşılaştırılmıştır. İstatistiksel performans kriterlerinden faydalanarak BMA yöntemiyle elde edilen ENSEMBLE çıktılarının uygulama havzasında, hem kalibrasyon hem verifikasyon döneminde daha başarılı performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu sayede tekil hidrolojik model kullanımından kaynaklanan belirsizlikler

giderilerek havzayı daha iyi performansla temsil edebilen akımlar türetilmiş ve BMA yönteminin güvenilir sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) - Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Destek Grubu (ÇAYDAG) tarafından desteklenen 114Y716 numaralı proje kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar çalışmayı değerlendiren hakeme önerilerinden dolayı özellikle teşekkür etmektedir.

7 KAYNAKLAR

- [1] Abulohom, M.S., Shah, S.M.S. ve Ghumman, A.R. (2001). "Development of a rainfall-runoff model, its calibration and validation." *Water Resources Management*, 15(3), 149-163.
- [2] Budyko, M.I. (1958). "The Heat Balance of the Earth's Surface." US Department of Commerce, Washington, DC.
- [3] Clyde, MA. (1999). "Bayesian model averaging and model search strategies." Oxford University Press, 157-85.
- [4] Duan, Q, Ajami, N.K, Gao, X. ve Sorooshian, S. (2007). "Mult-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging." *Advances in Water Resources*, 30(5), 1371-1386.
- [5] Ellison, A.M. (2004). "Bayesian inference in ecology." *Ecology Letters*, 7(4), 509-520.
- [6] Fıstıkoğlu, O. ve Harmancıoğlu, N. (2001). "Yukarı Gediz havzasında aylık su bütçesi modeli uygulaması." III. Ulusal Hidroloji Kongresi, İzmir.
- [7] Fıstıkoğlu, O. ve Okkan, U. (2010). "Tahtalı havzası için aylık su bütçesi." VI. Ulusal Hidroloji Kongresi Bildiriler Kitabı (546-554). Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- [8] Fu, B.P. (1981). "On the calculation of the evaporation from land surface." *Sci. Atmos. Sin.*, 23-31. (Çince).
- [9] Makhlof, M. ve Michel. C. (1991). "A two-parameter monthly water balance model for French watershed." *Journal of Hydrology*, 162(3-4), 299-318.
- [10] Mouelhi, S. ve Michel. C. ve Perrin, C. (2006). "Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model." *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 200-214.
- [11] Okkan, U. (2013). "İklim değişikliğinin akarsu akışları üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi." *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. (Tez danışmanı: Doç. Dr. Okan Fıstıkoğlu)*
- [12] Okkan, U., and Fıstıkoğlu, O. (2014). "Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M." *Theoretical and Applied Climatology*, 117, 343-361.
- [13] Okkan, U. ve Kırdemir, U. (2016). "Budyko yaklaşımına dayanan bir su bütçesi modeli ve parçacık sürü optimizasyonu algoritması ile kalibrasyonu." *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 2(1), 1-10.
- [14] Perrin, C., Michel, C., ve Andreassian, V. (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- [15] Raftery AE, Zheng Y. (2003). "Discussion: performance of Bayesian model averaging." *Journal of American Statistical Association*, 98(464), 931-938.
- [16] Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F. ve Polakowski, M. (2005). "Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensemble." *Monthly Weather Review*, 133(5), 1155-1174.
- [17] Shamseldin, A.Y., O'Connor, K.M. ve Liang, G.C. (1997). "Methods for combining the outputs of different rainfall-runoff models." *Journal of Hydrology*, 197(1-4), 203-229.
- [18] Shamseldin, A.Y. ve O'Connor, K.M. (1999). "A real time combination method for the outputs of different rainfall-runoff models." *Hydrological Sciences Journal*, 44(6), 895-912.
- [19] Thomas, H. A. (1981). "Improved Methods for National Water Assessment. Report, Contract: WR15249270." Washington, D.C.: US Water Resource Council.
- [20] Vandewiele, G. L., Xu, C-Y. ve Win, N-L. (1992). "Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma." *Journal of Hydrology*, 135(1-4), 315-347.
- [21] Viallefont V, Raftery AE, Richardson S. (2001) "Variable selection and Bayesian model averaging in epidemiological case-control studies." *Technical Report No:343*, 3215-3230.
- [22] Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang ve Y.Q., Shao, Q.X. (2008). "Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework – model development and testing." *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 117-131.