

GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE ALETSEL GÖZLEM VE UYGULAMA TEKNİKLERİ – 2 | BİRİM DEFORMASYON GÖZLEMİ

GEOTECHNICAL MONITORING AND MEASUREMENT TECHNIQUES - 2 | STRAIN MONITORING

Orhan E. İNANIR¹, Müge İNANIR²

ÖZET

Her geoteknik dizayn az yada çok kuramsaldır. Zemin ve kaya bulunan bütün inşaat işlerinde her zaman sürprizlerle karşılaşma riski vardır. Köprü, baraj, yol, tünel v.b. yapı inşaatlarında hesaplanan ve planlanandan farklı davranış sergileyen yapı örnekleri tarihte ve günümüz mühendislik uygulamalarında bolca görülebilmektedir. Bu nedenle tasarlanan yapıda öngörülen davranışın, uygulamadaki performansının gözlemlenmesi tarih boyunca görsel ve sayısal yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Zemin ve kaya ekseriyetle tabiatta homojen değildir ve davranışının tahmin edilmesi güçtür. Geoteknik problemleri idealleştirerek basit formlarda çözülebilir hale getirebilmekteyiz. Bu nedenle, geoteknik mühendisliğinde geliştirilmiş güçlü teori ve karmaşık nümerik modellere rağmen, sağlıklı uygulama için sahada güvenilir ve sıhhatli ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma kapsamında, ülkemizde ve dünyada geoteknik sektöründe birim deformasyon ölçümü için ekseriyetle tercih edilen titreşen telli birim deformasyon ölçüm, elektrik direnç tipi birim deformasyon ölçüm, Brillouin saçılmalı dağınık fiber optik birim deformasyon algılayıcı ile ölçüm ve dalgaboyu değiştirilmiş Fiber Bragg Izgara FBG tipi birim deformasyon ölçüm sistemleri, teorik arka planları, tercih edildiği geoteknik uygulama alanları, yerleştirme ve okuma usulleri özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enstrümantasyon, Titreşen Telli Sensörler, Elektrik Direnç Tipi Sensörler, Fiber Optik Sensörler, Brillouin Saçılmalı Dağınık Fiber Optik Birim Deformasyon Ölçer, Fiber Bragg Izgara FBG, Birim Deformasyon Ölçer.

¹ Dr., GEOgrup İnşaat A.Ş., oinanir@geogrup.com.tr (Sorumlu yazar)

² İnş.Y.Müh, GEOgrup İnşaat A.Ş., minanir@geogrup.com.tr



ABSTRACT

Every Geotechnical design is hypothetical to some extent, and every construction job involving soil and rock runs the risk of encountering surprises. In the history and today there are many examples of failed structures which behaved differently than expected in design such as bridges, dams, tunnels, fills, etc. Due to realization requirements of those discrepancies, the performance of many sub and superstructure behaviours have been monitored with observatory and instrumental methods. Soil/Rock material is not homogenous in the nature and difficult to expect the behaviour. Because of the uncertainties of the soil/rock parameters, mostly they are idealized into simple forms for design purposes. Although it is possible to perform very sophisticated and complex numerical analysis, still we need field monitoring programs for sound solutions. In the scope of this paper, vibrating wire strain gauge, electric resistance type and fiber optic Brillouin scattering type distributed strain sensing and modulated wavelength type Fiber Bragg Grating FBG type strain gauges are summarized as most commonly preferred strain monitoring systems in the geotechnical engineering world.

Keywords: instrumentation, Fiber Optic Brillouin Scattering Type Distributed Strain Sensing Modulated Wavelength type Fiber Bragg Grating FBG, strain gauge.

1. GİRİŞ

Her geoteknik dizayn az yada çok kuramsaldır. Zemin ve kaya bulunan bütün inşaat işlerinde her zaman sürprizlerle karşılaşma riski vardır. Köprü, baraj, yol, tünel v.b. yapı inşaatlarında hesaplanan ve planlanandan farklı davranış sergileyen yapı örnekleri tarihte ve günümüz mühendislik uygulamalarında bolca görülebilmektedir. Bu nedenle tasarlanan yapıda öngörülen davranışın, uygulamadaki performansının gözlemlenmesi tarih boyunca bir ihtiyaç olmuş ve görsel-sayısal yöntemlerle gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Zemin/kaya genellikle doğada homojen değildir ve davranışının tahmin edilmesi güçtür (Şekil 1). Geoteknik problemleri ancak idealleştirerek basit formlarda çözülebilir hale getirebilmekteyiz. Bu nedenle, geoteknik mühendisliğinde geliştirilmiş güçlü teori ve karmaşık nümerik modellere rağmen, sağlıklı uygulama için sahada güvenilir ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır.

⌘ IDEAL ORTAM	⌘ GERÇEK ORTAM
<input type="checkbox"/> Sürekli Ortam	<input type="checkbox"/> Süreksiz
<input type="checkbox"/> Homojen	<input type="checkbox"/> Heterojen
<input type="checkbox"/> İzotropik	<input type="checkbox"/> Anizotropik
<input type="checkbox"/> Lineer	<input type="checkbox"/> Non-Linear
<input type="checkbox"/> Elastik	<input type="checkbox"/> Elasto-Plastik

+ YERALTI SUYU

Şekil 1. İdeal ve gerçek ortam kıyaslaması.



Hayati önem arz etmesine rağmen, aletsel gözlem (geoteknik rasat, enstrümantasyon) tek başına iyi dizayn ve problemsiz uygulamayı garanti etmemektedir. Yanlış yere yerleştirilen Yanlış enstrüman en iyi koşulla kafa karıştırır en kötü koşulda ise problemi gölgelemesi nedeniyle amaçtan uzaklaştırır ve TEHLİKELİDİR. Aşırı miktarda enstrüman yerleştirmek para ziyanına buna karşılık tasarruf etmek amacıyla gereğinden az enstrüman yerleştirmek ise yanlış tasarruftan fazlasına neden olabilir. Bazı durumlarda problemi gizleyerek tehlikeli dahi olabilir. Geoteknik davranışı kontrol eden mekanizmanın belirlenmesini müteakip, projelendirme safhasında takip edilebilecek parametreler, kıyaslama yapılabilecek şekilde gözlemlenmelidir.

“Projede seçilen ve yerleştirilen her ölçüm aleti, bir geoteknik soruya cevap vermelidir.” (Dunnicliff, v.d., 1991)

Türkiye’de geoteknik rasat uygulamalarındaki tarihsel gelişime mütenasip olarak enstrümantasyon bilgisine ulaşma ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Bu maksatla birincisinde deplasman gözleminin incelendiği (İnanır ve İnanır, 2015) “Geoteknik Mühendisliğinde Aletsel Gözlem ve Uygulama Teknikleri” bildiri serisinin ikincisi olan bu bildiride birim deformasyon gözlemi konu edilmiştir. Bildirinin birim deformasyon ölçümü hususunda uygulamada çalışan mühendis ve akademide faaliyet gösteren araştırmacı meslektaşlarımıza çalışmalarında fayda sağlayacak teknik detay bilgiyi ihtiva etmesi amaçlanmıştır.

Ülkemizde ve dünyada geoteknik sektöründe birim deformasyon ölçümü için ekseriyetle tercih edilen titreşen telli birim deformasyon ölçüm, elektrik direnç tipi birim deformasyon ölçüm, Brillouin saçılmalı dağınık fiber optik birim deformasyon algılayıcı ile ölçüm ve dalgaboyu değiştirilmiş Fiber Bragg Izgara FBG tipi birim deformasyon ölçüm sistemleri, teorik arka planları, tercih edildiği geoteknik uygulama alanları, yerleştirme ve okuma usulleri incelenmiştir.

2. GEOTEKNİK RASAT - SİSTEMATİK PLANLAMA ADIMLARI

Geoteknik rasat projesi sadece enstrüman seçmekten ve muhtelif yerlere serpiştirmekten ibaret değildir. Aksine projenin amaçlarının tanımlanması ile başlayan, geoteknik davranışı kontrol eden mekanizmanın belirlenmesiyle ve ilgili parametrelerin gözlemine uygun ölçüm aletlerinin seçimi ve yerleştirilmesiyle devam eden ve elde edilen verilerin değerlendirilerek, sonuçlarının gerekmesi halinde proje revizyonu amaçlı kullanılmasına kadar uzanan adimsal ve geniş kapsamlı bir mühendislik sürecidir.

Projeye özel geoteknik rasat planı hazırlanması gerekmektedir. Doğru Enstrümantasyon Sistematik Planlama Gerektirmektedir.

Geoteknik Aletsel Gözlem Sistematik Planlama Safhaları (Dunnicliff, 1993);

- | | |
|---|--|
| 1. <i>Proje şartlarının belirlenmesi,</i> | 4. <i>Enstrümantasyonun amacının belirlenmesi,</i> |
| 2. <i>Geoteknik davranışı kontrol eden mekanizmanın belirlenmesi,</i> | 5. <i>Gözlemlenecek parametrelerin belirlenmesi,</i> |
| 3. <i>Cevaplanması gereken geoteknik soruların belirlenmesi,</i> | 6. <i>Gözlemlenecek parametredeki değişimin</i> |



- boyutunun belirlenmesi,*
7. *Dizayn, Uygulama ve İşletme aşamalarındaki görev atamalarının belirlenmesi,*
 8. *Ölçüm aleti seçimi,*
 9. *Ölçüm aleti noktalarının belirlenmesi,*
 10. *Gözlem kayıtlarının etkileyen faktörlerin gözlemlenmesi veya etkilerinin ortadan kaldırılması (kar, yağmur, güneş, v.d.)*
 11. *Doğru ölçüm alınabilmesinin sağlanması için ölçüm prosedürünün belirlenmesi,*
 12. *Her ölçüm aletinin özel maksadının belirlenmesi,*
 13. *Bütçe belirlenmesi (gerekmesi halinde alet seçimi revizyonu),*
 14. *Alet yerleştirme işinin inşaat aşamalarına göre planlanması,*
 15. *Planlı bakım ve kalibrasyon programının belirlenmesi,*
 16. *Veri toplama, veri işlenmesi, veri sunumu, değerlendirme, raporlama ve uygulamanın planlanması,*

safhalarından oluşmaktadır. Bu safhalar dikkate alınmadan yapılan aletsel gözlem çalışmaları, bir bütünlük sergilemez ve maalesef doğru amaca hizmet edememektedir.

2.1. Geoteknik Rasat Maksadı

Enstrümantasyon amacı;

- Güvenlik
 - *İnşaat faaliyetleri ve çevre üst/alt yapıları menfii etkileyebilecek olağanüstü bir davranış oluşumunu önceden belirleyebilmek üzere “Erken Uyarı Sistemi”*
- İmalat Kontrol
 - *İnşaat Faaliyetlerinin etkisinin gözlemlenmesi. Proje faaliyetlerinin göçme riski oluşmadan sürdürülebilmesine yardımcı olmak.*
- Kalite Güvence
 - *Aletsel gözlem, inşaat faaliyetlerinde kaliteli işçiliğin temini ve şartnamelerde belirtilen şekilde imalatların yapılmasının güvence altına alınması.*
- Hukuksal Veri
 - *Aletsel gözlem verisi, çevre yapılarda hasar oluşması ve hukuksal sürece girmesi halinde proje dizayn müellifi, müteahhit ve işverenin doğru bilgi sağlama ve haklarını koruma amaçlı veri olarak kullanılabilir.*

başlıklarından oluşmaktadır. Sistematik planlama aşamasında belirlenerek gerekli tercihlerin bu amaçlara göre düzenlenmesi gerekmektedir.

2.2. Gözlemlenen Geoteknik Parametreler

Gözlemlenecek parametreler ve alet seçimi ve yerleştirilmesi sistematik planlama mantığı ile projeye özel olarak belirlenmeli ve tasarıma esas parametrelerle (toplam gerilme, boşluksuyu basıncı, efektif gerilme v.b.) kıyaslanabilir olmalı ve paralellik arz etmelidir;

- Su Basıncı Ölçümü
 - *Yeraltı Su Seviyesi ve Boşluksuyu Basıncı Ölçümü*
 - *Piyezometer, (Piezometer),*



- *Casagrande Tipi Piyezometer (SPZ, StandPipe Piezometer),*
- Toplam Basınç Ölçümü
 - *Gerilme Ölçer Hücresi (Stress Cell),*
 - *Toplam Basınç Ölçer (Total Pressure Cell),*
- Deplasman Ölçümü
 - *Deplasman ve Dönme Ölçümü*
 - *Jeodezik Gözlem (Robotik Total-Station ile Otomatik Gözlem),*
 - *İnclinometre (Inclinometer),*
 - *SAA (Shape Accelerometer Array),*
 - *Eğim Ölçer (Tiltmeter/Submersible Tiltmeter/Portable Tiltmeter),*
 - *MPBX Çok Noktalı Kuyu Tipi Uzama Ölçer (MultiPointBorehole Extensometer),*
 - *Prob Tipi Ekstansometre,*
 - *Çatlak Ölçer (Crackmeter),*
 - *Pendulum (Düz-Ters Pendulum),*
 - *Hidrolik Oturma Ölçer,*
 - *Manyetik Oturma Ölçer,*
 - *Uzun Mesafe Çatlak Ölçer (Long Range Crackmeter),*
 - *Çeşitli Deformasyon Ölçerler*
- Yapısal Elemanlarda Yük ve Birim Deformasyon Ölçümü
 - *Yük Ölçer (Load Cell),*
 - *Birim Deformasyon Ölçer (Strain Gauge),*
- Sıcaklık Ölçümü
 - *Thermister,*
 - *Thermo Couple,*
- Yardımcı Ölçümler
 - *İnşaat çalışmalarından ve çevresel etkilerden kaynaklanan Vibrasyon & Gürültü Ölçümü*
 - *Titreşim Ölçer (VIBRA),*
 - *Ses Ölçer,*
 - *Toz Ölçer*
 - *Rezervuar Su Seviyesi ve Debi Ölçümü*
 - *Su seviye Ölçümü (rezervuar v.b.),*
 - *Rezervuarlı Debi Ölçer ve Açık Kanal Debi Ölçer (V Notch,Open Channel Doppler Ultrasonic Flowmeter, v.b.),*
 - *Basıncılı Hat Debi Ölçümü (Flow meter, Ultrasonic Flowmeter, v.b.),*
 - *Meteorolojik Ölçüm*
 - *Rüzgar Hız ve Yön Ölçer,*
 - *Sıcaklık ve Relatif Rutubet (Temperature & Relative Humidity),*
 - *Barometrik Basınç,*
 - *Yağmur & Kar Miktar Ölçer,*
- Veri Toplama Sistemleri
 - *Manuel Ölçüm Sistemleri (Mekanik, Hidrolik, Pnömatik, Elektrikli ve Fiber Optik Sistemler)*



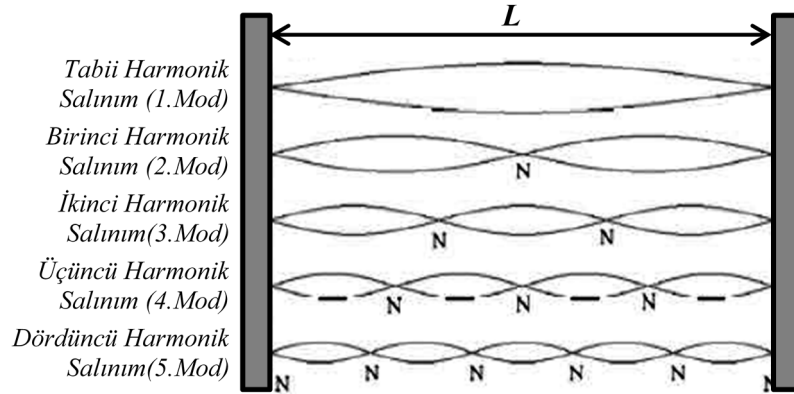
- *Taşınabilir Veri Okuma Üniteleri (Read-Out Units)*
- *Otomatik Ölçüm Sistemleri (Elektrikli ve Fiber Optik Sistemler)*
 - *Çok Kanallı Otomatik Veri Toplama Üniteleri (Data Logger)*

3. GEOTEKNİK UYGULAMALARDA EKSERİYETLE TERCİH EDİLEN BİRİM DEFORMASYON ÖLÇER TİPLERİ VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

3.1. Titreşen Telli Ölçüm Mekanizması

İki ucundan gerdirilmiş telin titreşime maruz bırakılması halinde farklı modlarda titreştiği gözlemlenir (Şekil 2). Bu hadise tel titreşimi ile sınırlı değildir ve yaylar, telli çalgılar, arabalar, binalar, elektrik devreleri, atom molekülleri, gezegenler vs titreşen bütün sistemler için geçerlidir.

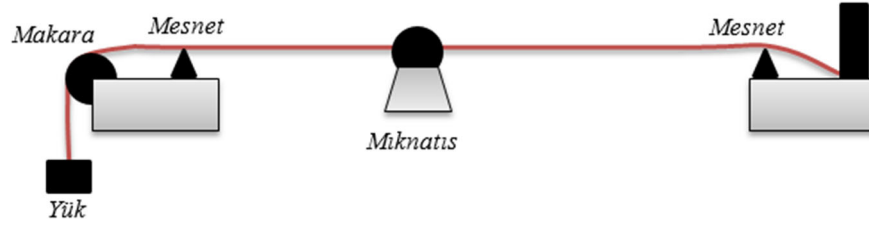
Titreşen telli ölçüm aletlerinin çalışma mekanizması iki mesnet arasında gerdirilmiş telin kuvvetli bir mıknatıs ile teçhiz edilerek üzerinden bir alternatif akımın geçirilmesi prensibine dayanmaktadır. Akım geçmesi neticesinde tel ile manyetik alana dik istikamette bir kuvvet teşekkül eder ve tel, tatbik edilen frekansta titreşmeye başlar. Titreşen telin genliği tatbik edilen kuvvetin yani mıknatısın telin tabii salınım anti-noktasına yakın bir yere yerleştirilmesi halinde, telin tabii frekansına yakın olduğu değerde artar.



Şekil 2. Titreşen telde oluşan dalga formlarının ve farklı harmonik salınımların şematik gösterimi.

Teldeki gerginlik değiştiğinde titreşimde ortaya çıkan tını değişmektedir. Tabii olarak teldeki gerginlik arttıkça daha tiz bir tını duyulmaktadır. Tınının notasını dinleyerek tel gerginliği konusunda fikir sahibi olunabilir. Bu mantık ile belirli gerginlikteki teli farklı frekanslarda titreşimi sağlanarak telin tabii titreşim modundaki büyük genlik tesbit edilmeye çalışılır. Diğer bir deyişle teldeki titreşimi tetikleyen ve kademeli olarak tedricen artan frekans ile rezonans durumu gözlenir (Şekil 3 ve Şekil 4). Ancak, sabit bir gerginlikte telin tabii olarak titreştiği tek bir frekans yoktur. Farklı dalga boylarında harmonik seriler şeklinde salınım yapmaktadır ve bunlar "titreşim mod"ları olarak isimlendirilmektedir (Şekil 2).





Şekil 3. Titreşen telli mekanizmayı temsil eden gergin tel ile mıknatıs düzeneği ve şematik gösterimi.

$$\lambda = \frac{2L}{n} ; \quad n=1,2,3,4,\dots\dots\dots (1)$$

-
- λ = Dalga boyu
 L = Tel boyu
 n = Titreşim modu

Bir tel titreşime maruz bırakıldığında tek bir dalgaboyu çok nadiren oluşur, genellikle farklı dalgaboylarının girişimi şeklinde salınım oluşur. Oluşan en uzun dalga boylu salınımına “tabii salınım” 1.Mod, kesirlerinde oluşan salınımlar ise 2.Mod, 3.Mod, 4.Mod gibi isimlendirilir.

Küçük bir genlikteki kayma dalgasının belirli bir gerginlikteki telde yayılma hızı;

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} (2)$$

-
- v = Dalga yayılma hızı
 T = Teldeki gerilme
 μ = Lineer yoğunluk (metredeki kütle)

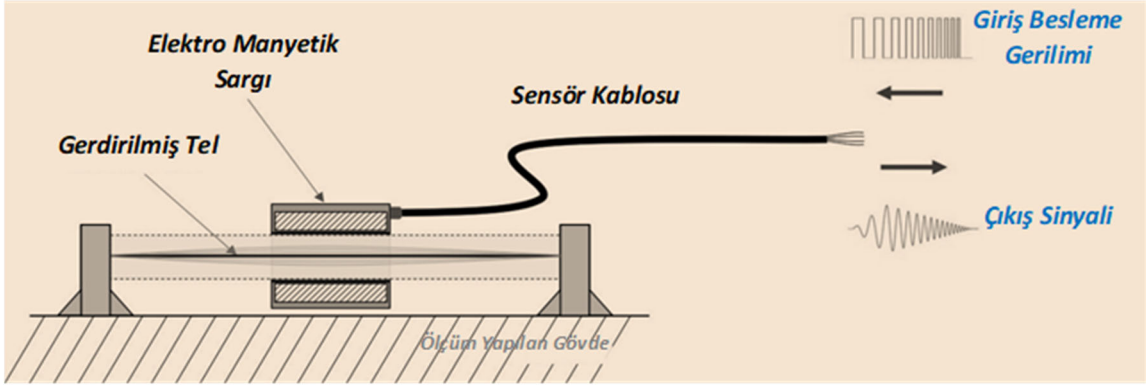
olmak üzere dalgaboyu frekans ilişkisi formülü ile düzenlendiğinde salınımın tabii frekansı (f);

$$v = f * \lambda$$

$$f = \frac{n}{2L} * \sqrt{\frac{T}{\mu}} (3)$$

şeklinde hesaplanır.





Şekil 4. Titreşen telli ölçüm mekanizması.

Yaygın kullanılan titreşen telli okuma cihazlarında sensör sinyali ölçümü için ses A/D (analog-dijital çevirici) kullanılmaktadır (Campbell Scientific Inc. firması tarafından üretilen AVW200 serisi veya muadili). Örnekleme aralığında 4096 nokta kaydı yapılmaktadır. Alınan kayıtlar Fourier Dönüşümleri (Fast Fourier Transform, FFT) algoritması kullanılarak frekans spektrumu oluşturulmaktadır (Şekil 5). Spektrum grafiğinde farklı frekans değerlerine karşılık gelen mV genliği RMS (Root Mean Square, karelerinin ortalamasının karekökü) değerleri gösterilmektedir.

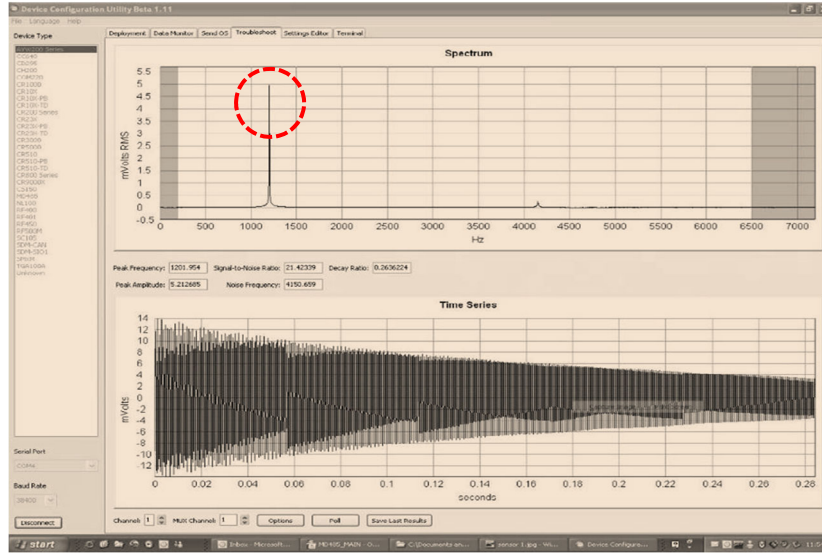
Titreşen telli sensör tetiklendikten hemen sonra oluşan titreşim kaydı bütün frekansları ihtiva eder şekilde zaman tanım alanında grafik olarak gösterilir. Elde edilen sinyalde hâkim frekans telin tabii rezonans frekansıdır. Diğer frekanslar çevre gürültüsü, tabii frekans harmonikleri, gürültü frekansı harmonikleri (50/60Hz harmoniği) ve mekanik sebeplerle oluşan titreşim frekanslarıdır.

Sinyal kalitesi;

- Sinyal genliğinin gürültü genliğine nisbeti “signal-to-noise diagnostic” sinyal/gürültü teşhis parametresiyle kontrol edilmektedir.
- Zaman grafiği ölçüm başlangıcından sonuna kadar sinyalin sönümlenmesini göstermektedir (Şekil 5). Sinyalin başlangıç genliğinin bitiş genliğine nisbeti ile sönümlenme teşhis parametresiyle kontrol edilmektedir.

Bazı sensörlerde titreşim çok çabuk sönümlenebilmektedir. Sensör ömrü konusunda bilgi edinebilmek ve ölçüm aleti karakterizasyonu açısından sıfır okuması kayıtlarında sönümlenme ve genlik parametrelerinin kaydedilmesi faydalıdır.



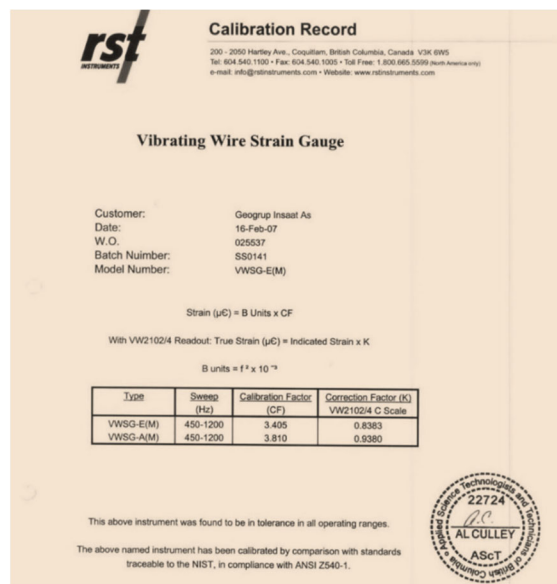


Şekil 5. 200 to 6500 Hz frekans ölçüm aralığında örnek sinyal için zaman ve frekans spektrum grafiği.

Ölçülen frekans değerinin “Bunit”/“Digit” birimine ve Birim Deformasyon “Microstrain” değerine dönüştürülmesi;

Titreşen telli ölçüm aletinden elde edilen frekans değeri (Hz) geoteknik enstrümantasyon sektörünün standardı olarak frekansın karesinin bine bölümü ($f^2/1000$) şeklinde “Bunit” veya “Digit” olarak isimlendirilerek kullanılmaktadır. Bunit/Digit değeri bir kalibrasyon katsayısı ile çarpılarak birim deformasyon (microstrain, $\mu\epsilon$) hesaplanır (Şekil 6).

Monte edildiği bünyedeki birim deformasyon hesaplaması yapılabilmesi için yerleştirme anında alınan sıfır okuması herhangi bir vakitte alınan okumadan çıkarılarak izafi birim deformasyon değeri hesaplanır. Birim deformasyon, telin frekansı arttığında telin uzamasına yani pozitif (+), frekansı azaldığında ise telin kışalmasına yani negatif (-) değere karşılık gelmektedir. Bu temayül kazık yükleme deneylerinde çekmede pozitif ve basınçta negatif birim deformasyon değerlerine tekabül etmektedir.



Şekil 6. Titreşen telli birim deformasyon ölçer (vw strain gauge) örnek bir kalibrasyon sertifikası.



3.2. Titreşen telli birim deformasyon ölçer (Vibrating wire strain gauge, VWSG)

Geoteknik uygulamalarda ekseriyetle “Titreşen telli birim deformasyon ölçer (Vibrating wire strain gauge, VWSG)” deformasyon ölçer tipi olarak tercih edilmektedir. Yöntemin manyetik kirliliğe az duyarlı olması, kablolama kusurlarına az duyarlı olması ve frekans sinyalinin birkaç kilometre uzağa problemsiz iletebilmesi geoteknik uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır. Farklı tel uzunluğundaki sensör yapılarına göre rezonans frekansın oluşacağı muhtemel frekans aralığı Tablo 1 ‘de özetlenmiştir.

Tablo 1. Titreşen telli ölçerlerde kullanılan tel uzunluğuna göre değişen yaklaşık frekans (Bunit) ölçüm aralıkları için özet liste.

Sensör Tel Boyu	Frekans Ölçüm Aralığı, Bunit Digit, [Hz ² /1000]
25.4mm (1 inç)	2.500 ~ 5.000
50.8mm (2 inç)	1.200 ~ 3.000
76.2mm (3 inç)	825 ~ 2.000
101.6mm (4 inç)	600 ~ 1.600
152.4mm (6 inç)	450 ~ 1.000
254mm (10 inç)	250 ~ 650



Şekil 7. Geoteknik uygulamalar kapsamında kullanılan birim deformasyon ölçerlerden genel görünüşü (İnanır, 2024).



Titreşen telli gömülü tip birim deformasyon ölçer
(*vibrating wire embedment type strain gauge, VWSG/E*)

Üretici firmaya göre farklılık arz etmekle beraber ekseriyetle sensör boyu yaklaşık 150mm mertebelerinde imal edilmektedir. Genellikle ölçüm aralığı 3.000 mikroStrain (+/- 1.500 $\mu\epsilon$) üretilmekle birlikte özel durumlarda 5.000 mikroStrain ölçüm aralığında sensör tercih edilmektedir. Tellerin ankre edilerek gergin hale getirilerek uç mesnetleri disk plakalarına bağlanmaktadır. Gömülü cins titreşen ölçerler kazık ana donatı istikametinde yerleştirilmek üzere dik istikamette kullanılan montaj donatıları veya inşaat teli vasıtasıyla sensörün ucundaki diskler beton içinde kalacak şekilde yerleştirilmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. KYD kapsamında kullanılan titreşen telli gömülü tip birim deformasyon ölçerlerden (vibrating wire embedment type strain gauge, VWSG/E) genel görünüşü.

Titreşen telli punta kaynaklı birim deformasyon ölçer
(*vibrating wire spot weldable strain gauge, VWSG/SW*)

Sensör boyu yaklaşık 50mm mertebelerinde imal edilmektedir. Genellikle ölçüm aralığı 3.000 mikroStrain (+/- 1500 $\mu\epsilon$) üretilmektedir. Tellerin ankre edilerek gergin hale getirildiği uç mesnetleri ince levha pabuçları punta kaynak ile veya epoksi ile yüzeye sabitlenmektedir. Punta kaynaklı cins titreşen telli ölçerler birçok uygulamada kullanılabilir. Yerleştirildiği pozisyonda aksel istikamette birim deformasyon ölçümü yapılmasına imkan vermektedir (Şekil 10).



Şekil 9. Beton yüzeyde kullanılan titreşen telli punta kaynaklı tip birim deformasyon ölçerlerden (vibrating wire spot weldable type strain gauge, VWSG/AW) genel görünüşü.



Titreşen telli kaynaklı birim deformasyon ölçer
(vibrating wire arc weldable strain gauge, VWSG/AW)

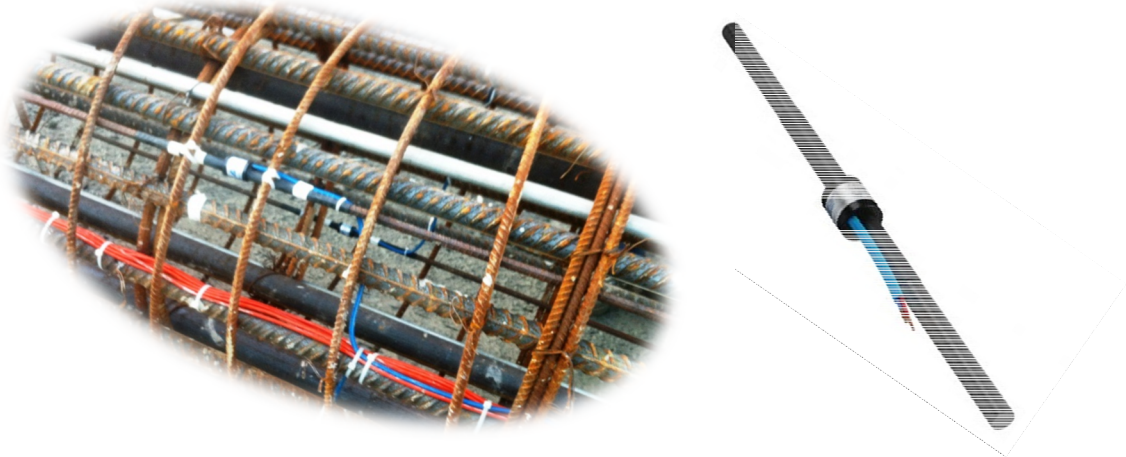
Sensör boyu yaklaşık 150mm mertebelerinde imal edilmektedir. Genellikle ölçüm aralığı 3.000 mikroStrain (+/- 1500 $\mu\epsilon$) üretilmekle birlikte özel durumlarda 5.000 mikroStrain ölçüm aralığında sensör tercih edilebilmektedir. Tellerin ankre edilerek gergin hale getirildiği uç mesnetleri kaynaklanabilir pabuçlarına sabitlenmektedir. Kaynaklı cins titreşen ölçerler kazık ana donatı istikametinde olacak şekilde donatıya veya ikincil donatıya kaynakla montajı yapılmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. KYD kapsamında kullanılan titreşen telli kaynaklı tip birim deformasyon ölçerlerden (vibrating wire arc weldable type strain gauge, VWSG/AW) genel görünüşü.

Titreşen telli donatı tipi birim deformasyon ölçer
(vibrating wire sister bar type strain gauge, VWSG/SB)

Tel boyu yaklaşık 50mm mertebelerinde imal edilen titreşen telli “insert” ler 12-15mm çapındaki donatı içerisine gömülerek ana donatıya paralel ilave donatı olarak kullanılmaktadır. Genellikle ölçüm aralığı 3.000 mikroStrain mertebelerinde üretilmektedir. Donatı cinsi titreşen ölçerler kazık ana donatı istikametinde olacak şekilde donatıya paralel ilave donatı olarak montajı yapılmaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. KYD kapsamında kullanılan titreşen telli donatı tipi birim deformasyon ölçerlerden (vibrating wire sister bar type strain gauge, VWSG/SB) genel görünüşü, (İnanır ve İnanır, 2022).



Titreşen telli püskürtme beton tipi birim deformasyon ölçer
(*vibrating wire shotcrete type strain gauge, VWSG/SC*)

Sensör boyu yaklaşık 166mm mertebelerinde imal edilen titreşen telli püskürtme beton tipi birim deformasyon ölçerler ekseriyetle tünel tahkimatlarında hasır çelik üzerine monte edilerek kullanılmaktadır. Genellikle ölçüm aralığı 30.000 mikroStrain (+/- 15.000 $\mu\epsilon$) mertebelerinde üretilmektedir. (Şekil 11).



Şekil 12. Tünel tahkimatlarında kullanılan titreşen telli püskürtme beton tipi birim deformasyon ölçerlerden (vibrating wire shotcrete type strain gauge, VWSG/SC) genel görünüş.

3.3. Wheatstone Köprüsü ile Direnç Tipi Birim Deformasyon Ölçüm (Strain) Mekanizması

Gerilme deformasyon ilişkisi mekaniğin temel konularındandır. Deneysel gerilme analizinde bir dış yük tatbik edilen elemanda birim deformasyon ölçümü yapılarak elde edilen değerler gerilme-deformasyon ilişkisinden yola çıkılarak gerilme hesaplanır. Hesaplanan bu gerilme değerinin mevcut elemanın müsaade edilen gerilme sınırı dahilinde olup olmadığı kontrolü yapılarak tasarım metodolojisi takip edilir (Omega,t.y.).

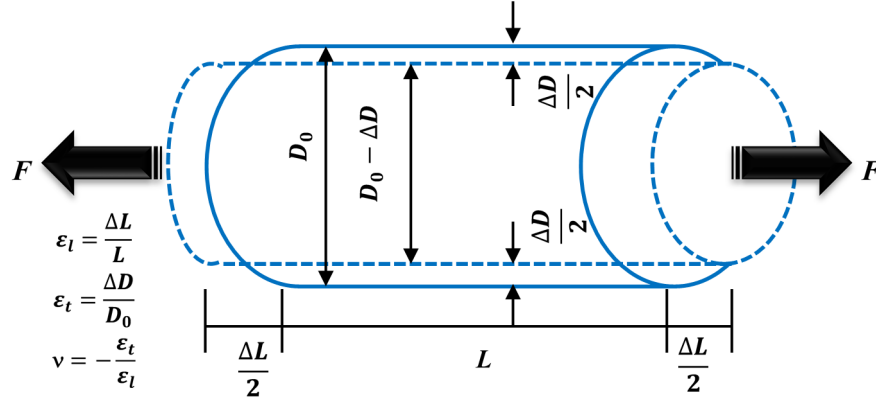
Yapı elemanındaki kesit tesirlerinin belirlenebilmesi kapsamında aksenal yükleme durumunda bir çelik çubuk her iki tarafından aksenal bir çekme yüküne maruz bırakıldığında;

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

F = Çekme Yüğü
A = Kesit alanı
 σ = gerilme

olmak üzere normal gerilme oluşmaktadır (Şekil 13).





Şekil 13. İki istikamette kuvvet tatbik edilen çubuğun boyuna uzamasının ve enine kısılmasının şematik gösterimi.

F kuvveti çubuğa tatbik edildiğinde çubuk şekil değiştirmektedir. Bu şekil değiştirme eksenel kuvvet istikametinde uzama ve dik istikamette kılma/daralma şeklinde gelişir. Bu boyuna ve enine istikamette şekli değiştirme “boyuna birim deformasyon/ longitudinal strain” ve “enine birim deformasyon / transverse strain” olarak isimlendirilmektedir ve sırasıyla “ ε_t ve ε_l ” sembolü ile temsil edilmektedir.

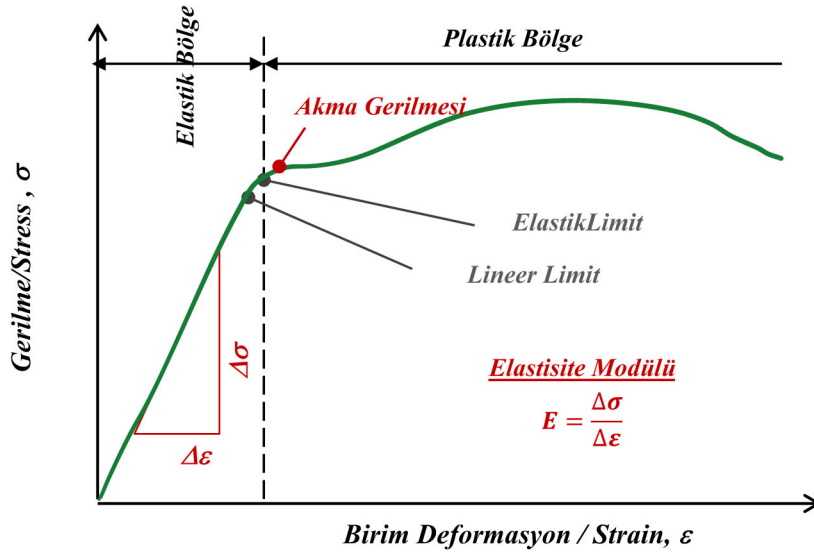
Birim deformasyon uzama miktarının çubuk boyuna oranı olarak hesaplandığından boyutsuz bir büyüklüktür. Fiziki bir anlam ifade edebilmesi maksadıyla genellikle birimi mm/mm cinsinden belirtilmektedir. Birçok metal için elastik sınır dahilinde karşılaşılan birim deformasyon (strain) miktarı genellikle 0.005000 mm/mm mertebelerindedir. Ölçülen birim deformasyon miktarları çok küçük olması nedeniyle, genelde pratik maksatla $\times 10^6$ (parts per million, ppm’e karşılık gelir) ile çarpılarak “mikrostrain” birimine dönüştürülerek kullanılmaktadır.

Diğer bir kullanımı ise $\times 100$ ile çarpılarak (örnek; 0.005 mm/mm = 5.000 mikrostrain = 0.5%) yüzde olarak ifade şeklindedir. Burada ifade edilen birim deformasyon “normal strain” anlamında kullanılmaktadır.

Boyuna istikametteki birim deformasyonun (normal strain) eşleniği olan enine istikametteki birim deformasyon, çubuk malzeme özelliklerine bağlı olarak meydana gelmektedir. Negatif değerli enine istikametteki birim deformasyonun (ε_t), boyuna istikametteki birim deformasyona (ε_l) oranı Poisson oranı (ν) olarak isimlendirilmektedir ve malzeme özelliklerine bağlı boyutsuz bir büyüklüktür (Şekil 13).

Bu malzemenin gerilme birim deformasyon ilişkisi bilinmesi halinde ölçülen birim deformasyon değerlerinden malzemedeki gerilme hesaplanabilmektedir. Bu maksatla bir çelik çubuk kademeli olarak eksenel çekme kuvvetine maruz bırakıldığında normal gerilmenin boyuna birim deformasyona bağlı değişiminin grafik gösterimi Şekil 14 olduğu gibi görünmektedir.

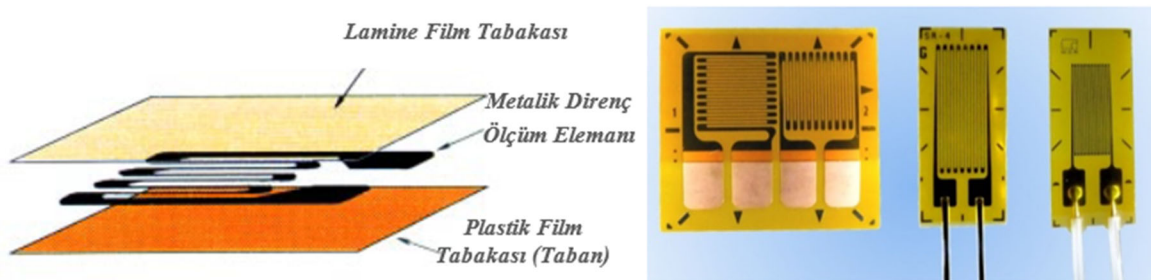




Şekil 14. Çelik için tipik gerilme - birim deformasyon ilişkisi.

Gerilme birim deformasyon grafiğinin başlangıç kısmında “lineer limit” noktasına kadar olan bölgede lineer bir ilişki mevcuttur. “Birim gerilme değişiminin ($\Delta\sigma$) birim deformasyon değişimi ($\Delta\epsilon$) nisbeti “Hooke Kanunu” ile tanımlanmaktadır. Eğimin lineer olduğu kısım malzemenin Elastisite Modülü veya Young Modülü olarak tanımlanmaktadır. Elastisite modülü (E), birimi gerilme ile aynıdır ve $E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$ şeklinde formülüne edilmektedir (Şekil 14). Her malzeme başlangıçtan itibaren çelik gibi davranmamaktadır (beton, pik demir vs) malzeme özelliklerine göre deney ile belirlenmelidir.

Literatürde “Yapıştırılabilir direnç tipi birim deformasyon ölçer / bonded resistance strain gauge” metalik olmayan (yarı iletken) ölçü aletini veya metalik (tel veya pul) ölçü aletlerini ifade etmektedir. Aksi belirtilmediği sürece direnç tipi birim deformasyon ölçerden kasıt genellikle “yapıştırılabilir metalik pul şeklinde direnç tipi birim deformasyon ölçer” şeklindedir. Birim deformasyon ölçerler, folyo üzerine iletken alaşımların ızgara şeklinde baskı yapılarak üretilmektedir (Şekil 15).



Şekil 15. Direnç tipi birim deformasyon ölçer bileşenlerinin şematik gösterimi ve genel görünüşü.

Birim deformasyon ölçer (strain gauge) dirençleri 30-3000 Ω aralığında olmak üzere endüstride en sık tercih edilen dirençler 120 Ω ve 350 Ω 'dur. Uygulama özelliklerine uygun



(ölçüm yapılacak malzeme özellikleri, etraf sıcaklığı vs) doğru birim deformasyon ölçer tercihi;

- Taban folyosu özellikleri
- Izgara metal malzeme özellikleri
- Yapıştırıcı özellikleri
- Koruma kaplaması malzemesi özellikleri

doğru ölçüm açısından kritik ehemmiyete sahiptir. Birim deformasyon ölçer, metalik ızgara şeklindeki ölçüm elemanının malzemenin uzama ve büzülme davranışına paralel hareket etmesi için ölçüm yapılacak malzemeye sağlam bir şekilde yapıştırılmalıdır. Metalik ızgara şeklindeki ölçüm elemanının (genellikle bakır-nikel alaşımı veya nikel- krom alaşımından imal edilen) şekil değiştirmesi sonucunda elektrik direnci değişmektedir. Birim deformasyon ile direnç değişimi nisbeti belirli bir aralıkta sabit bir ilişki içindedir ve gage faktör olarak isimlendirilmektedir.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2.5)$$

R	=	Direnç
ΔR	=	Direnç değişimi
ϵ	=	Birim deformasyon
GF	=	Birim Deformasyon Ölçer Katsayısı / Gage Faktör

Gerçekleşen birim deformasyona karşılık ölçüm elemanındaki mutlak direnç değerine nisbetle çok küçük olan direnç değişimi birim deformasyon ölçümüne esastır. Direnç değişimi mertebesini bir örnek ile görmek gerekirse;

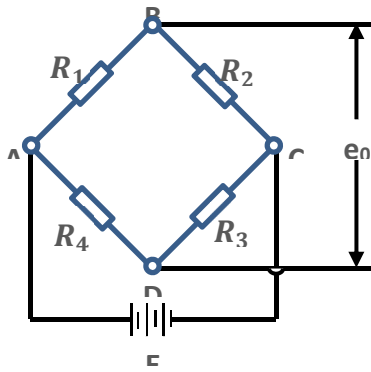
120 ohm birim deformasyon ölçer +2 gage faktör değeri için 1 mikrostrain birim deformasyon değerinde oluşan direnç değişimi ($\Delta R=120*0.000001*2=0.000240$) 240 micro-ohm değerindedir.

Birim deformasyon ölçer üretimden kaynaklı direnç toleransı normalde birkaç yüz mikrostrain değerine denk gelecek miktardadır ve ölçüm yüzeyine yapıştırıldığında da değişim göstermektedir. Bu sebep ile tatbik edildiği yüzeye ilk montaj sonrası sıfır okuması alınarak referans direnci yüksek doğruluklu, mikro-ohm ölçebilen ohmmetre ile kaydedilir. Deformasyon sonrası ölçülen direnç değeri ile referans direnç arasındaki farkın referans direncine nisbeti ile direnç değişim oranı hesaplanabilir.

Ancak direnç değişim miktarının çok küçük olması doğrudan yüksek doğruluk ve hassasiyetli ohmmetre kullanarak direnç ölçümü ile birim deformasyon hesabı doğruluğunu sağlamak pratik değil ve standart ölçü aletleri ile mümkün değildir. Bu maksatla dirençte çok küçük değişimlerin ölçülmesi için “Wheatstone Köprü Devresi” birçok ölçüm aletinde tercih edilmektedir.



“Wheatstone Köprü Devresi” çok küçük direnç değişimlerine gösterdiği yüksek hassasiyet munasebetiyle birim deformasyon (strain) ölçülmesi maksadıyla kullanılan temel devredir (Khan ve Wang, 2001, Murray ve Miller, 1992). Statik ve dinamik uygulamalarda kullanılan sabit voltajlı wheatstone köprüsü şematik görünümü Şekil 16’de verilmiştir. Çalışma prensibi açısından bakılırsa R_1 ve R_4 direnci üzerindeki voltaj düşüşü E_{ab} ve E_{ad} voltaj hesaplaması E devreye tatbik edilen voltaj değeri olmak üzere ve devrede çıkış voltajı e_0 , $E_{ab}-E_{ad}$ olmak üzere Şekil 16 de olduğu gibi hesaplanabilmektedir.



$$E_{ab} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot E$$

$$E_{ad} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot E$$

$$E = E_{ab} - E_{ad}$$

$$e_0 = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot E$$

Şekil 16. Wheatstone köprü devresi şematik gösterimi.

Burada $R_1 R_3 - R_2 R_4$ ilişkisinin sıfır olması halinde devreden çıkış voltajının (e_0) sıfır “0” olacağı aşikardır (diğer bir deyişle devre dengededir). Yani, $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ denklemi köprünün herhangi bir bacağındaki değişim köprünün diğer bacağındaki direncin veya dirençlerin ayarlanması ile dengelenebileceğini göstermektedir.

Başlangıçta $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ olarak dengelenmiş wheatstone köprü devresi (balanced wheatstone bridge circuit) yani çıkış voltajı $E=0$ ’dır. Devredeki dirençler R_1 , R_2 , R_3 ve R_4 dirençleri ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 ve ΔR_4 kadar değişim gösterirse çıkış voltajı da Δe_0 ;

$$\Delta e_0 = \frac{(R_1 + \Delta R_1) \cdot (R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2) \cdot (R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2) \cdot (R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \cdot E \quad (2.6)$$

Denklemleri ile ifade edilebilir. $\Delta R_1 \cdot \Delta R_3$ gibi ikinci derece ifadeler ihmal edilerek denklem basitleştirilirse;

$$\Delta e_0 = E \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.7)$$

Elde edilir ve $R_2/R_1 = m$ “direnç nisbeti, m” olmak üzere denklem tekrar düzenlenir ise;



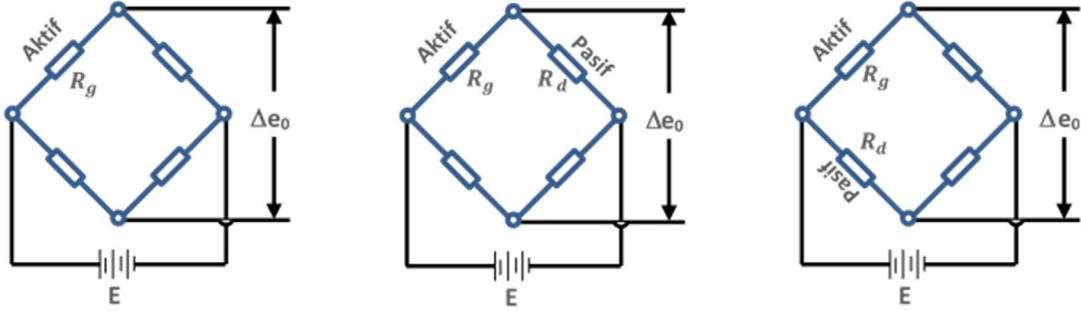
$$\Delta e_0 = E \cdot \frac{m}{(1+m)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

$$S_w = \frac{\Delta e_0}{\varepsilon} = \frac{E}{\varepsilon} \cdot \frac{m}{(1+m)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.8)$$

Wheatstone köprüsünde değişim hassasiyeti (S_w), çıkış voltajı (e_0) ve birim deformasyon (strain, ε) ilişkisi için temel denklem elde edilmiş olacaktır. Köprü aktif bacalarının farklı düzenlenmesi ile farklı değişim hassasiyetlerinde devreler düzenlenebilmektedir.

Çeyrek Köprü (Quarter Bridge)

Köprünün aktif bacaları düzenlemesinde sadece bir adet aktif ölçer (R_g , active gage) kullanılması halinde devre “çeyrek köprü” olarak isimlendirilmektedir (Şekil 17). Aktif ölçer R_g , ölçüm yapılan gövdenin bütün deformasyonunu yansıtacak şekilde monte edilmiş ve pasif ölçer (R_d) kullanılması durumunda ise aktif ölçer ile aynı özelliklerde ve gövdede birim deformasyon olmayan sükunetteki bir bölgede monte edilmiş, mekanik olmayan (sıcaklık vs.) değişimlerden zuhur eden birim deformasyon telafisi maksatlı kullanılmaktadır. Bu düzenlemede diğer köprü bacalarında sabit dirençler kullanılmaktadır.



Şekil 17. Çeyrek köprü devresi düzenlemeleri şematik gösterimi.

Dengelenmiş devrede aktif ölçer direncindeki değişim (ΔR_g) ye karşılık çıkış voltajı değişimi (Δe_0);

$$\Delta e_0 = \frac{Em}{(1+m)^2} \cdot \frac{\Delta R_g}{R_g} = \frac{E \cdot \varepsilon \cdot G_f \cdot m}{(1+m)^2}$$

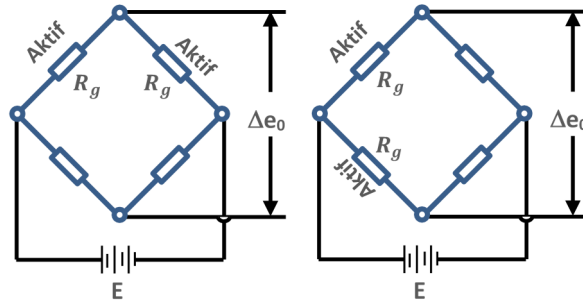
$$\varepsilon = \frac{(1+m)^2 \cdot \Delta e_0}{E \cdot m \cdot G_f} \quad (9)$$

ölçülerek besleme gerilimi (E) ve gage faktör (G_f) bilinmesi halinde birim deformasyon (ε) hesaplanabilmektedir.



Yarım Köprü (Half Bridge)

Köprünün aktif bacaları düzenlemesinde sadece iki adet aktif ölçer (R_g , active gage) kullanılması halinde devre “yarım köprü” olarak isimlendirilmektedir (Şekil 18). Aktif ölçer R_g , ölçüm yapılan gövdenin bütün deformasyonunu yansıtacak şekilde monte edilmiş olmalıdır. Yarım köprü devresi çeyrek köprüye göre sıcaklık telafisi ve daha yüksek devre hassasiyetli ölçüm avantajı sağlamaktadır. Özellikle düşük birim deformasyonlarda daha doğru ölçüm avantajı sağlamaktadır. Bu düzenlemede diğer köprü bacalarında sabit dirençler kullanılmaktadır.



Şekil 18. Yarım köprü devresi düzenlemeleri şematik gösterimi.

Bir silindirik numunenin aksel olarak iki ucundan çekilmesi halinde numunenin gövdesinde boyuna ve enine istikamette monte edilen iki adet eş birim deformasyon ölçer Şekil 18 şeklinde devre oluşturulması durumu için dengelenmiş devrede aktif ölçer direncindeki değişim (ΔR_g) ye karşılık çıkış voltajı değişimi (Δe_0);

$$\Delta e_0 = \frac{Em}{(1+m)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_g}{R_g} - \frac{-\nu \Delta R_g}{R_g} \right) = \frac{(1+\nu) \cdot m}{(1+m)^2} \cdot E \cdot G_f \cdot \varepsilon \quad (2.10)$$

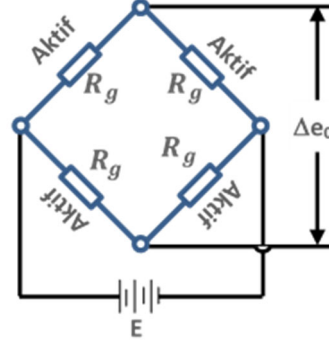
$$\varepsilon = \frac{(1+m)^2 \cdot \Delta e_0}{E \cdot G_f \cdot (1+\nu) \cdot m}$$

ölçülerek besleme gerilimi (E), gage faktör (G_f) ve poisson katsayısı (ν) bilinmesi halinde birim deformasyon (ε) hesaplanabilmektedir.

Tam Köprü (Full Bridge)

Köprünün bütün bacalarında 4 adet aktif ölçer (R_g , active gage) kullanılması halinde devre “tam köprü” olarak isimlendirilmektedir (Şekil 19). Aktif ölçerlerin R_g , tamamı ölçüm yapılan gövdenin bütün deformasyonunu yansıtacak şekilde monte edilmiş olmalıdır. Tam köprü devresi otomatik sıcaklık telafisi ve en yüksek devre hassasiyetli ölçüm avantajı sağlamaktadır. Yüksek doğrulukta ölçüm avantajı sağlamaktadır.





Şekil 19. Tam köprü devresi düzenlemesi şematik gösterimi.

Bir çubuk numunenin iki ucundan aşağı yönde eğilmesi halinde numunenin gövdesinde monte edilmiş dört adet eş birim deformasyon ölçer ikisi üstte uzama (negatif) ve aynı büyüklükte ikisi de altta kısalma (pozitif) birim deformasyona maruz kalması halinde Şekil 20 şeklinde devre oluşturulması durumu için dengelenmiş devrede aktif ölçer direncindeki değişim (ΔR_g) ye karşılık çıkış voltajı değişimi (Δe_0);

$$\Delta e_0 = \frac{E}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_g}{R_g} - \frac{-\Delta R_g}{R_g} + \frac{\Delta R_g}{R_g} - \frac{-\Delta R_g}{R_g} \right) = E \cdot G_f \cdot \varepsilon \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \frac{\Delta e_0}{E \cdot G_f} \quad (11)$$

ölçülerek besleme gerilimi (E), gage faktör (G_f) bilinmesi halinde birim deformasyon (ε) hesaplanabilmektedir.

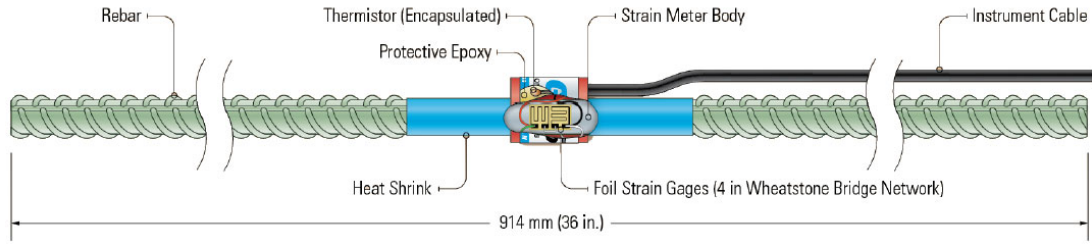
3.4. Elektrik direnç tipi birim deformasyon ölçerler (Electric resistance type strain gauges, SG/ER)

Elektrik direnç tipi donatı birim deformasyon ölçer
(Electric resistance rebar type strain meter, ERSM/R)

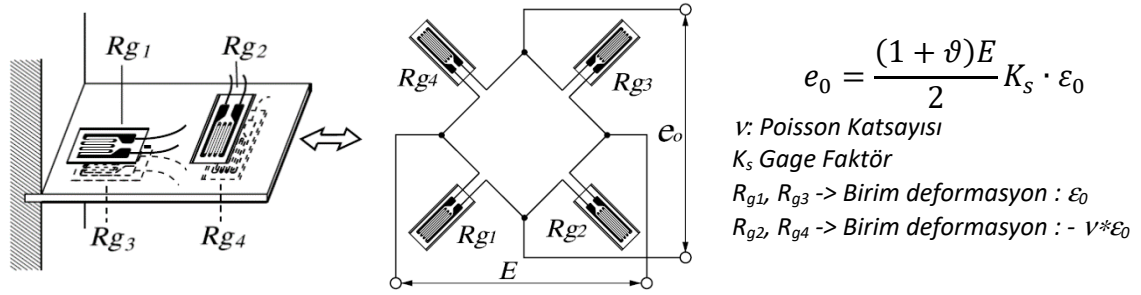
Kazık yükleme deneylerinde özellikle dinamik ölçüm alınması gerektiği hallerde “elektrik dirençli donatı tipi birim deformasyon ölçer (Electric resistance rebar type strain meter, ERSM/R)” deformasyon ölçer tipi olarak tercih edilmektedir.

12-35mm çapındaki donatı gövdesinde 4 adet aktif ve birbirine dik pozisyonda 350 ohm direnç tipi birim deformasyon ölçer için wheatstone köprü devre teçhiz edilerek üretilmektedir. Elektrik dirençli donatı tipi birim deformasyon ölçerler kazık ana donatı istikametinde olacak şekilde donatıya paralel ilave donatı olarak montajı yapılmaktadır (Şekil 20 ve Şekil 21).






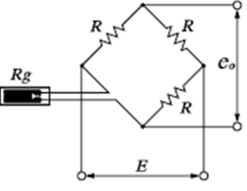

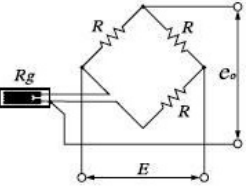
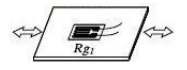

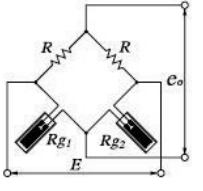

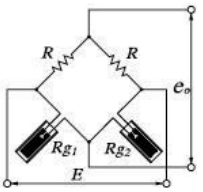
Şekil 20. Elektrik direnç tipi birim deformasyon ölçer şematik görünümü (Geokon, 2019).



Şekil 21. 4 adet aktif ve birbirine dik pozisyonda 350 ohm direnç tipi birim deformasyon ölçer için wheatstone köprü devre kurulumu.

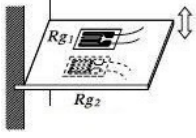
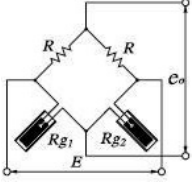
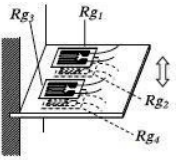
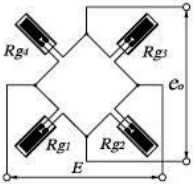
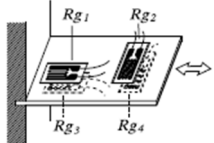
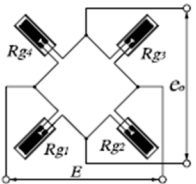
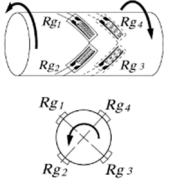
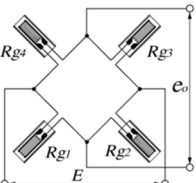


Tablo 2. Köprü aktif bacaklarının farklı düzenlenmesi ile elde edilen bazı tip devreler, kullanım alanları ve avantajları (Kyowa, n.d.).

Devre Kurulumu	Uygulama Örneği	Devre Elemanı	Ölçüm Verisi	Açıklama
<p>Çeyrek Köprü Tek yüze 1-aktif ölçer 2-kablo sistemi</p> <p>Birim Deformasyon Ölçer Sayısı: 1 adet</p>	 <p>Tek istikamette gerilme (uniform çekme/basınç)</p>		$e_0 = \frac{E}{4} K_s \cdot \varepsilon_0$ <p>K_s : Gage Faktör ε_0 : Birim deformasyon E : Besleme Voltajı e_0 : Çıkış Voltajı R_g : BDÖ(gage) Direnci R : Sabit Direnç</p>	<p>Sıcaklık düzeltmesi gerektirmeyen durumlarda kullanılmalıdır; Sıcaklık düzeltmesi yoktur x1 çıkış</p>
<p>Çeyrek Köprü Tek yüze 1-aktif ölçer 3-kablo sistemi</p> <p>Birim Deformasyon Ölçer Sayısı: 1 adet</p>	 <p>Tek istikamette gerilme (uniform çekme/basınç)</p>		$e_0 = \frac{E}{4} K_s \cdot \varepsilon_0$ <p>K_s : Gage Faktör ε_0 : Birim deformasyon E : Besleme Voltajı e_0 : Çıkış Voltajı R_g : BDÖ(gage) Direnci</p>	<p>Sıcaklık düzeltmesi yoktur, Bağlantı kablosunun termal etkisi bertaraf edilmektedir. x1 çıkış</p>
<p>Çeyrek Köprü Aktif-Pasif 2-ölçerli sistem</p> <p>Birim Deformasyon Ölçer Sayısı: 2 adet</p>	<p>Aktif</p>  <p>Tek istikamette gerilme (uniform çekme/basınç)</p> <p>Pasif</p> 		$e_0 = \frac{E}{4} K_s \cdot \varepsilon_0$ <p>K_s : Gage Faktör ε_0 : Birim deformasyon E : Besleme Voltajı e_0 : Çıkış Voltajı R_{g1} : BDÖ(gage) Direnci, ε_0 R_{g2} : BDÖ(gage) Direnci, 0</p>	<p>Sıcaklık düzeltmesi mevcuttur, Bağlantı kablosunun termal etkisi bertaraf edilmektedir. x1 çıkış</p>
<p>Yarım Köprü Dik istikamette 2-aktif ölçerli sistemi</p> <p>Birim Deformasyon Ölçer Sayısı: 2 adet</p>	 <p>Tek istikamette gerilme (uniform çekme/basınç)</p>		$e_0 = \frac{(1 + \nu)E}{4} K_s \cdot \varepsilon_0$ <p>ν : Poisson Katsayısı K_s : Gage Faktör ε_0 : Birim deformasyon E : Besleme Voltajı e_0 : Çıkış Voltajı R_{g1} : BDÖ(gage) Direnci, ε_0 R_{g2} : BDÖ(gage) Direnci, 0</p>	<p>Sıcaklık düzeltmesi mevcuttur, Bağlantı kablosunun termal etkisi bertaraf edilmektedir. x(1+ν) çıkış</p>



Tablo 1. (devamı) Köprü aktif bacaklarının farklı düzenlenmesi ile elde edilen bazı tip devreler, kullanım alanları ve avantajları (Kyowa, n.d.).

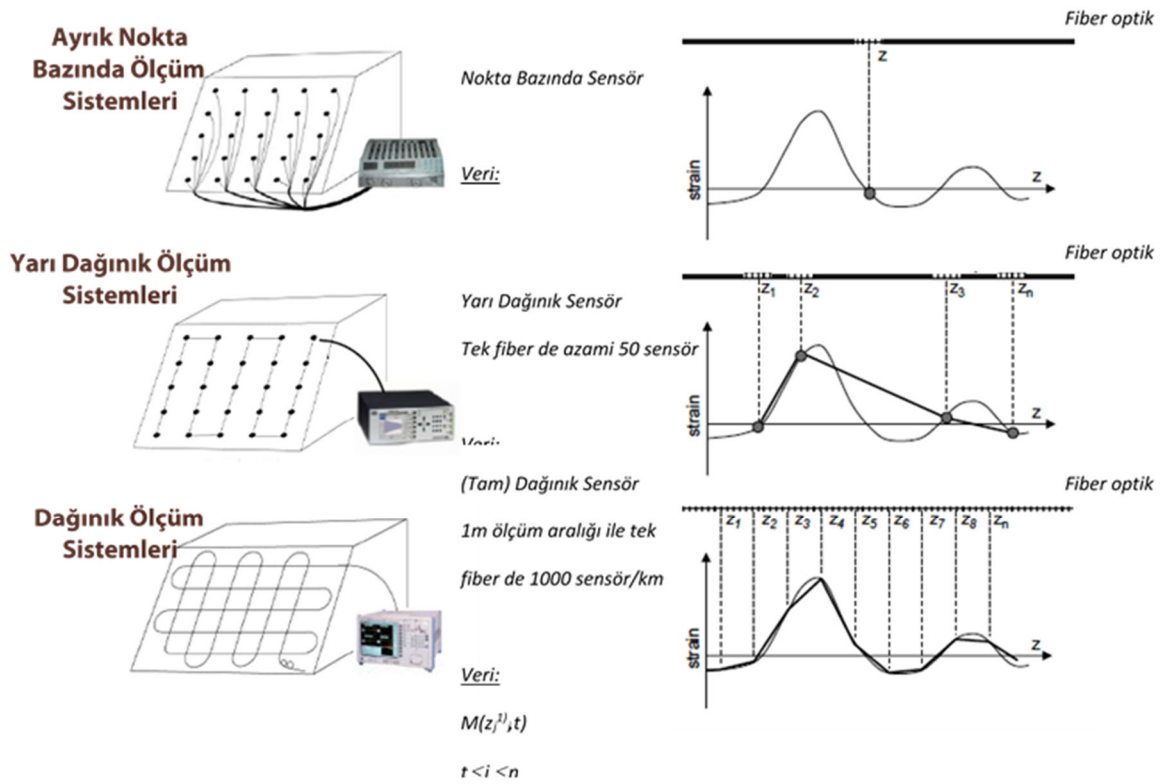
Devre Kurulumu	Uygulama Örneği	Devre Elemanı	Ölçüm Verisi	Açıklama
<p>Yarım Köprü 2-aktif ölçer sistemi (Eğilme neticesinde oluşan birim deformasyon ölçümü) Birim Deformasyon Ölçer Sayısı: 2 adet</p>	 <p>Eğilme</p>		$e_0 = \frac{E}{2} K_s \cdot \varepsilon_0$ <p> <i>Ks</i> : Gage Faktör <i>ε₀</i> : Birim deformasyon <i>E</i> : Besleme Voltajı <i>e₀</i> : Çıkış Voltajı <i>R_{g1}</i> : BDÖ(gage) Direnci, -<i>ε₀</i> <i>R_{g2}</i> : BDÖ(gage) Direnci, <i>ε₀</i> <i>R</i> : Sabit Direnç </p>	<p>Sıcaklık düzeltmesi mevcuttur, Bağlantı kablosunun termal etkisi bertaraf edilmektedir. Çekme/Basınç gerilmesi neticesinde oluşan birim deformasyon bertaraf edilmektedir. x1 çıkış</p>
<p>Tam Köprü 4-aktif ölçer sistemi (Eğilme neticesinde oluşan birim deformasyon ölçümü) Birim Deformasyon Ölçer Sayısı: 4 adet</p>	 <p>Eğilme</p>		$e_0 = E \cdot K_s \cdot \varepsilon_0$ <p> <i>Ks</i> : Gage Faktör <i>ε₀</i> : Birim deformasyon <i>E</i> : Besleme Voltajı <i>e₀</i> : Çıkış Voltajı <i>R_{g1}, R_{g3}</i>: BDÖ Direnci, -<i>ε₀</i> <i>R_{g2}, R_{g4}</i>: BDÖ Direnci, <i>ε₀</i> </p>	<p>Sıcaklık düzeltmesi mevcuttur, Bağlantı kablosunun termal etkisi bertaraf edilmektedir. Çekme/Basınç gerilmesi neticesinde oluşan birim deformasyon bertaraf edilmektedir. x4 çıkış</p>
<p>Tam Köprü Dik istikamette 4-aktif ölçerli sistemi Birim Deformasyon Ölçer Sayısı: 4 adet</p>	 <p>Tek istikamette gerilme (uniform çekme/basınç)</p>		$e_0 = E \cdot K_s \cdot \varepsilon_0$ <p> <i>Ks</i> : Gage Faktör <i>ε₀</i> : Birim deformasyon <i>E</i> : Besleme Voltajı <i>e₀</i> : Çıkış Voltajı <i>R_{g1}, R_{g3}</i>: BDÖ Direnci, -<i>ε₀</i> <i>R_{g2}, R_{g4}</i>: BDÖ Direnci, <i>ε₀</i> </p>	<p>Sıcaklık düzeltmesi mevcuttur, Bağlantı kablosunun termal etkisi bertaraf edilmektedir. x2(1+v) çıkış</p>
<p>Tam Köprü 4-aktif ölçer sistemi (Eğilme neticesinde oluşan birim deformasyon ölçümü) Birim Deformasyon Ölçer Sayısı: 4 adet</p>	 <p>Eğilme</p>		$e_0 = E \cdot K_s \cdot \varepsilon_0$ <p> <i>Ks</i> : Gage Faktör <i>ε₀</i> : Birim deformasyon <i>E</i> : Besleme Voltajı <i>e₀</i> : Çıkış Voltajı <i>R_{g1}, R_{g3}</i>: BDÖ Direnci, <i>ε₀</i> <i>R_{g2}, R_{g4}</i>: BDÖ Direnci, -<i>ε₀</i> </p>	<p>Sıcaklık düzeltmesi mevcuttur, Bağlantı kablosunun termal etkisi bertaraf edilmektedir. x4 çıkış</p>



3.5. Fiber optik tip birim deformasyon ölçer (Fiberoptic type strain gauge, SG/FO)

Tasarım açısından uygulama performansı ağırlıklı olarak yapıda oluşan birim deformasyon (strain) tayini ile belirlenebilmektedir. Daha önceki bölümlerde detayları anlatılan titreşen telli veya elektrik dirençli birim deformasyon ölçerler yüksek doğrulukta ve yaygın olarak inşaat ve geoteknik mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılmakla birlikte sensör bazında noktasal ölçüme imkan verebilmektedir. Fiber optik ölçüm sistemleri yarı dağınık ve tam dağınık ölçme mantığına uygun yapıları ile farklı bir ölçüm felsefesinin doğmasına imkan vermiştir (Şekil 22). Özellikle davranışı kontrol eden mekanizmanın zemin-yapı etkileşiminin hakim olduğu kazıklı temel, tünel, boru hattı, baraj, karayolu demiryolu dolgusu vs. gibi mühendislik yapılarında birim deformasyon profilinin belirlenmesi yapı davranışı karakterizasyonu (mesnet deformasyonu, gayri nizami yük dağılımı vs) açısından çok büyük önem arz etmektedir.

Fiber optik sensör sistemleri, esasen fiber optik, optik elektronik ve kompozit malzeme bilimlerini bünyesinde barındıran ve birden fazla disiplini ilgilendiren bir mühendislik alanı olarak gelecek vaat etmektedir. Fiber optik sensörler, diğer ölçüm sistemlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Fiber optik kablodan ışık ile veri transferi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiber optik ölçüm sistemleri ağırlıklı olarak uçak-uzay sanayinde geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknolojinin geoteknik mühendisliği alanına transfer edilmesi, ölçüm sistemleri açısından yeni potansiyeller doğurabilecektir ve son yıllarda bu istikamette yoğun çalışmalar devam etmektedir.



Şekil 22. Fiber optik ölçüm sistemlerinde ayırık nokta bazında, yarı dağınık ve dağınık ölçüm sistemleri gösterimi (Shi, 2014).

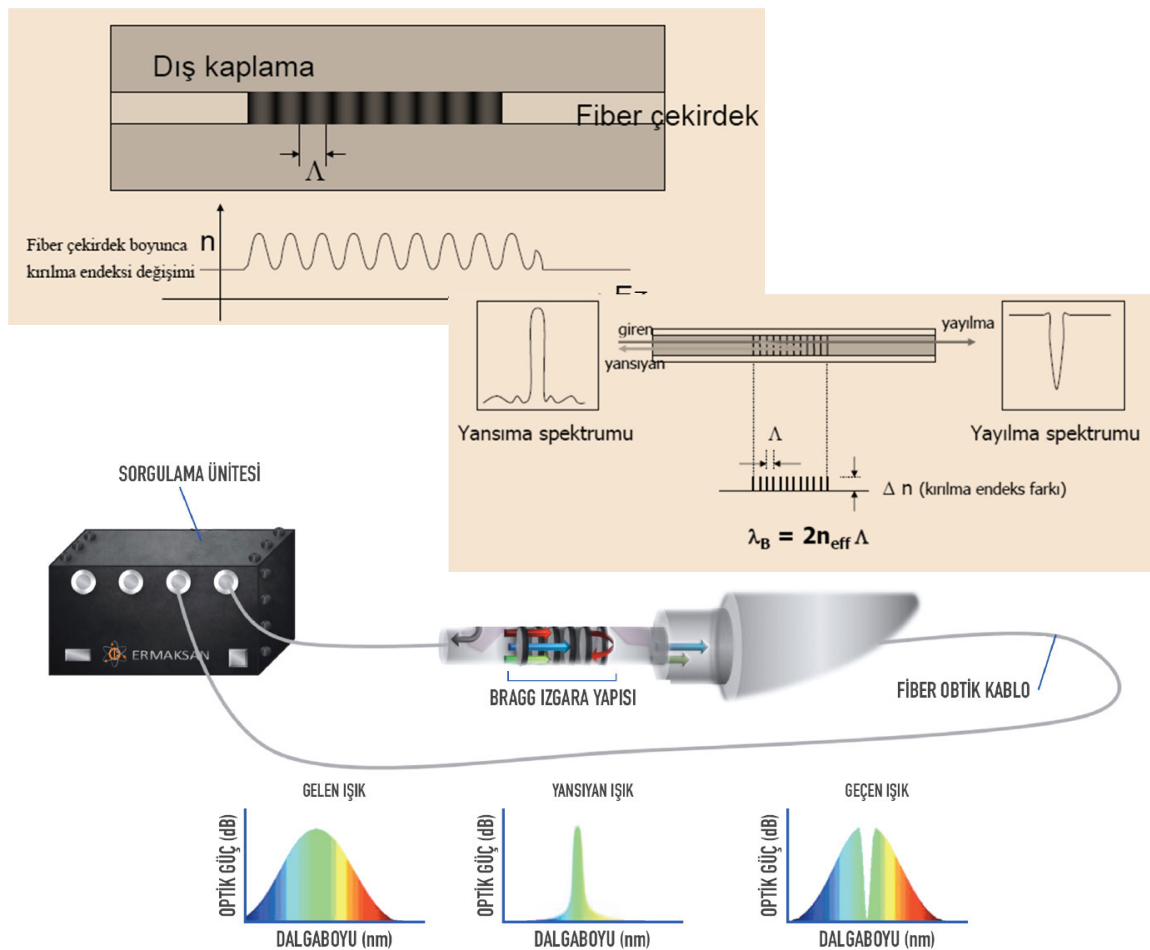


Dalgaboyu değiştirilmiş Fiber Bragg Izgarası-FBG- birim deformasyon ölçer (Modulated wavelength type Fiber Bragg Grating, FBG)

Optik fiberler; çekirdek malzemesi cam ya da plastik malzemelerden genellikle 125 mikrometre kalınlıkta imal edilmekte ve dış kaplaması ile 250 mikrometre kalınlığa kadar ulaşmaktadır. Işık yaklaşık 5-8 mikrometre çapında olan iç fiber çekirdekte seyahat etmektedir.

Modüle edilmiş dalgaboyu tipi Fiber Bragg Grating-FBG- birim deformasyon ölçer imalatı için cam fiberin belirli bir bölgesinin silika matris yapısı (tipik olarak birkaç milimetre mesafede), UV-ışın ile işlenerek fiber çekirdeğinde nizami bir ızgara deseni oluşturulmakta ve bu ızgara yapısı Fiber Bragg ızgara (Fiber Bragg Grating) olarak isimlendirilmektedir.

Fiber Bragg ızgaralarda, gelen ışığın belirli bir dalgaboyu (merkez dalgaboyu) geriye yansımaktadır. Fiber optik malzemenin uzaması veya kısalması, ızgara aralığının daralıp genişlemesine neden olur. Iızgara ara mesafelerinin değişmesi sonucu yansıyan ışığın dalgaboyu da değişmektedir. Desen ızgara referans dalgaboyu ile değişim oranı oluşan birim deformasyonunun hesaplanması maksatlı kullanılmaktadır.



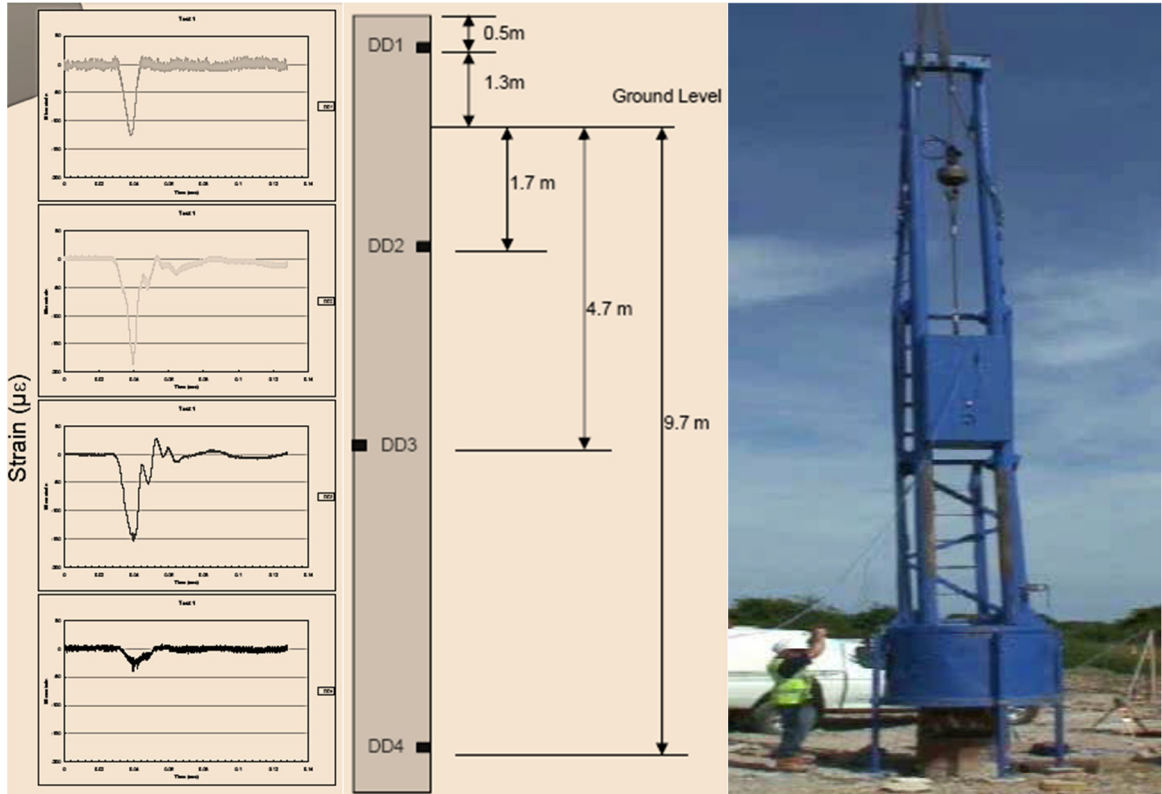
Şekil 23. Modüle edilmiş dalgaboyu tipi Fiber Bragg Grating-FBG- birim deformasyon ölçer çalışma prensibi şematik gösterimi (EonPhotonics,t.y.).



Farklı geoteknik uygulamalarda kullanım alanı bulan sistem kazık yükleme deneylerinde başarıyla uygulanmaktadır. Bir KYD kapsamında statik yükleme (deney yükü 3MN, deney süresi >1 gün), hızlı yükleme (deney yükü 3MN, deney süresi >1 gün) ve dinamik yükleme (deney yükü 4 t ağırlık serbest düşürülme ile, deney süresi >5-10 ms) deneyleri kapsamında FBG sensörleri iyi sonuç vermektedir. Bu sensörlerin başarı ile kullanımı konusunda Tatam, (2014) çalışmasında detay verilmiştir (Şekil 24 ve Şekil 25).



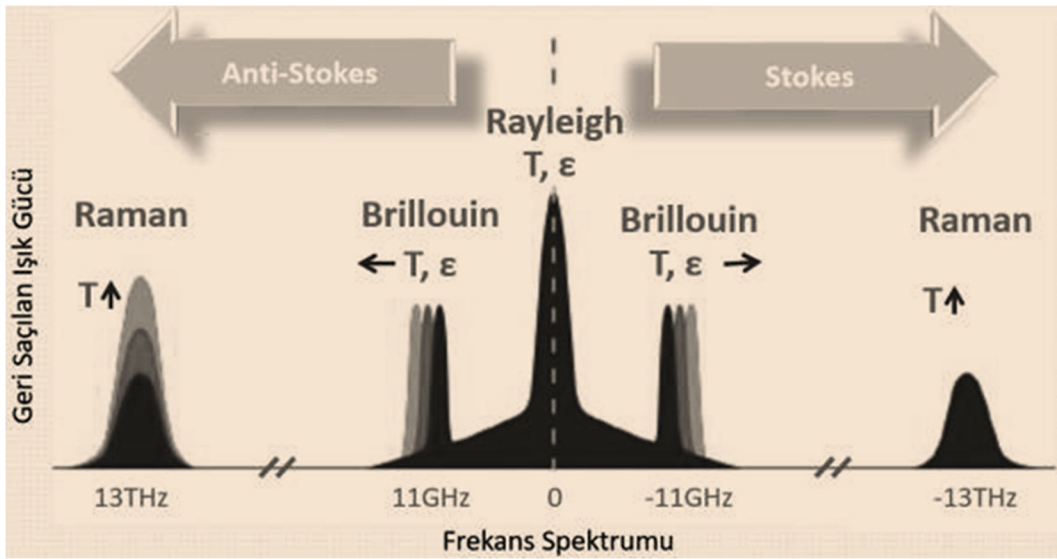
Şekil 24. Fiber bragg grating (FBG) yarı dağınık sensör ile bir kazık yükleme deney hazırlığı (Tatam, 2014).



Şekil 25. Fiber bragg grating (FBG) yarı dağınık sensör ile bir dinamik kazık yükleme deney uygulaması (Tatam, 2014).

Brillouin saçılmalı dağılık fiberoptik birim deformasyon ölçer (Fiber optic brillouin scattering type distributed strain sensing, FO-DSS)

Dağılık fiber optik sensör saçılmalarında, Raman ve Brillouin saçılma mekanizmasında, Rayleigh saçılma mekanizmasının aksine fiber çekirdekten gönderilen ışığın frekansı ile saçılan ışığın frekansı arasında Raman saçılımında 13 THz, Brillouin saçılımında ise 11 GHz seviyelerinde fark bulunmaktadır (Şekil 26). Saçılma prosesi içerisinde, fotonların enerji kazanarak üst enerji durumuna geçen anti-Stokes bileşenleri daha yüksek frekansa sahip olan bileşenler ve Stokes bileşenleri ise enerji kaybederek daha düşük frekansa sahip olan bileşenlerdir.

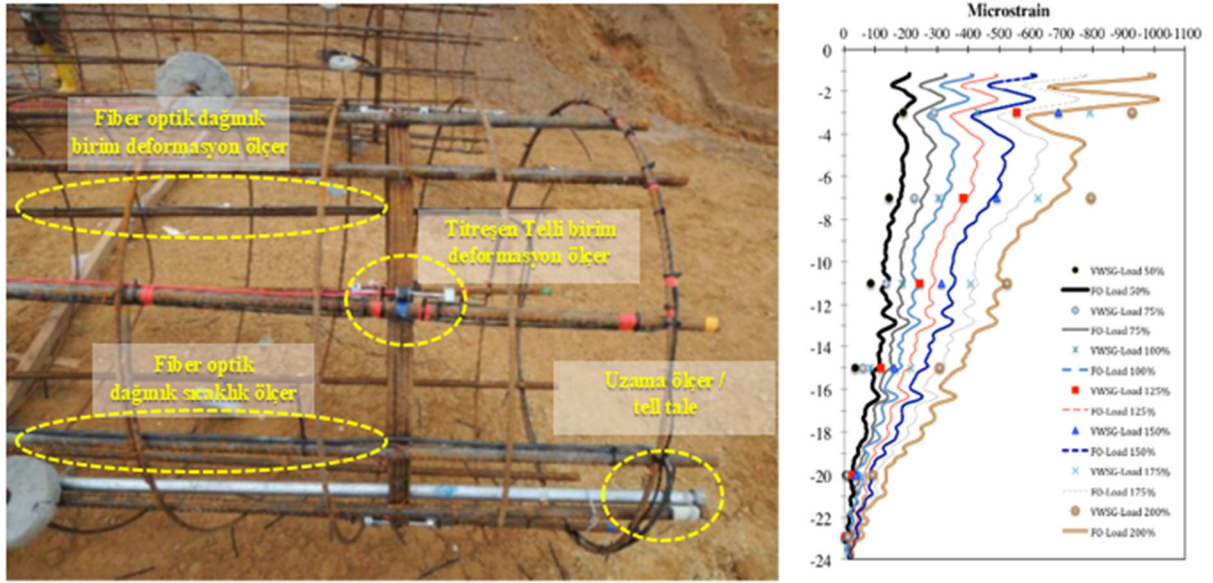


Şekil 26. Dağılık fiber optik sensör analiz saçılma spektrumu(Karaman vd., 2019).

Brillouin saçılmalı fiber optik dağılık algılamalı sistemler, Brillouin geri saçılan dalga yoğunluğunu ve sıcaklığın bir fonksiyonu olan frekans kaymasını ölçerek sıcaklık ve birim deformasyon değişikliklerini tespit etmektedir. Optik fiberdeki non-lineer kaynak jeneratörü ve gelişmiş sinyal-gürültü oranlarının sağlanabilmesi sayesinde ölçüm yapılabilen optik fiber uzunluğunun azami 100-200 km'lere kadar çıkarılabilmesi sağlamaktadır. Bu durum 5-50cm gibi kısa ölçüm aralıklarında dağılık olarak birim deformasyon ölçümüne imkan verebilmektedir.

Kazık yükleme deneyi kapsamında son yıllarda Brillouin saçılma tipi dağılık fiber optik birim deformasyon ölçer (Fiber optic brillouin scattering type distributed strain sensing, FO-DSS) sensörler artan miktarda kullanılmaktadır. Kazık yükleme deneyi kullanımına örnek teşkil etmesi ve konvansiyonel nokta bazında birim deformasyon ölçümü kıyaslaması (titreşen telli birim deformasyon ölçer) açısından 1200mm fore kazıkta statik yükleme deneyi (deney yükü yaklaşık 22MN, deney süresi >1 gün) FO-DSS sensörlerin başarı ile kullanımı konusunda Mohamad ve Tee, (2015), çalışmasında detay verilmiştir (Şekil 27).





Şekil 27. Dağınık fiber optik birim deformasyon ölçer ile bir kazık yükleme deney hazırlığı ve deneyde elde edilen birim deformasyon derinlik grafiği (Mohamad ve Tee, 2015).

4. SONUÇLAR

Türkiye’de geoteknik rasat uygulamalarındaki tarihsel gelişime mütenasip olarak enstrümantasyon bilgisine ulaşma ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Bu maksatla birincisinde deplasman gözleminin incelendiği (İnanır ve İnanır, 2015) “Geoteknik Mühendisliğinde Aletsel Gözlem ve Uygulama Teknikleri” bildiri serisinin ikincisi olan bu bildiride birim deformasyon gözlemi konu edilmiştir. Bildirinin birim deformasyon ölçümü hususunda uygulamada çalışan mühendis ve akademide faaliyet gösteren araştırmacı meslektaşlarımıza çalışmalarında fayda sağlayacak teknik detay bilgiyi ihtiva etmesi amaçlanmıştır.

Ülkemizde ve dünyada geoteknik sektöründe birim deformasyon ölçümü için ekseriyetle tercih edilen titreşen telli birim deformasyon ölçüm, elektrik direnç tipi birim deformasyon ölçüm, Brillouin saçılmalı dağınık fiber optik birim deformasyon algılayıcı ile ölçüm ve dalgaboyu değiştirilmiş Fiber Bragg Izgara FBG tipi birim deformasyon ölçüm sistemleri, teorik arka planları, tercih edildiği geoteknik uygulama alanları, yerleştirme ve okuma usulleri incelenmiştir. Bu kapsamda ağırlıklı Kazık Yükleme Deneyi, KYD özelinde uygulama örnekleri verilmiştir.

KAYNAKLAR

- Dunncliff, J., Deere, D.U., (1991), “Judgement in Geotechnical Engineering, The Professional Legacy of Ralph B. Peck”, BiTech Publishers Ltd., Canada
- Dunncliff, J. (1993), “Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance”, John Wiley & Sons, Inc., USA.



- EonPhotonics, (t.y.). FBG Sensör, erişim tarihi 28 Haziran 2024, erişim adresi http://www.eonphotonics.com/tr-TR/Urun/FBG_TR
- Geokon, (2019). "Installation Manual, Models 3911/3911A Resistance Type Strain Meters" erişim tarihi 10 Temmuz 2024, erişim adresi https://www.geokon.com/content/manuals/3911-3911A_Rebar_Strain_Meter.pdf
- İnanır, O.E., İnanır, M., (2015). Geoteknik Mühendisliğinde Aletsel Gözlem ve Uygulama Teknikleri – 1 Deformasyon Gözlemi (İnklinometre ve SAA), 6. Geoteknik Sempozyumu, 26-27 Kasım 2015, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- İnanır, O.E., İnanır, M., (2022). "Integrity of Bored Piles Under Tension", 11th International Stress Wave Conference, September 20-23 2022 Rotterdam The Netherlands,
- İnanır, O.E., (2024). Eksenel Statik Çekme Yüküne Maruz Betonarme Tekil Kazık Davranışı ve Orijinal Bir Kazık Deney ve İmalat Yaklaşımı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karaman, İ., Hatipoğlu, A., Günaydın, A. C., Fidanboylu, K. B., (2019). Dağınık Fiber Optik Sensör Türleri ve Sistemleri, erişim tarihi 15 Ocak 2020, erişim adresi <https://www.researchgate.net/publication/338139258>
- Khan, A.S., Wang, X., (2001). Strain Measurements and Stress Analysis, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Kyowa, (t.y.). How to Form Strain-gage Bridges, erişim tarihi 12 Mart 2016, erişim adresi <https://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/whats.pdf>
- Mohamad, H., Tee, B. P., (2015). Instrumented pile load testing with distributed optical fibre strain sensor, Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) Geotechnical & civil
- Murray, W.M., Miller, W.R., (1992). The Bonded Electrical Resistance Strain Gage: An Introduction, Oxford University Press, Inc., New York.
- Omega, (t.y.). Application Note 290-1—Practical Strain Gage Measurements, erişim tarihi 23 Şubat 2018, erişim adresi https://www.omega.co.uk/techref/pdf/StrainGage_Measurement.pdf
- Shi, B. (2014). Manufacture and Installation of the sensing fibers for FOS-based monitoring of geotechnical engineering, Cambridge Conference on Fibre Optic Sensing in Civil Infrastructure, CamFOS June30-July1, 2014.
- Tatam, R.P., (2014). Infrastructure applications of fibre Bragg grating sensors, Cambridge Conference on Fibre Optic Sensing in Civil Infrastructure, CamFOS June30-July1 2014.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
λ	Dalga boyu	R	Direnç
L	Tel boyu	ΔR	Direnç değişimi
n	Titreşim modu	ϵ	Birim deformasyon
v	Dalga yayılma hızı	GF	Birim Deformasyon Ölçer Katsayısı / Gage Faktör
T	Teldeki gerilme	$\mu\epsilon$	mikroStrain
μ	Lineer yoğunluk (metredeki kütle)	ϵ_l	Boyuna istikametteki birim deformasyon
ν	Poisson Oranı	ϵ_t	Enine istikametteki birim deformasyon
$\Delta\sigma$	Birim gerilme değişimi	$\Delta\epsilon$	birim deformasyon değişimi

