

## KİNETİK ENERJİ ÖLÇEN DÜZENEK\*

An Instrument for Kinetic Energy Measurements

( Kinerjimetre-1)

Fikret Çalışkan\*\*

### ABSTRACT

Kinerjimetre -1, an instrument for kinetic energy measurements developed in our department, enables us to measure the total kinetic energy of tremors during a certain time interval.

The system consists of a seismometer, Kinerjimetre -1 and a recorder. It measures the kinetic energy of tremors by the analogy of

$$E_T = \frac{\rho \cdot C}{2 k^2} \int_0^T e^2(t) dt \text{ where } \rho, C \text{ and } k \text{ are the density of}$$

the medium, wave propagation velocity and seismometer constant respectively and  $e(t)$  is the output voltage of the seismometer.

The measuring unit (Kinerjimetre-1) mainly includes amplifier, filter, ultra linear rectifier, triangle wave generator, squaring circuit, integrator, timing circuit and battery pack. Output of integrator is connected to a recorder. At the end of the fixed time interval, we can easily calculate total kinetic energy by multiplying the recorded value with the system constant.

Total gain of the amplifier and the filters can be adjusted in the interval of 2,7 to 270000. If the output voltage of seismometer is between 1,48  $\mu$  V and 1,48 V, the maximum error in the squaring circuit will be around 0.5 %. The time interval can be adjusted from 10 minutes to 12 hours.

Battery pack provides  $\pm 12$  Volts for all circuits. Some other circuits are added to improve the accuracy and control the amplitude of input signal, recorder interval and battery voltage.

The system can be used in the field to obtain the results directly thereby saving time and money.

### GİRİŞ

Günümüzde, küçük titreşimlerin kinetik enerjileri, sayısal yöntemlerle saptanabilmektedir. Bunun için, bilindiği gibi titreşimler hızlı kayıtçılar ile kayda alınıp, alınan kayıtlardan, genlikler, uygun örnekleme aralıklarıyla sayısal değerlere çevrilir. Bulunan değerler, bilgi işlem kartlarına delinerek bilgi sayara verilmekte, böylece kinetik enerji hesaplanabilmektedir.

Araştırmacıyı, yukarıda açıklanan klasik yöntemlerin rutin işlerinden kurtarmak için, kinetik enerjisi, istenilen zaman aralığında otomatik olarak hesaplayan, bir düzenek

\* İ.C. Fen Fakültesi Jeofizik Kürsüsünde tamamlanan aynı adlı Lisansüstü tezin kısaltılmışıdır.

\*\* İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Jeofizik Kürsüsü – İSTANBUL

geliştirmeyi amaçladık. Böylece zaman, para ve iş gücünden büyük tasarruf sağlanabilecektir. Gerçekleştirdiğim düzenek, daha önce Japonya'da Aso volkanında mikro depremlerin kinetik enerjisini ölçmek amacıyla yapılan bir aygıtın çalışma ilkesinden yararlanılarak geliştirilmiştir. Düzenek, bir sismometre, hesaplayıcı bir aygıt ve bir kayıtçıdan oluşmaktadır. Hesaplayıcı aygıtın, İ.Ü.F.F. Jeofizik Kürsüsünün Elektronik Laboratuvarında yapılmıştır.

Hesaplama işlemleri, düzeneğimizde, modern, duyarlı elektronik elemanlar kullanılarak, geliştirilen ölçü devreleri yardımı ile yapılır. Hesaplamaların, duyarlı, kolay ve hata oranı çok düşük olacak şekilde yapılabilmesi için, ayrıca özel denetleyici ve uyarıcı devreler geliştirilmiştir. Bunların yanında, uzun zamanlı bir integral alıcı devre geliştirilerek, taşınabilir bir kayıtçı ile kullanılması sağlanan aygıt, ucuzla maledilmiştir. Ayrıca, pille uzun süre sağlıklı olarak çalışmasını sağlayacak, regüleli özel besleme devresiyle taşınabilir olması sağlanmıştır. Aygıt, hesaplamaları otomatik olarak yaptığından, kullanılması çok kolaydır.

### KİNETİK ENERJİYİ HESAPLAMA YÖNTEMİ

Düzeneğin, kinetik enerjiyi hesaplama yöntemi, özet olarak aşağıda verilmektedir.

Elastik bir ortamda, T zaman süresinde birim yüzeyden açığa çıkan kinetik enerji, aşağıdaki bağıntı ile belirlenir (Wada., Kamo. and Suda., 1970).

$$E_T = \frac{\rho \cdot c}{2} \int_0^T \left( \frac{\partial \ell}{\partial t} \right)^2 dt \quad (1)$$

Burada :  $\partial \ell / \partial t$  hız,  $\rho$  ortamın yoğunluğu, c dalganın ortamdaki yayılım hızıdır. Hız sismometrisinin çıkışından alınan gerilim, aşağıdaki bağıntı ile verilebilir.

$$e(t) = k \cdot \frac{\partial \ell}{\partial t} \quad (2)$$

Burada k, sismometreye ait bir sabittir.

(2)'yi (1) bağıntısında yerine koyarsak, gerekli işlemler yapılırsa

$$E_T = \frac{\rho \cdot c}{2k^2} \int_0^T e^2(t) dt \quad (3)$$

elde edilir. Ortama ve sismometreye bağlı katsayıların ( $\rho$ , c, k) değerlerini yerlerine koyarak tek bir K sabit değeri bulunur.

$$K = \frac{\rho \cdot c}{2k^2} \quad (4)$$

Elde edilen bu değeri (3) bağıntısında yerine koyarsak, aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$E_T = K \cdot \int_0^T e^2(t) \cdot dt \quad (5)$$

Bu bağıntıdaki integral ve integral içindeki matematiksel işlemler, aygıtımızda, elektronik devreler yardımı ile benzetimli (analog) olarak hesaplanır. Sismometre çıkışındaki  $e(t)$  geriliminin kare alma devresinde karesi alınır. Bulunan değer, integral alma devresinde, (0,T) zaman aralığında integrali alınarak, çıkış gerilimi, kayıtçıya kaydedilir. Kayıtçıdan elde edilen gerilim, aygıtımızın katyasısı ile çarpılarak işlemin sonucu bulunur. Bu işlem aşağıdaki bağıntıda gösterilmiştir.

$$\int_0^T e^2(t) \cdot dt = A_0 \cdot V_t \quad (6)$$

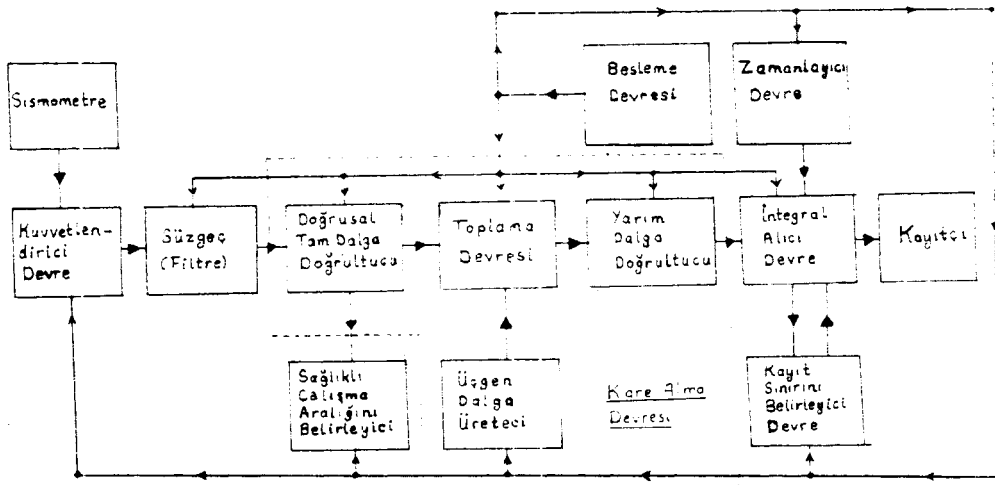
Bağıntıdaki  $A_0$  katsayısı, kuvvetlendirici, süzgeç, kare alma ve integral alma devrelerinin katyasılarını içeren aygıt katsayısı,  $V_t$ , kayıtçıdan elde edilen toplam gerilimdir. (6) bağıntısını, önceden saptanan K katsayısı ile çarparsak, (7) bağıntısından görüldüğü gibi,  $E_T$  kinetik enerjisi kolayca bulunmuş olur.

$$E_T = K \int_0^T e^2(t) \cdot dt = K \cdot A_0 \cdot V_t \quad (7)$$

Kinetik enerji buradan  $cm^2$  başına erg olarak bulunur.

### DÜZENEGİN AÇIKLANMASI

Düzenegın çalışma ilkesini açıklayan blok diyagram Şekil- 1 de gösterilmiştir:



Şekil - 1: Düzenegın Blok Diyagramı

Figure - 1: The block diagram of the system

Düzenegın blok diyagramında görülen elektrinok devrelerin açıklanmalarını sırası ile görelim.

### ÖN KUVVETLENDİRİCİ DEVRE

Sismometrenin çıkışından alınan gerilimin ölçülerek düzeye getirilmesini sağlar. Enerjisi ölçülecek olan işaretin genliği çok küçük ve frekansı da çok düşük olabilir. Bu nedenle, devrede işlem kuvvetlendiriciler kullanılmıştır. İşlem kuvvetlendiriciler, kazancı çok büyük, ısı değişimlerinden az etkilenen, farksal girişli, doğru akım kuvvetlendiricisidirler. Bu nedenlerden dolayı, diğer kuvvetlendiricilere göre daha güvenilir olduğu için, özellikle kullanılmışlardır.

Devrenin tüm kazancı, iki anahtar yardımı ile 1'den 10 000'e kadar değiştirilebilir. Anahtarlardan biri, beş durumlu olup her durumda kazancı on kat artırır. Diğer anahtar, on durumlu olup her durumda kazancı birer kat artırır. Kinetik enerjisi hesaplanacak olan titreşimin genliği anahtarlar yardımı ile en büyük 1,48 volt en küçük 1,48 mikrovolt olarak seçilebilir.

### SÜZGEÇ DEVRESİ

İstenmeyen titreşimleri, ölçeceğimiz titreşimlerden ayırır. Bu nedenle, süzgeç devresinde, istenilen frekans bandını geçiren bir alçak geçiren ve bir yüksek geçiren özel süzgeç kullanılmıştır. Devrenin kazancı 27 dir ve 0.2 Hz ile 100 Hz arasındaki frekans bandını geçirir.

### KARE ALMA DEVRESİ

Elektronik olarak yapılan işlemlerle, uyarıcının genliğinin karesi alınabilir. Bu işlemleri yapan ve kare alma devresini oluşturan devreleri şu şekilde açıklayabiliriz.

#### Üstün Doğrusal (ultra linear) Tam Dalga Doğrultucu

Ölçülecek düzeye getirilen uyarıcı, genellikle zamana bağlı olarak artı ve eksi değerler alabilir. Bu nedenle, uyarıcının daha kolay ve sağlıklı olarak karesinin alınması için, uyarıcı, bu devre yardımı ile üstün doğrusallıkla tam dalga doğrultulur. Bu devrede de işlem kuvvetlendiriciler kullanılarak devrenin daha güvenli çalışması sağlanmıştır.

#### Üçgen Dalga Üretici

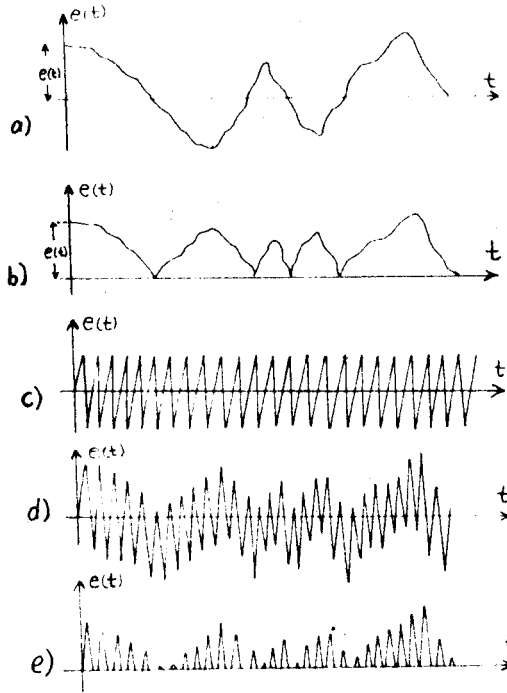
Kare alma işleminin temel devrelerinden biridir ve kare almaya yardım eder. Kare alma işleminde büyük doğruluk sağlanması için üçgen dalgalarının genliğinin, frekansının, ısı ve herhangi bir nedenle değişmemesi gerekir. Bu da, bu tür devrelerde güvenle kullanılan bir tümleşik devre (entegre) yardımı ile kurulan, bir elektronik devre tarafından sağlanmıştır.

#### Toplama Devresi

Bu devre de, tam dalga doğrultulan uyarıcı ile üçgen dalgalarının toplanmasını sağlayarak, kare alma işlemini gerçekleştiren bir yardımcı devredir.

## Yarım Dalga Doğrultucu Devre

Kare alma işlemini sona erdiren bu devre, toplam dalganın eksi kısımlarını atarak sıfır voltta sınırlar ve sadece artı genlikleri çıkışa ulaştırır. Böylece kare alma işlemi aşağıda açıklanacağı gibi gerçekleşmiş olur. Şekil- 2 Kare alma işleminde oluşan dalga şekillerini göstermektedir.



- a) Kare alma devresinin girişindeki dalga şekilleri  
The wave shapes in the input of the squaring circuit
- b) Üstün doğrusal tam dalga doğrultucu devresinin çıkışındaki dalga şekilleri  
The output wave shapes of the ultra linear rectifier circuit
- c) Üçgen dalga üreticinin çıkışındaki dalga şekilleri  
The output wave shapes of the triangle wave generator circuit
- d) Toplama devresi çıkışındaki dalga şekilleri  
The output wave shapes of the analog adder circuit
- e) Kare alma devresinin çıkışındaki dalga şekilleri  
The output wave shapes of the squaring circuit

Şekil - 2: Kare alma devresinde oluşan dalga şekilleri

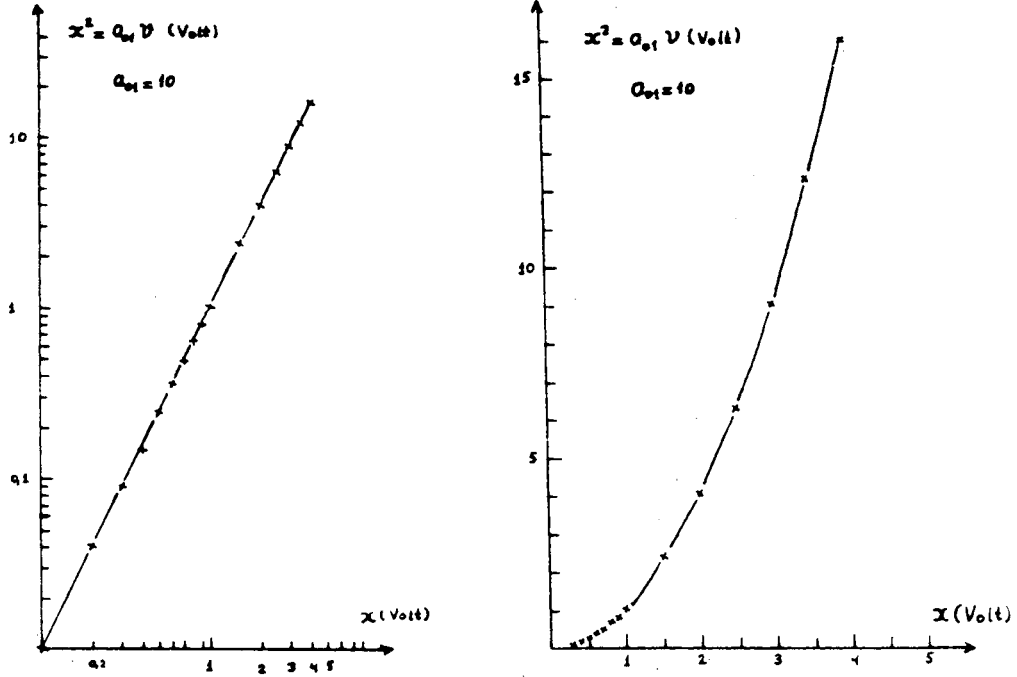
Figure - 2 : The wave shapes in the squaring circuit.

Şekilde görülen her üçgenin potansiyel enerjisi, o üçgenin alanına eşittir.

$$A = \frac{a \cdot e(t)}{2} \quad \frac{a}{2} = e(t) \cdot \text{tg } \Theta$$

$$V_{CD} = A = e^2(t) \cdot \text{tg } \Theta \quad V = b \cdot e^2(t)$$

Yukardaki bağıntılardan da görüldüğü gibi, her üçgenin oluşturduğu bu gerilim, o andaki uyarıcının genliğinin karesini verir.



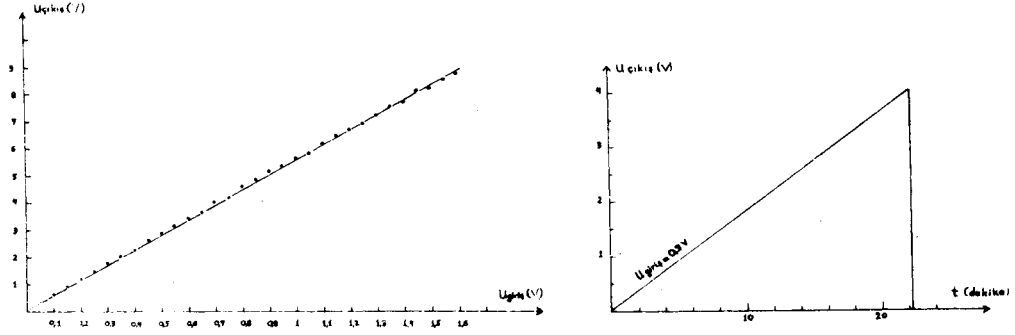
Şekil – 3: Kare alma devresinde, girişin gerilimlerinin fonksiyonu olarak çıkış geriliminin değişimi

Figure – 3: The plot of input versus output voltage in the squaring circuit

Devreyi denemek için girişine çeşitli değerlerde doğru gerilimler uygulanarak, çıkıştan saptanan değerlerle Şekil– 3a ve 3b çizildi. Grafiklerden görüldüğü gibi, kare alma işlemi tam olarak gerçekleşmiş olur. Kare almada ortalama hata % 0.5 dolaylarındadır. Kare alma devresinin katsayısı 0.1 dir.

### İNTEGRAL ALMA DEVRESİ

Kare alma devresinde açıklanan, her üçgenin oluşturduğu gerilimi, yani uyarıcının karesini, (O,T) zaman aralığında O yükü olarak bir kondansatörde toplarsak,  $e^2(t)$  nin integralini almış oluruz. İntegral alma işleminin duyarlı ve doğru yapılması için, duyarlı elektronik elemanlar kullanılarak, bir integral alıcı devre geliştirilmiştir. Bu devrede biriktirilen gerilim, bir kayıtçıya kayıt edilerek hesaplama işlemi bitirilir. Devrenin zamana bağlı olarak doğrusal çalışıp çalışmadığını anlamak için, girişine 0.3 V gerilim verildi. Çıkış gerilimini 10 kez küçülterek uzun zaman süresince kayıtçıya kaydettik. Elde edilen kayıt, Şekil– 4 de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi devre, üstün bir integral alıcı devre gibi çalışmaktadır. (Tobey, Graem, Huelsman, 1971. p. 216). Giriş gerilimi değerlerine bağlı olarak doğrusal integral alıp almadığını saptamak için, devrenin girişine çeşitli değerlerde gerilimler verildi. Bu değerlerin 10 dakika süresince integralleri alınarak çıkış gerilimleri kayıtçıya kaydedildi. Elde edilen değerlerle Şekil– 5 oluşturuldu. Eğrinin, doğrusallığından da anlaşıldığı üzere, devre oldukça doğru ve duyarlı integral almaktadır.



Şekil – 4: İntegral alma devresinde, zamanın fonksiyonu olarak çıkış geriliminin değişimi. Çizim kayıtçı ile çizilmiştir.

Figure – 4: The plot of integrator output as a function of time. (Recorded by plotter)

Şekil – 5: 10 dakika için, giriş gerilimleri ve integrallerini gösteren çizim.

Figure – 5: The integral values of input voltages for fixed time interval (10 minutes)

### SAĞLIKLI ÇALIŞMA ARALIĞINI BELİRLEYİCİ DEVRE

Karesi alınacak uyarıcının belirli bir alt düzeyden küçük, belirli bir üst düzeyden büyük olması sonucu, kare alma işlemine hata girer. Bunu önlemek için, bu düzeyleri belirleyip uyarıcı bir devre geliştirilmiştir. Alt ve üst düzeyler aşılmaya, devre, uyarıcı ışığı yakarak durumu bildirir. Işıklar sönecek şekilde, kuvvetlendiricilerin kazancı değiştirilerek sağlıklı çalışma aralığında ölçü alınması sağlanır. Belirlenen alt düzey 0.4 volt, üst düzey 4 voltur.

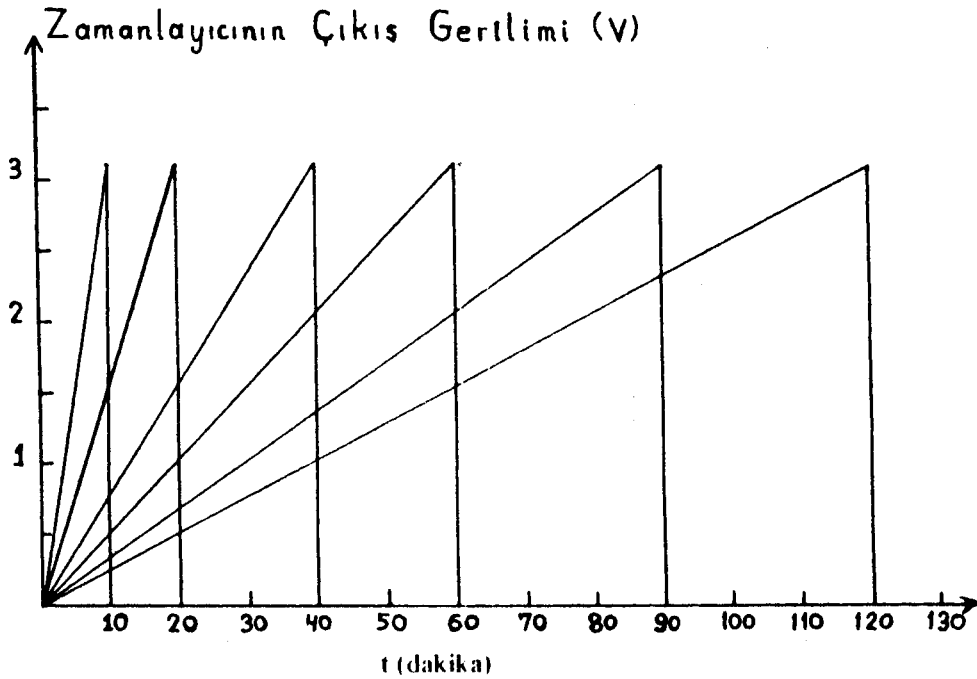
### KAYIT SINIRINI BELİRLEYİCİ DEVRE

Ölçü alınırken (O, T) zaman aralığı büyük seçilmişse, integral alıcının çıkış gerilimi T zamanından önce kayıt sınırına ulaşabilir. Bunun sonucu olarak, gerilim artmaya devam ederse, kayıt alınamaz duruma gelir. Bu sakıncayı önlemek için, kayıt sınırını belirleyen bir elektronik devre geliştirilmiştir. Kayıt edilen gerilim, sınıra gelince, devre tarafından integral alıcının çıkış gerilimi sıfırlanarak yeniden integral almaya başlatılır. Böylece, kayıt edilen gerilimler toplanarak, gerçek integral sonucu bulunur.

### ZAMANLAYICI DEVRE

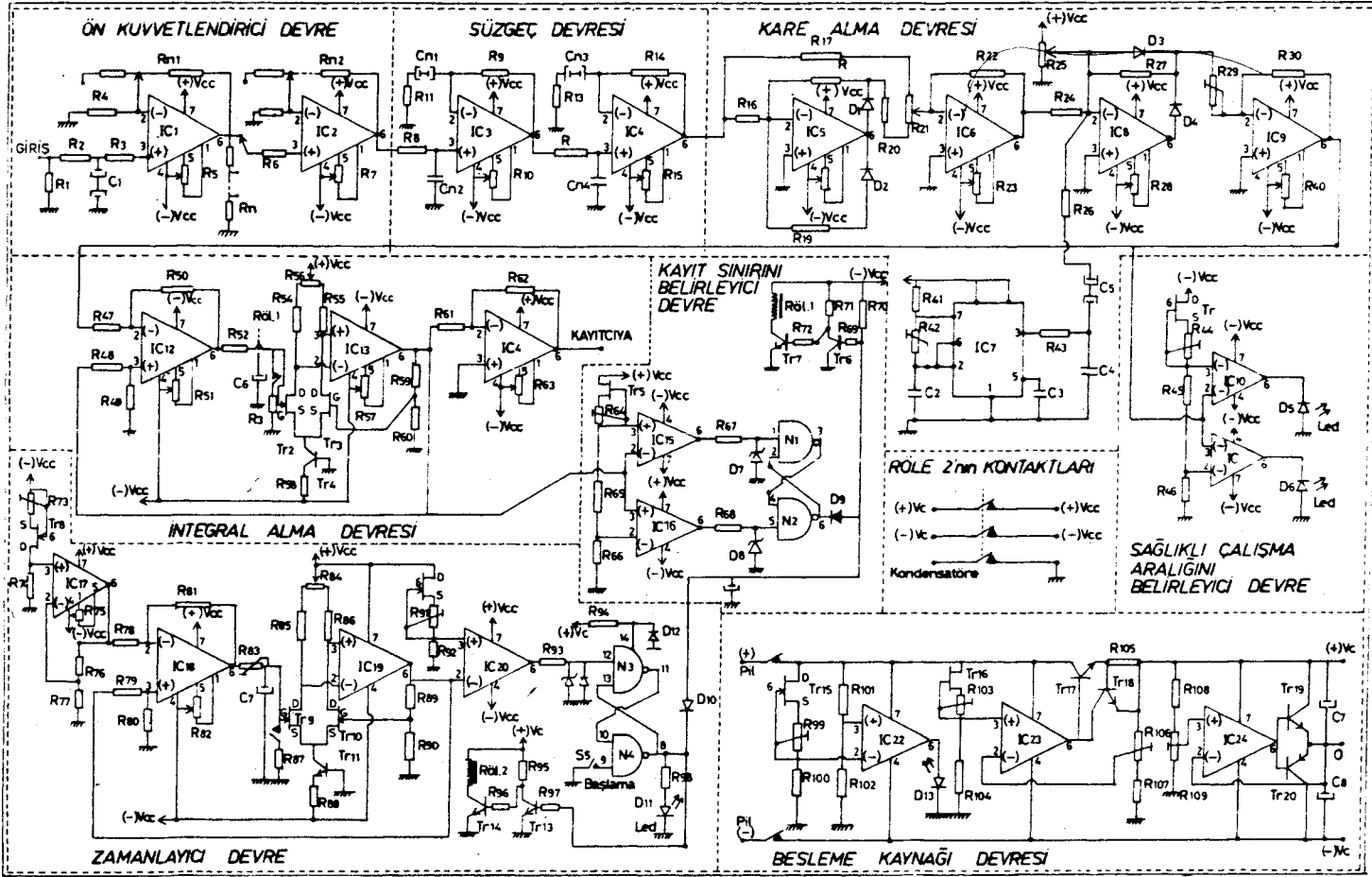
Kinetik enerji, (O, T) zaman aralığında hesaplandığından, ölçü alınırken zaman süresinin belirlenmesi gerekir. Ayrıca, zaman başlangıcında integral almaya son verilmelidir.

Bu işlem saate bakılarak yapılırsa, devamlı olarak düzeneğin başında beklemek gerekecektir. Dalgınlıkla girecek olan hataları da düşünerek, düzenekte otomatik bir zamanlayıcı devre geliştirilmiştir. Devre, zaman başlangıcında tüm devreleri çalışmaya başlatır ve zaman sonunda integral gerilimini sıfırlar. Ayrıca, tüm devrelere giden gerilimleri keserek, düzeneğin çalışmasına son verir. Böylece, gereksiz ölçü alınması ve pil harcanması önlenmiş olur. Çeşitli zaman süreleri için kayıttıya çizdirilen Şekil- 6 dan da görüldüğü gibi % 1 – 2 hata



Şekil - 6: Zamanlayıcının saptadığı, zaman süreçlerini gösteren çizim  
Figure - 6: The graphs of time intervals controlled by timing circuit

ile zaman saptanmaktadır. Zamanlayıcıdaki bu hata, devrede kullanılan dirençlerin değerinin tam olmaması sonucudur. Zamanlayıcının referans gerilimindeki küçük değişimler de hataya neden olmaktadır. Dirençlerin tam değerleri bulunarak kullanılır ve referans gerilim kaynağının geriliminin değişmemesi için gereken önlemler alınır, zaman süreci tam olarak saptanabilir. Zaman süresi, kayıt kağıdından okunabildiği için aygıtımızda bu işlemlere şimdilik gerek görülmemiştir. Zaman süreci, 11 durumlu bir anahtar yardımı ile 10 dakikadan 12 saate kadar çeşitli değerlerde seçilebilir.



Sekil - 7 : Geliştirilen aygıtın Şematik diyagramı  
Figure - 7 : Schematic diagram of developed instrument

### BESLENME DEVRESİ

Düzenegin arazide de kullanılabilmesi için, tanışabilir olması, bunun için de, pille çalışması gerekir. Pil zamanla zayıflayacağından düzenegin çalışma gerilimleri değişir. Sonuç olarak bu durum, ölçü ve denetleyici devrelerin hata yapmasına neden olur. Hatanın önlenmesi için çalışma gerilimlerinin sabit tutulması gerekir. Bu nedenle, az enerji harcaması olan bir regüle devre geliştirilmiştir. Pil gerilimi, biraz düşürülerek bu değerde sabit tutulur. Fakat, belli bir süre sonra pil daha çok zayıflayınca, gerilim, sabit tutulması gerekli değer altına düşer. Bu durumu saptayıp uyarmak için, az enerji harcaması olan bir uyarıcı devre geliştirilmiştir. Pil gerilimi, çalışma geriliminin altına düşer, uyarıcı devre, bir uyarı ışığı yakarak pilin değişmesi gerektiğini bildirir. Ayrıca, düzenekte kullanılan duyarlı işlem kuvvetlendiricilerin çalışması için gerekli olan, bir birine karşıt çift gerilim gerekir. Bu gereksinmeyi karşılamak için, besleme devresine ( = ) ve ( - ) işaretli gerilimler üreten bir çift gerilim kaynağı eklenmiştir.

### AYGITIN ÖZELLİKLERİ

En	34 cm
Yükseklik	13 cm
Derinlik	23 cm
Ağırlık yaklaşık	3 kg

Büyük boy 1.5 voltluk 18 pilin sağladığı 27 volt gerilimle çalışır. Aygıtın üzerindeki iki bağlantı ucu yardımı ile 23 volt'a kadar bir dış gerilim kaynağından da beslenebilir.

### SONUÇ

Açıklandığı gibi düzenek, bir sismometre, hesaplayıcı aygıt ve bir kayıtçıdan oluştuğundan, kinetik enerjinin saptanması için kullanılan aygıt sayısı düşük düzeyde tutulmuştur. Enerjinin saptanması için yapılacak olan işlem, önceden saptanan katsayı ile kayıtçıdan okunan gerilimi çarpmaktır. Böylece enerjinin ölçülmesi için yitirilen zaman hemen hemen ölçülecek olan enerjinin zaman sürecine eşittir.

Düzeneye eklenen denetleyici devreler yardımı ile daha sağlıklı ölçü alınarak, ölçmede girecek olan hataların en düşük düzeyde kalmasına çalışılmıştır. Aynı zamanda, denetleyici devreler yardımı ile aygıt kendi kendine ölçü aldığından, başında beklemeye gerek kalmaz. Hesaplama süresince, sadece, biraz kayıt kağıdı ve biraz da pil harcanır. Bunların sonucu olarak, kinetik enerjinin hesaplanmasını gerektiren bir çalışmada, para, zaman ve iş gücünden büyük tasarruf sağlanır. Duyarlı ölçüm yapma gerçekleşir. Sonucu bulmak için yapılacak işlemin kolaylığı ve kısa zamanda sonuca ulaşılması nedeniyle anında değerlendirme yapma olanağı sağlanmış olur. Ayrıca, pille çalıştığı ve taşınabilir olduğu için arazi çalışmalarında büyük kolaylık sağlar.

**TEŞEKKÜR**

Bu çalışmanın yapılmasında yol gösteren ve bana bu olanağı sağlayan sayın hocam Prof. Dr. İhsan Özdoğan'a, sayın hocam Doç. Dr. Hüseyin Soysal'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Lisans üstü çalışmasına başlamamı sağlayan sayın hocam rahmetli Doç. Dr. Yılmaz İspir'i rahmetle anarım. Değerli önerileri ve gerekli elektronik aygıtların zamanında sağlanmasındaki büyük yardımları nedeniyle sayın hocam Doç. Dr. Taner Bulat'a, her konudaki katkıları ve büyük yardımları için sayın Dr. Demir Kolçak'a ayrıca teşekkür ederim. Çalışmamda, şekillerin çizilmesindeki yardımlarından dolayı Selçuk Sipahioğlu'na, düzeneğin yapılması için gerekli elektronik malzemenin sağlanmasında gösterdiği kolaylık ve çabukluktan Oğuz Gündoğdu'ya şükranlarımı sunarım.

**YARARLANILAN KAYNAKLAR**

- "Circuits Devices Systems" 1966–1971 second edition, John Wiley Sons Inc. Sayfa 162–163
- CLAYTON, George. B., 1975, "Experiments with Operational Amplifiers", Learning by doing, sayfa 10–12, 56–57
- CLAYTON, George. B., 1975, "Linear Integrated Circuit Applications", sayfa 2–4, 24–28, 59, 91–97
- GRAEME— Jearld G., Gene E. Tobey, Lawrence P. HUELSMAN 1971, "Operational Amplifiers— Desing and Applications", sayfa 77–80, 245–249
- MILLMAN, Jacop, 1972, "Integrated Electronics", sayfa— 552, 698–700
- PITTMAN, P. C., 1974, "Memories—Counters" Desing of Digital Systems, Book 4, sayfa 1–7
- STRAUSS, Leonard., 1960–1970, "Wave Generation and Shaping", sayfa 15–16, 168–169, 268–270, 296–297
- WADA, Tatsuhiko, Kosuke KAMO and Yasuaki SUDO, 1970, "Measurement of Kinetic Energy", Special Contributions, Geophysical Institute, Kyoto University, No 10, sayfa 149–158