

# RF & MİKRODALGA GÜÇ ÖLÇÜMLERİNİN UME'DE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Rabia İnce, Şenel Yaran  
TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)

## ÖZET

*Elektronik sinyallerin frekansı yükseldikçe elektronik devre teoremleri işlevini yitirir. Bu nedenle yüksek frekanslarda ölçümler klasik yöntemler ile yapılamaz. Örneğin güç ölçümü, klasik yöntemlerin aksine akım ve gerilim ölçümleri yapılmadan bir hissedici eleman üzerinde mikrodalga güç ısı gücüne dönüştürülerek yapılır. Bu makalede frekans alanı 100 kHz'in üzerinde olan güç hissedicilerinin kalibrasyonunun UME' de nasıl yapıldığı ve ulusal birinci seviye standartlarının oluşturulması konuları anlatılmıştır.*

## 1. GİRİŞ:

RF & Mikrodalga güç ölçüm tekniklerine geçmeden önce frekans alanını tanımlayalım. Elektromanyetik spektrum , DC'den kozmik ışınlar ( $10^{12}$  Hz) kadar tüm frekansları kapsar[1]. Elektriksel büyüklükler nedeniyle oluşan ve bir iletim hattı boyunca yayılan 1 MHz ile 110 GHz arasındaki frekansları kapsayan elektromagnetik spectrum çeşitli kaynaklarda farklı şekillerde gruplandırılmış olmakla birlikte temelde büyük farklılıklar yoktur. Kısaca sözkonusu elektromagnetic spectrum üç ana bölüme ayrılır. Bunlar sırasıyla 1 MHz - 300 MHz arasındaki RADYO FREKANSI, 300 Mhz - 30 Ghz arasındaki MİKRODALGA ve 30 Ghz - 300 Ghz arasındaki MİLİMETRİK DALGA'dır[2]. Mikrodalga ve Milimetrikdalga frekans bandları ile dalga boyları Tablo-1'de verilmiştir[3].

Bandın Adı	Frekans Alanı (MHz)	Dalga Boyu (cm)
UHF	300 - 3,000	100 - 10
SHF	3,000 - 30,000	10 - 1.0
EHF*	30,000 - 300,000	1.0 - 0.1

Tablo -1. Mikrodalga Frekans Bandları

\*Dalga boyu bir santimetrenin altında olan frekanslar, Milimetrikdalga grubuna aittir.

Yüksek frekanslarda elektronik devre teoremleri geçerliliğini yitirmekte ve devre elemanlarının kullanımında önemli sınırlamalarla karşılaşmaktadır[3]. Bunlara en iyi örnek *skin effect* dir. DC akım iletkenin tüm kesitinden geçerken AC akım, *skin effect* nedeniyle frekans



değerine bağlı olarak, iletkenin yüzeyinden geçmeye eğilimlidir. Frekansın artmasıyla akımın aktığı kesit iletkenin yüzeyine doğru daralır. Bir başka deyişle akımın geçtiği iletken kesiti küçülür. Dolayısıyla iletkenin akıma gösterdiği direnç değeri artar. Bu durum düşük frekanslar için ihmal edilebilir, ancak mikrodalga frekansları yüksek değerlerde olduğu için akım, iletkenin yüzeyindeki çok dar bir kesitten geçmek isteyecek ve kesitin küçülmesi ile iletkenin gösterdiği direnç değeri de artacaktır.

Ayrıca AC sinyal taşıyan iletkenler, her zaman radyasyon yayar[3]. 50 Hz'lik bir sinyal taşıyan iletken bile radyasyona neden olur. Düşük frekanslarda bu radyasyon ihmal edilebilir, ancak mikrodalga frekanslarında oluşan radyasyonun büyüklüğü ihmal edilemez seviyelerdedir.

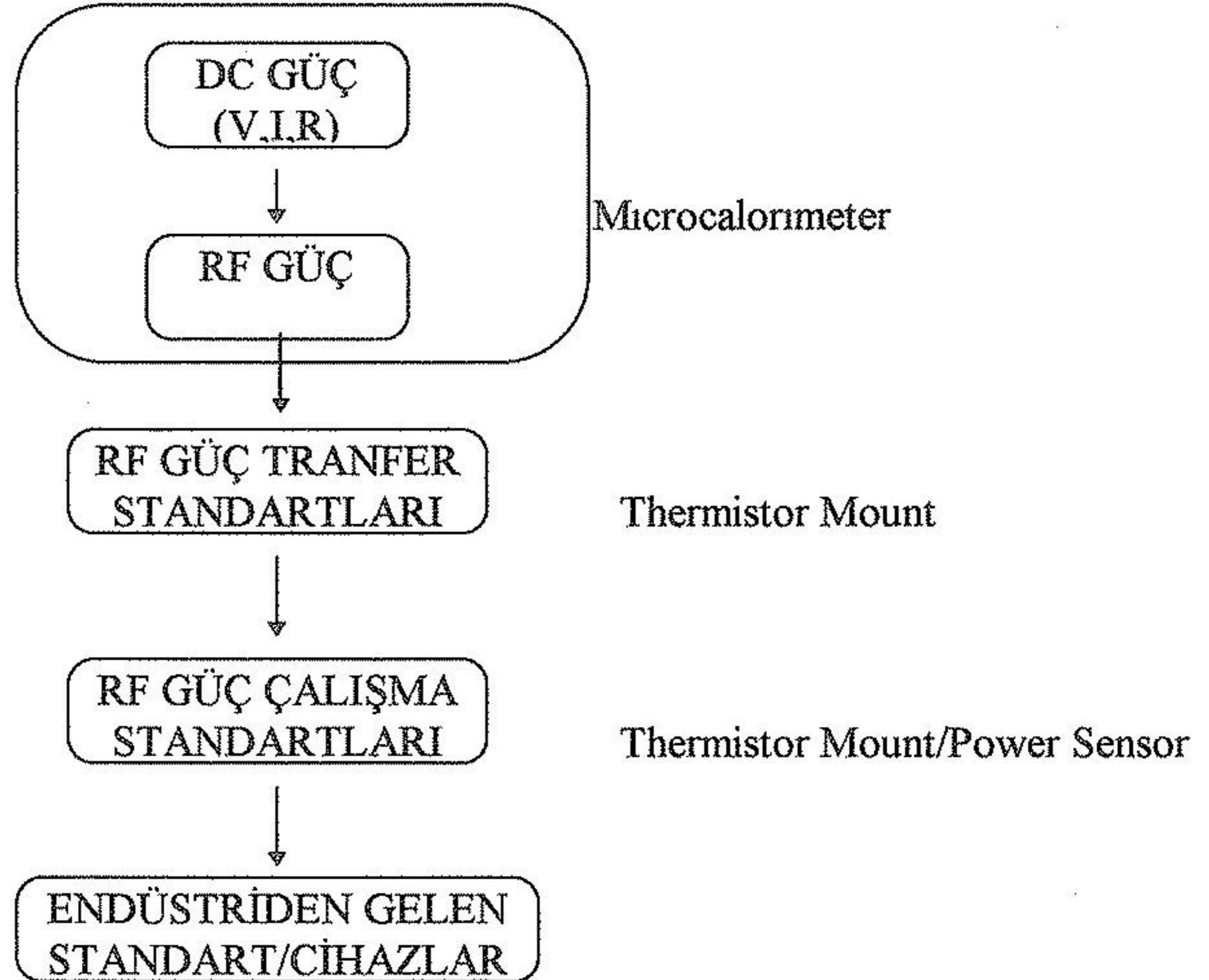
Yüksek frekansdan kaynaklanan radyasyon ve *skin effect* gibi problemler nedeniyle mikrodalga devrelerinde DC/düşük frekans devre teoremleri ve elemanları kullanılamaz.

Düşük frekanslarda, elektronik devre teorileri kullanılarak akım, gerilim, direnç ve benzeri devre elemanları ve büyüklükleri kolaylıkla tanımlanabilmekte ve analiz edilebilmektedir.

Yüksek frekanslarda bir iletim hattındaki akım ve gerilim değerleri sabit değildir. Aynı zamanda mikrodalga elemanlarından *waveguide* içinde akım ve gerilim ölçümü yapılması mümkün değildir. Bu nedenlerden dolayı DC/düşük frekans devre teoremleri ve elemanları yüksek frekanslarda kullanılamaz.

## 2. GÜÇ BİRİMİNİN OLUŞTURULMASI

Mikrodalga güç birimi olarak WATT kullanılır. Bu birim de güç için kullanılan watt biriminden türetilir[4] Mikrodalga watt biriminin oluşturulması amacıyla ulusal ölçüm enstitülerinde kalorimetreler kullanılmaktadır. Bu doğrultuda birinci seviye standartdan diğer güç metrelere iletilen doğruluk zinciri Şekil-1'de verilmiştir.



Şekil-1 Mikrodalgada Watt Biriminin Oluşturulması



### 3. MİKRODALGA GÜÇ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Mikrodalgada güç ölçümü, bir hissedicinin üzerinde ölçülecek gücün tamamının veya belirli bir miktarının harcanması ve elde edilen elektriksel sinyalin meter devresinde değerlendirilmesiyle gerçekleştirilir. Bir mikrodalga güç ölçüm sistemi, hissedici ve gösterge devresinden oluşmakta olup blok şema olarak Şekil - 2'de gösterilmiştir. Sadece hissedicinin değiştirilmesi ile sistemin ölçüm alanı değiştirilebilir.



Şekil - 2 Bir Mikrodalga Güç Ölçüm Sistemi Blok Şeması

### 4. GÜÇ ÖLÇÜMÜ [4],[5]

Mikrodalgada güç ölçümlerinde çeşitli güç hissedicileri kullanılmaktadır. Bu hissediciler, üzerlerine uygulanan mikrodalga gücü, ısı enerjisine dönüştürürler. Daha sonra bu ısı enerjisinin değerlendirilmesi için iki ayrı yöntem izlenir. Birinci sınıf hissedicilerde önce mikrodalga güç uygulanır ve daha sonra mikrodalga gücün neden olduğu sıcaklık değerini verebilecek bir dc güç uygulanır. Böylece mikrodalga gücün dc eşdeğeri belirlenir. İkinci sınıf hissedicilerde ise oluşan sıcaklık değeri doğrudan bir dc elektronik sinyale çevirilir. Mikrodalgadan dc güce geçiş için her iki gücün ısı etkisi bir araç olarak kullanılmakla birlikte sıcaklık ile ilgili teorik bilgilere ihtiyaç yoktur. Uygulamada üç temel tipde mikrodalga güç hissedicisi vardır. Bunlar sırasıyla thermocouple, diyot ve thermistördür.

Thermocouple ve diyot hissediciler üzerlerine uygulanan mikrodalga güç nedeniyle oluşan ıyı doğrudan dc sinyale çevirirler Bu dc sinyal güç metre devrelerinde değerlendirilerek göstergeden mikrodalga güç olarak okunur. Uygulamada her iki hissedici genellikle aynı güç metre devrelerini kullanır.

Thermistör ise bir çeşit direnç olup değeri sıcaklık ile değişmektedir. Thermistörün ısı arttırıldığında, bununla bağlantılı olarak direnç değeri değişir. Bu hissedici, güç metre devresine ait bir wheatstone direnç köprüsünün bir kolunu oluşturur. Mikrodalga güç uygulanmadan önce thermistörün direnç değeri köprüdeki diğer dirençlerin değerine eşit oluncaya kadar köprüye bir dc güç uygulanır ve köprünün dengeye gelmesi sağlanır. Thermistöre bir mikrodalga güç uygulandığında thermistörün sıcaklığının artması nedeniyle direnç değeri değişir ve köprünün dengesi bozulur. Köprüyü tekrar dengeye getirmek amacıyla, uygulanan dc gücün miktarı azaltılır. Başlangıç ve sonuçtaki dc güç farkı, hissedicinin üzerine uygulanan mikrodalga gücün eşdeğeri dc güce eşittir ve göstergeden mikrodalga güç olarak okunur.

### 5. KALİBRASYON FAKTÖRÜ[5]

Güç hissedicisi, ideal bir yük ise göstergeden okunan değer, hissedici üzerinde harcanan değer ile aynıdır. Fakat uygulamada ideal bir hissedici yoktur. Güç kaybına neden olan iki hata vardır. Bu hataların birincisi RF kaybıdır. RF kaybı, hissedicinin girişindeki gücün geriye yansıyan ve hissedici üzerinde harcanan kısımları dışında kalan kayıp miktarıdır. Bu tip kayıplar, *waveguide mount*'un duvarlarından (*waveguide mount* kullanıldığında), kötü bağlantılardan, kapasitör ve



dielektrik kayıplarından kaynaklanabilir. İkinci hata ise DC-Mikrodalga transfer hatasıdır. Bu hata termistörlerde DC veya AF gücün ısı etkisi ile mikrodalga gücün ısı etkisi arasındaki farktan thermocouple ve diyot hissedicilerde ise mikrodalga gücün ısıya ve daha sonra dc güce dönüştürülmesinden kaynaklanmaktadır.

Sözkonusu hatalar hissedicinin efektif verimliliği (*Effective Efficiency*) olarak tanımlanır. Bunların ölçüm sonucundan ayırt edilmesi oldukça zordur. Efektif verimlilik göstergeden okunan eşdeğer DC gücün, hissedici üzerinde harcanan mikrodalga güce oranı ile hesaplanabilir.

$$\eta_e = \frac{\text{Güç(EşdeğerDCGüç)}}{\text{Güç(HarcananMikrodalgaGüç)}}$$

Eşdeğer DC Güç; *DC substituted power*

Harcanan Mikrodalga Güç; *MW dissipated or absorbed power*

Efektif verimlilik, genellikle birden (1) küçük veya ideal şartlarda eşittir. Genellikle yüzde (%) olarak ifade edilir. Örneğin, bir hissedicinin efektif verimliliği 8 Ghz'de 0.98 ise bu oran %98 olarak belirtilir. Efektif verimlilik, hissedici üzerinde harcanan güç ile göstergeden okunan güç arasındaki farkı telafi eder. Göstergede okunan eşdeğer DC güç efektif verimliliğe bölüldüğünde, hissedici üzerinde harcanan mikrodalga güç elde edilir.

Uygulamada genellikle harcanan güçten daha çok iletim hattı üzerindeki güç değeri kullanılmaktadır. Bu nedenle efektif verimliliğin dışında birde DC eşdeğer gücün yani göstergeden okunan değer, hissedici girişine uygulanan güce oranı , kalibrasyon faktörü ( $K_b$ ) tanımlanmıştır.

$$K_b = \frac{\text{Güç(EşdeğerDCGüç)}}{\text{Güç(GelenMikrodalgaGüç)}}$$

Eşdeğer DC Güç; *DC substituted power*

Gelen Mikrodalga Güç; *MW incident power*

Göstergede okunan güç değeri kalibrasyon faktörüne bölüldüğünde iletim hattındaki yani hissedici girişindeki güç miktarı elde edilir. Uygulamada güç metre üzerindeki kalibrasyon faktörü ( $K_b$ ) düğmesinin uygun değere ayarlanması ile iletim hattındaki  $P_0$  gücü direk olarak göstergeden okunur.

Kalibrasyon faktörü, RF ve DC-Mikrodalga transfer kayıplarına ilave olarak empedans uyumsuzluğu (*mismatch*) kayıplarında telafi eder. Uyumsuzluk kayıpları iletim hattının empedansı ile hissedicinin giriş empedansı arasındaki farklılıktan kaynaklanır. İletim hattındaki gücün bir kısmı bu uyumsuzluk nedeniyle geriye yansır. Kalan kısmı hissedici üzerinde harcanır.

Kalibrasyon faktörü, efektif verimlilik ile ifade edilen hataları kapsadığından efektif verimlilik ile de bağıntılıdır. Bu bağıntı aşağıdaki formül ile gösterilmiştir.

$$K_b = \eta_e (1 - \rho_m^2)$$

$\rho_m$ ; termistörün yansıma katsayısıdır.



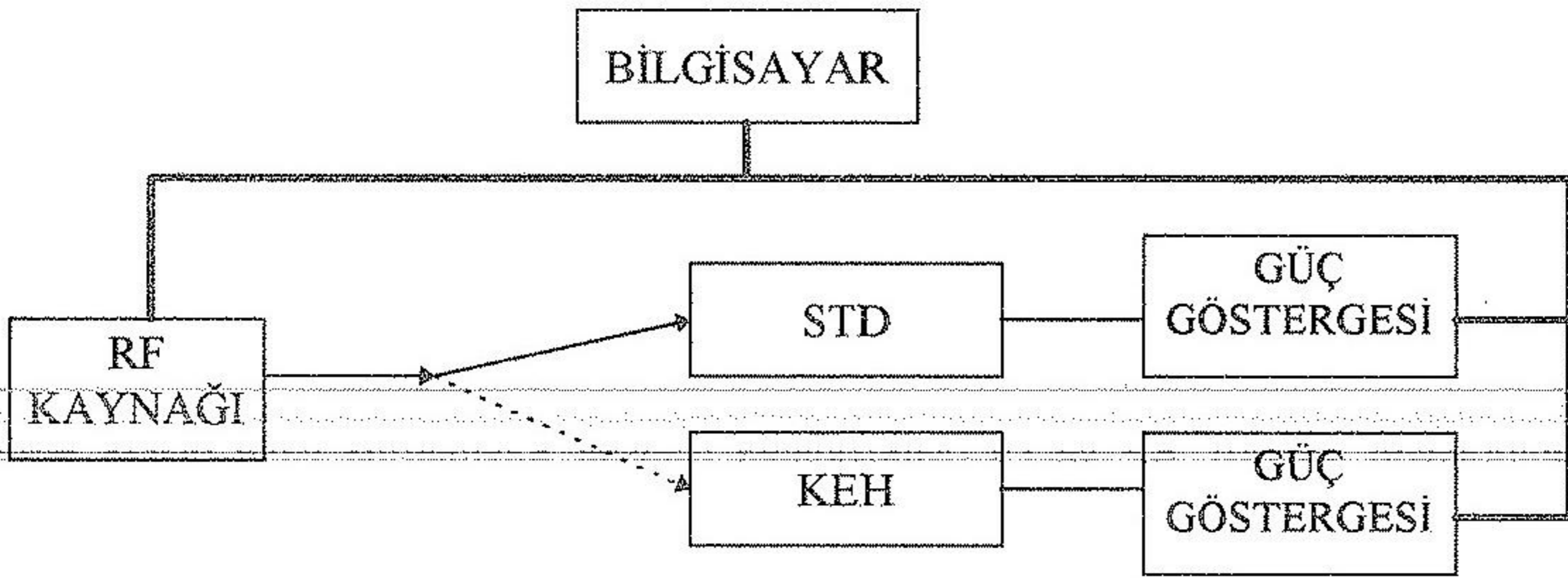
## 6. KALİBRASYON FAKTÖRÜ ÖLÇÜMÜ

Mikrodalga güç hissedicilerine ait kalibrasyon faktörleri, kullanım sıklığına bağlı olarak zamanla değişir. Bu nedenle belirli zaman aralıklarında hissedicilerin kalibre edilmelerine ihtiyaç vardır. UME RF & Mikrodalga Laboratuvarı'nda kalibrasyon faktörü ölçümlerinde karşılaştırma yöntemi kullanılmaktadır. Doğruluğu bilinen bir standart hissedici ile kalibre edilen hissedici (KEH) karşılaştırılmakta ve alınan sonuçlardan KEH'in kalibrasyon faktörleri hesaplanmaktadır. Tüm bu ölçümler bilgisayar kontrolü ile yapılmaktadır. Kalibrasyon işleminde kullanılan cihazlar ile iletişim kurmak ve ölçüm sonuçlarını almak için Visual Basic yazılımı, ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi ve kalibrasyon faktörlerinin hesaplanması için ise Excel yazılımı kullanılmaktadır.

Aynı frekans ve güç seviyelerindeki üç hissediciden standart grupları oluşturulmuş ve bunlardan bir tanesi Fransız Ulusal Ölçüm Enstitüsü, LCIE tarafından kalibre edilmiştir. Grup içindeki hissediciler birbirleri ile karşılaştırılarak kalibrasyon faktörü değerleri ölçülmekte ve bu değerlerdeki değişimler belirlenmektedir. Böylece doğruluğu garanti altına alınan bu standartlardan herhangi biri kullanılarak KEH'in kalibrasyon faktörleri belirlenmektedir.

Kalibrasyon işleminde kullanılan devre düzeneği Şekil - 3 'de verilmiştir. Visual Basic yazılımı ile hazırlanan program çalıştırılmaya başlandığında ölçüm yapılması istenen frekanslar girilir. Standart ve KEH'in tipleri seçilir. En son olarak RF kaynağının kararlılığı için gerekli süre ile ölçümler arasındaki bekleme süresi girilir. Kalibrasyon ölçümleri için gerekli olan bu bilgilerin girilmesinden sonra standart hissedici RF kaynağına bağlanır.

Hem standart hemde KEH üç farklı konumda sırayla RF kaynağına bağlanır. Böylece birden fazla ve farklı konumlarda ölçüm yapılarak konnektördeki mekanik simetriden kaynaklanabilecek hatalar ile aynı zamanda rastgele hatalar en aza indirilir. Bu bağlantı konumları arasında  $120^{\circ}$  fark vardır ve  $0^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$  ve  $240^{\circ}$  konumları olarak isimlendirilirler. RF kaynağı çıkışına ilk önce  $0^{\circ}$  konumunda standart, bağlanır ve standart güç metrenin *Calibration Factor* düğmesi %100 konumuna alınır.



Şekil - 3 Kalibrasyon Faktörü Ölçüm Düzeneği

Başlangıçta programa girilen bilgilere uygun olarak ölçüm işlemlerine başlanır. Bu bağlantıda hissedici sökülmeden başlangıçta girilen frekanslardaki sinyallerin uygulanması ile üç ölçüm serisi gerçekleştirilir. Ölçüm işlemleri tamamlandığında program alınan ölçüm sonuçlarının excel yazılımına aktarılması için durur. Sonuçlar excel'e aktarıldıktan sonra standart sökülerek yerine  $0^{\circ}$  konumunda KEH bağlanır. Standart hissedici ile yapılan ölçümler gibi KEH ile de



ölçümler yapılır ve sonuçlar Excel'e aktarılır. Visiual Basic ile hazırlanan ölçüm programının akış şeması Şekil - 4 'de verilmiştir.

Standart ve KEH'in üç farklı konumdaki ölçüm sonuçları Excel 'de hazırlanan program ile analiz edilir ve KEH kalibrasyon faktörü hesaplanır. Kalibrasyon faktörü hesabından önce her bağlantı konumundaki üç ölçüm serisi sonuçlarından aynı frekansa karşılık gelenlerin standart sapmaları hesaplanır ve diğer ölçüm konumlarındaki standart sapmalar ile karşılaştırılır. Standart sapmaları diğer konumlardan farklı olan konumda tekrar ölçüm yapılır ve tekrar standart sapmaları hesaplanarak sonuçlar kontrol edilir. Bu işlem tatmin edici sonuçlar alınıncaya kadar tekrarlanır.

Daha sonra standart hissediciye ait kalibrasyon faktörü değerleri girilir ve önceden belirlenen frekanslardaki KEH kalibrasyon faktörleri hesaplanır.

Standart hissedici grubundaki bir diğer standart hissedici kullanılarak tüm bu ölçümler tekrar yapılır ve KEH kalibrasyon faktörleri tekrar hesaplanır. Sonuçlar arasında farklılıklar varsa ölçümler tekrarlanır. Böylece birinci sonuçların doğruluğu ikinci sonuçlar ile garanti altına alınır.

Buraya kadar yapılan ölçümler sadece güç ölçümleri idi. Ayrıca hissedicilerin girişindeki yansıma katsayısının bilinmesine de ihtiyaç vardır. Hissedicinin karakteristik özelliklerinden olan yansıma katsayısı, empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan kayıpların hesaplanmasında kullanılmaktadır. Yansıma katsayısı Netwok Analyzer kullanılarak ölçülür. Bu katsayı, kalibrasyon faktörü gibi frekans ile değişmekte olup bu nedenle hissedicinin frekans alanı içerisindeki çeşitli frekanslarda ölçülür ve ölçüm belirsizliği hesaplanır.

Tüm ölçüm ve hesaplama işlemleri tamamlandıktan sonra sistematik ve rasgele hatalar hesaplanarak yapılan ölçümlerin belirsizliği hesaplanır ve raporlanır. UME'de elde edilen en iyi belirsizlikler aşağıda verilmiştir.

Kalibrasyon Faktörü ölçüm belirsizlikleri:

Frekans Alanı	Belirsizlik
100 kHz - 15 Ghz	±1.9 %
15 Ghz - 18 Ghz	±3.4 %
18 Ghz - 26.5 Ghz	±4.4 %

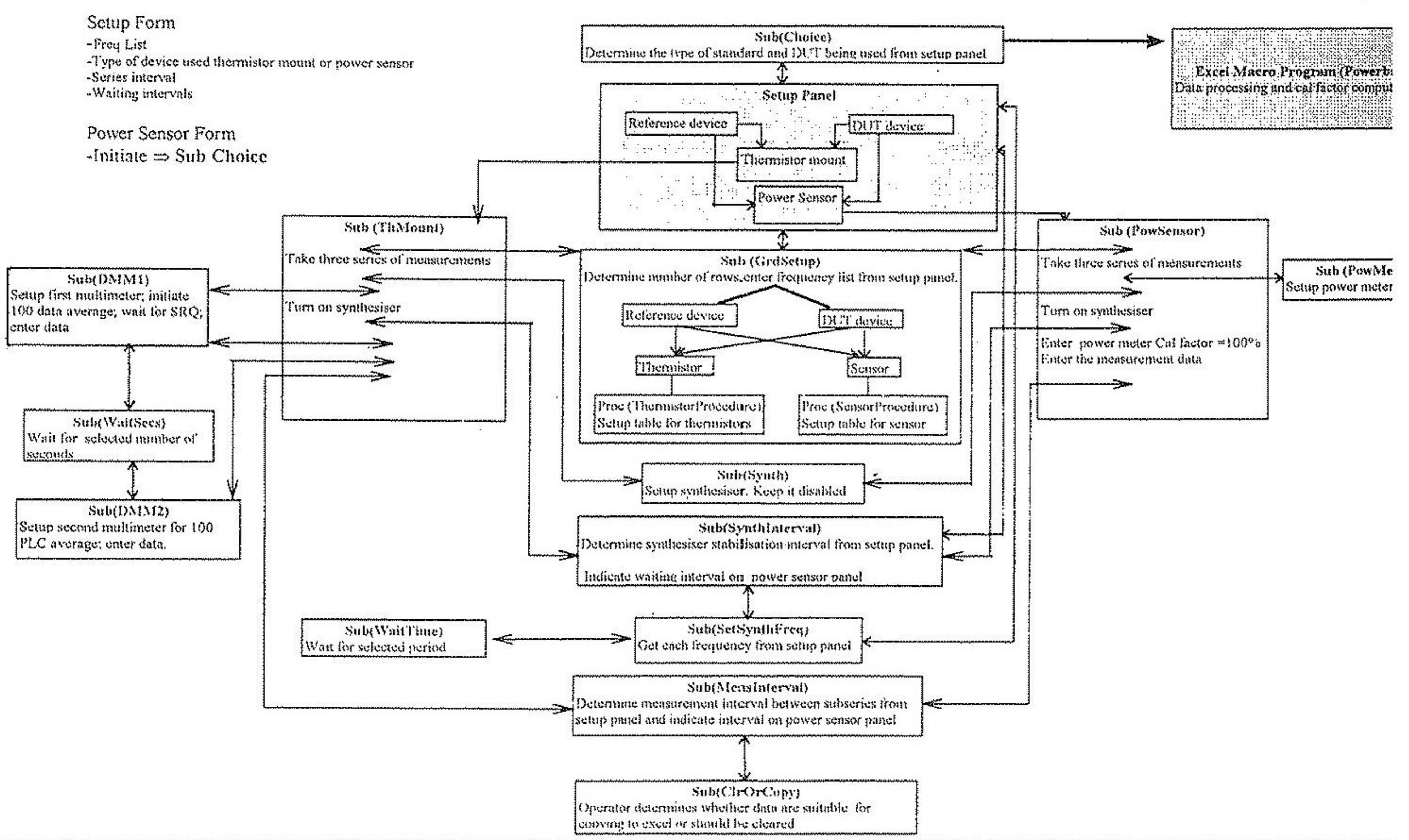
## 7. SONUÇ

UME RF & Mikrodalga laboratuvarı' nda yapılan Kalibrasyon Faktörü ölçümlerinde üç adet hissediciden oluşturulan bir standart grubu kullanılmaktadır. Bu grup içindeki hissedicilerden biri kullanılarak karşılaştırma yöntemi ile istenen bir hissedici kalibre edilmektedir. Birinci seviye ulusal standart olarak bir mikrokalorimetrenin kurulması durumunda mevcut standartlar ile elde edilen ölçüm belirsizlikleri en az on misli daha iyi olacaktır.

## REFERANSLAR:

1. "Electronic Measuring Systems" Metron Institute of Measurement Technology, 1978
2. "RF and Microwave Measurements" NPL -National Physical Laboratory , 1991
3. Allan Lytel, "Microwave Test & Measurements Techniques", Howard W. Sams& Co., 1964
4. A.Fantom, "Radio Frequency & Microwave Power Measurements", IEE Electrical Measurements Series 7, 1990
5. "Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements", Hewlett Packard Aplication Note 64-1





Şekil-4 Otomatik Kalibrasyon Faktörü Ölçümlerinde Kullanılan Program Akış Şeması