

İKİ BOYUTLU YOL MODELLERİ ÜZERİNDE ELASTİK DALGALARIN YAYILMASININ ETUDU

**İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesince «Doktor»
ünvanının verilmesi için kabul edilen tezdır.**

Y. Müh. EMİNE AĞAR

Tezin Dekanlığa Verildiği Tarih : 6 Şubat 1970
Tezin Müdafaa Edildiği Tarih : 15 Mayıs 1970

Doktorayı Yöneten Profesör : Prof. Kemal KUTLU
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Faruk UMAR
: Prof. Dr. Sacit TAMEROĞLU

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İNŞAAT FAKÜLTESİ MATBAASI
1970

Y. C.
Yükseköğretim Kurulu

Bu çalışmayı yapabilmem için her türlü imkânı sağlayan ve yardımlarını esirgemiyen sayın hocalarım Prof. Kemal KUTLU ve Prof. Faruk UMAR'a, yapıcı tenkitlerinden faydalandığım Prof.Dr. Sacit TAMEROĞLU'na, deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmemde yardımcı olan Fransa Ponts et Chaussées Laboratuvarının Yol Mekaniği bölümü mensuplarına, baskı işlerini titizlikle yapan Ressam İlhami ATINÇ, Güngör G R ve İnşaat Fakültesi Matbaası personeline teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
RESUME	II
SEMBOLLER	III
GİRİŞ	1
1. BÖLÜM	
ELASTİK, HOMOGEN ve İZOTROP BİR ORTAMDA DALGALARIN YAYILIŞI	3
1.1 Tarihi Gelişme	3
1.2 Tarifler	4
1.3 Genel Hareket Denklemleri	4
1.4 Küresel Dalgalar	7
1.5 Düzlem Dalgalar	9
1.6 Yüzey Dalgaları-Rayleigh Dalgaları	11
1.6.1 Serbest Yüzeyli Yarı Sonsuz Ortam Hali	11
1.6.2 Tabakalı Yarı Sonsuz Ortam Hali	14
1.7 Bir Titreşimin Genliğinin Titreşim Kaynağına Olan Mesafeyle Değişimi	16
1.8 İntegrasyon Metodu	18
1.9 Nümerik Hesap Prensipleri	19
1.10 Genliğin Boyutu	20
2. BÖLÜM	
GOODMAN VİBRÖRÜ METODU	21
2.1 Giriş	21
2.2 Tarifler	22
2.3 Kullanılan Aletler	22
2.3.1 Jeneratörler	22
2.3.2 Vibrörler	25
2.3.3 Kaptörler	26
2.3.4 Filtreler	28
2.3.5 Ölçü Aletleri	30
2.3.6 Frekansmetre	31
2.3.7 Kamyonet	32

2.4	Aletlerin Toplu Çalışma Prensipleri	34
2.5	Ölçme Prensipleri	34
2.6	Ölçme Yapılacak Noktaların Seçimi	37
2.7	Ölçme Yaparken Dikkat Edilecek Hususlar	37
2.8	Ölçme Neticelerinin Değerlendirilmesi	38
2.9	Teorik Eğriler	38
2.9.1	Yarı Sonsuz Ortam Hali	38
2.9.2	Tabakalı Yarı Sonsuz Ortam Hali	39
2.10	Teorik LAMB Eğrilerinin Belirtilmesi	44
2.11	Sonuç	48
3.	BÖLÜM	
	MODELLER ÜZERİNDE ÇALIŞMALAR	51
3.1	Giriş	51
3.2	Yarı Sonsuz Ortam Modeli	52
3.3	Faz Ölçmeleri İçin Esaslar	53
3.4	Ölçme Yapılan Eksenler	55
3.4.1	1 Numaralı Eksen-Yüzeysel Eksen	56
3.4.2	2 Numaralı Eksen-Eğik Eksen	56
3.4.3	3 Numaralı Eksen-Düşey Eksen	57
3.5	Sonuç	58
3.6	Genliğin Vibröre Olan Mesafeyle Değişiminin Etüdü	58
3.7	Model Üzerinde Genlik Ölçmeleri	58
3.8	Genliğin Değişiminin Elektronik Hesap Makinalarıyla Hesaplanması	60
3.9	Sonuç	62
3.10	Tabakalı Yarı Sonsuz Ortamda Dispersiyon Eğrileri	63
3.11	Aynı Frekanslı Fakat Farklı Dalga Boylu İki Titreşimin Girişimi	64
3.12	Tabakalı Yarı Sonsuz Ortam Modeli	70
3.13	Ölçme Prensipleri	72
3.14	Serbest Arakesitli Tabakalı Model Üzerinde Yapılan Ölçmeler	73
3.14.1	Faz Eğrilerinin Değerlendirilmesi	73
3.14.2	Deneyisel Dispersiyon Eğrisinin İncelenmesi	74
3.14.3	Genlik Eğrilerinin İncelenmesi	75

3.15	Tam Kaygan Arakesitli Tabakalı Model Üzerinde	
	Yapılan Ölçmeler	75
3.15.1	Faz Eğrilerinin Değerlendirilmesi	76
3.15.2	Deneysel Dispersiyon Eğrisinin	
	İncelenmesi	76
3.15.3	Genlik Eğrilerinin İncelenmesi	76
3.16	Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Model	
	Üzerinde Yapılan Ölçmeler	77
3.16.1	Faz Eğrilerinin Değerlendirilmesi	77
3.16.2	Deneysel Dispersiyon Eğrisinin	
	İncelenmesi	77
3.16.3	Genlik Eğrilerinin İncelenmesi	78
3.17	Üç Arakesit Tipine Karşılaştırmalı Genel	
	Bakış ve Sonuçların Goodman Vibrörü ile	
	Yol Üzerindeki Çalışmalar Bakımından	
	Önemi	78
3.18	Sonuç	81

EK 1 Tablolar

EK 2 Şekiller

REFERANS LİSTESİ

HAL TERCÜMESİ

Ö Z E T

Üç bölüm halinde sunulan bu çalışmada iki boyutlu yol modelleri üzerinde elastik dalgaların yayılışı etüd edilmiştir.

Birinci bölümde, elastik, homogen ve izotrop bir ortamda dalgaların yayılışına ait genel denklemler verilmiştir.

15 - 20 senedir yolların dinamik olarak incelenmesinde kullanılan ve model üzerindeki çalışmalarda esas alınan Goodman Vibrörü Metodu ikinci bölümde tanıtılmıştır. Önce kullanılan aletler anlatılmış bilahare metodun prensipleri açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde Fransa Ponts et Chaussées Merkez Laboratuvarının Yol Mekaniği bölümünde modeller üzerinde yapılmış olan deneysel çalışmaların neticeleri gösterilmiş, bu neticelerin değerlendirilmeleri yapılmış ve yol tekniği bakımından önemleri belirtilmiştir.

R E S U M E

L'objet de ce travail est l'étude de la propagation d'ondes élastiques sur des modèles bidimensionnels des chaussées.

Cette thèse comporte essentiellement trois chapitres.

Au premier chapitre on a donné les équations générales sur la propagation d'ondes dans un milieu élastique, homogène et isotrope.

C'est au deuxième chapitre que l'on a exposé la technique du vibreur Goodman qui est utilisée en auscultation dynamique des chaussées au cours des quinze ou vingt dernières années. Les travaux sur modèles sont basés sur cette technique. On a fait tout d'abord la description de l'appareillage, puis on a expliqué les principes de la technique.

Au troisième chapitre on a montré sur modèles, les résultats des expériences effectuées à la section Mécanique des Chaussées du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et on les a interprétés. On a précisé leurs importances au point de vue de la technique routière.

SEMBOLLER

x, y, z	Dik koordinatlar
u, v, w	Yer değiştirme bileşenleri
P_{xx}, P_{yy}, P_{zz}	x, y, z eksenlerine paralel normal gerilme bileşenleri
P_{xy}, P_{yz}, P_{zx}	Dik koordinatlarda kayma gerilmesi bileşenleri
λ, μ	Lamé parametreleri
E	Elastisite modülü
θ	Hacim genieřmesi
ρ	Yoęunluk
ν	Poisson oranı
X, Y, Z	Birim hacme etkiyen kütle kuvveti bileşenleri
α	Boyuna dalgaların yayılma hızı
β	Enine dalgaların yayılma hızı
C_R	Rayleigh hızı
u_1, u_2, u_3	Dış normalin kosinüs direktörleri
r, z, χ	Silindirik koordinatlar
q, ω	r ve z doęrultularındaki yer değiştirme bileşenleri
n	Frekans
ℓ	Dalga boyu
A	Genlik
φ	Faz
R	Vibröre mesafe

IV

Not : Fransızcadaki vibreur, capteur ve mode kelimelerine tam türkçe karşılıklar bulunamadığından bu kelimeler tez içinde, okunuşlarıyla yazılarak kullanılmıştır. Bu sebeple aşağıdaki tariflerin verilmesi lüzumludur.

Vibrör (vibreur) : Bir jeneratörden aldığı gerilimi sinüsoidal titreşime çeviren bir alettir. Titreşim kaynağı olarak kullanılır.

Kaptör (Capteur) : Vibröre nazaran ters yönde çalışır. Yani aldığı titreşim hareketini gerilime çevirir.

Mod (Mode) : Şekil, tarz



GİRİŞ

Yollarda dalga yayılması ilk olarak 1945 de Amerika Birleşik Devletlerinde beton yol plakları üzerinde etüd edilmiştir. Yolun yapısını bozmayan bir metodla beton plakların kalınlığını tayin etmek için, antisimetrik LAMB dalgalarının plaklardaki yayılma hızları ölçülmüştür.

Esnek yol döşemeleri üzerindeki ilk titreşim deneyleri ise 1948 de Van Der Poel tarafından Hollanda Shell laboratuvarında iki ton ağırlığında titreşen bir makina kullanarak yapılmıştır.

1950 senesinin sonlarına doğru Goodman metodu Sehll Laboratuvarınca kabul edilmiştir. Bu metodu kullanarak yapılan çalışmalar daha ziyade esnek yollar üzerine teksif edilmiştir.

Bir sinüsoidal titreşim kaynağı tarafından yolda meydana getirilen küçük genlikli yüzey dalgalarının yayılışını inceleyerek yol döşemesini bozmadan yoldaki tabakaların kalınlıkları, bu tabakaların rijitlik derecesi, homogenliği, zayıf noktaları, inşaattan veya takviyeden sonra yolun mukavemet yönünden gelişimi gibi birçok hususlarda bilgi sahibi olmak için kullanılan bir metod olarak özetliyebileceğimiz Goodman metodu Hollanda'dan sonra İngiltere Road Research Laboratuvarında Dr. Jones'un idaresinde yol çalışmalarında kullanılmaya başlanmış ve zamanla geliştirilmiştir.

Bu metodun Fransa Ponts et Chaussées Laboratuvarlarında ele alınması 1961-62 senelerine, bilahare geliştirilip genelleştirilmesi 1965 senesine raslar.

Goodman metodu elastisite teorisine dayanır ve aşağıdaki hipotezleri kabul eder.

- Yollar sonsuz derinlikli bir yatak(alt yapı) üzerine oturan masayılı bir tabaka serisinden meydana gelmiştir. Bu tabakalar yatay ve sınırsız olarak uzanırlar.

- Yolu teşkil eden bütün malzeme elastik, homogen ve izotropdur.

- Bir tabakadan diğer tabakaya (arakesitlerde) gerilme ve yer değiştirmeler sürekliidir.

Hakikatte bu hipotezlerin normal yollarda, hatta tecrübe yollarında gerçekleştirilmesi oldukça güçtür. Bu sakınca Goodman Vibrörü ile yol üzerinde elde edilmiş deneysel sonuçların teori ile karşılaştırılmasını güçleştirir ve hatalı değerlendirmeler yapılmasına bile sebep olabilir. Bu güçlüğü yenmek için yukarıdaki hipotezlerin tam olarak yerine getirildiği modeller üzerinde çalışmak uygun görülmüştür. Üzerinde çalışılması ve inşası en kolay modeller iki boyutlu modellerdir. Böylece bu tezin konusu " İki Boyutlu Yol Modelleri Üzerinde Elastik Dalgaların Yayılmasının Etüdü " olmuştur.

Deneysel çalışmalar sertleştirilmiş kauçuk ve plexiglas plaklardan teşkil edilmiş iki boyutlu modeller üzerinde Goodman metodunu kullanarak, vibrör tarafından doğurulan titreşimlerin faz ve genliğinin vibröre olan mesafeyle değişimini incelemek suretiyle yapılmıştır.

Bölüm 1

ELASTİK, HOMOGEN ve İZOTROP BİR ORTAMDA DALGALARIN YAYILIŞI

1.1. Tarihi Gelişme

Elastik sistemlerin dinamiği bir asırdan fazla bir zamandanberi incelenmektedir. 1825 de POISSON, dalgaları, enine ve boyuna dalgalar olmak üzere ikiye ayırarak elastik ortamların küçük hareketleri üzerine POISSON teoremini kurmuştur. RAYLEIGH'in 1885 de kendi adıyla anılan yüzey dalgalarını keşfetmesi sonunda elastik yarı sonsuz ortama ait ilk dinamik çözümü bulmak mümkün olmuştur.

Bir yarı sonsuz ortamın yüzeyine etkiyen noktasal bir titreşim kaynağının yüzey dalgaları (RAYLEIGH dalgaları) ile birlikte kütle dalgalarını da yani enine ve boyuna dalgaları da meydana getirdiği 1904 de LAMB tarafından gösterilmiştir. LAMB, ayrıca sonsuz serbest plakta dalga yayılışı teorisini vermiş ve dalgaların simetrik ve asimetrik olmak üzere iki esas yayılma şekli olduğunu ispatlamıştır.

1911 de, LOVE, üzeri bir plak ile örtülmüş yarı sonsuz elastik bir ortama ait çözümü vererek ve yüzeydeki plakta enine dalgaların yatay polarizasyonu sonunda meydana gelen yüzey dalgalarının (LOVE dalgalarının) izahını yaparak RAYLEIGH'in çalışmalarını tamamlamıştır.

Elastik dalgaların tabakalı ortamlarda yayılması , yansınması ve kırılmasına ait teori üzerinde çalışan daha sonraki araştırmacılar arasında Jeffreys (1926), Slichter ve Gabriel (1933), Muskat (1940), Healan (1953) ve Cagniard'ı (1962) sayabiliriz.

Deneyisel araştırmalar ise Oliver, Press ve Ewing tarafından plexiglas ve metalden imal edilmiş iki boyutlu sismik modeller üzerinde yapılmıştır.

Bu çalışmaların mühendisler tarafından kullanılması 1930 da Lorenz ile başlar. Bu alandaki son eserlerden başlıcaları Barkan'ın "Dynamics of bases foundations" ve Tse-Yung-Sung'un "Vibrations

in semi-infinite solids due to periodic surface loading" dir.

1.2 Tarifler

Elastisite : bir cismin dış kuvvetler etkisiyle belirli bir sınıra kadar şekil değiştirmesi ve kuvvetlerin kaldırılması ile tamamen başlangıç şekline dönmesi özelliğidir.

Homogenlik : cismi teşkil eden maddenin cisim içinde düzgün yayılması yani cisimden alınacak en küçük elemanın dahi cisim ile aynı fiziksel özelliklere sahip olmasıdır.

İzotropi : cismin elastik özelliklerinin bütün doğrultularda aynı olması, farklı özellik gösterdiği herhangi bir doğrultunun bulunmamasıdır.

1.3 Genel Hareket Denklemleri

Bir kuvvet sisteminin tesir ettiği elastik bir ortamda $Oxyz$ koordinat sistemine göre konumu belirlenmiş bir noktanın yer değiştirmelerini tayin edebilmek için bir skaler potansiyel φ , bir de vektöriyel potansiyel $\vec{\Psi}(\psi_1, \psi_2, \psi_3)$ i tarif etmek lazımdır. Zira POISSON teoremine göre her elastik yer değiştirmeyi bir gradyan ve bir rotasyonel ile ifade etmek mümkündür. Bir noktanın x, y, z doğrultusundaki yer değiştirme bileşenleri u, v, ω aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi_3}{\partial y} - \frac{\partial \psi_2}{\partial z} \\ v &= \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial \psi_1}{\partial z} - \frac{\partial \psi_3}{\partial x} \\ \omega &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi_2}{\partial x} - \frac{\partial \psi_1}{\partial y} \end{aligned} \quad (1.1)$$

vektöriyel şekilde ise ,

$$\vec{S}(u, v, \omega) = \text{grad } \varphi + \text{rot } \vec{\Psi}(\psi_1, \psi_2, \psi_3) \quad (1.2)$$

dır.

Diğer taraftan LAME parametrelerini kullanarak genleşme gerilmeleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 P_{xx} &= \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\
 P_{yy} &= \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \\
 P_{zz} &= \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}
 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Kayma gerilmeleri de

$$\begin{aligned}
 P_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\
 P_{yz} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\
 P_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)
 \end{aligned} \quad (1.4)$$

şeklinde gösterilir.

Burada birinci indis gerilmenin incelendiği düzleme dik olan doğrultuyu, ikincisi ise gerilme doğrultusunu gösterir.

Bu denklemlerde :

$$\begin{aligned}
 \theta &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} & \text{veya} & \quad \theta = \nabla^2 \varphi \\
 \lambda &= \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & & \quad \text{Lamé parametresi} \\
 E &= \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu} & & \quad \text{Elastisite modülü} \quad (1.5) \\
 \mu &= \frac{E}{2(1+\nu)} & & \quad \text{Kayma modülü-Lamé parametresi} \\
 \nu &= \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} & & \quad \text{Poisson oranıdır.}
 \end{aligned}$$

Hareket denklemleri aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} = X + \frac{\partial P_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial P_{zx}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{d^2 v}{dt^2} = Y + \frac{\partial P_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial P_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial P_{zy}}{\partial z} \quad (1.6)$$

$$\rho \frac{d^2 w}{dt^2} = Z + \frac{\partial P_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial P_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial P_{zz}}{\partial z}$$

Bu ifadelerde X, Y, Z birim hacme etkiyen kütle kuvveti bileşenleri, ρ ise ortamın yoğunluğudur.

(1.3) ve (1.4) numaralı denklemlerden çıkarılan değerleri (1.6) numaralı denklemlerde yerine koyarsak aşağıdaki ifadeleri elde ederiz.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + X$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + Y \quad (1.7)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + Z$$

$\frac{d^2}{dt^2}$ yerine $\frac{\partial^2}{\partial t^2}$ koymak suretiyle yukarıdaki denklemler lineer hale getirilmiştir. Bu şekildeki işlem neticesinde yapmış olduğumuz ihmal sonuca tesir etmeyecek kadar küçüktür.

Kütle kuvvetlerini ihmal ederek ve (1.1) bağıntılarını kullanarak (1.7) denklemlerinin birincisini aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{\partial^2 \psi_3}{\partial t^2} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial t^2} \right)$$

$$= (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \varphi + \mu \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \varphi + \mu \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 \psi_3 - \mu \frac{\partial}{\partial z} \nabla^2 \psi_2$$

Bu denklem ve (1.7) bağıntısının aynı şekilde yazılacak olan diğer iki denklemi, aşağıdaki ifadelerin kökleri olan φ ve ψ fonksiyonları ile sağlanabilir.

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad \nabla^2 \psi_i = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial t^2} \quad i=1,2,3 \quad (1.8)$$

Bu ifadelerde

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1.9)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

dur.

Bu dalga denklemleri elastik bir katı ortam içerisinde α ve β hızları ile yayılan iki dalga tipinin mevcut olduğunu gösterir. Bu dalgalar ortamı geometrik limitlerinden bağımsız olarak karakterize ederler.

1.4 Küresel Dalgalar

Bu tip dalgalar noktasal bir kaynak tarafından doğururlar. Tabakalı ortamlarda dalga yayılması sırasında küresel simetri kalmaz, fakat birçok hallerde eksenel simetri kalabilir.

Silindirik koordinatlar r, z, θ (z eksenı kaynaktan geçer ve tabakalara diktir) ve r ve z doğrultusundaki yer değiştirme bileşenleri q ve w ile gösterilirse iki hareket denklemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$(\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial q}{\partial r} - \frac{q}{r^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial r} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial r} \right) = \rho \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \quad (1.10)$$

$$(\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 q}{\partial z \partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\mu}{r} \left(\frac{\partial q}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \mu \left(\frac{\partial^2 q}{\partial z \partial r} - \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

Eksenel simetri sebebiyle φ açısı görülmez.

(1.1) numaralı bağıntılarda belirlenmiş potansiyeller yerine aşağıdaki ifadelerdekini kullanıyoruz.

$$q = \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{\partial W}{\partial z} \quad (1.11)$$

$$\omega = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial(rW)}{r \partial r}$$

(1.11) numaralı değerlerin (1.10) denklemlerinde yerine konmasıyla elde edilecek eşitlikler, aşağıdaki ifadelerin çözümü olan φ ve W fonksiyonları ile sağlanabilir.

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (1.12)$$

$$\nabla^2 W - \frac{1}{r^2} W = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}$$

Silindirik koordinatlarda

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

dir.

(1.12) numaralı denklemlerden birincisi bir dalga denklemidir ve ikincisinde W fonksiyonu

$$W = - \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (1.13)$$

ile gösterilen başka bir fonksiyonla ifade edilebilir. O zaman eğer ψ

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (1.14)$$

dalga denkleminin çözümü ise W fonksiyonunun ikinci denklemi sağladığı kolayca görülür.

1.5 Düzlem Dalgalar

Bir elastik ortamın bir noktasında bir kaynak tarafından doğurlan dalgalar bu kaynaktan itibaren her doğrultuda yayılırlar. Fakat pertürbasyon merkezinden uzak mesafede bu dalgalara Düzlem Dalgalar gözüyle bakılabilir.

Dış normalinin kosinüs direktörleri v_1, v_2, v_3 olan bir L hattı boyunca dalga boyu ℓ olan bir düzlem dalga sisteminin c hızı ile yayıldığını kabul edelim. Bu hal için yer değiştirme bileşenleri u, v, ω aşağıdaki denklemlerle verilebilir.

$$\begin{aligned} u &= A_1 e \left[i \frac{2\pi}{\ell} (v_1 x + v_2 y + v_3 z - ct) \right] \\ v &= A_2 e \left[i \frac{2\pi}{\ell} (v_1 x + v_2 y + v_3 z - ct) \right] \\ \omega &= A_3 e \left[i \frac{2\pi}{\ell} (v_1 x + v_2 y + v_3 z - ct) \right] \end{aligned} \quad (1.15)$$

Bu u, v, ω değerlerini (1.7) numaralı hareket denklemlerinde yerine koyarsak (kütle kuvvetleri ihmal edilecek) A_i ye göre lineer homojen olan (1.16) numaralı üç denklemi elde ederiz.

$$-\rho c^2 A_1 + (\lambda + \mu) v_1 (A_1 v_1 + A_2 v_2 + A_3 v_3) + \mu A_1 = 0$$

$$-\rho c^2 A_2 + (\lambda + \mu) v_2 (A_1 v_1 + A_2 v_2 + A_3 v_3) + \mu A_2 = 0 \quad (1.16)$$

$$-\rho c^2 A_3 + (\lambda + \mu) v_3 (A_1 v_1 + A_2 v_2 + A_3 v_3) + \mu A_3 = 0$$

A_i nin katsayıları $\vec{S}$ yer değiştirme vektörünün bileşenlerini tayin edeceklerdir. $\vec{S}$ vektörünü L hattı doğrultusundaki B ve birbirlerine ve aynı zamanda B ye dik olan C ve D vektörlerinin bileşkesi olarak tasavvur edebiliriz. (1.16) numaralı denklemleri basitleştirmek gayesiyle z eksenini L doğrultusunda x ve y eksenlerini de C ve D doğrultularında alırsak aşağıdaki sonuçları elde ederiz.

- B bileşeni için $v_1 = v_2 = 0$ $v_3 = 1$ olur.
 (1.16) nomu denklemde $A_1 = A_2 = 0$ $A_3 = B$ koyarız.
 C bileşeni için $v_2 = v_3 = 0$ $v_1 = 1$ olur.
 (1.16) nolu denklemde $A_2 = A_3 = 0$ $A_1 = C$ koyarız.
 D bileşeni için $v_1 = v_3 = 0$ $v_2 = 1$ olur.
 (1.16) nolu denklemde $A_1 = A_3 = 0$ $A_2 = D$ koyarız.

Böylece (1.16) numaralı denklemler aşağıdaki şekle gelir.

$$\begin{aligned} -\rho c^2 C + \mu C &= 0 \\ -\rho c^2 D + \mu D &= 0 \\ -\rho c^2 B + (\lambda + \mu) B &= 0 \end{aligned} \quad (1.17)$$

(1.17) numaralı denklemlere göre $c = \alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ hızının dalga yayılması doğrultusuna paralel yer değiştirme bileşenine, ve $c = \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ hızının ise birbirlerine ve yayılma doğrultusuna dik olan iki yer değiştirme bileşenine ait olduğu kolayca görülür.

Bu duruma göre L hattı boyunca yayılan dalga sistemi üç farklı kısımdan meydana gelmiştir.

1) α hızı ile yayılan P dalgaları - Boyuna Dalgalar - Dönmesiz Dalgalar - Genleşme Dalgaları

2) Hızları β olan SV dalgaları - Enine Dalgalar - Kesme Dalgaları - Biçim Değiştirme Dalgaları

3) β hızı ile yayılan SH dalgaları - LOVE dalgaları. Sınır Şartları bu dalgaların yollarda mevcut olmadığını gösterdiği için çalışmalar sırasında bu dalgalar incelenmemiştir.

1. 6 Yüzey Dalgaları - RAYLEIGH Dalgaları

1. 6.1 Serbest Yüzeyli Yarı Sonsuz Ortam Hali

Rayleigh, serbest yüzeyli bir elastik yarı sonsuz ortamın yüzeyinde meydana gelen, yüzeyde yayılan ve ayrıca yüzeyden itibaren ancak birkaç dalga boyu kadar ortamın içine nüfuz eden YÜZEY DALGALARI'na ait teoriyi kurmuştur.

1) Pertürbasyonun y den bağımsız olması

2) Doğrultusu ortamın içine doğru alınmış olan Z eksenini takiben pertürbasyonun hızla azalması şartıyla x ekseninde doğrultusunda yayılan bir basit harmonik dalga serisi tasavvur edelim. İkinci şartı sağlayan dalgalar YÜZEY DALGALARI adını alır. Birinci şart ise bizi y ye göre kısmî türevlerin sıfır olması neticesine götürür ve (1.1) numaralı denklemler aşağıdaki şekli alır.

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi_2}{\partial z} \\ v &= \frac{\partial \psi_1}{\partial z} - \frac{\partial \psi_3}{\partial x} \\ \omega &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi_2}{\partial x} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Bir basit burkulmaya tekabül eden v bileşeni ile ilgilenmiyeceğiz. Buradan

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1.19)$$

$$\nabla^2 \psi_2 = \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}$$

bulunur.

Bu bağıntılara bakılınca φ fonksiyonunun bir genleşme, (P) dalgasına ve ψ_2 fonksiyonunun ise bir biçim değiştirme (SV) dalgasına tekabül ettiği görülür.

$z = 0$ için sınır şartlarını sağlamak için (1.8) numaralı denklemlerin aşağıda (1.20) numaralı bağıntılarla gösterilen şekildeki çözümleri kullanılmalıdır.

$$\varphi = f(z) e^{ik(ct - x)}$$

$$\psi_2 = g(z) e^{ik(ct - x)} \quad (1.20)$$

$$k = \frac{2\pi}{\ell}$$

Bu hal için üslü terimler özdeş olmalıdır.

φ i (1.8) numaralı denklemde yerine koyunca

$$\frac{d^2 f}{dz^2} + \left(\frac{c^2}{\alpha^2} - 1 \right) k^2 f = 0 \quad (1.21)$$

elde ederiz. Bu denklemin integrali

$$f(z) = A_1 e^{ik \left[\sqrt{\frac{c^2}{\alpha^2} - 1} z \right]} + A_2 e^{-ik \left[\sqrt{\frac{c^2}{\alpha^2} - 1} z \right]} \quad (1.22)$$

olur. Bu sonuçtan hareket ederek (1.20) numaralı denklemlerin çözümünü aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\begin{aligned} \varphi &= A_1 e^{ik \left[ct + z \sqrt{\frac{c^2}{\alpha^2} - 1} - x \right]} + A_2 e^{ik \left[ct - z \sqrt{\frac{c^2}{\alpha^2} - 1} - x \right]} \\ \psi_2 &= B_1 e^{ik \left[ct + z \sqrt{\frac{c^2}{\beta^2} - 1} - x \right]} + B_2 e^{ik \left[ct - z \sqrt{\frac{c^2}{\beta^2} - 1} - x \right]} \end{aligned} \quad (1.23)$$

Fakat bunlar genel denklemlerdir. Yarı sonsuz ortamda tabakaların bulunmaması sebebiyle yansıyan dalgalar yoktur. Genel denklemler yarı sonsuz ortamın sınır şartlarına uydurularak aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir.

$$\varphi = A e^{ik \left[ct \pm \sqrt{\frac{c^2}{\alpha^2} - 1} z - x \right]} \quad (1.24)$$

$$\psi_2 = B e^{ik \left[ct \pm \sqrt{\frac{c^2}{\beta^2} - 1} z - x \right]} \quad 0 \leq z \leq +\infty \quad (1.25)$$

Burada $c < \beta < \alpha$ olmalı ve $z \rightarrow \infty$ olduğu zaman potansiyeller sıfıra varacak şekilde işaret seçilmelidir.

Sınır şartlarına göre P_{zx} ve P_{zz} gerilmeleri sıfırdır.

$$\begin{aligned} \left[P_{zx} \right]_{z=0} &= 0 \rightarrow \mu \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial z^2} \right) = 0 \\ \left[P_{zz} \right]_{z=0} &= 0 \rightarrow \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial \omega}{\partial z} = \lambda \nabla^2 \varphi + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x \partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (1.26)$$

Buradan hareketle (1.24) ve (1.25) numaralı denklemleri kullanarak aşağıdaki bağıntıları buluruz.

$$\begin{aligned} \pm 2 \sqrt{\frac{c^2}{\alpha^2} - 1} A + \left(2 - \frac{c^2}{\beta^2} \right) B &= 0 \\ \left(2 - \frac{c^2}{\beta^2} \right) A \pm 2 \sqrt{\frac{c^2}{\beta^2} - 1} B &= 0 \end{aligned} \quad (1.27)$$

A ve B nin sıfırdan farklı değerler olması için c parametresinin (1.27) numaralı denklemlerin determinantını sıfıra eşitleyerek elde edeceğimiz (1.28) numaralı denklemi sağlaması gerekir.

$$\left(2 - \frac{c^2}{\beta^2} \right)^2 = 4 \left(1 - \frac{c^2}{\alpha^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{c^2}{\beta^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.28)$$

Bu RAYLEIGH DENKLEMİ'ni $\frac{c^2}{\beta^2}$ faktörüne göre düzenleyelim.

$$\frac{c^2}{\beta^2} \left[\frac{c^6}{\beta^6} - 8 \frac{c^4}{\beta^4} + c^2 \left(\frac{24}{\beta^2} - \frac{16}{\alpha^2} \right) - 16 \left(1 - \frac{\beta^2}{\alpha^2} \right) \right] = 0 \quad (1.29)$$

Eğer $c = 0$ ise (1.24) ve (1.25) numaralı denklemler zamana tabi değildirler. (1.27) numaralı bağıntılara göre $A = -iB$ ve $u = \omega = 0$ dır. (1.29) numaralı denklemin ikinci terimi $c = 0$ ve $\beta < \alpha$ için negatif ve $c = \beta$ için ise pozitiftir. $0 < c < \beta < \alpha$ için denklemin daima bir kökü vardır ve bu şartlarda yüzey dalgaları mevcuttur.

Sıkıştırılamayan bir katı için $\alpha \rightarrow \infty$ halinde (1. 29) numaralı denklem aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{c^6}{\beta^6} - 8 \frac{c^4}{\beta^4} + 24 \frac{c^2}{\beta^2} - 16 = 0 \quad (1.30)$$

c^2 ye göre üçüncü dereceden olan bu denklem $c^2 = 0,91275 \beta^2$ için reel bir köke sahiptir. Bu ise $c = 0,95 \beta$ hızıyla yayılan yüzey dalgalarına tekabül eder. Denklemin diğer iki kökü komplekstir ve yüzey dalgalarını temsil etmezler.

Bu durumda RAYLEIGH dalgalarının (yüzey dalgalarının) hızı $c = c_R$ için aşağıdaki bağıntıyı buluyoruz demektir.

$$\frac{c_R}{\beta} = F \quad (1.31)$$

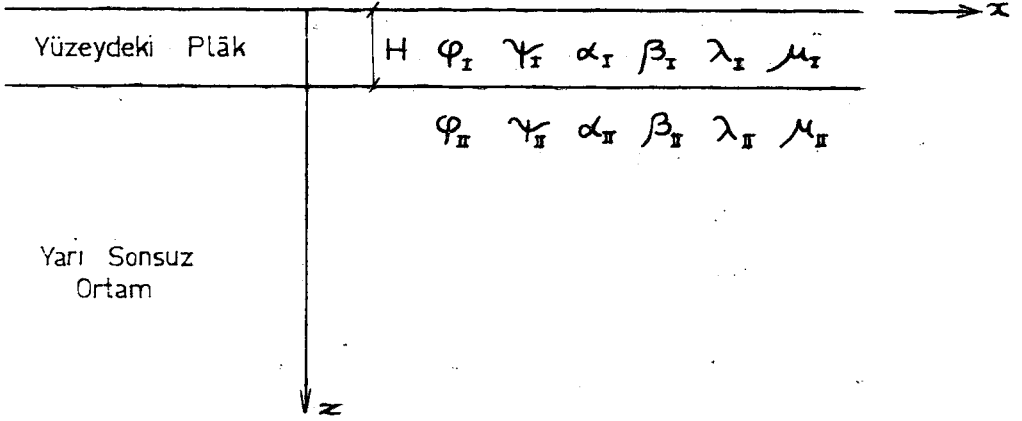
F , 0,9 mertebesinde ve POISSON oranıyla (ν) değişir. KNOPOFF eğrilerinden hareketle aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$\begin{aligned} 0 < \nu < 0,20 & \quad F(\nu) = 0,18 \, 25 \, \nu + 0,875 \quad (1.32) \\ 0,20 < \nu & \quad F(\nu) = -0,0833 \, \nu^2 + 0,20 \, 6666 \, \nu + 0,8735 \end{aligned}$$

1. 6. 2. Tabakalı Yarı Sonsuz Ortam Hali

Rayleigh dalgaları elastik ortamın geometrik yapısını karakterize ederler. Elastik sistemin yüzeyinde kalınlığı az olan bir tabaka olması halinde hızları frekansla değişir. Bu hale tekabül eden RAYLEIGH denklemini elde edebilmek için sınır şartlarını gözönüne alarak çok uzun bir hesap yapmak gerekir.

Bir elastik yarı sonsuz ortamın, H sabit kalınlıklı yatay bir tabaka (plak) ile örtüldüğünü düşünelim, (Şekil 1.1). (1. 23), (1. 24) ve (1. 25) numaralı denklemlere göre belirtilmiş olan φ_I, ψ_I ve φ_{II}, ψ_{II} potansiyelleri düzlem dalgaların her iki ortamdaki yayılımını ifade ederler.



Şekil 1.1

$$\begin{aligned}
 \varphi_I &= A e^{[i(\omega t - kx) - P_I z]} + B e^{[i(\omega t - kx) + P_I z]} \\
 \gamma_I &= C e^{[i(\omega t - kx) - S_I z]} + D e^{[i(\omega t - kx) + S_I z]} \\
 \varphi_{II} &= E e^{[i(\omega t - kx) \pm P_{II} z]} \\
 \gamma_{II} &= F e^{[i(\omega t - kx) \pm S_{II} z]}
 \end{aligned} \tag{1.33}$$

Yukarıdaki denklemlerle

$$S = ik \sqrt{\frac{c^2}{\beta^2} - 1}$$

$$P = ik \sqrt{\frac{c^2}{\alpha^2} - 1}$$

$$\omega = k \cdot c = \frac{2\pi}{\rho} \quad c = 2\pi n$$

n = Frekans

φ_{II} ve ψ_{II} potansiyelleri $z \rightarrow +\infty$ olması halinde sifıra yaklaşırlar.

Elastik sistemimizin sınır şartlarına göre aşağıdaki bağıntıları yazabiliriz.

$$\left. \begin{aligned} P_{zz} &= (\lambda_I + 2\mu_I) \nabla^2 \varphi_I - 2\mu_I \left(\frac{\partial^2 \varphi_I}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_I}{\partial x \partial z} \right) = 0 \\ P_{zx} &= \mu_I \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_I}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \psi_I}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_I}{\partial x^2} \right) = 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &(1.34) \\ &z=0 \text{ için} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} u_I &= \frac{\partial \varphi_I}{\partial x} - \frac{\partial \psi_I}{\partial z} = u_{II} = \frac{\partial \varphi_{II}}{\partial x} - \frac{\partial \psi_{II}}{\partial z} \\ \omega_I &= \frac{\partial \varphi_I}{\partial z} + \frac{\partial \psi_I}{\partial x} = \omega_{II} = \frac{\partial \varphi_{II}}{\partial z} + \frac{\partial \psi_{II}}{\partial x} \\ \left[P_{zz} \right]_I &= \left[P_{zz} \right]_{II} \quad \left[P_{zx} \right]_I = \left[P_{zx} \right]_{II} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &(1.35) \\ &z=H \text{ için} \end{aligned}$$

Böylelikle altı homojen denklem elde ediyoruz. Çözüm için denklemler sisteminin altıncı dereceden olan determinantını sifıra eşitlemek lâzımdır.

1.7 Bir titreşimin Genliğinin Titreşim Kaynağına Mesafeyle Değişimi

Noktasal bir titreşim kaynağının tesir ettiği bir yarı sonsuz ortamın yüzeyinde kaynağa (R) mesafedeki bir noktaya ait düşey yerdeğiştirme aşağıdaki formülle verilir. (Referans 14)

$$U(R) = \frac{1}{2\pi\mu} \int_0^{+\infty} \frac{kd(m^2 - k^2)}{4m k^2 d - (m^2 + k^2)^2} J_0(kR) dk$$

veya başka bir gösterilişle ,

$$U(R) = \frac{1}{2\pi\mu} \int_0^{+\infty} k f(k) J_0(kR) dk$$

$$U(R) = \frac{1}{2\pi\mu} I \quad (1.36)$$

Yukarıdaki formülde

μ : Etüd edilen ortamı teşkil eden malzemenin kayma modülü

R : Düşey yerdeğiştirmesi aranan noktanın titreşim kaynağına mesafesi

ω : $2\pi n$ (n : titreşim frekansı)

J_0 : Bessel fonksiyonudur
m ve d aşağıdaki formüllerle verilir.

$$m = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{\beta^2}} \quad d = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{\alpha^2}}$$

α ve β boyuna ve enine dalgaların ortamdaki yayılma hızları

m ve d parametrelerinden her biri (k) nin alacağı değerlere göre reel veya imajiner bir sayı olabilir.

(1.36) numaralı bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U(R) = A e^{i\varphi} \quad (1.37)$$

A : Düşey yerdeğiştirme hareketinin hesaplanmak istenen genliği

φ : Düşey yer değıştirme hareketinin fazıdır.

Bu durumda genliğin nümerik hesabı $[k f(k) J_0(kR)]$ fonksiyonunun sıfır ile sonsuz arasında integralini almaktan ibarettir. Elde edilecek olan integral (I) kompleks bir fonksiyondur.

1.8 İntegrasyon Metodu

Teoriye göre $R = 0$ için düşey yer değiştirme sonsuzdur. Diğer taraftan basit hesaplara k sonsuza gittiği zaman

$$k f(k) \longrightarrow L = \frac{1}{2\left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} - 1\right)}$$

olduğu görülür.

Bu durumda (I) nin aşağıdaki gibi hesaplanması uygun olur.

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{+\infty} [k f(k) - L] J_0(kR) dk + \int_0^{+\infty} L J_0(kR) dk \\ I &= \int_0^{+\infty} [k f(k) - L] J_0(kR) dk + \frac{L}{R} \quad (1.38) \end{aligned}$$

Yüzey dalgalarının mevcudiyeti $f(k)$ fonksiyonunun $k_0 = \frac{\omega}{C_R}$ noktasında bir kutup ihtiva etmesiyle kendini belirtir. (C_R : Rayleigh -Yüzey dalgalarının ortamdaki yayılma hızı) Bunun için (I) nin hesabında $k f(k)$ fonksiyonunun kuptan ileri gelen kısmını çıkartıp neticeye yüzey dalgalarına ait bir terim ilave etmek gerekir. Yüzey dalgalarının iştiraki aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$\int_0^{+\infty} \frac{k \operatorname{Res}(k_0)}{k^2 - \frac{\omega^2}{C_R^2}} J_0(kR) dk = -\frac{i}{4} \operatorname{Res}(k_0) H_0^{(2)}\left(\frac{\omega}{C_R} R\right) \quad (1.39)$$

Burada $\operatorname{Res}(k_0)$: $f(k)$ fonksiyonunun k^2 değişkenine göre (k_0^2) noktasındaki rezidüsüdür.

$H_0^{(2)}$: Hankel fonksiyonudur.

Basit bir hesaplara

$$\operatorname{Res}(k_0) = \frac{d(m^2 - k^2)}{4md - \frac{2k^2}{md}(m^2 + d^2) - 4(m^2 + k^2)}$$

bulunur.

Netice olarak aşağıdaki hesabı yapmamız gerekir.

$$I = \int_0^{+\infty} \left[k f(k) - L - \frac{k \operatorname{Res}(k_0)}{k^2 - \frac{\omega^2}{C_R^2}} \right] J_0(kR) dk + \frac{L}{R} - \frac{i}{4} \operatorname{Res}\left(-\frac{\omega}{C_R}\right) H_0^{(2)}\left(-\frac{\omega}{C_R} R\right) \quad (1.40)$$

Genlik (A) aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$A = \frac{1}{2\pi\mu} |I| \quad (1.41)$$

1.9 Nümerik Hesap Prensipleri

$$\int_0^{+\infty} \left[k f(k) - L - \frac{k \operatorname{Res}(k_0)}{k^2 - \frac{\omega^2}{C_R^2}} \right] J_0(kR) dk = \int_0^{+\infty} \varphi(k) J_0(kR) dk$$

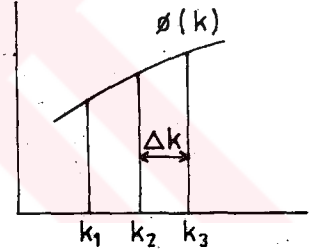
Yukarıdaki integral yerine

$$\int_0^P \varphi(k) J_0(kR) dk$$

yı hesaplıyabiliriz.

(P kafi derecede büyük seçilecektir)

$\varphi(k) J_0(kR)$ fonksiyonunun nümerik integrasyonu Simpson metodu yardımıyla yapılacaktır.



$$\int_{k_1}^{k_2} \varphi(k) dk = \frac{\Delta k}{3} [\varphi(k_1) + 4\varphi(k_2) + \varphi(k_3)]$$

Δk : İntegrasyon adımıdır.

α ve β hızları bilindiğine göre ; Rayleigh hızı (C_R) , $\frac{\omega}{C_R}$ $4m^2 k^2 d - (m^2 + k^2)^2 = 0$ eşitliğinin bir kökü olacak şekilde hassasiyetle hesaplanmalıdır. Bunun için yaklaşık Newton metodundan istifade edilir. Hesabın esas kademelerini aşağıdaki gibi sıralıyabiliriz.

$$- \frac{L}{R} \text{ in hesabı}$$

- C_R in hesabı
- Yüzej dalgalarına ait terimin hesabı
- $\int_0^P \varphi(k) J_0(kR) dk$ nın hesabı

$\varphi(k)$ fonksiyonu $k = \frac{\omega}{\alpha}$ ve $k = \frac{\omega}{\beta}$ noktalarında sıvırlıklar gösterir. Diğer taraftan $\varphi(k)$ fonksiyonu $J_0(kR)$ ile çarpıldığı zaman Bessel fonksiyonundan ileri gelen salınımlar meydana gelir.

1.10. Genliğin Boyutu

Genlik (A), $\frac{L}{R} \frac{1}{2\pi\mu}$ terimi boyutunda olacaktır.

$$[A] = \frac{L^{-1}}{[\mu]} = \frac{L^{-1}}{ML^{-1}T^{-2}}$$

$$[A] = \frac{L}{MLT^{-2}}$$

Burada bir yerdeğiştirmenin kuvvete oranı bahis konusudur.

Hesaplarda α ve β m/sn, ω radyan/sn, μ newton/m² ve R m olarak alınırsa genlik metre cinsinden bulunacak ve ω pülsasyonu ile titreşen 1 newtonluk yüke tekabül edecektir.

Bölüm 2

GOODMAN VİBRÖRÜ METODU

2.1 Giriş

Goodman vibrörü metodu yolların yapılarını bozmadan dinamik olarak incelenmesine yarayan bir metoddur. Bu metodla yolun yüzeyinde sinüsoidal bir titreşim kaynağı tarafından meydana getirilen küçük genlikli titreşimlerin yolda yayılışı etüd edilir. Titreşimlerin yayılma hızlarını dalga boylarına bağlayan eğrinin analizi ile yol hakkında aşağıdaki hususlarda bilgi sahibi olmamız mümkündür.

1) Belirli bir frekans için yol tabakalarının homogenliğinin ve sıkıştırma kalitesinin kontrol edilmesi, bunun için;

- Yol üzerinde, vibrör etrafında sekiz veya daha fazla radyal doğrultu boyunca ölçmeler yapılır ve sonuçlar karşılaştırılır.

- Yol üzerinde bütün genişlik boyunca vibrörün yeri 20 - 50 cm değiştirilerek enine profil ve benzer yolla boyuna profil etüd edilir.

2) Bir yolun inşasından sonra mukavemet yönünden gelişme durumunun belirli zaman aralarıyla incelenmesi (Meselâ 6 ayda bir)

3) İnşa sırasında yolun tabaka tabaka analiz edilmesi, tabakaların arakesitlerinin yataylığının, tabaka kalınlıklarının sabit olup olmadığının kontrolü

4) Yolda bir takviye yapılmışsa takviyeden evvel ve sonra ölçmeler yaparak istenilen sonuca varılıp varılmadığının kontrolü.

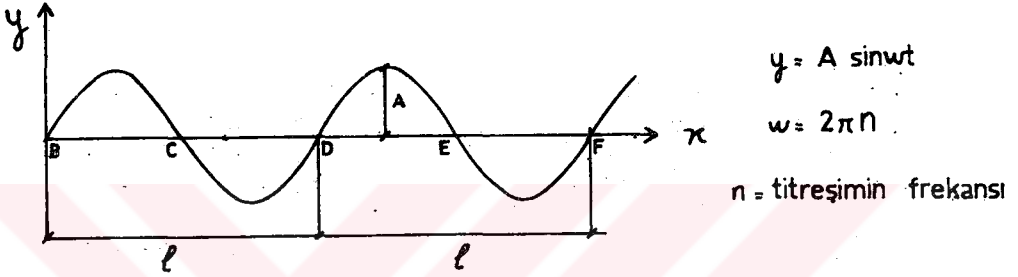
5) Fazla çökme görülen bir noktada bu çökmenin sebebinin belirtilmesi,

6) Yoldaki girinti, çıkıntı ve çatlakların incelenmesi.

2.2. Tarifler

Sık sık kullanılacak olan aşağıdaki tabirlerin tarif edilmesi lüzumludur.

Periyodik titreşim : Titreşime maruz bir nokta eşit zaman aralıklarında aynı duruma geliyorsa periyodik titreşim yapıyor demektir. Periyodik titreşimi aşağıdaki gibi bir şekille temsil edebiliriz (Şekil. 2.1)



Şekil 2.1

Faz : Herhangi bir noktada titreşimin bulunduğu haldir. Şekilde B, D, F noktaları birbirleriyle aynı fazda, B ve C veya C ve D noktaları zıt fazdadırlar

Dalga boyu (ℓ) : Aynı titreşim durumu gösteren yani eşit fazlı noktalar arasındaki mesafedir.

Genlik (A) : Titreşim sırasında, titreşen noktanın orijinal konumuna göre en büyük yer değiştirme miktarıdır.

2.3 Kullanılan Aletler

Yoldaki ölçmeler sırasında kullanılan aletler model üzerindeki çalışmalarda da kullanılmış fakat etüdün özelliği sebebiyle bazen küçük değişiklik ve ilâveler yapmak gerekmiştir. Bu yüzden model üzerindeki çalışma esasına göre aletlerin tanıtılması uygun görülmüştür.

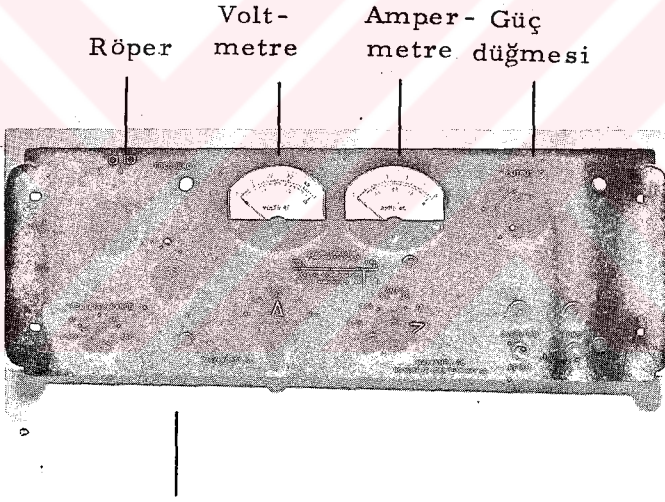
2.3.1 Jeneratörler

Alçak ve yüksek frekanslar için olmak üzere iki tip jeneratör kullanılmıştır.

a) Alçak frekans jeneratörü
 Tip 1308 A General Radio
 Fiyatı : 14000 FF.

20 Hz ile 20 KHz arasındaki frekanslar için kullanılan ve alternatif güç veren bir kaynaktır. Aynı zamanda bir amplifikatör ihtiva eder. Verebileceği maksimum akım şiddeti 5A, gerilim ise 400 V tur. İstenilen frekansı % 3 mertebesinde bir hassasiyetle verir.

Bu aletle çalışırken frekans veya güç değişikliği yapmadan önce muhakkak surette güç düğmesini sıfıra getirmek ve vibröre güç gönderilirken devamlı olarak voltmetre ve ampermetreye bakarak üst sınırların aşılmamasına dikkat etmek gereklidir.



Hassas frekans ayarı düğmesi

Şekil 2.2 BF 1308 A

- b) Yüksek Frekans Jeneratörü
Wavetek
Fiatı : 4000 FF

Röper Güç düğmesi

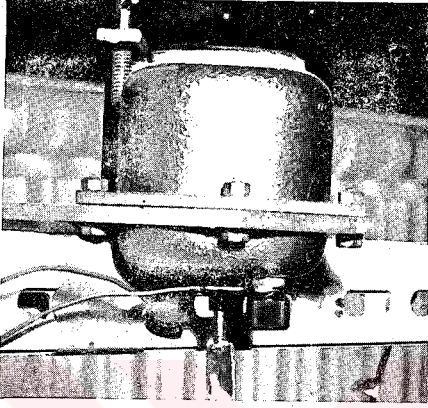


Şekil 2.3 Wavetek

Model üzerindeki çalışmalarda piezoelektrik vibröre enerji vermek için kullanılmış olan bir jeneratördür. Bu jeneratörlerle frekansı 10^6 Hz'e kadar çıkarmak kabildir.

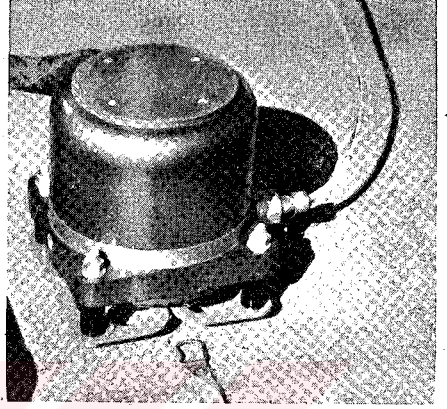
2.3.2 Vibrörler

a) Elektromanyetik Goodman Vibrörü



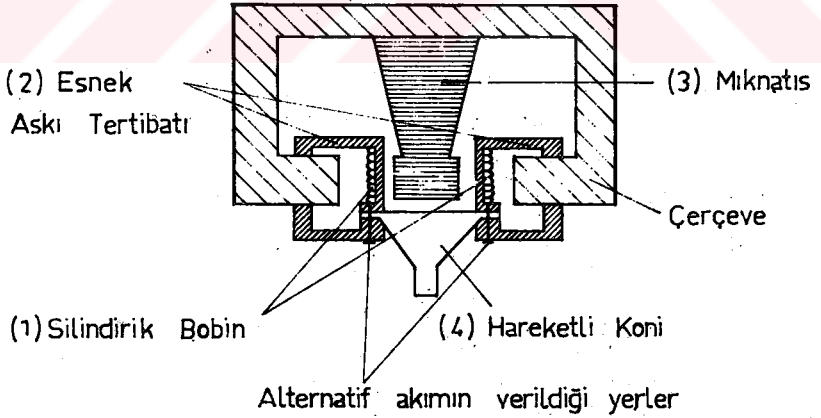
Şekil 2.4

Tip V 47 Fıatı : 1000 FF
Model üzerinde kullanıldı



Şekil 2.5

Tip V 50 Fıatı : 4000 FF
Yolda kullanılır.



Şekil 2.6 Goodman vibrörünün kesiti

Vibrör aşağıdaki kısımları ihtiva eder.

- (1). Manyetik yuvarlak demir üzerine yerleştirilmiş silindirik bobin
- (2). (1) numaralı sistemin üzerine oturduğu esnek askı tertibatı
- (3). Manyetik yuvarlak demirde çok kuvvetli bir manyetik alan yaratan mıknatıs
- (4). Hareketli bobine (1) rijit bir şekilde tesbit edilmiş olan koni

Vibröre alternatif akım verildiği zaman koni, mekanik salınımlar hasıl eder.

Goodman Vibrörü sağlam yapılı olmakla beraber nemden ve sıcaktan korumak gereklidir. Vibrörü naklederken hiçbir zaman pastili üstüne koymamak lâzımdır.

b) Piezoelektrik Vibrör

Fiatı : 150 FF.

Ponts et Chaussées Laboratuvarlarında yapılmıştır. Aşağıda kaptörler kısmında anlatılan piezoelektrik kaptörün ters yönde çalıştırılmasıyla elde edilmiştir. Yani, alete titreşim verip gerilim almak yerine gerilim verilip titreşim meydana getirilmiştir.

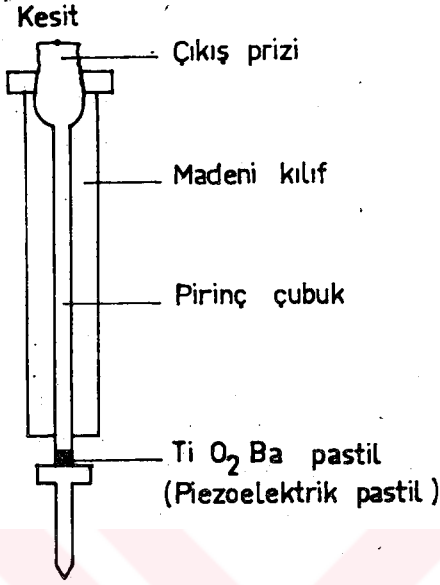
2. 3. 3 Kaptörler

a) Piezoelektrik Kaptör

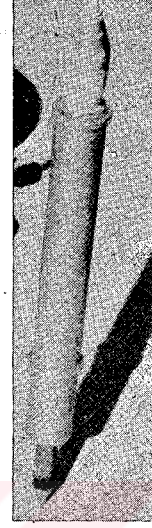
Fiatı : 150 FF

Ponts et Chaussées Laboratuvarlarında imâl edilmiştir. (Şekil 2. 7).

Baryum titanattan (TiO_2Ba) bir pastil mevcuttur. Pastilin rezonansını azaltmak için ucuna piriñten bir çubuk monte edilmiştir. Bu sistem bir madenî kılıf içine yerleştirilmiştir. Piezoelektrik pastilin kendine gelen kuvveti gerilime çevirme özelliği sebebiyle pastilde sinyal alınan noktanın yer değiştirmesiyle orantılı olarak bir gerilim meydana gelir. Bu gerilim bir analizöre (osiloskoba) gönderilerek kaptörün aldığı sinyalin fazı ve genliği incelenir.



Dış görünüş



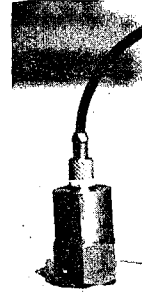
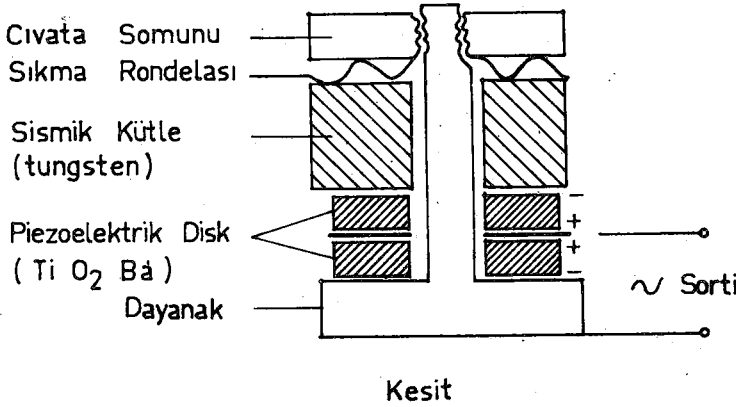
Şekil. 2.7 Piezoelektrik Kaptör

b) Bruël ve Kjaer Kaptörü (B. K. Kaptörü)

Tip 4354

Fiatı : 800 FF

Üç doğrultuda çalışan sismik bir piezoelektrik kaptördür.



Şekil 2. 8 B. K. Köptörü

Kaptör bir titreşime tabi tutulunca, piezoelektrik disk üzerine sismik kütle kendi ivmesi ile orantılı olarak değişen bir kuvvet tatbik eder. Piezoelektrik diskte bu kuvvetle ve dolayısıyla sismik kütlenin ivmesiyle orantılı olan değişken bir gerilim hasıl olur. Netice olarak bu gerilim aynı zamanda alınan titreşimin ivmesiyle de orantılı olmuş olur. Gerilimin değerlendirilmesi piezoelektrik kaptördeki gibidir.

c) Kaptörleri Kullanırken Dikkat Edilecek Hususlar

Ençok ihtimam isteyen aletler bunlardır. Piezoelektrik pastiller kolayca kırılabilirdiğinden nakil sırasında çok dikkatli muhafaza edilmelidir. Ölçmeler sırasında piezoelektrik kaptör daima aynı konumda ve düşey olarak tutulmalıdır. Bunu sağlamak için bir dayanak kullanmak uygun olur. BK kaptörü serbest çalıştırıldığı zaman bir noktaya birçok defalar konduğunda farklı değerler verdiği için ağır bir kılıf ile kılavuzlanarak bu mahzur giderilmiştir.

2.3.4 Filtreler

Bu cihazlar kaptör tarafından gönderilen sinyalleri filtre etmeğe yararlar.

a) Alçak Frekans Amplifikatörü-Selektif Amplifikatör

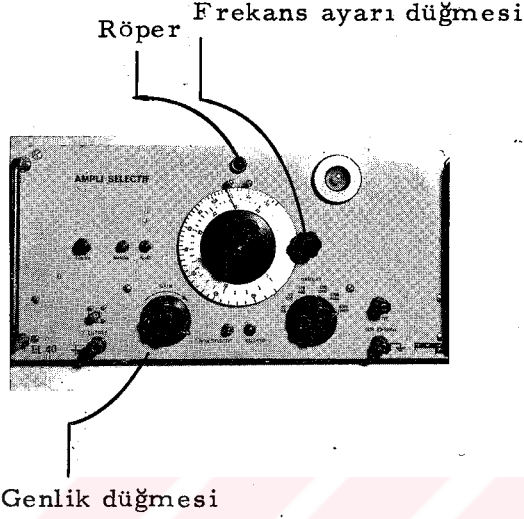
EL - 40 A. O. I. P.

Fiatı : 5000 FF

Elektronik bir cihazdır. İki maksat için Goodman vibrörü devresine konmuştur.

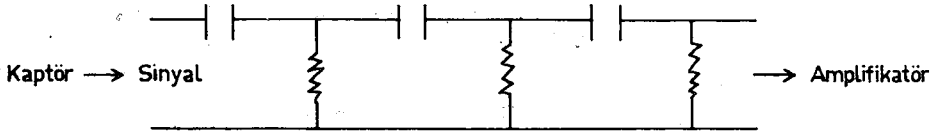
1) Kaptörün gönderdiği sinyal genliğini büyütür. (Ortalama olarak 600 defa) Selektif olarak çalışmadığı hallerde bu iş için kullanılır. Genlik düğmesi maksimum genlik elde edilecek şekilde ayarlanır ve ölçüler sırasında bir daha dokunulmaz.

2) Amplifikatör referans sinyalinin frekansına ayarlanır. Bu ayarlama frekans ayarı düğmesi ile yapılır ve hassasiyet derecesi % 1 dir. Frekans ayarı yapıldıktan sonra düğmeyi oynatmamalıdır. Amplifikatör selektif olarak çalıştığı zaman ayar edildiği frekans dışındaki parazit sinyallerin (yakında çalışan inşaat makinalarının ve trafiğin gürültüsünün) tesirini yok eder.



Şekil 2.9 Selektif Amplifikatör

- b) Yüksek Frekanslar İçin Filtre
(Model üzerindeki çalışmalarda kullanılmıştır)



Şekil 2.10

Alçak frekans amplifikatörü ancak 40 000 Hz'e kadar selektif olarak çalıştığından daha yüksek frekanslarda yukarıdaki basit filtre tertibatı kullanılmıştır. Bu tertibatın vazifesi sadece parazit gürültüleri yok etmektir. Filtreden çıkan sinyal, genliğinin büyütülmesi için amplifikatöre gönderilir.

2.3.5 Ölçü Aletleri

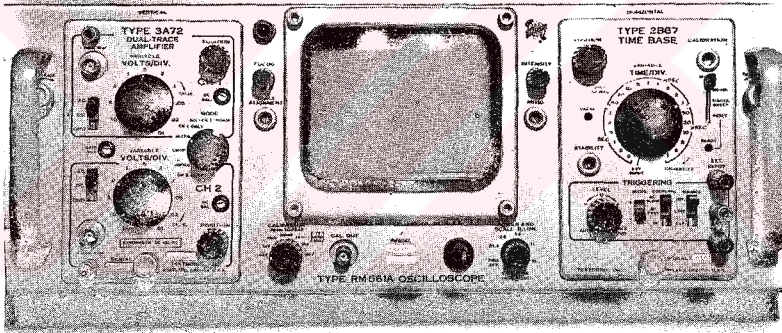
Bu aletler kaptör tarafından gönderilen sinyallerin analizine, faz ve genliklerinin tayinine yararlar.

a) Katodik Osiloskop

RM 561 A TEKTRONIX

Fiatı : 10000 FF

Osiloskop, elektrik olayı, zamanın fonksiyonu olarak gözle görülecek ve incelenecek hale getirir.



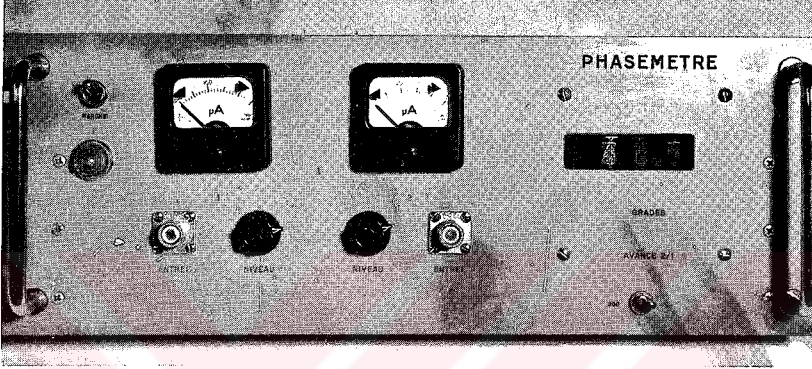
Şekil 2.11 Katodik Osiloskop

Osiloskobun ekranında incelenmesi istenilen gerilim birbirine dik olarak yerleştirilmiş ve anod ile ekran arasında bulunan iki kondansatörün plaklarına verilir. Bu gerilim plaklar arasında bir elektrik alan meydana getirir. Diğer taraftan katod elektronlar doğurur ve bunları anod çeker. Elektronlar demeti kondansatörlerin plakları arasından geçerken yatay plaklar tarafından düşey, düşey plaklar tarafından ise yatay olarak saptırılır. Dolayısıyla ekran üzerinde sinüsoidal bir eğri elde edilir.

b) Fazmetre.

Fiatı : 7000 FF.

Şekil 2.12 de gösterilen alet jeneratörden gelen referans sinyali ile kaptör tarafından yoldan alınarak gönderilen sinyal arasındaki faz farkını grad cinsinden verir.



Şekil 2.12 Fazmetre

2.3.6 Frekansmetre - SCHNEIDER

Fiatı : 4000 FF.

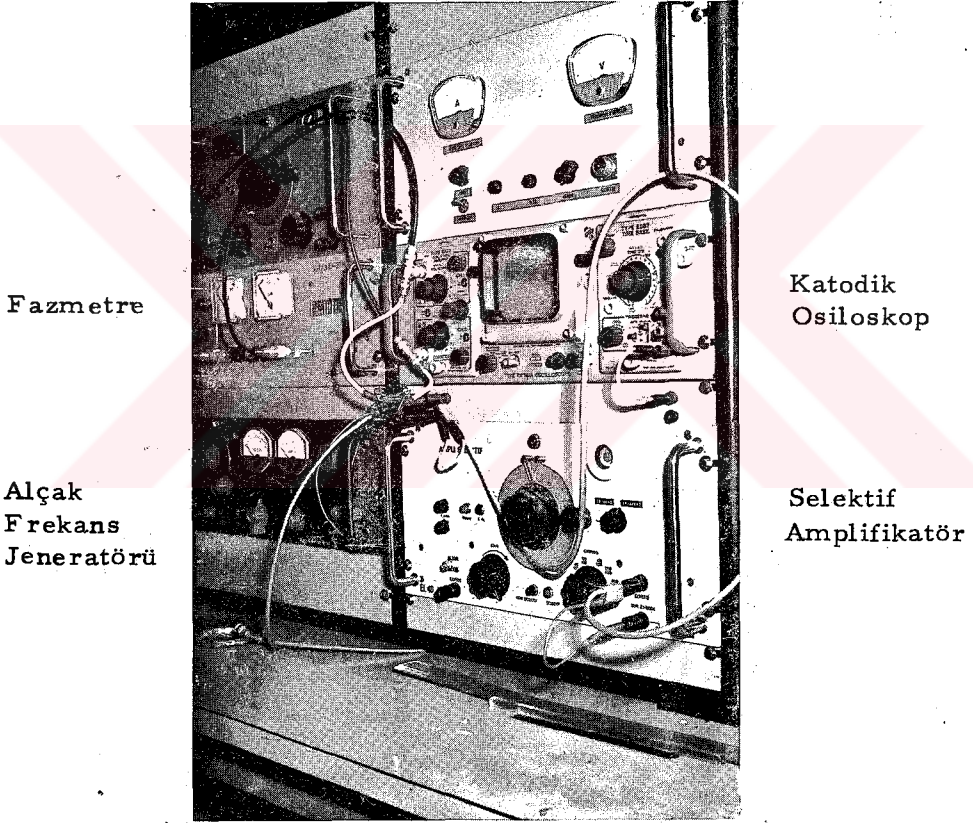


Şekil 2.13 Frekansmetre

Referans sinyalinin frekansı jeneratörde ancak % 3 mertebesinde bir hassasiyetle ayarlanabilir. Bu ise frekansa dayanılarak hesaplanacak hız değerlerine tesir eder. Frekansmetre kullanarak bu mahzur giderilir.

2.3.7 Kamyonet

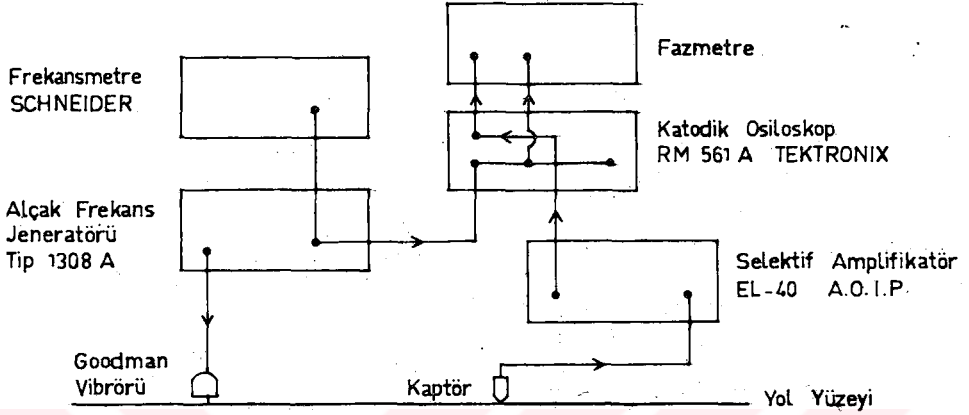
Yukarıda anlatılan alet grubu bir kamyonete yerleştirilmiştir. Aletlerin nakli bu kamyonetle yapılır. Çalışmalar sırasında sadece vibrör ve kaptör yol üzerine konur. Diğer aletler kamyonette kalır.



Şekil 2.14
Aletlerden bir kısmının kamyonete monte edilmiş hali

Aletlerin Toplu Çalışma Şeması

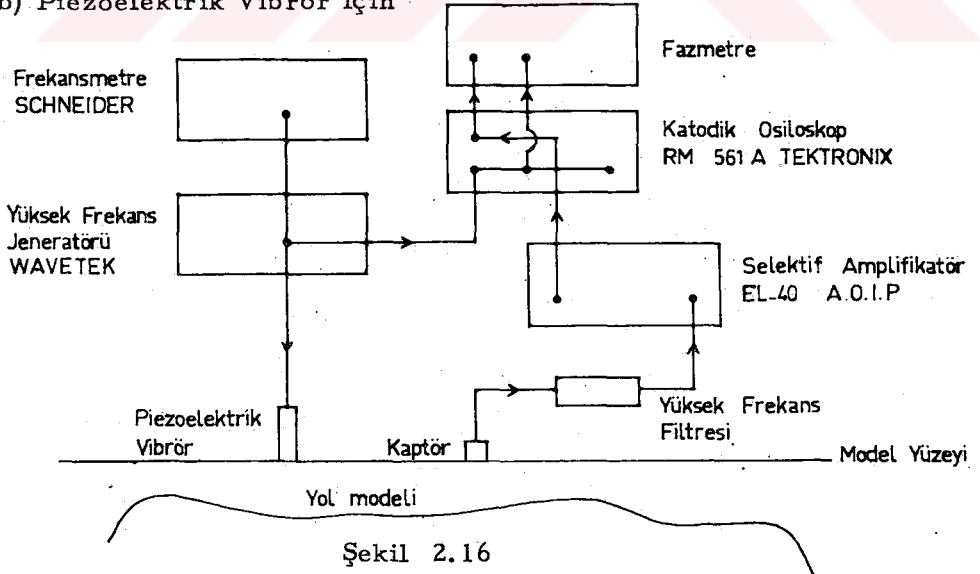
a) Elektromanyetik Goodman Vibrörü İçin



Yol veya yolun modeli

Şekil 2.15

b) Piezoelektrik Vibrör İçin



Yol modeli

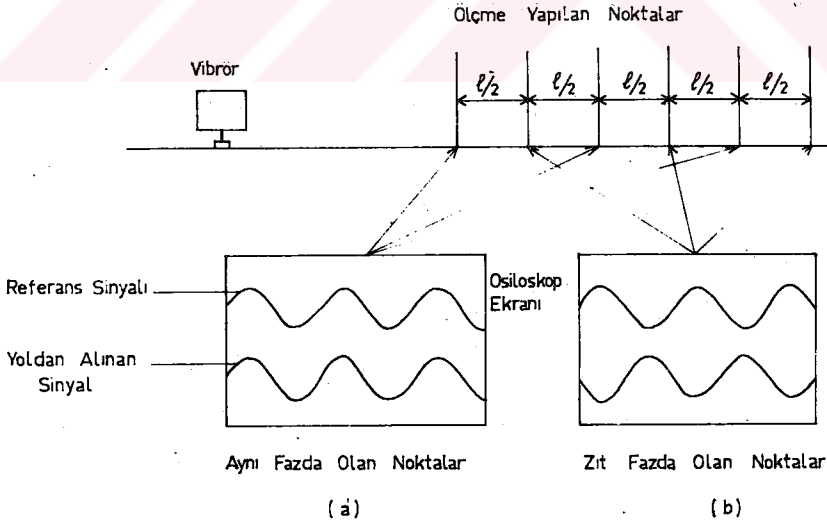
Şekil 2.16

2.4 Aletlerin Toplu Çalışma Prensibi

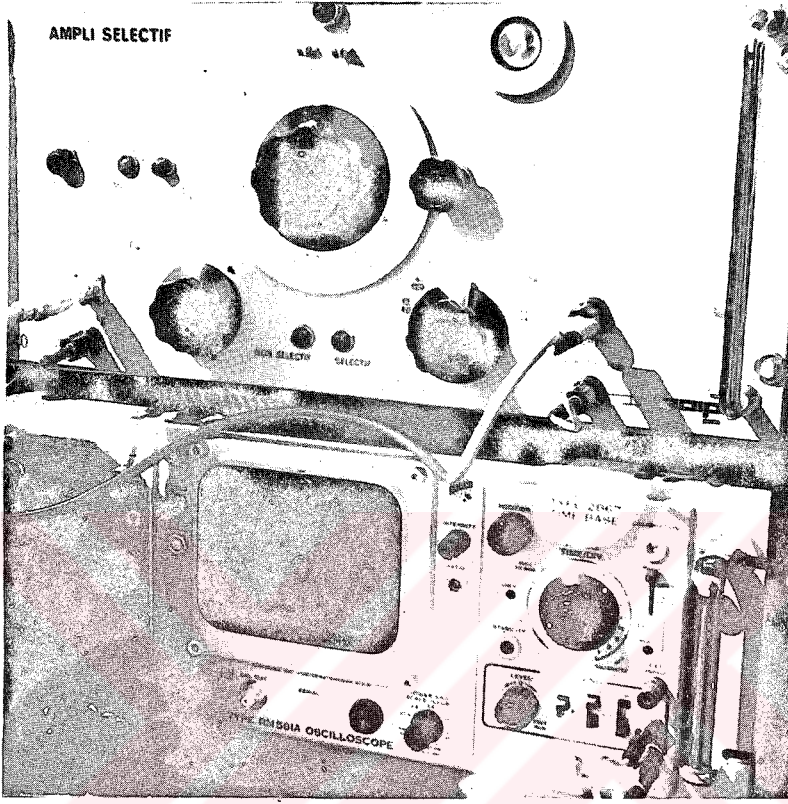
Jeneratör tarafından meydana getirilen gerilim jeneratörün amplifikatörü aracılığıyla vibröre gönderilir. Vibrör kendisine gelen gerilimi sinüsoidal bir titreşime çevirerek yol yüzeyine nakleder. Jeneratörün referans sinyali aynı zamanda osiloskop'un birinci bandına ve fazmetreye gönderilir. Vibrör tarafından yola verilen sinyalin frekansına göre seçilmiş olan kaptör vibröre az bir mesafede yol yüzeyine yerleştirilmiştir. Kaptör yoldan aldığı sinyali selektif amplifikatöre verir. Amplifikatör parazit sinyalleri yok eder ve esas sinyalin genliğini ortalama olarak 600 defa büyütür osiloskobun ikinci bandına ve fazmetreye gönderir. (40000 Hz in üstündeki frekanslarda ilave bir filtre tertibatı kullanılmıştır) Osiloskobun ekranı üzerinde, yola verilen ve yoldan alınan sinüsoidal titreşimler görülür ve iki sinyal arasındaki faz farkı, alınan sinyalin genliği tayin edilir. Fazmetre ise bu faz farkını doğrudan doğruya grad cinsinden verir.

2.5 Ölçme Prensibi

Ölçüler vibrörden geçen radyal bir eksen üzerinde kaptörü oynatarak osiloskobun ekranında görülen referans sinyali ile yoldan alınan sinyalin aynı fazda ve zıt fazda olduğu noktalar aranmak suretiyle yapılır. (Şekil 2.17). Mesafeleri ölçmek için santimetreye kadar bölünmüş bir şerit seçilen ölçü eksenini boyunca yerleştirilmiştir.



Şekil 2.17



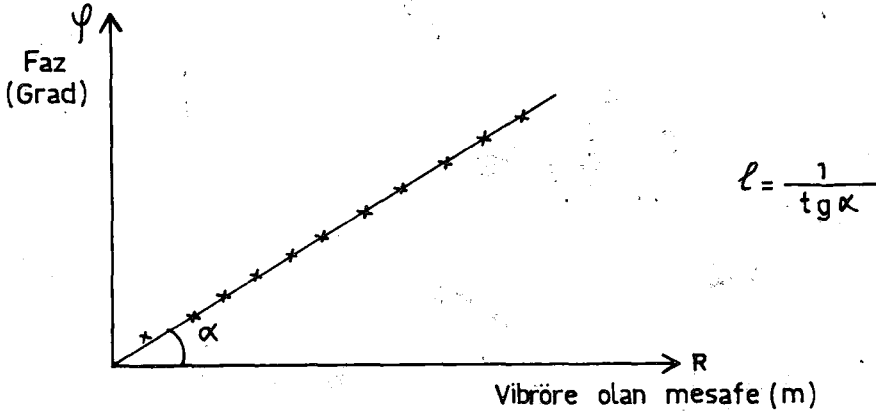
Şekil 2.18

Şekil 2.17 deki (b) halinin osiloskopta görünüşü

Böylece birbirlerinden uzaklıkları dalga boyunun yarısına ($\ell/2$) eşit olan bir noktalar serisi elde edilir. Bundan faydalanılarak ortalama dalga boyu (ℓ) tayin edilir. Yola verilen titreşimin frekansı (n) bilindiğine göre dalgaların yayılma hızı (faz hızı) aşağıdaki bağıntıdan bulunur.

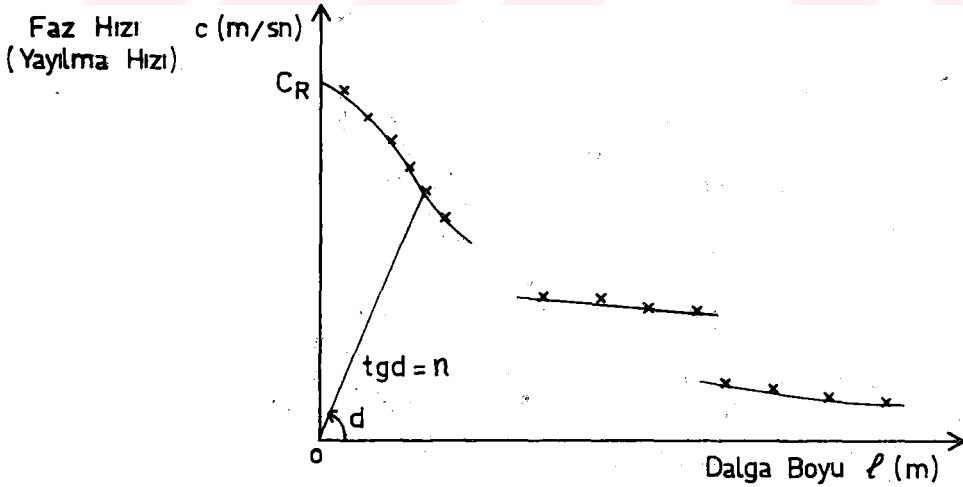
$$c \text{ (m/sn)} = n \text{ (Hz)} \times \ell \text{ (m)} \quad (2.1)$$

Kullanılan Goodman devresi bir fazmetre ihtiva ediyorsa, kaptör, seçilen eksen boyunca vibrörden uzaklaştırıldıkça referans sinyali ile yoldan alınan sinyal arasındaki faz farkı doğrudan doğruya fazmetrenin ekranından grad olarak okunur. Faz-mesafe eğrisi çizilir.



Şekil 2.19

Bu eğrinin meylinin tersi aranılan dalga boyunu verir. Aynı sistemle birçok değişik frekans için ölçmeler yapılarak dalga boyları tayin edilir ve bunlara tekabül eden yayılma hızları (2.1) bağıntısı ile hesaplanır. Bilahare bu değerler $c = f(l)$ dispersiyon eğrisi üzerinde gösterilir. Buna Deneysel Dispersiyon Eğrisi denir. Yolu karakterize eden bu eğri yoldaki tabaka sayısına ve yol tabakalarında titreşimin yayılma hızları arasındaki oranlara bağlı olarak birkaç kısımdan meydana gelmiştir. (Şekil 2.20).



Şekil 2.20

Her Deneyssel Dispersiyon Eğrisi yanında, eğriyi çizmek için kullanılan ölçü tablosu da verilmelidir.

2. 6. Ölçme Yapılacak Noktaların Seçimi

- Yol üzerinde ölçü yapılacak noktaları seçmeden önce yolun yapısına ait mümkün olan bütün bilgileri toplamalıdır. Yolda bir genişletme ve takviye yapılmış olabilir. Bu durumda vibrörü eski yol ile genişletilmiş kısmın arakesitine koymamalıdır.

- Titreşimlerin girişiminin ölçüler üzerindeki etkisini yok etmek için yolun kenarlarına çok yakın noktalarda ölçü yapılmamalıdır. Genel olarak 1, 5-2, 0 metrelik bir mesafe uygundur.

- Faz değişimi vibrör civarında lineer olmadığı için ölçmelere vibrörden en az bir dalga boyu mesafeden başlamalı ortalama olarak 8-10 dalga boyu bir uzaklığa kadar devam etmelidir. Bulunan yayılma hızı değeri nazara alınan dalga boyu sayısı arttığı nisbette hakikate yakın olur.

2. 7 Ölçme Yaparken Dikkât Edilecek Hususlar

-Vibrörün pastilinin yol yüzeyi ile çok iyi temas etmesi sağlanmalıdır.

- Vibrörün konduğu noktalar iyi bir şekilde röperlenmelidir. Bu suretle lüzum görüldüğü takdirde istenilen noktalarda ölçüler tekrarlanabilir.

-Jeneratör maksimum güç, amplifikatör ise maksimum genlik verecek şekilde ayarlanmalıdır.

-Piezoelektrik kaptörü daima aynı konumda ve düşey olarak tutmalıdır. Bunu sağlamak için bir dayanaktan istifade edilebilir. Kaptörün üstüne bastırılınca sinyalin genliği büyür ve ölçüleri yapmak kolaylaşır da bu yol çok hatalı olur. Zira bu sebepten faz farkında meydana gelebilecek değişiklikler bizi yanlış sonuçlara ulaştırır.

-Kaptör yoldan kaldırılınca osiloskobun ekranında görülen sinyal parazit sinyaldir. Bu sinyalin genliği tesbit edilir. Ölçmeler sırasında, kaptörün yoldan alarak gönderdiği sinyalin genliği bu değere düşünce ölçmeye son verilmelidir.

2. 8 Ölçme Neticelerinin Değerlendirilmesi

Goodman vibrörü ile yapılan ölçmelerin geçerli olabilmesi için bir takım ek bilgilerin de verilmesi lüzumludur. Yolu teşkil eden tabakaların kalınlıkları ve bunların inşa edildiği malzemenin granülometrisi, yoğunluğu, su muhtevası kullanılan çimento veya bitüm gibi bağlayıcıların cins ve yüzdeleri tam olarak belirtilmeli ayrıca yolda gözle görülen hususlar, çatlaklar, tekerlek izleri, drenaj tertibatının ve banketlerin durumu tesbit edilmelidir.

Ölçme neticelerinin değerlendirilmesi deneysel dispersiyon eğrilerini değişik yol yapıları için elastisite teorisine göre hesaplanmış teorik eğrilerle karşılaştırmak suretiyle yapılır. Fakat bu karşılaştırmannın, üstteki paragrafta belirtilmesi şart koşulan yol yapısı nazara alınmaksızın yapılması bilahare karşılaştırma ile bulunan sonucun doğruluk derecesinin yola ait bilgilere göre kontrol edilmesi daha uygun olur.

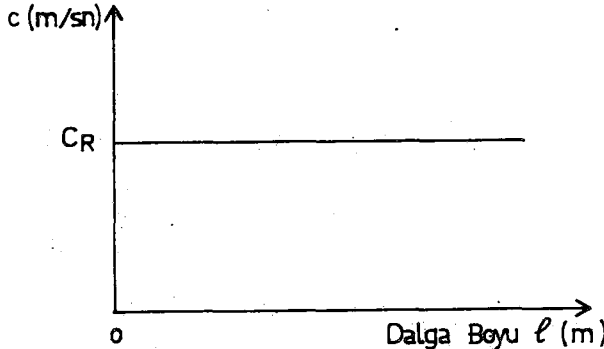
2. 9 Teorik Eğriler

2. 9.1 Yarı Sonsuz Ortam Hali

Tesviye edilerek profiline getirilmiş yol alt yapısı bu hale teka-bül eder. Teorik yünden, yarı sonsuz ortam için, titreşim frekansı ne olursa olsun dalgaların yayılma hızının sabit olduğu öngörülür ve bu sabit hıza Rayleigh hızı denir.

$$c = C_R \text{ sabittir.}$$

Bu durumda dispersiyon eğrisi yatay bir doğrudan ibarettir.



Şekil 2. 21

Rayleigh hızı (C_R) vasıtasıyla ortamın dinamik elastisite modülünü hesaplamak mümkündür.

$$E = 2(1+\nu) \rho \left(\frac{C_R}{F} \right)^2 \quad (2.2)$$

burada,

E = ortamın dinamik elastisite modülü

ν = Poisson oranı

ρ = ortamın yoğunluğu

C_R = Rayleigh hızı

$F = \frac{C_R}{\beta}$ ya eşit olan bir katsayıdır.

Enine ve boyuna dalgaların yayılma hızları β ve α ise aşağıdaki bağıntılarla verilir.

$$\beta = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (2.3)$$

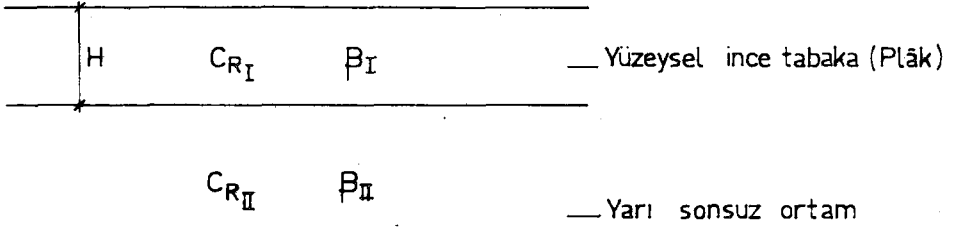
$$\alpha = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

2. 9. 2 Tabakalı Yarı Sonsuz Ortam Hali

Yolalt yapısının üst yapıya ait tabakalarla örtülmesi sonunda bu hale tekabül eden bir yapı elde edilir.

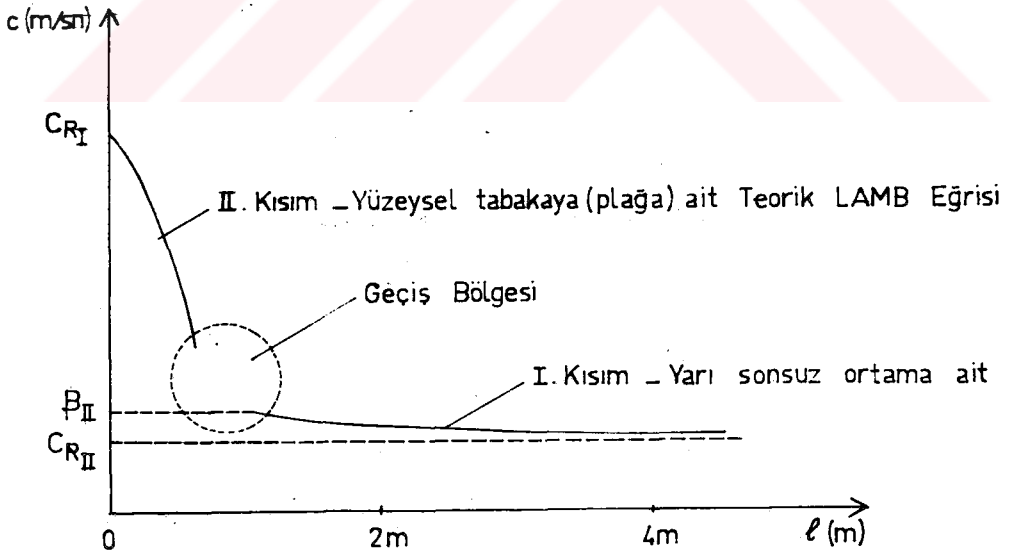
1) Yarı sonsuz ortamın daha rijit ve ince bir tabaka (plâk) ile örtülü olması hali, (Şekil 2. 22)

Teorik dispersiyon eğrisi iki kısımdan meydana gelmiştir. Birinci kısım yarı sonsuz ortama ait olup hemen hemen yatay bir doğrudur. Diğeri ise yüzeysel tabakaya (plağa) aittir. Teorik LAMB eğrisi adıyla anılan bu eğri $\ell=0$ için C_{R1} değerini verir.



$$C_{RI} > C_{RII}$$

Şekil 2. 22



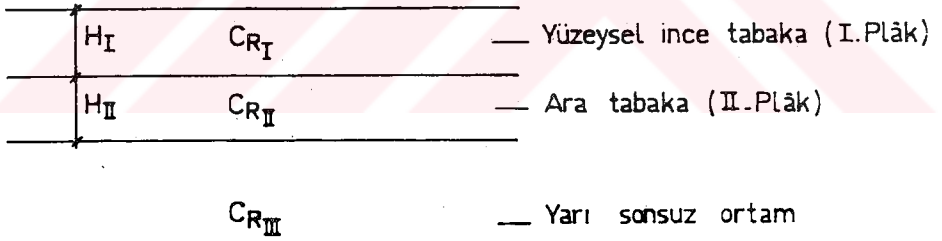
Şekil 2. 23

Toprağın bir plak tarafından örtülmesi halinde 40 Hz ile 200 Hz arasındaki alçak frekanslar için dalga boyları büyük olup 2 metre-nin üstündedir ve dalgalar sabit bir hızla yayılırlar. Bu sabit hız Rayleigh Dalgalarının topraktaki yayılma hızına, (C_{R_I}) ye tekabül eder. 200 Hz ile 500 Hz arasında dalgaların yayılma hızı artar ve enine dalgaların topraktaki yayılma hızına, (β_{II}) ye ulaşır.

500 Hz in üstündeki yüksek frekanslar için dalga boyları küçüktür ve yayılma hızı frekans arttıkça süratli bir şekilde artar, $\varnothing=0$ için yani frekansın sonsuz olması halinde yüzeysel tabakaya ait Rayleigh hızı olan C_{R_I} maksimum değerini alır.

Dispersiyon eğrisinin yukarıda belirtilen iki parçası arasında bir Geçiş Bölgesi mevcuttur. Henüz iyi tanınmayan bu bölgede ölçmeler zor ve az hassastır. Yüzeysel tabaka ile yarı sonsuz ortamın rijitlikleri arasındaki fark arttıkça geçiş bölgesi daralır.

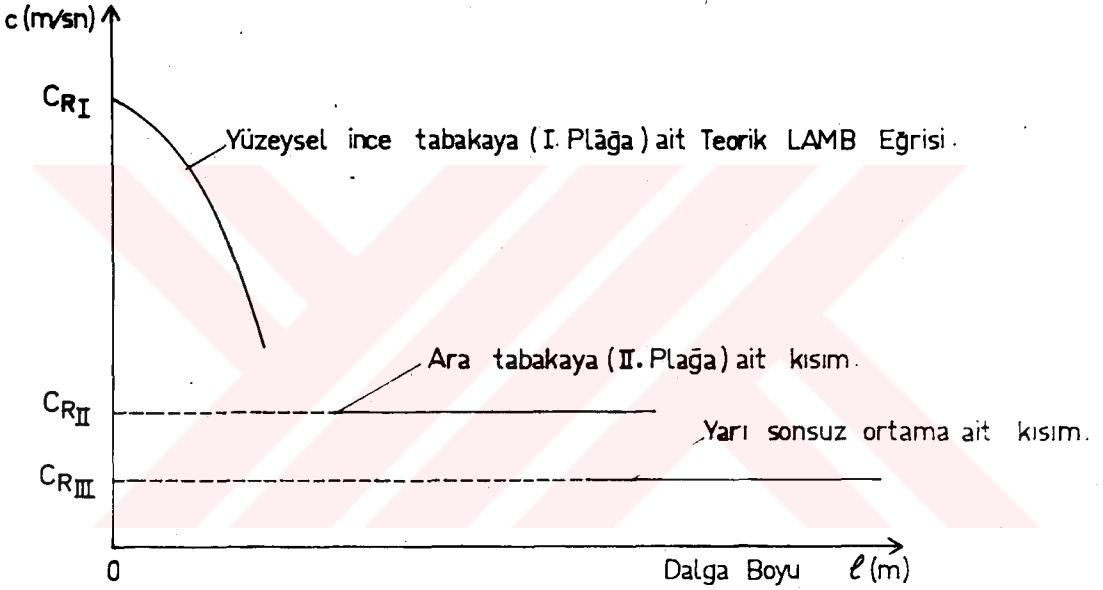
2) Yarı sonsuz ortamın üstüste iki ince tabaka ile örtülü olması hali



Şekil 2. 24

a) Yüzeysel tabakanın rijitliği çok yüksek ise dispersiyon eğrisi Şekil 2.25 deki gibidir.

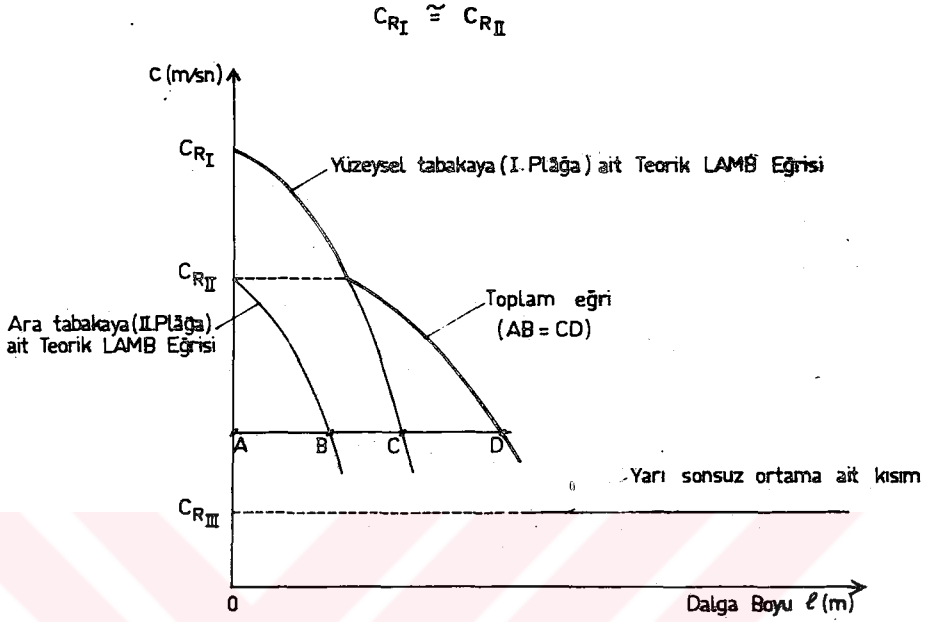
$$C_{RI} \gg C_{RII}$$



Şekil 2.25

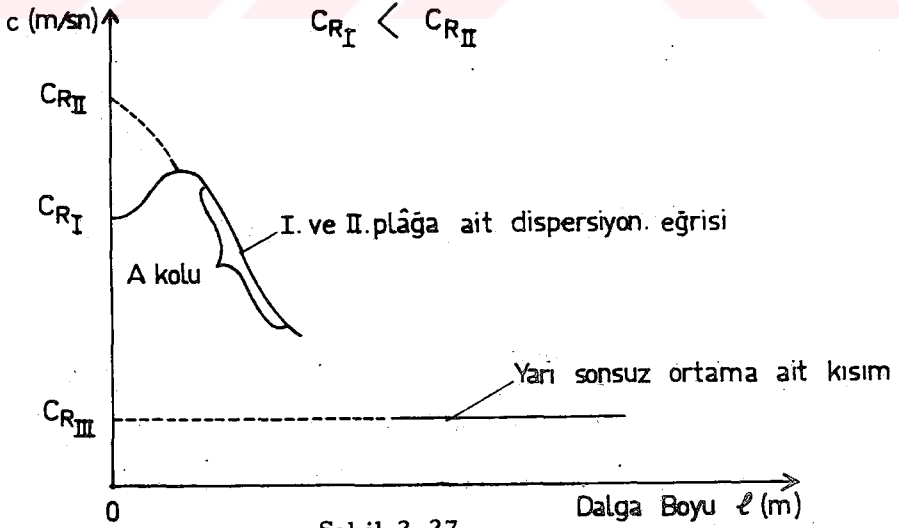
b) Yüzeysel tabakanın rijitliği ara tabakanınkinden çok az fazla ise Şekil 2.26 daki dispersiyon eğrisi elde edilir.

c) Yüzeysel tabaka ve ara tabakanın rijitlikleri eşitse tek bir dispersiyon eğrisi elde edilir. Bu eğri $H_I + H_{II}$ kalınlıklı bir plâğa ait Teorik LAMB Eğrisine tekabül eder.



Şekil 2. 26

d) Şekil 2. 27 yüzeysel tabakanın ara tabakadan daha az rijit olması halindeki dispersiyon eğrisini gösterir.



Şekil 2. 27

Bu durumda Teorik LAMB Eğrilerinin süperpozisyonu geçerli değildir. Diğer hallerde olduğu gibi LAMB eğrilerini kullanarak tabaka kalınlıklarını tayin etmek mümkün olmaz. Zira dispersiyon eğrisi her tabaka için ayrı bir parça (kısım) ihtiva etmez, iki tabakanın karakteristiklerine ve yapıldıkları malzemelere bağlı olan ve bir maksimumu bulunan tek bir eğri halindedir. Çözüm için elektronik hesap makinalarında programlamaya başvurulur. Fakat bu oldukça pahalı ve uzundur.

Ara tabakaya (II. plağa) ait Rayleigh hızını (C_{RII} yi) bulmak için çok basit ve yaklaşık bir metod vardır. Bunun için C_{RI} , H_I , H_{II} değerleri bilinmelidir.

C_{RI} : Deneysel dispersiyon eğrisinden elde edilir (Şekil 2. 27)

H_I, H_{II} : Yoldan alınacak nümune üzerinde tayin edilir veya projeden alınır.

Bundan sonra $H' = H_I + H_{II}$ kalınlıklı plaklara ait Teorik LAMB Eğrilerinden Şekil 2. 27 de verilen dispersiyon eğrisinin A koluna en uygun olanı bulunur. Bu LAMB eğrisinin vereceği hız C'_R olsun. Bilinenleri gözönüne alarak aşağıdaki (2. 4) numaralı bağıntıyı yazabiliriz. Bu bağıntının varlığı çalışmalarla birçok defalar gösterilmiştir.

$$C_{RII} H_{II} + C_{RI} H_I = C'_R H' \quad (2.4)$$

$$C_{RII} = \frac{C'_R H' - C_{RI} H_I}{H_{II}}$$

Bu metodla bulunan C_{RII} değeri elektronik hesap makinalarında hesaplanan değere çok yakındır.

2.10 Teorik LAMB Eğrilerinin Belirtilmesi

LAMB eğrileri serbest plaklar içindir. Yani plakların altında ayrıca bir alt yapının bulunmadığı esas alınarak hesaplar yapılmıştır. Halbuki yoldaki yüzeysel plaklar (üstyapıya ait tabakalar) bir alt yapı üzerine oturmaktadır. Bu sebeple LAMB eğrilerini kullanarak yol yapısının tayini metodu yaklaşık bir metoddur.

LAMB eğrilerinin belirtilmesi için aşağıdaki denklemin sağlanması gerekir.

$$\frac{\text{th } \frac{\pi H}{\ell} \sqrt{1 - \frac{c^2}{\alpha^2}}}{\text{th } \frac{\pi H}{\ell} \sqrt{1 - \frac{c^2}{\beta^2}}} = 4 \frac{\sqrt{1 - \frac{c^2}{\alpha^2}} \sqrt{1 - \frac{c^2}{\beta^2}}}{\left(2 - \frac{c^2}{\beta^2}\right)^2} \quad (2.5)$$

Burada, H : Plağın (tabakanın) kalınlığı

c : Yayılma hızı

ℓ : (c) ye tekabül eden dalga boyu

α : Boyuna dalgaların yayılma hızı

β : Enine dalgaların yayılma hızıdır.

1) Bu fonksiyonu incelemek için $\frac{\beta}{\alpha}$ oranının değerini hesaplamak gerekir. (1. 9) ve (2. 3) numaralı denklemlerde gösterildiği gibi α ve β hızları aşağıdaki eşitliklerle verilir.

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.6)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}} \quad (2.7) \text{ bulunur.}$$

bulunur.

Böylece $\frac{\beta}{\alpha}(\nu)$ eğrisini çizebiliriz. (Şekil 2. 28)

2) $\frac{\ell}{H} = 0$ özel halini inceliyelim. (2. 5) numaralı denkleme göre aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$4 \sqrt{1 - \frac{c^2}{\alpha^2}} \sqrt{1 - \frac{c^2}{\beta^2}} = \left(2 - \frac{c^2}{\beta^2}\right)^2 \quad (2.8)$$

Bu denklemlerde

$$\frac{c}{\beta} = x$$

$$\frac{c}{\alpha} = kx$$

koyarsak (2. 9) numaralı denklemi elde ederiz.

$$x^2 \left[x^6 - 8x^4 + 8(3 - 2k^2)x^2 - 16(1 - k^2) \right] = 0 \quad (2.9)$$

Bu denklemlerde

x daima sıfırdan farklı olduğu için denklem aşağıdaki şekli alır.

$$x^6 - 8x^4 + 8(3 - 2k^2)x^2 - 16(1 - k^2) = 0 \quad (2.10)$$

$c = C_R$ olması halinde (2. 11) numaralı denklemi elde ederiz.

$$\left(\frac{C_R}{\beta} \right)^6 - 8 \left(\frac{C_R}{\beta} \right)^4 + 8(3 - 2k^2) \left(\frac{C_R}{\beta} \right)^2 + 16(1 - k^2) = 0 \quad (2.11)$$

Bu fonksiyona göre $\frac{C_R}{\beta}(\nu)$ eğrisini çizebiliriz (Şekil 2. 29)

3) $\frac{\beta}{\alpha}(\nu)$ ve $\frac{C_R}{\beta}(\nu)$ eğrileri bizce bilindiğine göre $\frac{C_R}{\alpha}(\nu)$

fonksiyonunu da çizebiliriz (Şekil 2. 28).

4) C_R , ℓ ve H değerleri ne olursa olsun geçerli olan eğrileri çizebilmek için $\frac{c}{C_R} \left(\frac{\ell}{H} \right)$ fonksiyonunu incelemek gerekir. $\frac{c}{C_R}$

oranına keyfî bir değer verilir ve $\frac{c}{\alpha}$ ile $\frac{c}{\beta}$ hesaplanır.

Daha sonra (2. 5) numaralı denklemi sağlayan $\left(\frac{\ell}{H} \right)$ değeri bulunur.

Böylece $\frac{c}{C_R} \left(\frac{\ell}{H} \right)$ fonksiyonu çizilebilir. Her Poisson oranı için bir eğri elde edilir (Şekil 2. 30).

LAMB eğrilerini deneysel dispersiyon eğrileri ile karşılaştırabilecek şekilde çizmek için tablolar hazırlanmıştır (Tablo 2.1)

$\frac{p}{\alpha}$

$\frac{p}{\alpha}$

0.8

0.6

0.4

0.2

0

0.1

0.2

0.3

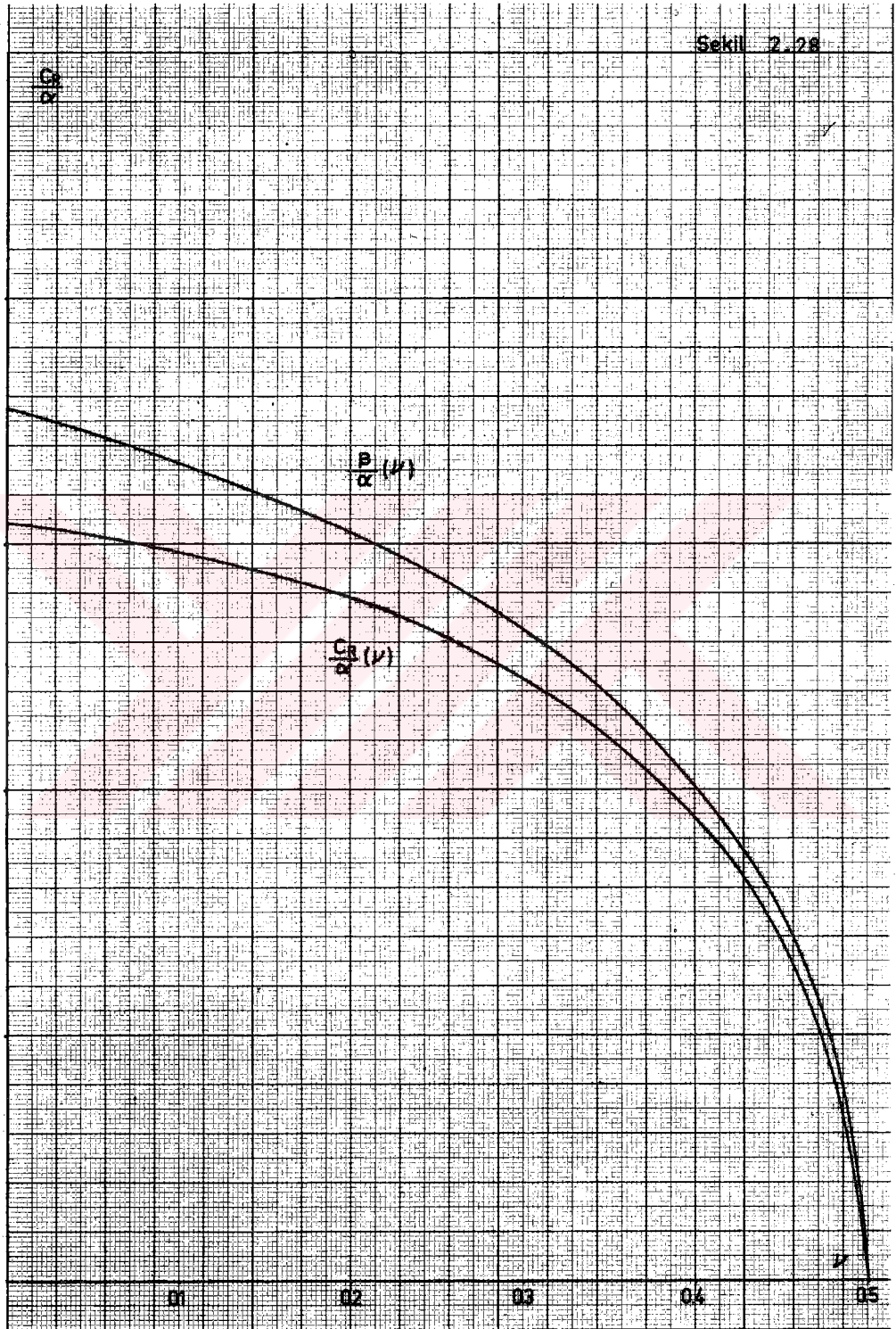
0.4

0.5

$\frac{p}{\alpha}(\nu)$

$\frac{p}{\alpha}(\nu)$

ν



Sekil 2.29

$\frac{C}{P_R}$

0.95

0.94

0.93

0.92

0.91

0.90

0.89

0.88

0.87

0

01

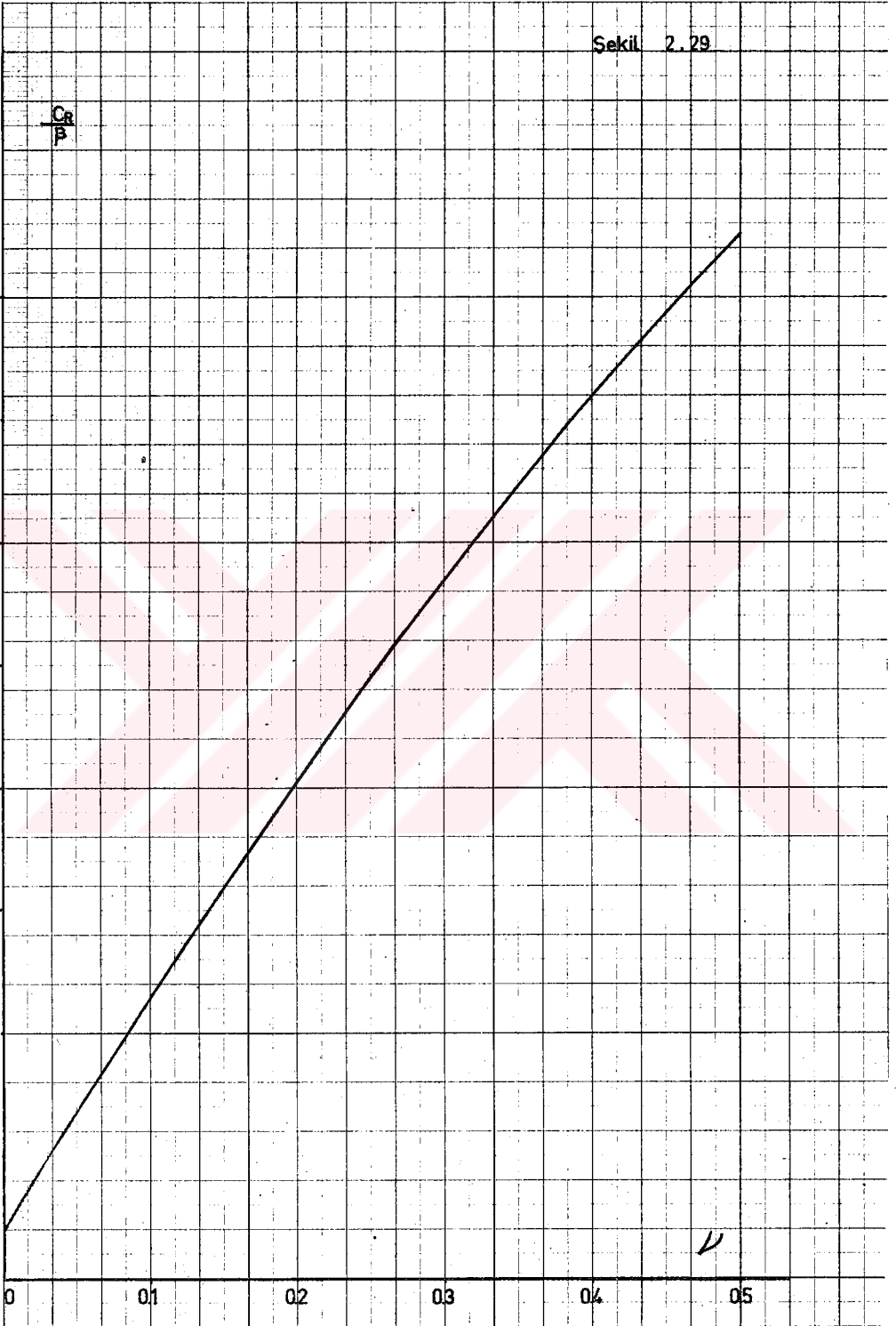
02

03

04

05

✓



$\frac{C}{C_R}$

0.9

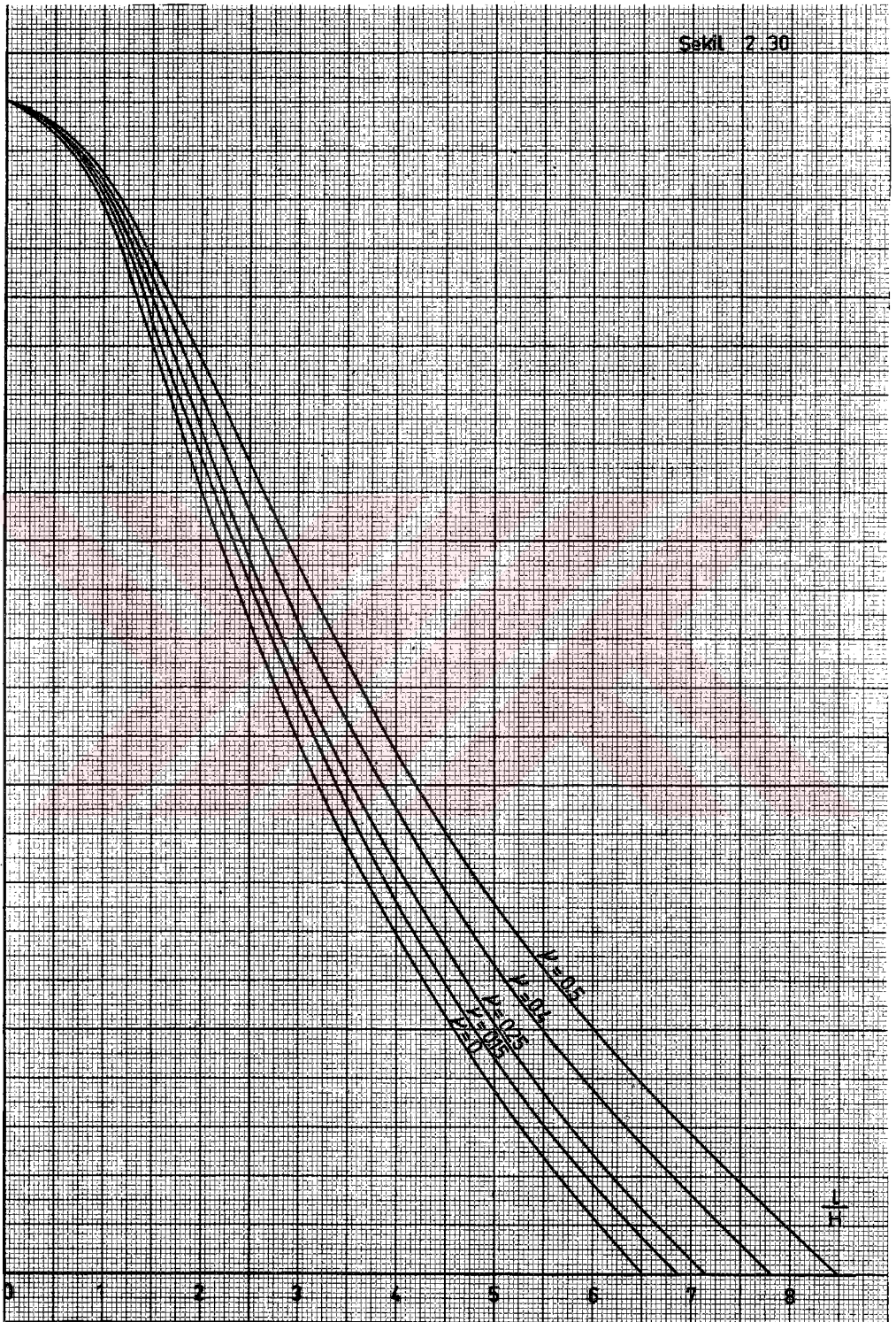
0.8

0.7

0.6

0.5

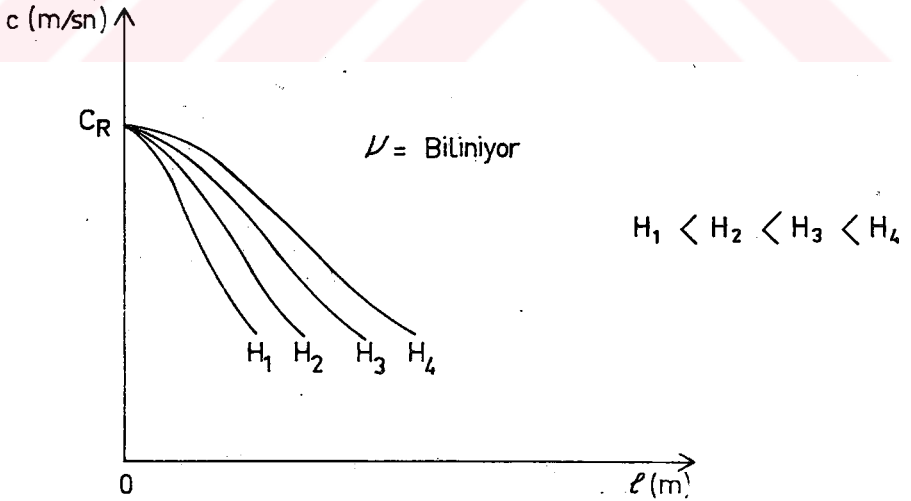
0.4



Poisson Oranı $\nu = 0,25$									
c/c_R	1	0,96	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	
ℓ/H	0	0,95	1,45	2,22	3,05	4,10	5,40	7,20	
H	4,0 cm	0	3,80	5,80	8, 88	12,20	16,40	21,60	28,80
	4,5 cm	0	4,27	6,52	110,00	13,72	18,45	24,30	32,40
	5,0 cm	0	4,75	7,25	11,10	15,25	20,50	27,00	36,00
c_R	1250 m/sn	1250	1290	1125	1000	875	750	625	500
	1300 m/sn	1300	1248	1170	1040	910	780	650	520
	1350 m/sn	1350	1296	1080	1080	945	810	675	540

Tablo 2.1

Tablodan anlaşılacağı üzere belirli bir Poisson oranı için her (c_R) hızında, değişik kalınlıklara tekabül eden eğrilerden meydana gelmiş bir eğriler demeti elde edilir (Şekil 2.31).



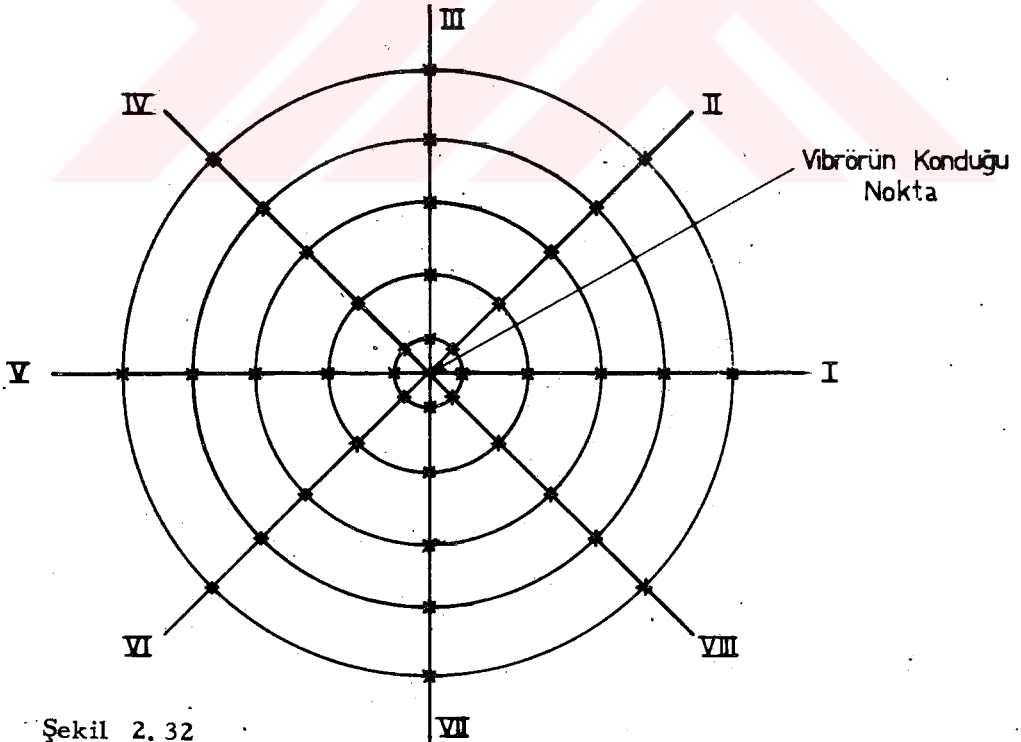
Şekil 2.31

2.11 Sonuç

Goodman devresinde bulunan aletlerin çalışma şekli, ölçme metodu ve teorik eğriler hakkında yukarıda yapılan açıklamalardan sonra, yol hakkında çeşitli hususlarda bilgi sahibi olabilmek için deneysel sonuçlardan nasıl faydalandığının belirtilmesi uygun olacaktır.

-Goodman vibrörü ile yol üzerinde yapılan ölçmeler sonunda elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, ölçme tablolarına dayanılarak çizilen deneysel dispersiyon eğrisini analiz etmek suretiyle yapılır. Deneysel dispersiyon eğrisi yolun yapısına bağlı olarak birçok kısımdan meydana gelmiştir. Eğrinin yatay doğrular halinde olan kısımları bu parçalara tekabül eden yol tabakalarına ait Rayleigh hızlarını (C_R) verir. Eğrisel kısımlar için teorik LAMB eğrilerinden en uygun olanları aranır. Böylelikle yüzeydeki yol tabakaları için C_R , v ve H değerleri tayin edilmiş olur. Bilinen bu değerlere dayanılarak (2.2) denklemine göre tabakaların dinamik elastisite modülleri (E_{dinamik}) hesaplanır.

-Belirli bir frekansta tabakaların homogenliğini ve sıkışmanın kalitesini kontrol etmek için vibrörden geçen sekiz veya daha çok sayıda radyal eksen boyunca ölçmeler yapılır. Her eksen üzerinde



Şekil 2.32

referans sinyali ile yoldan alınan sinyalin aynı fazda ve zıt fazda bulunduğu noktalar işaretlenir. Bunun neticesinde fazları aynı olan noktalardan geçen eğriler çizilir. Yol tabakasının bütün doğrultularda homogen olması halinde bu eğriler, merkezleri vibrörün bulunduğu nokta olan daireler halindedir. (Dalga daireleri (Şekil 2. 32)).

Heterogen bir malzeme, düzgün olmayan bir sıkışma, girinti, çıkıntı ve çatlaklar olması halinde eğriler çok değişik şekillerde elde edilir.

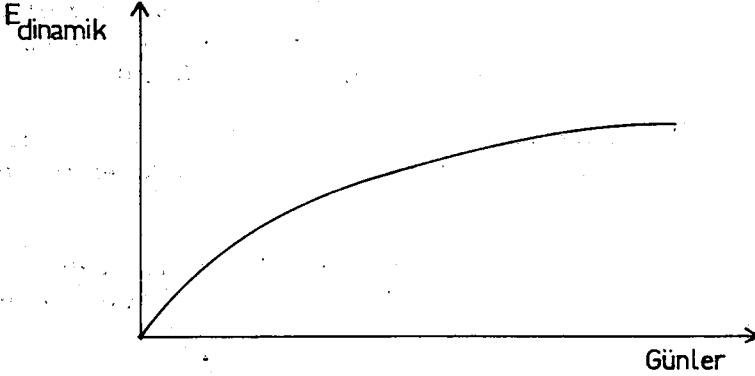
Bu tip deney yol kenarlarının dalga yayılması üzerindeki etkisini de belirtmeğe yarar. Fakat henüz bu konuda sistemli çalışmalar yapılmamıştır.

-Yolun enine ve boyuna eksenine boyunca vibrör 20 ile 50 cm aralıklı noktalara konarak ölçmeler yapılır. Ölçmelere göre her nokta için çizilen deneysel dispersiyon eğrilerinden bulunacak, C_R , v , H ve Edinamik değerleri karşılaştırılarak yolun enine ve boyuna profilleri boyunca tabakaların kalınlıklarının ve rijitlik derecelerinin ne durumda bulunduğu incelenir.

-Trafik altında bir yolun rijitlik derecesinin zamanla nasıl bir artış gösterdiğini incelemek için belirli zamanlarda (meselâ altı ayda bir) ölçmeler yapılır. Her ölçme sonunda sonuçlara göre, rijitlik derecesi (Edinamik) hesaplanır. Hesaplanan rijitlik dereceleri karşılaştırılarak yolun zamanla gelişimi hakkında bilgi sahibi olunur.

-Yolun yapımı sırasında Goodman vibrörü ile ölçmeler yaparak yolu tabaka tabaka analiz etmek mümkündür. İlk ölçmeler toprak tesviyesinin bitiminde yapılır ve toprağın istenildiği şekilde sıkıştırılarak, gerekli rijitlik derecesine ulaşıp ulaşılamadığı kontrol edilir. Daha sonra üst yapıya ait her tabakanın (temel altı, temel, satıh tabakası) inşasından sonra ölçmeler yapılır. Böylelikle yolun yapımı bittiği zaman altyapıya ve üst yapının bütün tabakalarına ait gerekli bilgi (C_R , v , H , Edinamik) elde edilmiş olur. Ölçme sonuçlarına dayanılarak bulunan bu yol karakteristikleri ile projede öngörülen şartlar karşılaştırılarak yolun yapımının projeye uygun bir şekilde gerçekleştirilip gerçekleştirilmediği incelenir.

Yolun tabakalarından birinde priz yapan bir malzeme kullanılmış ise bu tabakanın yapımından sonraki ilk hafta hergün, daha sonra seyrek aralarla ölçmeler yapmak suretiyle malzemenin dinamik elastisite modülünün (Edinamik) zamanla nasıl bir artış gösterdiği incelenir (Şekil 2. 33).



Şekil 2. 33

İlk hafta rijitlik derecesindeki artış çok hızlıdır. İkinci ayın sonunda ise artış çok azalmıştır.

Böyle bir malzemeden yapılmış yol tabakası için ölçmeler sonunda elde edilecek deneysel dispersiyon eğrisine göre kalınlık tayini yapılırsa inşadan sonraki ilk günlerde esas kalınlıktan daha küçük kalınlıklar bulunur. Zaman geçtikçe bulunan kalınlığın değerinde artış görülür. Malzeme prizini tamamladıktan sonra yapılan ölçmelere göre çizilecek deneysel dispersiyon eğrisinin vereceği kalınlık tabakanın gerçek kalınlığı olacaktır.

-Bir yolun rijitlik derecesi yeterli bulunmayıp takviye edilmesi uygun görülürse ise takviyeden evvel ve sonra yol üzerinde Goodman vibrörü ile ölçmeler yapılır ve $E_{dinamik}$ hesaplanır. Hesaplanan dinamik elastisite modülleri karşılaştırılarak takviye sonunda istenilen kalitede bir yol elde edilip edilmediği kontrol edilir.

-Yolun bir noktasında diğer noktalara nazaran daha fazla bir çökme görülmüş ise bunun sebebinin Goodman vibrörü ile yapılacak çalışmalarla ortaya konması mümkündür. Bunun için fazla çökme olan noktada ve başka noktalarda bir çok frekans için ölçmeler yapılır ve her noktaya ait deneysel dispersiyon eğrisi çizilir. Bu eğriler analiz edilerek ölçme noktalarında yol tabakalarının karakteristikleri(C_R , V , H , $E_{dinamik}$) tayin edilir. Bulunan bu değerlerin karşılaştırılmasıyla fazla çökmenin yoldaki hangi tabakanın daha az rijit veya daha az kalın olması sebebiyle meydana geldiği anlaşılır.

B ö l ü m 3

MODELLER ÜZERİNDE ÇALIŞMALAR

3.1 Giriş

Goodman metodu elastisite teorisine dayanır. Bu metodu kullanırken aşağıdaki kabuller yapılır ve ölçme neticeleri buna göre değerlendirilir.

1) Yollar bir yarı sonsuz ortam üzerine oturan birçok tabakadan meydana gelmiştir. Bu tabakalar yatay ve sınırsız olarak uzanırlar ve birbirlerine paraleldirler.

2) Yolu teşkil eden bütün malzeme elastik, homogen ve izotropdur.

3) Tabakaların arakesitlerinde gerilme ve yer değiştirmeler sürekli. Sonsuz derinlikte, $z \rightarrow \infty$ için yer değiştirmeler sıfıra varır.

Teorik olarak öngörülen bu ideal şartların yollarda gerçekleştirilmesi hayli zordur. Bu sebeple Goodman vibrörü ile yapılan çalışmalar sonunda bulunan deneysel neticelerin değerlendirilmesinde bir takım güçlüklerle karşılaşılır. İzah edilemeyen bazı durumlar ortaya çıktığı gibi yanlış değerlendirmeler yapılarak hatalı sonuçlara bile varılabilir.

Teori şartlarının tam olarak yerine getirildiği modeller üzerinde çalışıldığı takdirde yukarıda belirtilen aksaklıklar giderilebilir. İki boyutlu modeller bu iş için en uygun modellerdir. Çünkü bu modelleri yapmak ve üzerinde çalışmak kolaydır.

Tabakalı yarı sonsuz ortama ait bütün denklemler bu modeller için de geçerlidir. Yalnız Tablo 3.1 de gösterilen düzeltmelerin yapılması gerekir.

	Üç boyutlu teoride parametreler	İki boyutlu teoride parametreler
Enine dalgaların hızı	β	β
Boyuna dalgaların hızı	α	$\alpha' = \sqrt{\frac{2\beta^2}{1-\nu}}$
Poisson oranı	ν	$\nu' = \frac{\nu}{1+\nu}$
Rayleigh dalgalarının hızı	$C_R = f(\beta, \nu)$	$C_R' = f(\beta, \nu')$

Tablo 3.1
İki ve üç boyutlu teorilerin parametreleri arasındaki bağıntılar

Çalışmalar sırasında iki boyutlu çeşitli modeller hazırlanarak değişik yol yapılarına tekabül eden sistemler elde etmeğe gayret edilmiştir. Dalgaların yayılışı önce yarı sonsuz ortam modeli üzerinde faz ve genlik değişimi yönünden incelenmiş, bilahare aynı hususlar değişik arakesitli tabakalı modeller üzerinde etüd edilmiştir.

3.2 Yarı Sonsuz Ortam Modeli

Model kullanmaktaki gaye homogen, izotrop ve elastik sistemler elde etmek olduğu için kullanılacak malzemenin bu şartları haiz olmasına dikkat edilmiştir. Bunun için karakteristikleri :

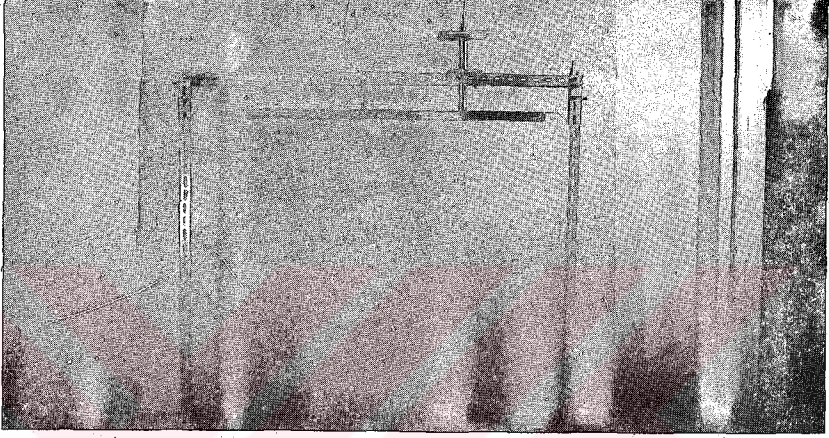
Elastisite modülü : $E = 29000 \text{ kg/cm}^2$

Yoğunluğu $\rho = 1,2$

Poisson oranı $\nu = 0,30$ olan plexiglas seçilmiştir.

Şekil 3.1 de görüldüğü gibi model rijit çubuklar arasına düşey olarak yerleştirilmiştir. Yan kenarlar sebebiyle meydana gelebilecek yansıma, girişim olaylarının normal dalga yayılması üzerindeki etkisini yok etmek için modelin üst köşeleri kesilmiştir. Modelin üst kenarı düzgün yüzeyli bir hale getirilerek vibrör ve kaptörün model ile çok iyi temas etmeleri sağlanmış bu sayede ölçmelerde yapılacak hata nisbeti iyice düşürülmüştür. Ayrıca ölçmeler sırasında kaptörü

B.K.Kaptörü Piezoelektrik Vibrör



Şekil 3.1

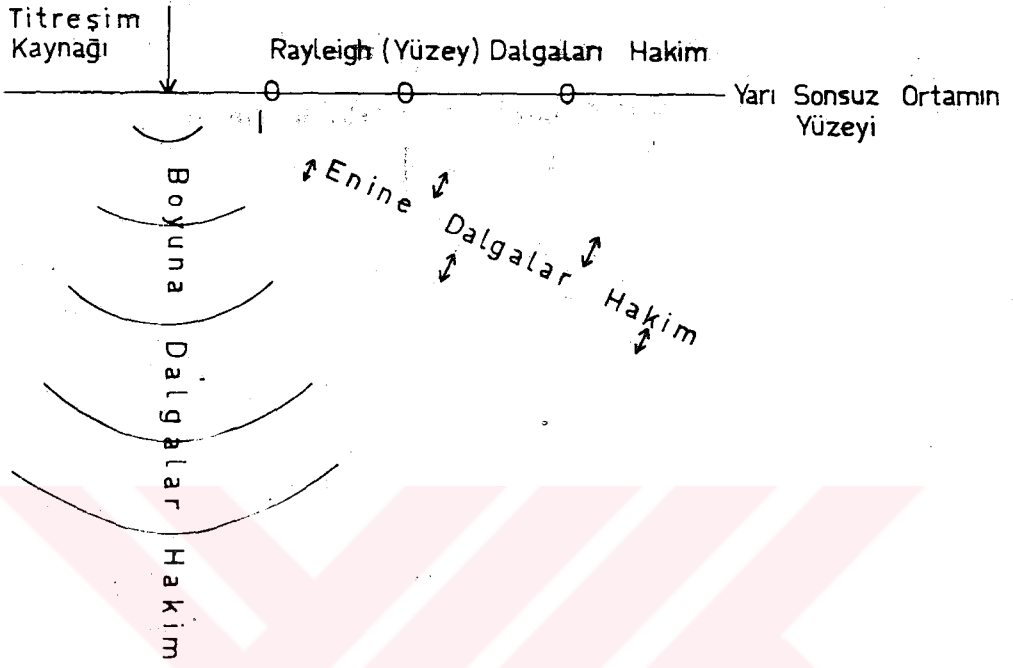
Yarı sonsuz ortam modeli

modelin üstüne daima aynı konumda koyarak bütün noktalarda ölçme şartlarının aynı olmasının teminine gayret edilmiştir. Civarda parazit gürültüler olunca ölçme yapılmamıştır.

3.3 Faz Ölçmeleri İçin Esaslar

Aşağıdaki hususlar gözönüne alınarak ölçme metodu tesbit edilmiştir.

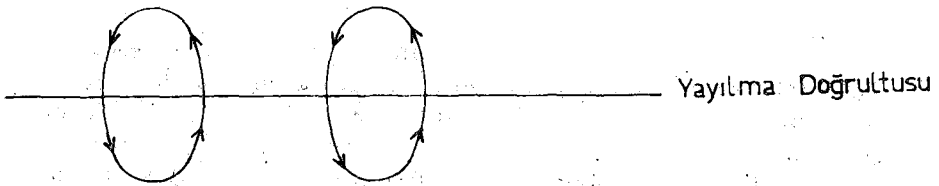
- Bir yarı sonsuz ortamın yüzeyine noktasal bir titreşim kaynağı tesir ettirildiği zaman yarısonsuz ortamın yüzeyinde meydana gelen ve yüzeyde yayılan, biraz da ortamın içine nüfuz eden Rayleigh dalgaları ile ortamın içinde yayılan kütle dalgaları yani enine ve boyuna dalgalar olmak üzere üç tip dalga meydana gelir. Şekil 3.2 bu üç tip dalganın yarı sonsuz ortamda yayılırken hakim oldukları bölgeleri göstermektedir.



Şekil 3.2

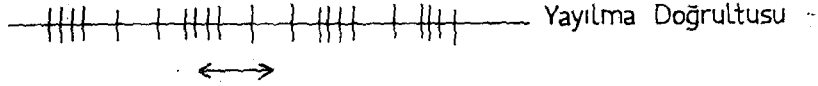
-Danelerin Hareket Durumları

Rayleigh dalgalarının yayılmasında daneler yarı sonsuz ortam yüzüne dik ve yayılma doğrultusuna paralel düzlem üzerinde elips çizerek hareket ederler. (Şekil 3.3.)



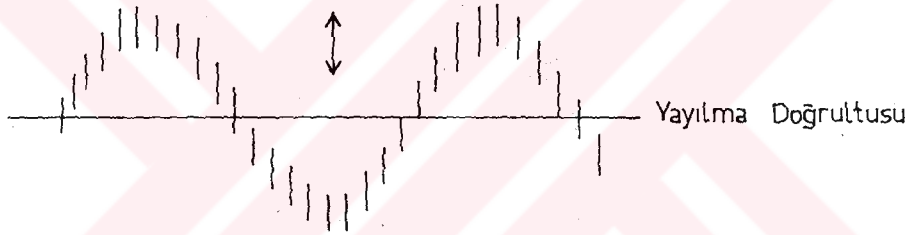
Şekil 3.3

Boyuna dalgalarda danelerin hareketi dalgaların yayılma doğrultusuna paraleldir (Şekil 3. 4)



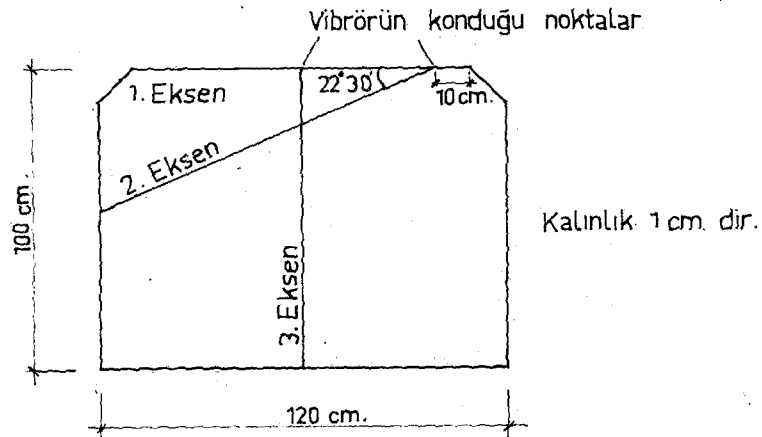
Şekil 3. 4

Enine dalgalarda ise daneler dalgaların yayılma doğrultusuna dik bir şekilde hareket ederler (Şekil 3. 5).



Şekil 3. 5

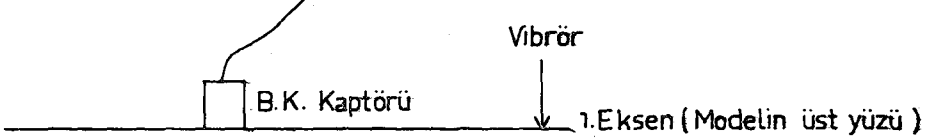
3. 4 Ölçme Yapılan Eksenler



Şekil 3. 6

3. 4. 1 1 Numaralı Eksen-Yüzeysel Eksen

Yüzeysel eksen Rayleigh dalgalarının yayılışını incelemek için seçilmiştir.

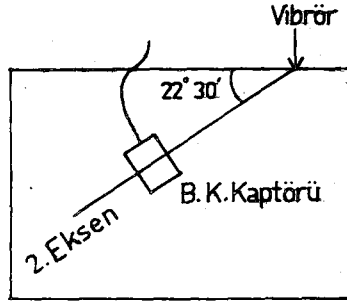


Şekil 3. 7

Şekil 3.1 ve 3.7 de görüldüğü gibi B. K. kaptörü yüzeysel eksenine yani modelin üst kenarına dik duruma getirilerek ölçmeler yapılmıştır. Ölçmelere vibröre 10 cm mesafeden başlanmış ve ortalama 70 cm lik bir uzaklığa kadar devam edilmiştir. Kaptör eksen üzerinde ikişer cm. hareket ettirilmek suretiyle ikişer cm aralıklı noktalara tekabül eden faz değerleri fazmetreden okunarak elde edilmiş (Tablo 3. 2) ve faz $\varphi = f(R)$ eğrileri çizilmiştir. (Şekil 3. 8 ve 3. 9) da görüldüğü gibi deneysel noktalar sabit meyilli doğrular üzerinde sıralanmaktadır. Her doğrunun meylinin tersi, doğrunun ait olduğu frekansa tekabül eden dalga boyunu verir. Bu dalga boylarından hareket edilerek, ölçülerini yapıldığı altı farklı frekans için hızlar hesaplanmış (Tablo 3. 3) ve bulunan değerler deneysel dispersiyon eğrisi $c = f(\ell)$ üzerinde gösterilmiştir (Şekil 3.10). Goodman vibrörü ile yapılan çalışmalarda ölçmelerin hassasiyet derecesinin % 5 mertebesinde olduğu nazara alınırsa deneysel dispersiyon eğrisine ait noktaların hemen hemen yatay bir doğru üzerinde bulunduğu kabul edilebilir. Bu yatay doğrunun ordinatı ortalama Rayleigh hızını $C_R = 1290 \text{ m/sn}$ olarak vermektedir.

3. 4. 2 2 Numaralı Eksen-Eğik Eksen

Enine dalgaların yayılışı eğik eksen üzerinde incelenmiştir. B. K. kaptörünün üç doğrultuda çalışan bir kaptör olması sayesinde danelerin dalgaların yayılma doğrultusuna dik yöndeki yer değiştirmelerini tesbit etmek mümkün olmuştur.

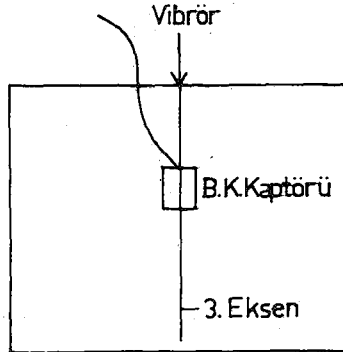


Şekil 3.11

Şekil 3.11 de görüldüğü gibi B. K. kaptörü enine dalgaların yayılma doğrultusuna dik bir durumda, modelin düşey yüzeyinde, 2 numaralı eksen boyunca ikişer cm kaydırılarak paragraf (3.4.1) de izah edildiği şekilde, beş farklı frekans için ölçmeler yapılmıştır. Ölçme neticeleri (Tablo 3.4) de verilmiş ve faz eğrileri (Şekil 3.12) de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiği takdirde, eğrilerin yüzeysel eksenine ait faz doğrularına nazaran biraz daha dalgalı olduğu görülür. Bu dalgalanmanın Rayleigh dalgaları ve boyuna dalgalar tesiriyle olması mümkündür. Faz eğrilerine dayanılarak hazırlanmış olan deneysel dispersiyon eğrisinden (Tablo 3.5) (Şekil 3.13) enine dalgaların yarı sonsuz ortamda yayılma hızı $\beta_{ort} = 1365 \text{ m/sn}$ bulunmaktadır.

3.4.3 3 Numaralı Eksen-Düşey Eksen

Boyuna dalgaların etüdü düşey eksen üzerinde yapılmıştır.



Şekil 3.14

Danelerin boyuna dalgaların yayılma doğrultusunda yaptığı yer değiştirmelerini tesbit edebilmek için B. K. kaptörü (Şekil 3.14) de görüldüğü gibi düşey eksen doğrultusunda, modelin düşey yüzeyi üzerine konmuş ve ikişer cm hareket ettirilerek 6 frekans için ölçmeler yapılmıştır. (Tablo 3. 6) ölçme neticelerini, (Şekil 3.15 ve 3.16) ise faz eğrilerini göstermektedir. Yarı sonsuz ortamda boyuna dalgaların yayılma hızını (α_{ort}) bulmağa yarayan ve faz eğrilerinden hareketle hesaplanan değerler (Tablo 3. 7) de verilmiş ve dispersiyon eğrisi ise (Şekil 3.17) de gösterilmiştir. $\alpha_{ort} = 2265 \text{ m/sn}$ dir.

3.5 Sonuç

Yarı sonsuz ortam modeli üzerinde yapılmış olan faz ölçmelerinden şu neticeyi çıkartabiliriz. Teorik bakımdan öngörüldüğü gibi elastik, homogen ve izotrop bir yarı sonsuz ortam yüzeyine tesir eden bir titreşim kaynağı, ortamın yüzeyinde yayılan Rayleigh dalgaları ile ortamın içinde yayılan enine ve boyuna dalgaları meydana getirir. Titreşimin frekansı ne olursa olsun dalgaların yayılma hızları sabittir.

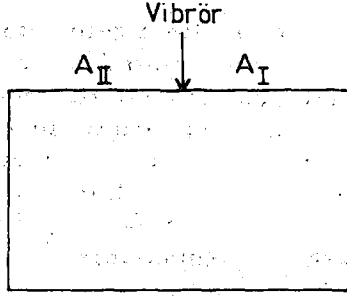
3.6 Genliğin Vibröre Olan Mesafeyle Değişiminin Etüdü

Goodman vibrörü ile şimdiye kadar yapılan çalışmalar genel olarak, vibrör tarafından doğurulan titreşimin fazının değişiminin incelenmesine hasredilmiştir. Titreşimin genliğinin vibröre olan mesafeyle değişiminin etüdü ise henüz yenidir, fakat üzerinde sistemli bir şekilde çalışılması gereken çok önemli bir konudur. Zira bu sayede kaplamaları titreşimleri sönmüleme katsayılarına göre ayırdetmek, dispersiyoneğrisinde alçak ve yüksek frekanslar arasında bulunangeçiş bölgesini incelemek mümkün olacak ve yolların dinamik olarak incelenmesine yarayan metodlar zenginleşecektir.

Bu sebeple model üzerindeki çalışmalarda, titreşim kaynağından uzaklaşıldıkça genliğin nasıl bir değişim gösterdiğinin incelenmesi lüzumlu ve faydalı görülmüştür. Fakat genliğin değişiminin teorik çözümü kolay değildir. Deneysel neticeleri teorik çözümlere bağlayabilmek ise çok güçtür.

3.7 Model Üzerinde Genlik Ölçmeleri

Şekil 3.18 de görüldüğü gibi vibrör modelin tam ortasına konmuş ve vibrörün hem sağ (A_I) hem de sol (A_{II}) tarafında ölçmeler yapılmıştır. Ölçmelere vibröre 4-5 cm mesafeden başlanılmış kaptör vibrörden uzaklaştıkça genliğin değişimi osiloskobun ekranında incelenmiştir. Düşük frekanslarda ölçme noktaları arası 5 cm



Şekil 3.18

olarak seçilmiş, frekans büyüdükçe bu değer 1,0, 0,5 ve 0,25 cm ye düşürülmüştür. Kaptör tarafından modelden alınarak osiloskoba gönderilen sinyalin maksimum ve minimum noktaları arasındaki mesafe (A) okunarak genliğin değeri volt cinsinden elde edilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19

Osiloskobun ekranından okunan A genliği kaptörün modelden aldığı sinyal sebebiyle meydana getirdiği gerilimin A' genliğinin K katıdır. Yani $A=KA'$ dır. Tayini imkânsız olan bu (K) sayısı Goodman devresindeki aletlerin toplu çalışma durumuna bağlı bir katsayıdır. Fakat her frekans için sabit olduğundan ölçme neticelerine bir tesiri yoktur. Sadece, genlik değerleri sabit bir sayıyla çarpılmış olarak elde edilir. Vibrörün sağ ve solunda yapılan ölçmelerle bulunan genlik değerlerine göre $A_I(R)$ ve $A_{II}(R)$ eğrileri ayrı ayrı çizilmiştir. Plexiglas model elastik, homogen ve izotrop olduğu ve titreşim vibröre göre simetrik yayıldığı halde $A_I(R)$ ve $A_{II}(R)$ eğrileri umumî olarak benzer şekilli olmakla beraber çakışmamaktadırlar.

Bu fark deney şartlarından ileri gelmektedir. Zira genliğin ölçülmesi çok zor ve fazla hassasiyet isteyen bir iştir. Kaptörün küçük bir kayma yapması bile neticeyi çok değiştirmektedir. Ölçmeler sırasında kaptörün daima aynı konumda çalıştırılmasında ve istenilen noktaya konmasında, modelin ve vibrörün düşey olarak tesbitinde, modelin vibrör ve kaptör ile değme yüzeyinin hazırlanmasında yapılabilen ve bütün titizliğe rağmen önlenemiyen küçük hatalar $A_I(R)$ ve $A_{II}(R)$ eğrileri arasındaki farkı doğurmaktadır.

Çalışmalar sırasında 10000 Hz ile 210000 Hz arasındaki bir çok frekans için genliğin değişimi incelendiği halde hacmi kabartmamak gayesiyle burada sadece dört frekansa ait neticeler verilmiştir,

10000 Hz - Tablo 3. 8	Şekil 3. 20
30000 Hz - Tablo 3. 9	Şekil 3. 21
70000 Hz - Tablo 3. 10	Şekil 3. 22
210000 Hz - Tablo 3. 11	Şekil 3. 23

Bütün genlik eğrileri teorik bakımdan da öngörüldüğü gibi dalgalı eğrilerdir. Yani, vibrörden uzaklaşıldıkça titreşimin genliği salınımlı bir eğri çizerek azalır. 10000 Hz gibi düşük frekanslarda bu azalma çok yavaştır. Kullanılan model üzerindeki maksimum ölçme uzunluğu olan 50 cm içinde hemen hemen hiç azalma yok gibidir. Frekans büyüdükçe genliğin mesafeyle azalışı daha belirli bir hal alır, vibröre yakın mesafede genliğin değeri hızlı bir düşüş gösterir, vibrörden uzaklaşıldıkça genlikteki azalma daha yavaş olur.

3. 8 Genliğin Değişiminin Elektronik Hesap Makinalarıyla Hesaplanması

1. 8 ve 1. 9 numaralı paragraflardan anlaşılacağı üzere 1. 40 ve 1. 41 numaralı eşitlikler yardımıyla genliğin nümerik olarak hesaplanması çok güç ve fazla zaman isteyen bir iştir. Bu sebeple Ponts et Chaussées Laboratuvarının CAE 510 ordinatöründe ALGOL lisaniyle hazırlanmış bir programla hesaplar yapılmıştır. Yarı sonsuz ortama (plexiglas modele) ait α , β ve μ değerleri ve titreşime ait ω değeri bilindiğine göre

$$A = \frac{1}{2\pi\mu} \left[\int_0^{+\infty} \left[kf(k) - L - \frac{k \text{ Res}(k_0)}{k^2 - \frac{\omega^2}{C_R^2}} \right] J_0(kR) dk + \frac{1}{R} - \frac{1}{4} \text{Res}\left(\frac{\omega}{C_R}\right) H_0^{(2)}\left(-\frac{\omega}{C_R}R\right) \right] \text{ dir.}$$

Diğer bir gösterilişle,

$$A = \frac{1}{2\pi\mu} \left[\int_0^{\infty} \varphi(k) J_0(kR) dk + \frac{L}{R} - \frac{i}{4} \text{Res} \left(\frac{\omega}{C_R} \right) H_0^{(2)} \left(\frac{\omega}{C_R} R \right) \right] \quad (3.1)$$

(3.1) denklemini esas alınarak değişik (R) değerleri için genlikler hesaplanmıştır. Fakat $\varphi(k)$ fonksiyonunun $k = \frac{\omega}{\alpha}$, $\frac{\omega}{\beta}$ ve

$\frac{\omega}{C_R}$ noktalarındaki durumları ve Bessel fonksiyonu $(J_0(kR))$ sebebiyle meydana gelen salınımlar yüzünden istenilen hassasiyeti elde etmek mümkün olamamıştır. Meselâ $\frac{\omega}{C_R} = 508,5$ ve integrasyon adımı $\Delta k = 10$ alınarak genlik eğrisinin bir noktasının hesabı 8 dakikada yapılabilmektedir. (R) in küçük değerleri için hassasiyet kâfi gelse bile büyük değerleri için netice aldatıcı olmaktadır. İntegrasyon adımı yarıya indirilerek, yani $\frac{\Delta k}{2}$ alınarak hesap yapıldığında, hesap zamanı iki misline çıkmakta diğer taraftan iki sonuç arasında $(\Delta k$ ve $\frac{\Delta k}{2}$ halleri için) % 30 civarında bir fark görülmektedir. Halbuki genliğin değişiminin çok hassas bir şekilde hesaplanması gerekir. İntegrasyon adımının küçültülmesiyle doğan % 30 luk fark ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Bu sebeple 3.1 denklemini esas alınarak CAE 510 ordinatörüyle yapılan hesaplara göre çizilen teorik genlik eğrileri umumi görünüş olarak deneysel genlik eğrilerine benzemekle beraber, eğriler arasında tam bir uygunluk yoktur. $\varphi(k)$ fonksiyonunun ve Bessel fonksiyonunun yukarıda belirtilen özellikleri gözönüne alınarak uygun bir integrasyon adımı seçilebildiği takdirde teorik genlik eğrisi, $A = f(R)$ yeterli bir hassasiyetle elde edilebilecektir.

Titreşim kaynağının enerjisinin yaklaşık olarak $2/3$ ünün yüzey dalgalarını meydana getirmek için harcandığı, yüzey dalgalarının $R^{-1/2}$ ve kütle dalgalarının R^{-2} gibi sönümlendiği, titreşim kaynağından uzaklaşıncaya yüzey dalgalarının hakim olduğu gözönüne alınarak 3.1 denkleminde diğer terimler ihmal edilmiş sadece yüzey dalgalarının varlığını gösteren

$$A = \frac{1}{2\pi\mu} \left[\frac{i}{4} \text{Res} \left(\frac{\omega}{C_R} \right) H_0^{(2)} \left(\frac{\omega}{C_R} R \right) \right] \quad (3.2)$$

3.2 ifadesine göre CAE 510 ordinatöründe hesaplar yapılmıştır. 30000 Hz 70000 Hz ve 210000 Hz için elde edilen neticeler Tablo 3.12 de verilmiş, teorik genlik eğrileri de deneysel eğrilerle birlikte gösterilmiştir. Salınımlara sebep olan terim ihmal edilerek hesaplar yapıldığı için bulunan teorik eğriler devamlı azalan ondülesiz eğrilerdir. Daha önce de belirtildiği gibi Goodman devresinin özelliği sebebiyle

model üzerinde ölçülen genlikler volt cinsinden elde edilmiştir. Nümerik hesaplar ise genliği metre olarak verirler. Teorik eğrilerle deneysel eğrileri karşılaştırırken bu husus unutulmamalıdır.

30000 Hz

Deneysel eğri ile teorik olarak hesaplanmış eğri arasında iyi bir uygunluk var.

70000 Hz

Vibrörden 40 cm uzaklığa kadar deneysel ve teorik eğriler arasında bir uygunluk var, ölçü uzunluğunun sonuna doğru (40 ile 50 cm arası) eğrilerde ayrılma oluyor.

210000 Hz

Teorik ve deneysel eğriler arasındaki uygunluk vibrörden ancak 15-20 cm ye kadar devam ediyor. Daha büyük mesafelerde eğriler birbirlerinden ayrılıyorlar.

Teorik ve deneysel eğriler arasındaki uygunluk 30000 Hz de en iyi durumdayken frekans büyüdükçe azalıyor ve çalışılan en büyük frekans olan 210000 Hz de ancak 15-20 cm lik bir mesafede görülüyor.

3.9 Sonuç

Titreşimin genliğinin titreşim kaynağına olan mesafeyle değişiminin incelenmesi fazla hassasiyet isteyen zor bir etüddür. Elektronik hesap makinasında 3.1 denklemine göre yapılan hesaplarda, $\varphi(k)$ fonksiyonunun $k = \frac{\omega}{\alpha}$, $\frac{\omega}{\beta}$ ve $\frac{\omega}{C_R}$ noktalarındaki durumları ve Bessel fonksiyonu sebebiyle meydana gelen salınımlar yüzünden yeterli bir hassasiyet sağlamak mümkün olamamıştır. İntegrasyon adımını küçülterek bile (Bu ise hesap müddetinin artması demektir.) iyi sonuç alınamamıştır. Diğer taraftan, bütün gayretlere rağmen, model üzerindeki çalışmalarda hipotezlerde öngörülme ve değerinin tahmini imkânsız olan bir takım yan tesirlerin önüne geçilememektedir. Bu sebeple hassas olarak hesaplanamayan teorik sonuçlarla deney şartlarının etkisinde kalan deneysel sonuçların karşılaştırılması çok güçleşmektedir.

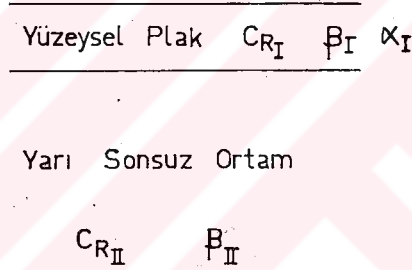
$\varphi(k)$ fonksiyonunun ve Bessel fonksiyonunun özelliklerine uygun bir integrasyon adımı seçilebildiği takdirde teorik genlik eğrisi hassasiyetle hesaplanabilecektir.

Deneysel ve teorik çalışmalara göre varılan sonuç şu şekilde özetlenebilir, genlik eğrisi $A = f(R)$ salınımlı bir eğridir. Bu salınımların genliği vibröre yakın mesafede büyüktür ve vibrörden uzaklaştıkça küçülür. Düşük frekanslarda genliğin mesafeyle azalışı yavaştır. Frekans büyüdükçe vibröre yakın mesafede genlikte hızlı bir azalma olur, vibrörden uzaklaştıkça genliğin azalma hızı düşer.

3.10 Tabakalı Yarı Sonsuz Ortamda Dispersiyon Eğrileri

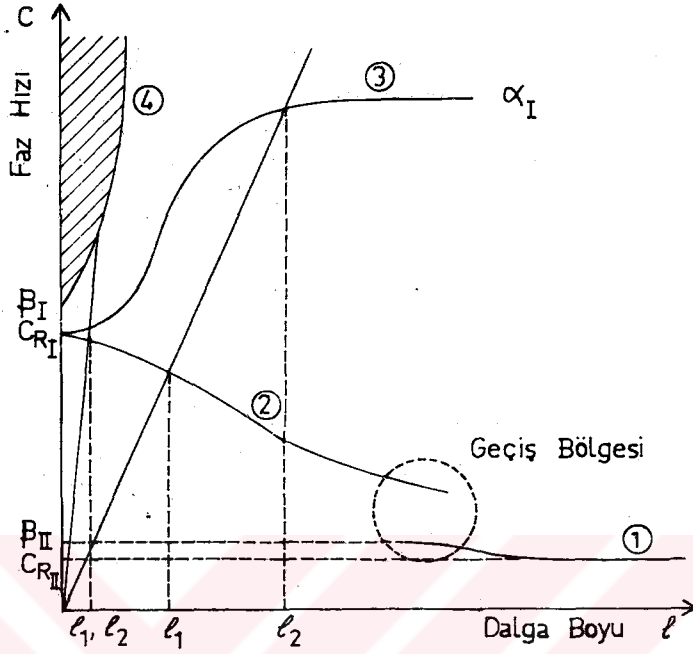
Tabakalı yarı sonsuz ortam modeli üzerindeki çalışmalar sırasında elde edilen bir takım neticelerin izah edilebilmesi için bu ek bilginin verilmesi lüzumludur.

Şekil 3. 24 de gösterilen sisteme ait dispersiyon eğrileri Şekil 3. 25 deki gibidir.



Şekil 3. 24

Şekil 3. 25 de 1 numaralı eğri yarı sonsuz ortama 2, 3 ve 4 numaralı eğriler ise yüzeysel plağa ait eğrilerdir. 2 numaralı eğri daha önce de belirtilmiş olan Teorik LAMB eğrisidir. Asimetrik Modu gösterir. 3 numaralı eğri Simetrik Mod veya Boyuna Modu temsil eder. 2 ve 3 numaralı eğriler yüksek frekanslar için yüzeysel plaktaki Rayleigh hızına (C_{R_I} e) ulaşırlar. 3 eğrisi büyük dalga boylarında, boyuna dalgaların hızına (α_I e) varır. Taralı şekilde gösterilen 4 üncü bölüm ise sistemdeki rezonanslardan ileri gelen Yüksek Modları temsil eder.



Şekil 3.25

Şekil 3.25 e bakınca kolayca anlamak mümkündür ki farklı dalga boyu fakat aynı frekanslı iki titreşimin girişimine her bölgede raslamak mümkündür. Mesela geçiş bölgesinde (alçak frekanslar için) yarı sonsuz ortamın kütle dalgaları veya Rayleigh dalgaları ile yüzeyel plağın asimetrik modla yayılan dalgaları arasında girişim olabilir. Daha yüksek frekanslarda asimetrik modla simetrik mod veya yüksek modlar girişim yapacaktır.

3.11 Aynı Frekanslı Fakat Farklı Dalga Boylu İki Sinüsoidal Titreşimin Girişimi

Birinci titreşim : V_1 , dalga boyu ℓ_1

$$\text{denklemleri} \quad y_1 = A_1 \sin \psi_1$$

İkinci titreşim : V_2 , dalga boyu ℓ_2

$$\text{denklemleri} \quad y_2 = A_2 \sin \psi_2$$

Bu iki sinüsoidal titreşimin bir titreşim kaynağından aynı fazlı olarak yayılmağa başladığını ve genlikleri oranının $\left(\frac{A_1}{A_2}\right)$ nin sabit

olduğunu farzedelim. Bileşke titreşim (V) de sinüsoidal olacaktır.

$$V = A \sin \Psi$$

$$\operatorname{tg} \Psi = \frac{A_1 \sin \Psi_1 + A_2 \sin \Psi_2}{A_1 \cos \Psi_1 + A_2 \cos \Psi_2} \quad A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos (\Psi_1 - \Psi_2)}$$

$$A_1 = A_2 \quad \text{özel hali için}$$

$$\operatorname{tg} \Psi = \operatorname{tg} \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2} \quad \text{olacaktır.}$$

1 cm ye tekabül eden, grad cinsinden faz farkını φ ile gösterirsek V_1 ve V_2 titreşimleri için

$$\varphi_1 = \frac{400}{\ell_1}, \quad \varphi_2 = \frac{400}{\ell_2} \quad \text{ile belirtilir.}$$

Bu durumda titreşim kaynağına (R) mesafedeki bir noktada

$$\Psi_1 = R \varphi_1$$

$$\Psi_2 = R \varphi_2 \quad \text{dir.}$$

İki titreşimin zıt fazda bulunduğu (x) absisli bir (M) noktası için aşağıdaki eşitliği yazabiliriz.

$$x \varphi_1 - x \varphi_2 = (2k + 1) 200$$

(k, sıfır veya pozitif tam sayı)

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta \varphi \quad \text{koyarsak}$$

$$x \Delta \varphi = (2k + 1) 200 \quad \text{olacaktır.}$$

Bu tip noktalarda bileşke titreşimin genliği minimum, $A_1 = A_2$ olduğu takdirde ise sıfır olur.

Aynı şekilde iki titreşimin aynı fazda bulunduğu (x) absisli bir (P) noktasında,

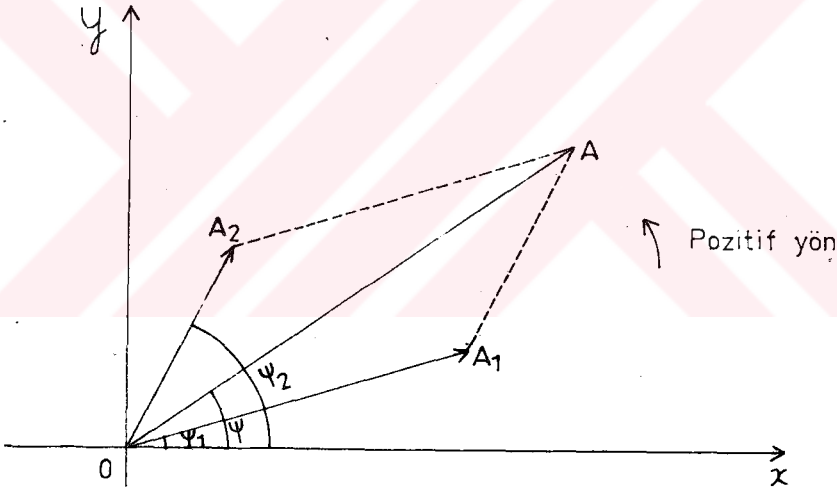
$$x \varphi_1 - x \varphi_2 = k \cdot 400$$

(k , sıfır veya pozitif tam sayı)

$$x \cdot \Delta \varphi = k \cdot 400 \quad \text{eşitliğini yazabiliriz.}$$

Bu tip noktalarda bileşke titreşimin genliğinin maksimum olacağı açıktır.

Bileşke titreşimin (V nin) faz eğrisini Fresnel metodunu kullanarak tayin edebiliriz.



Şekil 3.26

Bunun için, Şekil 3.26 da görüldüğü gibi bir (0) başlangıç noktasından geçen Ox referans ekseni ve (0) noktası etrafında bir pozitif dönme yönü seçelim. V_1, V_2 ve V titreşimleri A_1, A_2 ve A uzunluktaki vektörlerle temsil edilsin. Her nokta için benzer şekilde Fresnel konstrüksiyonu teşkil edilerek bileşke titreşimin faz değerleri, yani (ψ) nin değişimi bulunur. V_1 ve V_2 titreşimlerinin zıt fazda bulunduğu noktalardan biraz evvel ve biraz sonra titreşim vektörlerinin durumu incelenecek olursa bileşke titreşim vektörünün birbirine çok yakın mesafedeki bu iki nokta arasında yön

değiştirdiği yani 200 gradlık bir faz farkı meydana geldiği görülür (Şekil 3. 27).

Girişim yapan titreşimlerin dalga boyları , $\ell_1 = 4 \text{ cm}$ $\ell_2 = 10 \text{ cm}$ olsun.

$$\varphi_1 = \frac{400}{4} = 100 \text{ grad}$$

$$\varphi_2 = \frac{400}{10} = 40 \text{ grad}$$

$$\Delta\varphi = 60 \text{ grad}$$

olacaktır.

Titreşim kaynağından (x) mesafedeki bir noktada iki titreşim zıt fazda ise,

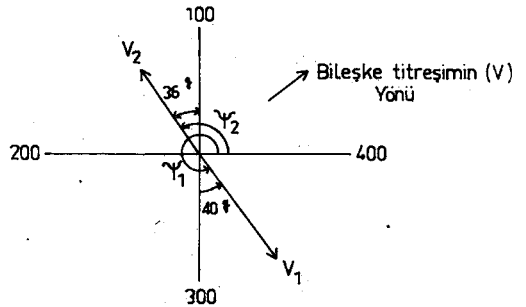
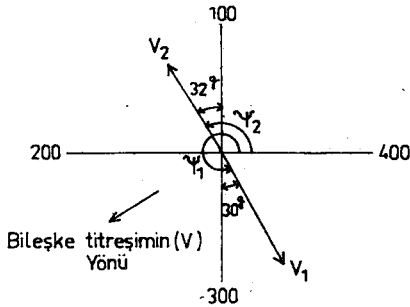
$$x \Delta\varphi = 200$$

$$x \cdot 60 = 200 \longrightarrow x = 3,33 \text{ cm. bulunur.}$$

3. 30 cm ve 3. 40 cm için γ_1 ve γ_2 değerlerini hesaplayıp bileşke titreşimi Fresnel metodu ile gösterelim.

$$\begin{aligned} 330 \text{ cm. için} \\ \gamma_1 &= 330 \text{ grad} \\ \gamma_2 &= 132 \text{ grad} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 340 \text{ cm. için} \\ \gamma_1 &= 340 \text{ grad} \\ \gamma_2 &= 136 \text{ grad} \end{aligned}$$



Şekil 3. 27

Bu durumda faz eğrisi salınımlı bir eğri olacaktır. Salınım noktaları V_1 ve V_2 titreşimlerinin zıt fazda bulunduğu noktalardır. Salınım noktaları arasındaki mesafe (L) V_1 ve V_2 titreşimlerinin genlikleri oranından, $(\frac{A_1}{A_2})$ den bağımsız olup $\Delta\varphi$ ye bağlıdır.

$$L = \frac{400}{\Delta\varphi} \text{ dir}$$

Salınım noktaları arasında, faz eğrisi, 1 cm için faz farkı

$$\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \text{ olan doğrular halindedir. (} A_1 = A_2 \text{ hali için)}$$

Bu parçalar için titreşimin dalga boyu (ℓ)

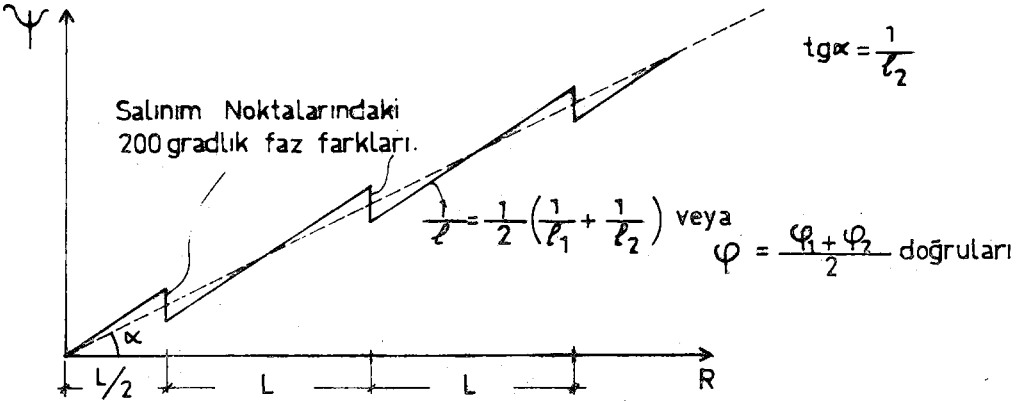
$$\frac{1}{\ell} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\ell_1} + \frac{1}{\ell_2} \right) \text{ eşitliğini sağlayacaktır.}$$

Faz eğrisi üzerinde bir (d) mesafesindeki faz değeri (ψ) için aşağıdaki genel formül verilebilir.

$$\psi = d \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) + \left(\frac{d}{L} \right) 200$$

$$\psi = d \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) + \left(\frac{d \cdot \Delta\varphi}{400} \right) 200$$

Birinci terim salınım noktaları arasında bulunan doğrusal kısımlara tekabül eder, ikinci terim ise salınım noktalarında meydana gelen 200 gradlık faz farklarının (d) uzunluğu boyunca toplamını verir.



Şekil 3. 28

Faz eğrisi üzerinde, salınım noktalarındaki 200 gradlık faz farklarını Şekil 3.28'deki gibi gösterirsek genel denklemi

$$\Psi = d \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) - \left(\frac{d \cdot \Delta \varphi}{400} \right) 200$$

olarak yazmak gerekir.

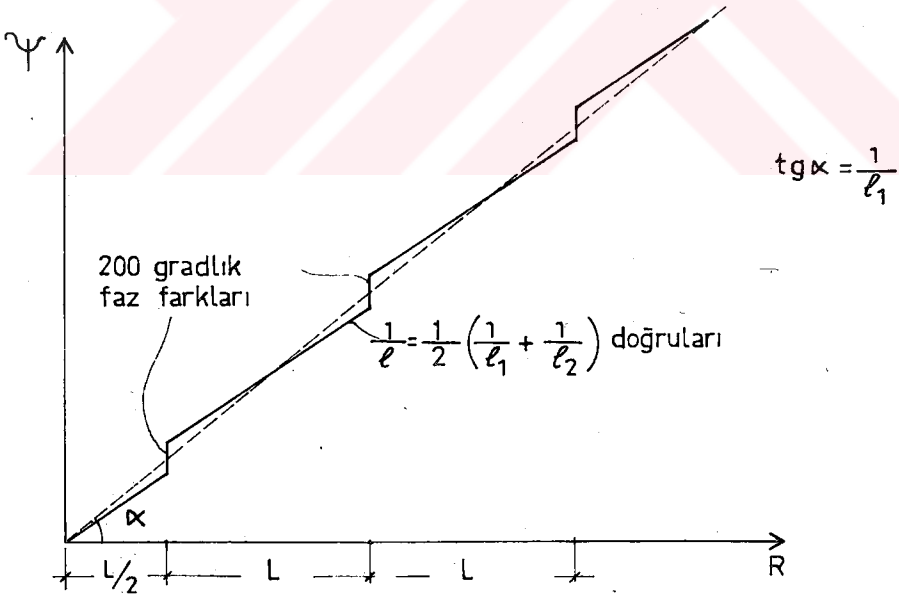
$$\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{dir.}$$

$$\Psi = d \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) - \left(\frac{d (\varphi_1 - \varphi_2)}{400} \right) 200$$

$$\Psi = d \varphi_2$$

bulunur.

Yani faz eğrisinin ortalama meyli $\text{tg} \alpha = \frac{1}{\ell_2}$ olacaktır.



Şekil 3.29

200 gradlık faz farkları birinci durumdakinin aksine olarak Şekil 3.29 daki gibi gösterilirse genel denklem

$$\Psi = d \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) + \left(\frac{d \cdot \Delta \varphi}{400} \right) 200$$

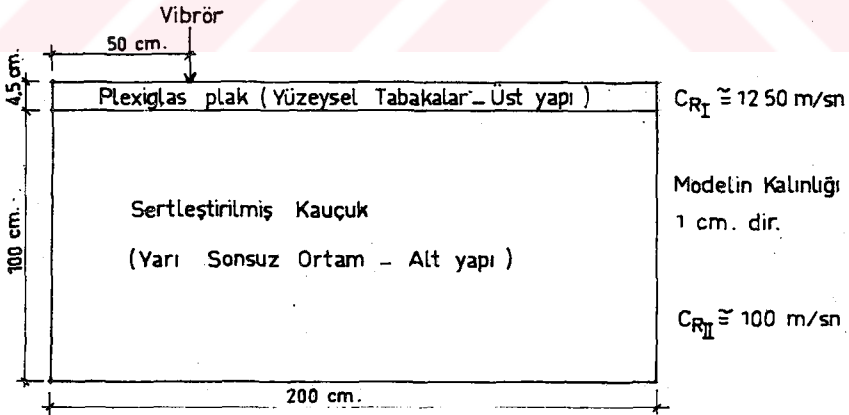
$$\Psi = d \varphi_1$$

şeklini alacaktır.

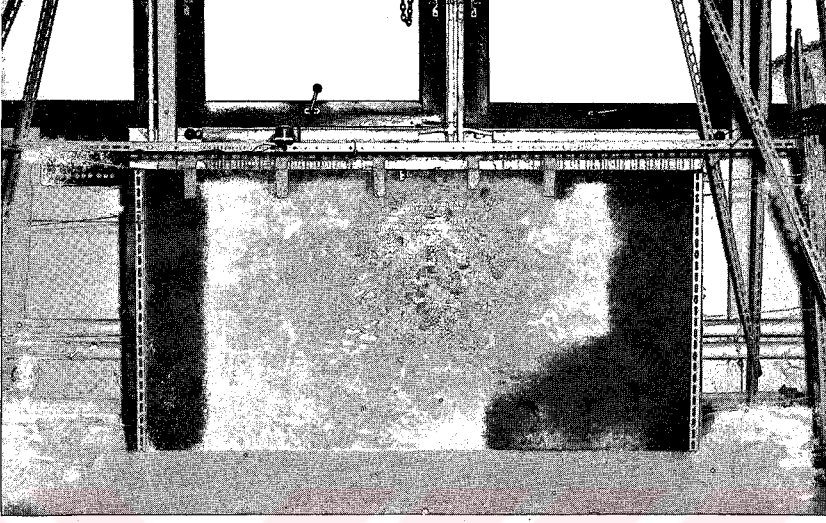
Bu durumdaki faz eğrisinin meyli $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\ell_1}$ olur.

4.12 Tabakalı Yarı Sonsuz Ortam Modeli

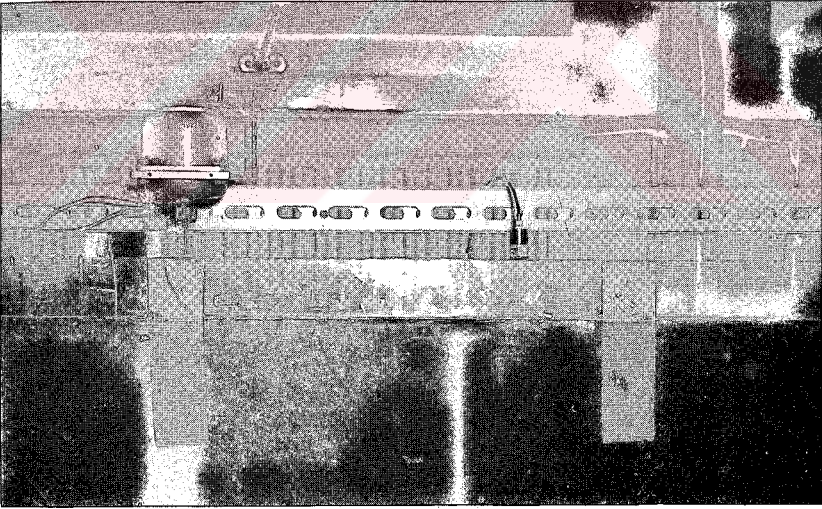
Bilindiği gibi yollar tabakalı bir yapıyı haizdir. Tesviye edilip profiline getirilmiş toprak alt yapı (yarı sonsuz ortam) üzerine üst yapıya ait tabakaların (yüzeysel ince plakların) inşası suretiyle meydana gelmiştir. Model üzerindeki çalışmalarda yolların bu durumuna uyacak sistemler elde etmeğe çalışılmıştır. Alt yapı için elastik, homogen, izotrop ve düşük elastisite modüllü bir malzeme olan sertleştirilmiş kauçuk seçilmiş, üst yapıya ait tabakalar yerine ise sertleştirilmiş kauçuktan çok daha rijit olan tek bir plexiglas plak kullanılmıştır.



Şekil 3.30
Tabakalı yarı sonsuz ortam modeli



Şekil 3.31
Modelin uzaktan görünüşü



Şekil 3.32
Vibrör ve kaptörün model üzerindeki durumları

Plexiglas plak ve sertleştirilmiş kauçuğun birbirine değen kenarları hiçbir girinti çıkıntı kalmayacak şekilde tamamen düz hale getirilerek arakesitin gayri muntazam oluşu sebebiyle normal dalga yayılmasında meydana gelebilecek istenmeyen durumların önüne geçilmiştir. Hipotezlerde şart koşulduğu gibi arakesitin yatay olmasına bilhassa dikkat edilmiştir. Plexiglas plağın vibrör ve kaptör ile temas eden üst kenarı da düzleştirilmiştir. Bu şekilde hazırlanmış olan yol modelinde sertleştirilmiş kauçuk ile plexiglasın arakesit şartları değiştirilerek yollarda raslanabilecek çeşitli durumları elde etmeğe çalışılmıştır.

Böylece elde edilen üç tip modeli aşağıdaki gibi isimlendirebiliriz.

1) Serbest Arakesitli Tabakalı Model

Plexiglas plak sertleştirilmiş kauçuk üzerine serbest oturtulmuş arakesite hiçbir şey konmamıştır.

2) Tam Kaygan Arakesitli Tabakalı Model

Plexiglas plak ile sertleştirilmiş kauçuğun arakesitine gres yağı sürülerek tam kaygan bir arakesit elde edilmiştir.

3) Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Model

Plexiglas plak ile sertleştirilmiş kauçuk birbirine yapıştırılmıştır.

3.13 Ölçme Prensibi

Ölçmelere vibröre 10 cm mesafeden başlanmış ve ortalama 120 cm ye kadar devam edilmiştir. Modelin üst kenarı boyunca kaptör vibrörden uzaklaştırılarak 1 veya 2 santimetre aralıklı noktalarda titreşimin genlik ve fazı tesbit edilmiştir. Yarı sonsuz ortam modeli üzerindeki çalışmalarda yapıldığı gibi titreşimin genliği osiloskobun ekranından volt olarak tayin edilmiş fazı ise fazmetreden grad cinsinden okunmuştur. Fakat bazı noktalarda kaptör vibrörden uzaklaştırıldığı halde fazda bir değişiklik olmadığı görülmüş bu durumdaki bölgelerde ölçme noktaları aralığı 0,5 cm ye kadar indirilmiştir. Okunan değerlerle hazırlanan tablolara göre her frekans için genlik $A = f(R)$ ve faz $\varphi = f(R)$ eğrileri çizilmiştir. Her model üzerinde ortalama olarak 15 frekans için ölçmeler yapılmış ve sonuçları karşılaştırabilmek gayesiyle üç model üzerinde de hemen hemen aynı frekanslarda çalışılmıştır.

3.14 Serbest Arakesitli Tabakalı Model Üzerinde Yapılan Ölçmeler

Frekans n (Hz)	Gösterildiği		Notice	
	Tablo No.	Şekil No.	Dalga Boyu ℓ (cm)	Faz Hızı C (m/sn)
200	3.14	3.33		
300	3.14	3.34		
400	3.14	3.35		
500	3.14	3.36	60.00	300
4000	3.15	3.37	18.30	732
10000	3.16	3.38	9.85	985
14000	3.16	3.39	7.66	1070
16000	3.17	3.40	6.80	1088
18000	3.18	3.41	6.20	1115
20000	3.19	3.42	9.85	1970
21000	3.20	3.43	8.75	1840
26100	3.21	3.44	5.45	1425
30000	3.22	3.45	4.85	1450
45000	3.22	3.46	2.66	1200
77115	3.23	3.47	1.60	1235

Tablo 3.13

3.14.1 Faz Eğrilerinin Değerlendirilmesi

200 - 300 - 400 Hz gibi alçak frekanslarda faz eğrilerine dayanarak dalga boyu tayini mümkün değildir. Çünkü yarı sonsuz ortama (sertleştirilmiş kauçuğa) ait yüzey veya kütle dalgaları ile yüzeysel plağın (plexiglas plağın) asimetric mod ile yayılan dalgaları arasındaki girişim ve arakesitteki yansımaların tesiriyle faz eğrileri ondü-
leli bir hal almıştır.

500 Hz ile 16000 Hz arasındaki frekanslarda, frekans büyüdükçe faz eğrilerinin daha düzgün bir hale geldiği görülür. Eğriler üzerinde yarı sonsuz ortam dalgalarının tesiri yavaş yavaş azalmaktadır.

20000 Hz e ait deneysel faz eğrisini 3.11 nolu paragrafta belirtilen esaslara göre analiz ederek vibrörden aynı faz da ve eşit genlikli olarak çıkan ve genliklerinin vibröre olan mesafeyle değişimi aynı olan, aynı frekansla fakat farklı dalga boylarıyla yayılan iki sinüsoidal titreşimin girişim yaptığını göstermek mümkün olmuştur.

Faz eğrisi üzerinde eğrinin salınım yaptığı noktalar arasındaki mesafe $L=13,5$ cm. ölçülmüş, eğrinin ortalama meylinin tersinden $\ell_2=9,85$ cm bulunmuş ve bunlara dayanarak $\ell_1=5,70$ cm hesaplanmıştır. Bu iki titreşime ait yayılma hızları,

$$c_1=5,70 \times 20000 = 1140 \text{ m/sn} \quad c_2=9,85 \times 20000=1970 \text{ m/sn}$$

olacaktır.

Plexiglas plakta $C_R \approx 1250$ m/sn olduğu nazara alınırsa birinci titreşimin asimetric mod ile ikincinin ise simetric mod ile yayıldığı kolayca görülür. L , ℓ_1 , ℓ_2 değerlerine göre teorik faz eğrisi hesaplanarak çizilmiş, teorik ve deneysel eğriler arasında fevkalade bir uygunluk bulunduğu tesbit edilmiştir (Şekil 3.42). Deneysel faz eğrisinin salınım yaptığı yani iki titreşimin zıt fazda bulunduğu noktalarda genlik eğrisi minimumlardan geçmektedir. Bu durum da kabul edilen hipotezin doğruluğunu ayrıca göstermektedir. Titreşimlerin genlikleri eşit olduğu için faz eğrisinin salınım noktalarında genlik eğrisinin sıfırdan geçmesi gerekir. Kaptörün modelle temasının noktasal olmayıp küçük bir alanla olması sıfır yerine çok küçük genlik değerleri elde edilmesine sebeb olmuştur.

18000 Hz ile 30000 Hz arasındaki bütün frekanslarda asimetric mod dalgaları ile simetric veya yüksek mod ile yayılan dalgaların girişim yapması sebebiyle faz eğrileri ondülelidir. Faz eğrilerinden hareket ederek bu frekans aralığı için bulduğumuz hız değerleri yüzeysel plaktaki Rayleigh hızından ($C_R = 1250$ m/sn) büyüktür.

45000 Hz ve 77115 Hz e ait faz eğrileri hemen hemen doğrular halindedir. Bu yüksek frekanslarda farklı modlarla yayılan dalgaların girişiminin faz eğrileri üzerinde hissedilmesi güçtür.

3.14.2 Deneysel Dispersiyon Eğrisinin İncelenmesi

Deneysel faz eğrilerinden ortalama dalga boyları tayin edilmiş, bunlara tekabül eden hızlar hesaplanarak bulunan değerlere göre deneysel dispersiyon eğrisi çizilmiştir. (Şekil 3.48). Dispersiyon eğrisinin bir parçası, karakteristikleri, $C_R = 1250$ m/sn $\nu = 0,25$

$H = 4,5$ cm olan serbest sonsuz plağa ait teorik LAMB eğrisi ile hemen hemen çakışmaktadır. Modelde kullanılan yüzeysel plexiglas plağın da karakteristikleri aynıdır. Buradan, serbest arakesit halinde yüzeysel tabakanın hakiki kalınlığının bulunacağı neticesine varırız. Farklı modlarla yayılan dalgaların girişim yaptığı frekanslara

ait noktalar LAMB eğrisinin üstünde bulunan bir grup teşkil ederler. Düşük frekanslara tekabül eden noktalar ise geçiş bölgesini meydana getirmiştir.

3.14.3 Genlik Eğrilerinin İncelenmesi

200 - 300 - 400 Hz gibi geçiş bölgesinde bulunan alçak frekanslarda, vibrörden itibaren 40 - 50 cm uzaklığa kadar genlikte çok hızlı bir azalma oluyor, bilahare azalma yavaşlıyor. Frekans yükseldikçe eğrilerde dalgalanma görülmekle beraber genel olarak fazla ondüleli bir durum arz etmiyorlar.

500 Hz ile 16000 Hz arasındaki frekanslarda genlik çok dalgalı eğriler çizerek vibröre olan mesafeyle azalıyor.

18000 Hz ile 30000 Hz arasındaki frekanslara ait faz eğrileri üzerinde, serbest sonsuz plakta farklı modlarla yayılan dalgaların girişimi açık bir şekilde hissediliyor. Faz eğrisinin salınım noktalarında genlik minimum değere, hemen hemen sıfıra varıyor.

45000 Hz ve 77115 Hz gibi yüksek frekanslarda genlik eğrileri dalgalı ve genlik vibröre olan mesafeyde hızlı bir azalma gösteriyor.

3.15 Tam Kaygan Arakesitli Tabakalı Model Üzerinde Yapılan Ölçmeler

Frekans n (Hz)	Gösterildiği		Notlar	
	Tablo No.	Şekil No.	Dalga Boyu λ (cm)	Faz Hızı c(m/sn)
200	3.25	3.49	72.70	145
300	3.25	3.50	72.70	273
400	3.25	3.51	67.50	270
500	3.25	3.52	60.00	300
4000	3.26	3.53	18.20	728
10000	3.26	3.54	9.71	971
14000	3.27	3.55	7.52	1050
18000	3.28	3.56	6.10	1100
20000	3.28	3.57	9.65	1930
24000	3.29	3.58	11.00	2640
27000	3.29	3.59	9.33	2520
30000	3.30	3.60	4.50	1350
45000	3.31	3.61	2.72	1225

Tablo 3.24

3.15.1 Faz Eğrilerinin Değerlendirilmesi

Geçiş bölgesinde bulunan 200 Hz ile 500 Hz arasındaki frekanslarda serbest arakesitli model hali için belirtilen sebepten dolayı faz eğrileri biraz ondülelidir. Fakat dalga boyu tayin etmek mümkündür.

4000 Hz, 10000 Hz ve 45000 Hz e ait faz eğrileri düzgün doğrular halindedirler.

14000 Hz ile 30000 Hz arasındaki frekanslarda farklı modla yayılan dalgaların girişimi sebebiyle faz eğrileri çok dalgalı bir durum arz ediyor.

3.15.2 Deneysel Dispersiyon Eğrisinin İncelenmesi

Deneysel dispersiyon eğrisinin asimetrik modla yayılan dalgalara ait olan kısmı $0 < \ell < 10$ cm. için, karakteristikleri, $C_R=1250$ m/sn $\nu = 0,25$, $H=4,0$ cm olan serbest sonsuz plağa ait teorik LAMB eğrisi ile çakışma halindedir, $\ell > 10$ cm için(daha büyük dalga boylarında) 4,5 cm ve 4,0 cm kalınlığa tekabül eden LAMB eğrileri arasında kalmaktadır. (Şekil 3. 62). Yani arakesitin tam kaygan olması halinde, yüzeysel tabakanın kalınlığını hassas bir şekilde tayin etmek mümkün değildir. Dispersiyon eğrisinin diğer kısımları serbest arakesitli modeldeki gibidir.

3.15.3 Genlik Eğrilerinin İncelenmesi

Geçiş bölgesinde bulunan 200 Hz ile 500 Hz arasındaki düşük frekanslarda genlik eğrileri oldukça düzgün, vibrörden 40 cm mesafeye kadar genlikte hızlı bir azalma oluyor sonra azalma hızı yavaşlıyor.

4000 Hz, 10000 Hz, 45000 Hz ' de genlik dalgalı bir eğri çizerek vibröre olan mesafeyle azalıyor.

14000 Hz ile 30000 Hz arasındaki frekanslarda genlik eğrileri, faz eğrilerinin salınım yaptığı noktalarda minimuma varan dalgalı eğriler halindedir.

3.16. Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Model Üzerinde Yapılan Ölçmeler

Frekansa n (Hz)	Gösterildiği		Netice	
	Tablo No.	Şekil No.	Dalga Boyu λ (cm)	Faz Hızı c (m/sn)
200	3.33	3.63	71.00	142
300	3.33	3.64	58.50	175.5
500	3.33	3.65	45.50	227.5
5000	3.34	3.66	15.60	780
10000	3.34	3.67	9.56	956
17000	3.35	3.68	11.80	2010
18000	3.35	3.69	11.00	1980
20000	3.36	3.70, 3.71	9.00	1800
21000	3.37	3.72	11.30	2380
30000	3.38	3.73	4.16	1248
45000	3.39	3.74	2.75	1238
70000	3.40	3.75	1.75	1225

Tablo 3. 32

3.16.1 Faz Eğrilerinin Değerlendirilmesi

Daha önceki iki arakesit tipinde olduğu gibi 500 Hz e kadar olan düşük frekanslarda, geçiş bölgesinin özelliği sebebiyle faz eğrileri dalgalıdır.

500 Hz den daha büyük frekanslarda, frekans arttıkça faz eğrileri düzgün doğrular halini alır.

17000 Hz ile 30000 Hz arasındaki frekanslarda farklı modlarla yayılan titreşimlerin girişimleri faz eğrilerini ondüleli hale getirmiştir.

30000 Hz , 45000 Hz ve 70000 Hz e ait faz eğrileri düzgün doğrular halindedirler.

3.16.2 Deneysel Dispersiyon Eğrisinin İncelenmesi

Deneysel dispersiyon eğrisinin, asimetrik mod dalgalarının hakim olduğu frekanslara tekabül eden noktalardan geçen parçası,

karakteristikleri $C_R=1250$ m/sn $V = 0,25$ ve $H=4,0$ cm olan serbest sonsuz plağa ait teorik LAMB eğrisi ile tam bir çakışma halindedir (Şekil 3.76). Halbuki modeldeki yüzeysel plağın (plexiglas plağın) kalınlığı 4,5 cm dir. Yapıştırılmış arakesit halinde, yüzeysel plağın, deneysel dispersiyon eğrisine göre tayin edilen kalınlığı haki ki kalınlıktan küçüktür. Farklı modlarla yayılan dalgaların girişim yaptığı frekanslara ait noktalar LAMB eğrisi üstünde bulunan bir grup teşkil etmiştir. Düşük frekanslara tekabül eden noktalar ise geçiş bölgesini meydana getirmiştir.

3.16.3 Genlik Eğrilerinin İncelenmesi

Genlik eğrileri diğer iki arakesit tipinde belirtildiği gibi frekanslara göre aynı şekilde gruplara ayrılır.

3.17 Üç Arakesit Tipine Karşılaştırmalı Genel Bakış ve Sonuçların Goodman Vibrörü ile Yol Üzerindeki Çalışmalar Bakımından Önemi

A) 200 Hz ile 77115 Hz arasında bulunan bir çok frekans için ölçmeler yapılmıştır. Her üç arakesit tipi için faz ve genlik eğrilerini dört büyük gruba ayırabiliriz. Grupları sınırlayan frekanslar kesin olmayıp arakesit tiplerine göre küçük farklar gösterebilir.

1) 200 Hz - 500 Hz

Geçiş bölgesinde bulunan bu düşük frekanslarda yarı sonsuz ortam dalgaları ile yüzeysel plakta asimetrik modla yayılan dalgalar girişim yaptığından faz eğrileri çok ondülelidir. Serbest arakesitli modelde bu frekans aralığı için, faz eğrilerine dayanarak dalga boyu tayin etmek mümkün olamamıştır.

Genlik eğrileri ise hemen hemen salınım yapmayan ve düzgün azalan eğriler halindedir. (Serbest arakesitli modele ait eğriler diğerlerine nazaran biraz dalgalıdır). Eğrilerin bu özelliği sayesinde geçiş bölgesini tanımak imkan dahiline girecektir. Zira önce de belirtildiği gibi yarı sonsuz ortama ve tabakalı modelde 500 Hz in üstündeki frekanslara ait bütün genlik eğrileri çok dalgalı eğrilerdir.

2) 500 Hz - 16000 Hz

Yüzeysel plağın asimetrik modla yayılan dalgaları üzerinde yarı sonsuz ortam dalgalarının tesiri frekans büyüdükçe azalmakta ve faz

eğrileri düzgün doğrular haline gelmektedir. Deneysel dispersiyon eğrisinin bu frekans aralığına tekabül eden noktaları, eğrinin teorik LAMB eğrisiyle çakışan kısmını teşkil ederler.

Genlik eğrileri çok dalgalı ve genliğin vibröre olan mesafeyle azalışı oldukça hızlıdır. 30000 Hz in üstündeki frekanslara ait genlik eğrileri de bu şekildedir. Serbest arakesitli model üzerinde elde edilen genlik eğrileri diğerlerine nazaran fazla dalgalı ve genliğin azalışı daha yavaştır.

3) 16000 Hz - 30000 Hz

Faz eğrileri, yüzeysel plakta asimetrik, simetrik ve yüksek modlarla yayılan dalgaların girişim yapmaları sebebiyle çok ondülelidir. Bu eğrilerden tayin edilmiş olan ortalama dalga boylarına göre hesaplanan hız değerleri yüzeysel plaktaki Rayleigh hızından (C_{RT} den) büyüktür.

Şimdiye kadar Goodman vibrörü ile yollar üzerinde yapılan çalışmalar sırasında da modelde elde ettiğimiz ondüleli eğrilere benzer eğriler elde edilmiştir. Bunun, yolun yapısının homogen olmamasından, yolda bir çatlak bulunmasından veya yolun çeşitli tabakaları arasındaki geçiş bölgesinden ileri geldiği düşünülmüştür. Halbuki tabakalı yarı sonsuz ortam modelimizde yüzeydeki plexiglas plak tek tabaka halindedir. (yani farklı tabakaların geçiş bölgesi yoktur) Homogen, izotrop ve elastiktir. Çatlak ihtiva etmemektedir. Böyle bir model üzerinde 20000 Hz için elde ettiğimiz faz eğrisini analiz ederek aynı frekansla fakat farklı dalga boylarıyla (değişik modlarla) yayılan sinüsoidal iki titreşimin girişim yaptığını göstermek mümkün olmuştur. Bu durumda Goodman vibrörü ile yol üzerinde yapılan ölçmelere göre çizilmiş olan faz eğrilerinin değerlendirilmesinde hata-ya düşüldüğü açıktır.

Bu frekans aralığına ait genlik eğrileri, faz eğrilerinin salınım yaptığı (girişim yapan titreşimlerin zıt fazda bulunduğu) noktalarda minimumlardan geçer. Genlik eğrilerinin bu özelliği faz eğrilerini incelerken çok faydalı bir unsur olacaktır.

Bundan sonra Goodman Vibrörü ile yol üzerinde yapılacak çalışmalarda yukarıda belirtilen hususların nazara alınması, ondüleli bir faz eğrisi elde edilince ölçme noktaları arasındaki mesafeyi küçülterek faz değişiminin hassas bir şekilde incelenmesi ve genlik eğrisinin de yardımıyla neticelerin değerlendirilmesi uygun olur.

4) 30000 Hz - 77115 Hz

Bu frekans aralığında farklı modlarla yayılan dalgaların girişimi ni faz eğrileri üzerinde hissetmek mümkün değildir. Faz eğrileri düzgün doğrular haline gelmiştir.

Şekil 3. 25 e bakınca kolayca görüleceği gibi yüksek frekanslarda simetrik ve asimetrik modlarla yayılan titreşimlerin dalga boyları birbirine çok yakındır. Bu sebeple $\Delta \varphi$ küçük L büyüktür. Sınırlı ölçü uzunluğu içinde faz eğrisinin salınım noktalarına raslamak mümkün değildir. Bu durumda elde edilecek faz eğrisi ℓ_1 ve ℓ_2 değerleri arasında bulunan ortalama bir dalga boyu değeri verecektir. Bu dalga boyuna göre hesaplanacak hız, asimetrik mod dalgalarının hızından büyük olacaktır. Nitekim yollar üzerinde, Goodman vibrörü ile yüksek frekanslarda çalışma imkânı sağlandığındanberi, daha önce nisbeten düşük frekanslarla çalışarak bulunmuş olan hızlardan daha büyük hızlar, dolayısıyla daha yüksek bir mukavemet elde edildiği görülmüş fakat bu farkın sebebi izah edilememiştir. Böylece model üzerindeki çalışmalar karanlık olan bu noktayı aydınlatmaktadır.

B) Üç arakesit tipi için elde edilen deneysel dispersiyon eğrileri birbirlerinden farklıdır. Serbest arakesitli modele ait dispersiyon eğrisi yüzeysel plağın (plexiglas plağın) hakikî kalınlığını $H=4,5$ cm vermektedir. Yani LAMB hipotezi şartlarına en iyi şekilde serbest arakesit halinde yaklaşılmaktadır. Bu sebeple Goodman Vibrörü ile yol üzerinde yapılacak çalışmalarda yol tabakaları birbiri üzerine serbest oturuyorsa tabaka kalınlıkları yeter bir hassasiyetle tayin edilebilecektir.

Yapıştırılmış arakesitli modelde deneysel dispersiyon eğrisine göre yüzeysel plağın kalınlığı hakiki kalınlıktan küçük $H=4,0$ cm bulunmaktadır. Yani yol tabakaları arasında iyi bir bağlantı mevcut ise Goodman metodu ile tayin edilecek kalınlıklar esas kalınlıklardan küçük olacaktır.

Arakesitin tam kaygan olması hali yukarıda belirtilen iki halin arasında bulunan bir durumdur.

Probleme ters yönden de bakılabilir. Eğer yoldaki tabaka kalınlıkları biliniyorsa Goodman Vibrörü ile yapılan çalışmalar sonunda elde edilecek deneysel dispersiyon eğrilerine göre yollardaki arakesit şartlarını tahmin etmek mümkün olacaktır.

3.18 Sonuç

Yol modelleri üzerinde ilk dinamik çalışmalar J. R. Tosticarelli tarafından İngiltere Road Research Laboratuvarında linolyum (alt yapı - yarı sonsuz ortam), alüminyum karışımı ve perspex (üst yapı - yüzey - sel tabakalar) plaklardan hazırlanmış iki boyutlu modellerle yapılmıştır. Tosticarelli Goodman metodunu kullanarak modeller üzerinde yaptığı faz ölçmelerine dayanarak bulduğu deneysel dispersiyon eğrilerinin teorik LAMB eğrilerine uygunluğunu göstermiştir.

Bu tezde Goodman metodunu kullanarak, iki boyutlu yol modelleri üzerinde elastik dalgaların yayılması etüd edilmiştir.

Yarı sonsuz ortam modeli olarak seçilen plexiglas plak üzerinde yapılan faz ölçmeleriyle α hızıyla yayılan boyuna dalgaların, β hızıyla yayılan enine dalgaların ve C_R hızıyla yayılan yüzey dalgalarının varlığı gösterilmiştir. Titreşimin frekansı ne olursa olsun bu üç tip dalgaının yarı sonsuz ortamdaki yayılma hızları değişmemektedir. Bu, teoriye uygun bir sonuçtur.

Yarı sonsuz ortam modeli üzerinde titreşimin genliğinin vibröre olan mesafeyle değişimi de incelenmiş ve vibrörden uzaklaşıldıkça genliğin salınımlı bir eğri çizerek, düşük frekanslarda yavaş ve yüksek frekanslarda hızlı bir şekilde azaldığı görülmüştür. Ayrıca CAE 510 ordinatöründe teorik genlik eğrileri de hesaplanmıştır. Fakat genliğin deneysel olarak incelenmesinde ve teorik olarak hesaplanmasında karşılaşılan güçlükler sebebiyle deneysel ve teorik genlik eğrileri arasında çok iyi bir uygunluk göstermek mümkün olamamıştır.

Tabakalı yarı sonsuz ortam modeli olarak sertleştirilmiş kauçuk (alt yapı - yarı sonsuz ortam) ve plexiglas plaktan (üst yapı - yüzey sel tabaka) meydana gelmiş modeller (serbest arakesitli tabakalı model, tam kaygan arakesitli tabakalı model, yapıştırılmış arakesitli tabakalı model) kullanılmıştır. Bu modeller üzerinde de vibrör tarafından doğurulan titreşimin faz ve genliğinin vibröre olan mesafeyle değişimi etüd edilmiştir.

Serbest arakesitli tabakalı model üzerinde 20000 Hz için elde edilmiş olan salınımlı faz eğrisi analiz edilerek, vibrörden aynı fazlı olarak çıkan ve yüzey sel plexiglas plakta eşit frekanslı ve simetrik ve asimetrik modla yayılan iki sinüsoidal titreşimin girişim yaptığı gösterilmiştir. Buna dayanarak bazı frekanslarda faz eğrilerinin dalgalı olmasının sebebinin aynı frekansla fakat farklı dalga boylarıyla yayılan sinüsoidal titreşimlerin girişim yapması olduğu sonucuna varılmıştır.

Faz eğrilerinin salınım noktalarında yani girişim yapan titreşimlerin zıt fazda bulunduğu noktalarda genlik eğrilerinin minimumlardan geçmesi kabul edilen hipotezin doğruluğunu ayrıca göstermiş ve bu husus faz eğrilerinin değerlendirilmesinde yardımcı bir unsur olarak kullanılmıştır.

Etüd sonunda bulunan bu orijinal sonucun Goodman vibrörü ile yol üzerinde yapılacak çalışmalarda gözönüne alınması faydalı olacaktır. Çünkü bugüne kadar düzgün bir doğru yerine dalgalı bir faz eğrisi elde edilince bunun yolun homogen olmamasından yolda bir çatlak bulunmasından, v. b. ileri geldiği düşünülmüştür. Halbuki görüldüğü gibi faz eğrilerinin dalgalı olmalarının sebepleri yalnız yoldaki gayri muntazamlıklar değildir. Salınlı bir faz eğrisi elde edilince genlik eğrisinin de yardımıyla doğru bir değerlendirme yapılmalıdır.

Serbest, tam kaygan ve yapıştırılmış arakesitli tabakalı modeller için farklı dispersiyon eğrileri elde edilmiştir. LAMB hipotezi şartları en iyi şekilde serbest arakesitli modelde gerçekleşmekte ve yüzeysel tabakanın hakikî kalınlığı bulunmaktadır. Yapıştırılmış arakesitli modele ait dispersiyon eğrisi gerçek kalınlıktan daha küçük bir kalınlık değeri vermektedir. Bu sonuçtan da yol üzerindeki çalışmalarda faydalanılabilir. Eğer yol tabakalarının kalınlıkları biliniyorsa (projeden alınabilir) deneysel dispersiyon eğrilerine göre bulunacak kalınlıklar gerçek kalınlıklarla karşılaştırılarak yol tabakalarının arakesit şartları tahmin edilebilecektir.

Goodman vibrörü ile yapılan çalışmalarda kabul edilen hipotezlerle en az uyan malzemeler daneli malzemelerdir. Yollardaki daneli malzemenin meydana gelmiş tabakalar için modeller inşa edilip üzerinde çalışılabildiği takdirde elde edilecek neticeler Goodman metoduyla büyük ilerlemelere yol açacaktır. Ayrıca modeller üzerinde yollarda raslanabilecek bütün durumları elde etmek mümkündür. Birçok tabaka ihtiva eden modeller yapılabilir. Bu modellerde tabakalar arasındaki arakesit şartları değiştirilebilir, gayri muntazamlıklar ve çatlaklar meydana getirilebilir. Yaratılan bu şartların faz, genlik ve dispersiyon eğrileri üzerindeki etkileri tesbit edildiği takdirde Goodman vibrörü ile yolda yapılan ölçme neticelerinin değerlendirilmesi sırasında karşılaşılan güçlüklerin halledilmesi, izâh edilemeyen durumların sebeplerinin bulunması, imkân dahiline girecektir.

Tablo 3.2

Yüzeysel Eksen Üzerinde Faz Ölçmeleri

Vibröre Mesafe (cm)	Frekanslar (n)						Vibröre Mesafe (cm)	Frekanslar (n)					
	20 150 Hz	22 040 Hz	23 970 Hz	25 890 Hz	27 830 Hz	29 780 Hz		20 150 Hz	22 040 Hz	23 970 Hz	25 890 Hz	27 830 Hz	29 780 Hz
10	062	310	304	086	120	0.28	44	154	250	020	018	216	370
12	220	060	044	230	288	224	46	248	380	160	172	370	194
14	340	174	196	388	050	400	48	390	122	312	340	148	366
16	046	326	334	154	186	190	50	100	248	060	102	344	110
18	174	174	074	090	320	374	52	218	384	184	244	090	264
20	278	184	236	070	160	188	54	334	112	332	018	320	110
22	020	340	374	240	334	400	56	052	250	120	190	024	320
24	108	090	148	386	100	140	58	230	020	240	340	168	060
26	240	206	288	162	256	334	60	312	124	380	126	400	280
28	382	340	022	322	064	140	62	040	290	150	275	166	190
30	100	088	160	080	216	302	64	195	042	306	030	-	240
32	230	226	326	240	392	104	66	270	180	070	206	-	389
34	340	350	088	020	170	268	68	400	340	-	389	-	240
36	056	120	234	174	312	086	70	120	040	-	-	-	360
38	180	242	368	342	140	240	72	-	194	-	-	-	240
40	288	364	120	102	280	020	74	-	312	-	-	-	392
42	040	120	264	246	040	214	76	-	020	-	-	-	250

Tablo 3.4

Eğik Eksen Üzerinde Faz Ölçmeleri

Vibröre Mesafe (cm)	Frekanslar (n)					Vibröre Mesafe (cm)	Frekanslar (n)				
	21 620 Hz	24 920 Hz	27 830 Hz	29 780 Hz	32 720 Hz		21 620 Hz	24 920 Hz	27 830 Hz	29 780 Hz	32 720 Hz
10	388	206	100	254	0.50	44	194	370	086	160	200
12	110	380	248	170	240	46	324	130	302	028	260
14	240	126	036	330	110	48	092	060	020	180	080
16	342	330	192	072	270	50	140	340	184	320	396
18	100	120	344	230	030	52	350	360	320	386	104
20	234	244	126	374	200	54	030	104	108	260	266
22	364	324	252	164	100	56	180	340	240	380	330
24	082	200	020	252	260	58	312	400	380	340	130
26	200	270	218	166	390	60	020	120	180	390	110
28	340	040	374	228	140	62	110	320	350	280	200
30	080	190	136	080	340	64	308	360	100	032	356
32	154	300	300	140	240	66	400	080	244	290	340
34	330	076	050	200	380	68	172	-	112	308	030
36	072	190	192	380	160	70	304	-	230	200	124
38	150	310	360	080	270	72	052	-	040	260	060
40	320	110	180	230	228	74	160	-	236	024	330
42	064	240	366	040	370	76	320	-	-	324	052

Table 3.6

Düsey Eksen Üzerinde Faz Ölçmeleri

Vibröre Mesafe (cm)	Frekanslar (n)						Vibröre Mesafe (cm)	Frekanslar (n)					
	21620 Hz	24420 Hz	27830 Hz	29780 Hz	34700 Hz	38110 Hz		21620 Hz	24420 Hz	27830 Hz	29780 Hz	34700 Hz	38110 Hz
10	240	160	168	300	230	270	44	320	400	220	180	312	0.80
12	268	214	280	390	400	400	46	028	070	300	308	060	254
14	378	324	360	110	100	130	48	066	180	364	368	110	386
16	060	396	064	222	242	246	50	152	212	160	100	270	120
18	124	086	202	324	286	390	52	212	310	190	150	340	240
20	212	174	286	020	070	144	54	280	360	354	300	128	022
22	282	234	354	126	216	264	56	360	030	020	340	240	100
24	340	346	060	210	300	030	58	400	140	140	108	348	260
26	030	030	130	330	050	110	60	070	170	210	326	100	400
28	114	110	236	050	102	250	62	160	310	304	-	186	100
30	166	186	340	152	266	360	64	180	340	386	-	340	226
32	260	260	038	270	360	110	66	276	110	040	-	052	050
34	316	328	186	340	140	250	68	364	200	130	-	140	110
36	384	392	260	130	260	366	70	-	290	340	-	260	-
38	064	112	352	244	334	120	72	-	-	-	-	054	-
40	128	160	040	334	070	240	74	-	-	-	-	270	-
42	196	346	140	068	142	400	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 3.3

Yüzaysel eksene ait faz eğrilerinden dispersiyon eğrisi için
elde edilen değerler

Frekans (Hz) n	Dalga Boyu (cm) λ	Faz Hızı (m/sn) α
20150	6,50	1310
22040	5,84	1287
23970	5,42	1297
25890	4,91	1270
27830	4,66	1297
29780	4,33	1288

$C_R = 1290$ m/sn bulunur.

Tablo 3.5

Eğik eksene ait faz eğrilerinden dispersiyon eğrisi için
elde edilen değerler

Frekans (Hz) n	Dalga Boyu (cm) λ	Faz Hızı (m/sn) α
21620	6,10	1319
24920	5,40	1345
27830	4,88	1440
32720	4,13	1354

$\beta_{ort} = 1365$ m/sn

Tablo 3.7

Düşey eksene ait faz eğrilerinden dispersiyon eğrisi için
elde edilen değerler

Frekans (Hz) n	Dalga Boyu (cm) λ	Faz Hızı (m/sn) α
21620	10,80	2335
24420	9,33	2285
27830	8,15	2270
29780	7,14	2130
34700	6,60	2290
38110	6,00	2285

$\alpha_{ort} = 2265$ m/sn

Tablo 3.8

Yarı Sonsuz Ortam Modeli Üzerinde Genlik Ölçmeleri

Frekans $\eta = 10000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt)	
	A_I	A_{II}
5	1.62	1.10
10	1.30	0.85
15	1.10	0.90
20	1.52	1.10
25	1.30	0.95
30	1.42	0.54
35	1.20	0.80
40	1.22	1.22
45	1.15	0.80
50	1.50	0.80

Tablo 3.9

Yarı Sonsuz Ortam Modeli Üzerinde Genlik Ölçmeleri

Frekans $\eta = 30000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt)		Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt)		Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt)	
	A_I	A_{II}		A_I	A_{II}		A_I	A_{II}
4	4.90	6.00	20	4.80	4.90	36	3.00	2.60
5	5.50	5.10	21	3.90	4.80	37	3.80	3.00
6	5.25	5.35	22	4.40	4.60	38	2.85	2.40
7	4.40	5.20	23	3.90	5.30	39	2.80	2.90
8	4.90	6.00	24	4.00	4.55	40	2.90	2.85
9	3.70	4.70	25	3.40	4.40	41	3.20	3.40
10	4.50	5.50	26	3.90	3.90	42	2.40	3.10
11	4.30	4.80	27	3.90	4.80	43	2.30	2.85
12	4.40	6.00	28	4.00	3.60	44	2.60	3.20
13	4.50	5.00	29	3.05	4.05	45	2.90	2.95
14	4.45	4.90	30	3.00	3.35	46	2.30	2.85
15	4.10	4.75	31	3.20	4.20	47	2.70	2.00
16	4.40	5.20	32	3.00	2.60	48	1.90	1.90
17	4.05	4.50	33	3.60	3.30	49	2.38	1.65
18	5.20	5.30	34	3.40	2.90	50	2.40	2.60
19	4.40	4.90	35	3.30	4.00	-	-	-

Tablo 3.10

Yarı Sonsuz Ortam Modeli Üzerinde Genlik Ölçmeleri

Frekans $n = 70000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik(Volt)		Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik(Volt)		Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik(Volt)	
	A _I	A _{II}		A _I	A _{II}		A _I	A _{II}
5,0	1.20	1.24	20.0	0.72	0.63	35.0	0.39	0.25
5.5	0.94	1.10	20.5	0.60	0.53	35.5	0.41	0.12
6.0	0.80	1.05	21.0	0.57	0.58	36.0	0.48	0.14
6.5	0.94	1.08	21.5	0.60	0.47	36.5	0.40	0.14
7.0	0.94	1.16	22.0	0.50	0.61	37.0	0.40	0.16
7.5	0.88	1.28	22.5	0.50	0.60	37.5	0.37	0.20
8.0	1.14	0.94	23.0	0.53	0.59	38.0	0.34	0.21
8.5	1.00	0.88	23.5	0.56	0.54	38.5	0.35	0.24
9.0	0.84	0.92	24.0	0.50	0.47	39.0	0.37	0.22
9.5	0.76	1.08	24.5	0.52	0.64	39.5	0.40	0.22
10.0	0.96	1.20	25.0	0.60	0.58	40.0	0.37	0.28
10.5	0.92	1.27	25.5	0.65	0.50	40.5	0.35	0.28
11.0	0.78	1.04	26.0	0.50	0.52	41.0	0.30	0.27
11.5	0.84	1.10	26.5	0.56	0.46	41.5	0.28	0.26
12.0	0.70	0.88	27.0	0.60	0.40	42.0	0.27	0.24
12.5	0.62	0.76	27.5	0.58	0.30	42.5	0.26	0.27
13.0	0.70	0.80	28.0	0.58	0.34	43.0	0.28	0.22
13.5	0.88	1.08	28.5	0.57	0.32	43.5	0.24	0.21
14.0	0.90	1.00	29.0	0.59	0.31	44.0	0.26	0.16
14.5	0.80	0.88	29.5	0.50	0.34	44.5	0.25	0.13
15.0	0.86	0.90	30.0	0.58	0.36	45.0	0.20	0.20
15.5	0.85	0.84	30.5	0.55	0.31	45.5	0.20	0.16
16.0	0.80	0.76	31.0	0.42	0.325	46.0	0.23	0.12
16.5	0.76	0.71	31.5	0.47	0.29	46.5	0.27	0.15
17.0	0.76	0.72	32.0	0.44	0.32	47.0	0.27	0.14
17.5	0.76	0.68	32.5	0.46	0.28	47.5	0.24	-
18.0	0.80	0.66	33.0	0.42	0.25	48.0	0.24	-
18.5	0.62	0.70	33.5	0.40	0.26	48.5	0.18	-
19.0	0.66	0.70	34.0	0.39	0.21	49.0	0.16	-
19.5	0.64	0.67	34.5	0.42	0.23	49.5	0.23	-
-	-	-	-	-	-	50.0	0.20	-

Tablo 3.11

Yarı Sonsuz Ortam Modeli Üzerinde Genlik Ölçmeleri

Frekans $\eta = 210000$ Hz

Vibröre Mesafe (cm)	Genlik(Volt)		Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik(Volt)		Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik(Volt)	
	A _I	A _{II}		A _I	A _{II}		A _I	A _{II}
4,00	0,62	0,56	10,75	0,125	0,13	17,50	0,09	0,06
4,25	0,60	0,52	11,00	0,09	0,13	17,75	0,095	0,07
4,50	0,60	0,41	11,25	0,11	0,15	18,00	0,08	0,06
4,75	0,54	0,41	11,50	0,125	0,14	18,25	0,095	0,075
5,00	0,50	0,35	11,75	0,105	0,12	18,50	0,07	0,07
5,25	0,44	0,32	12,00	0,08	0,14	18,75	0,06	0,065
5,50	0,47	0,28	12,25	0,075	0,13	19,00	0,09	0,06
5,75	0,52	0,22	12,50	0,10	0,145	19,25	0,08	0,055
6,00	0,36	0,25	12,75	0,11	0,12	19,50	0,08	0,06
6,25	0,32	0,19	13,00	0,08	0,11	19,75	0,09	0,065
6,50	0,18	0,21	13,25	0,105	0,11	20,00	0,08	0,055
6,75	0,15	0,28	13,50	0,11	0,105	20,50	0,055	0,055
7,00	0,25	0,21	13,75	0,08	0,13	21,00	0,085	0,06
7,25	0,29	0,23	14,00	0,08	0,13	21,50	0,055	0,06
7,50	0,21	0,265	14,25	0,08	0,12	22,00	0,06	0,055
7,75	0,14	0,29	14,50	0,06	0,13	22,50	0,04	0,045
8,00	0,17	0,31	14,75	0,075	0,12	23,00	0,04	0,045
8,25	0,22	0,22	15,00	0,07	0,105	23,50	0,045	0,04
8,50	0,16	0,19	15,25	0,06	0,12	24,00	0,045	0,05
8,75	0,12	0,20	15,50	0,065	0,09	24,50	0,03	0,04
9,00	0,11	0,18	15,75	0,07	0,10	25,00	0,042	0,03
9,25	0,18	0,18	16,00	0,08	0,09	26,00	—	0,04
9,50	0,19	0,16	16,25	0,10	0,09	27,00	—	0,035
9,75	0,20	0,13	16,50	0,12	0,08	28,00	—	0,04
10,00	0,18	0,12	16,75	0,125	0,075	29,00	—	0,04
10,25	0,13	0,13	17,00	0,08	0,08	30,00	0,0375	0,035
10,50	0,14	0,13	17,25	0,10	0,07	35,00	0,0325	0,03

Tablo 3.12

**Elektronik Hesap Makinasında Hesaplanan
Genlik Değerleri**

Vibröre Mesafe (cm) R	Frekanslar (Hz) n			Vibröre Mesafe (cm) R	Frekanslar (Hz) n		
	30000	70000	210000		30000	70000	210000
5		$4.71.10^{-9}$	$8.16.10^{-9}$	28	$13.04.10^{-10}$	$1.99.10^{-9}$	$3.45.10^{-9}$
6		4.30 "	7.45. "	29	12,81 "	1.97 "	3.39 "
7		3.98 "	6.70 "	30	12.59 "	1.92 "	3.33 "
8	$24.38.10^{-10}$	3.73 "	6.45 "	31	12.39 "	1.89 "	3.27 "
9	23.00 "	3.51 "	6.08 "	32	12.19 "	1.86 "	3.23 "
10	21.81 "	3.33 "	5.77 "	33	12.01 "	1.83 "	3.18 "
11	20.80 "	3.18 "	5.50 "	34	11.83 "	1.81 "	3.13 "
12	19.91 "	3.04 "	5.27 "	35	11.66 "	1.78 "	3.09 "
13	19.13 "	2.92 "	5.06 "	36	11.50 "	1.76 "	3.04 "
14	18.44 "	2.82 "	4.88 "	37	11.34 "	1.73 "	3.00 "
15	17.81 "	2.72 "	4.71 "	38	11.19 "	1.71 "	2.96 "
16	17.24 "	2.63 "	4.56 "	39	11.05 "	1.69 "	-
17	16.73 "	2.56 "	4.43 "	40	10.91 "	1.67 "	-
18	16.26 "	2.48 "	4.30 "	41	10.77 "	1.65 "	-
19	15.83 "	2.42 "	4.19 "	42	10.64 "	1.63 "	-
20	15.42 "	2.36 "	4.08 "	43	10.52 "	1.61 "	-
21	15.05 "	2.30 "	3.98 "	44	10.40 "	1.59 "	-
22	14.71 "	2.25 "	3.89 "	45	10.28 "	1.57 "	-
23	14.38 "	2.20 "	3.81 "	46	10.17 "	1.55 "	-
24	14.08 "	2.15 "	3.73 "	47	10.06 "	1.54 "	-
25	13.80 "	2.11 "	3.65 "	48	9.96 "	1.52 "	-
26	13.53 "	2.07 "	3.58 "	49	9.86 "	1.51 "	-
27	13.28 "	2.03 "	3.51 "	50	9.76 "	1.49 "	-

Tablo 3.14

Serbest Arakesitli Tabakalı Modelde
Fas ve Genlik Ölçmeleri

Vibrö Mesafe R (cm)	Frekanslar (n)							
	200 Hz		300 Hz		400 Hz		500 Hz	
	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) φ	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) φ	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) φ	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) φ
7	2.40	214	9.40	240	3.40	241	11.60	267
10	2.20	219	12.00	250	3.30	247	15.60	270
15	2.05	226	10.20	255	3.20	257	15.50	285
20	0.90	223	9.40	257	3.60	267	12.80	328
25	0.70	220	8.60	258	3.30	268	20.00	348
30	0.28	205	6.80	263	2.20	283	18.00	385
35	0.18	282	4.80	290	1.60	355	20.00	008
40	0.16	311	3.00	314	1.60	004	10.00	033
45	0.16	348	2.80	295	1.80	031	4.80	113
50	0.12	371	2.00	332	1.80	048	10.00	155
55	0.10	350	3.00	011	2.20	054	12.80	152
60	0.10	034	2.40	035	2.00	060	20.00	195
65	0.04	113	2.80	058	1.60	112	20.00	208
70	0.08	207	3.30	080	2.30	179	7.40	232
75	0.15	240	3.00	095	2.10	222	9.40	338
80	0.18	248	2.60	113	1.80	239	10.20	329
85	0.12	250	2.20	154	1.90	248	8.80	355
90	0.08	229	2.20	188	2.40	236	10.60	383
95	0.10	161	2.00	198	1.10	252	16.00	004
100	—	—	1.50	202	1.40	344	4.80	033
105	—	—	1.90	254	1.40	383	5.20	128
110	—	—	1.70	261	1.40	011	4.40	136
115	—	—	1.60	296	1.40	026	6.00	154
120	—	—	1.80	302	1.40	043	8.80	192
125	—	—	2.20	348	1.20	075	8.60	219

Table 3.15

Serbest Arakesitli Tabakalı Modelde Faz
ve Genlik Ölçmeleri
Frekans $n = 4000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ
7	-	-
10	1.00	322
15	1.20	014
20	1.35	128
25	1.75	215
30	1.60	335
35	1.05	051
40	1.35	151
45	0.90	273
50	1.55	355
55	1.80	114
60	1.45	161
65	0.65	319
70	1.10	386
75	1.30	126
80	0.90	200
85	1.50	337
90	0.90	024
95	1.50	148
100	0.45	291
105	1.25	361
110	0.45	138
115	-	-
120	-	-
125	-	-

Tablo 3.16
Serbest Arakesitli Tabakalı Modelde Faz ve Genlik Ölçmeleri

	10000 Hz		14000 Hz			10000 Hz		14000 Hz	
	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ		Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ
10	1.90	273	2.50	061	78	1.00	196	2.00	000
12	1.90	354	2.30	160	80	1.30	317	1.60	117
14	1.20	037	2.50	256	82	1.10	376	1.25	205
16	1.95	110	3.50	351	84	0.60	103	0.50	368
18	1.50	200	2.20	042	86	1.20	164	1.10	050
20	1.45	282	1.85	161	88	0.65	237	1.00	180
22	2.15	350	1.50	267	90	1.50	321	1.80	251
24	1.60	008	2.50	001	92	1.45	361	2.20	345
26	1.70	109	2.50	104	94	0.85	105	2.30	021
28	1.75	179	3.00	208	96	1.20	157	1.30	164
30	1.65	271	3.25	296	98	0.160	230	1.00	207
32	2.40	355	3.80	387	100	1.35	330	1.35	009
34	1.80	026	2.65	088	102	1.00	372	0.90	075
36	2.10	1105	3.00	190	104	0.80	128	1.40	202
38	2.20	169	1.75	315	106	0.90	177	0.90	300
40	1.80	278	2.10	034	108	0.55	265	1.50	380
42	2.10	351	2.10	147	110	1.45	333	0.60	083
44	1.35	030	3.55	230	112	1.15	—	1.50	—
46	1.70	119	2.90	333	114	0.75	—	0.16	—
48	1.45	193	2.60	015	116	1.10	—	1.15	—
50	1.60	294	2.20	132	118	0.22	—	0.65	—
52	2.20	364	1.65	215	120	1.30	—	1.30	—
54	1.10	061	11.30	375	122	0.60	—	1.30	—
56	2.10	121	2.10	070	124	0.90	—	1.00	—
58	1.55	182	2.60	179	126	1.00	—	0.80	—
60	1.25	303	1.90	274	128	0.28	—	1.05	—
62	1.50	368	2.10	368	130	1.30	—	0.80	—
64	0.85	064	1.50	053	132	0.50	—	—	—
66	1.40	155	1.35	168	134	1.00	—	—	—
68	1.10	216	0.80	243	136	0.80	—	—	—
70	1.20	320	1.35	017	—	—	—	—	—
72	1.50	375	1.25	108	—	—	—	—	—
74	1.00	068	2.10	220	—	—	—	—	—
76	1.70	134	2.25	313	—	—	—	—	—

Tablo 3.17

Serbest Arakesitli Tabakalı Modelde Faz ve Genlik

Ölçmeleri $n=16000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ
10	1.25	054	74	0.80	194
12	0.95	174	76	0.80	289
14	1.05	299	78	0.60	013
16	1.30	004	80	0.40	163
18	1.20	107	82	0.65	280
20	1.00	221	84	0.55	003
22	0.95	364	86	0.55	099
24	1.40	080	88	0.44	214
26	1.30	197	90	0.60	334
28	1.20	309	92	0.70	043
30	1.30	018	94	0.38	175
32	1.50	135	96	0.45	295
34	1.40	243	98	0.57	024
36	1.00	345	100	0.67	127
38	0.95	095	102	0.64	231
40	1.35	221	104	0.46	236
42	1.40	321	106	0.35	047
44	1.30	029	108	0.40	217
46	1.05	150	110	0.40	290
48	0.90	266	112	0.52	045
50	1.00	346	114	0.48	146
52	0.90	108	116	0.51	243
54	0.85	234	118	0.39	372
56	1.25	353	120	0.42	068
58	1.00	067	122	0.28	214
60	0.85	161	124	0.17	376
62	0.55	278	126	0.50	054
64	0.50	016	128	0.22	153
66	0.50	142	130	0.33	282
68	0.85	248	132	0.39	382
70	0.65	363	134	0.16	070
72	0.60	085	136	0.34	240

Tablo 3.18

Serbest Arakesitli Tabakalı Modelde

Fas ve Genlik Ölçmeleri

 $\Omega = 18000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
10	0.40	186	61	0.31	169	105	0.07	360
12	0.52	337	62	0.10	254	106	0.21	040
14	0.66	030	63	0.08	070	107	0.15	041
16	0.85	135	64	0.14	126	108	0.30	079
18	0.75	224	66	0.54	196	110	0.44	200
20	0.26	327	68	00.63	286	111	0142	240
21	0.05	070	70	0.63	357	112	0.41	268
22	0.22	200	72	0.42	088	114	0.15	018
24	0.74	302	74	0.16	204	115	0.15	077
26	1.10	026	75	0.13	339	116	0.16	088
28	0.90	103	76	0.20	014	117	0.24	031
30	0.75	216	78	0.27	181	118	0.30	019
32	0.55	330	80	0.33	295	119	0.38	024
34	0.44	066	82	0.40	025	120	0.31	042
36	0.18	225	84	0.32	104	122	0.28	209
37	0.31	334	86	0.37	208	124	0.28	266
38	0.52	270	88	0.23	288	125	0.22	312
40	0.75	114	89	0.12	210	126	0.21	032
42	1.00	204	90	0.15	201	127	0.20	061
44	0.85	300	92	0.25	291	127,5	0.18	084
46	0.50	005	93	0.34	356	128	0.15	107
48	0.10	132	94	0.49	200	130	0.05	266
50	0.42	376	95	0.52	029	131	0.08	340
52	0.48	083	96	0.34	070	132	0.05	035
54	0.50	196	98	0.23	198	134	0.32	201
56	0162	305	100	0.27	296	135	0.36	215
58	0.78	004	102	0.09	056	136	0.25	243
60	0.38	117	104	0.11	210	-	-	-

Tablo 3.19

Serbest Arakesitli Tabakalı Madelde

Faz ve Genlik Ölçmeleri $n = 20000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
10	1.45	300	56	1.60	238	102	0.06	200
12	1.60	011	58	1.20	354	103	0.14	063
14	2.25	121	60	0.75	060	104	0.24	122
16	3.15	217	61	0.55	094	105	0.34	182
18	2.20	310	62	0.35	081	106	0.48	245
20	1.05	390	63	0.55	080	108	0.80	330
21	0.75	005	64	0.90	114	110	0.70	065
22	1.20	005	65	0.95	161	112	0.90	132
24	2.40	068	66	1.40	212	114	0.24	260
26	2.40	170	68	1.70	300	115	0.30	300
28	3.00	270	70	1.20	011	116	0.34	300
30	1.85	378	72	1.05	106	117	0.40	296
32	1.30	090	74	0.25	186	118	0.57	305
34	0.40	220	75	0.20	125	119	0.65	330
35	0.14	227	76	0.30	146	120	0.40	380
35,5	0.36	160	77	0.55	210	122	0.75	105
36	0.60	170	78	0.70	262	124	0.23	220
37	1.30	212	80	1.05	355	126	0.38	323
38	2.30	254	82	1.05	100	127	0.14	384
40	2.25	354	84	0.80	200	128	0.16	100
42	2.60	062	86	0.80	300	129	0.20	127
44	2.10	152	88	0.28	381	130	0.16	123
46	1.30	257	89	0.21	380	131	0.22	085
47	0.65	285	90	0.28	380	132	0.37	087
48	0.60	275	91	0.51	0.25	133	0.29	127
49	0.75	275	92	0.90	070	134	0.24	230
50	1.15	305	94	0.80	146	135	0.46	285
51	1.30	348	96	0.80	266	136	0.80	298
52	1.40	014	98	0.70	345	138	0.23	370
53	1.90	060	100	0.33	085	140	0.58	110
54	1.40	120	101	0.23	127	—	—	—

Tablo 3.20

Serbest Arakesitli Tabakalı Modelde
Fas ve Genlik Ölçmeleri
 $n = 21000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) φ
10	2.30	364	61	1.50	347	104	0.45	355
12	2.80	070	61,5	1.30	368	105	0,40	379
14	2.90	180	62	1.00	315	106	0,22	367
16	4,40	296	62,5	0,90	029	107	0,35	334
18	3,20	386	63	0,70	015	107,5	0,41	350
20	2,20	081	63,5	0,55	023	108	0,48	370
22	2,00	133	64	0,75	033	109	0,74	010
24	3,20	190	65	0.85	046	110	0,65	058
26	3,50	290	66	1,30	085	112	0,90	184
28	4.00	389	67	1,50	127	114	0,40	280
29	3.10	051	68	1,80	173	116	0,30	372
30	3,25	104	70	1,70	284	117	0.16	372
32	2,20	220	72	1.40	320	118	0.30	195
34	1.40	343	74	0.80	132	119	0.37	106
36	0.90	009	76	0.50	270	120	0.41	025
37	0.90	006	78	0.24	015	121	0.40	046
37,5	1.40	017	80	0.33	320	122	0.18	085
38	1.70	040	81	0.75	377	122,5	0.11	247
40	2.70	131	82	0.90	031	123	0.21	277
42	3.40	234	84	1.10	143	124	0.40	310
44	3.60	334	86	1.20	242	125	0.45	363
46	2.30	040	88	0.90	357	126	0.36	024
48	1.05	131	90	0.40	040	128	0.77	163
49	0.60	143	91	0.61	065	130	0.44	221
50	0.80	130	92	0.50	025	131	0.22	323
51	1.00	162	93	0.70	046	132	0.34	371
52	1.20	221	94	0.65	089	133	0.15	343
54	1.40	340	96	0.70	218	133,5	0.13	307
56	1.70	072	98	0.60	344	134	0.17	299
58	2.50	183	100	0.55	099	135	0.16	347
60	1.60	300	102	0.70	208	136	0.36	015

Tablo 3.21

Serbest Arakesitli Tabakalı Modelde

Faz ve Genlik Ölçmeleri

 $n = 26\ 100\ \text{Hz}$

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
10	3.80	306	52	1.20	114	96	0.17	148
12	2.80	020	54	0.60	233	98	0.47	314
14	1.70	128	56	0.35	155	100	0.46	013
16	1.50	233	58	0.60	289	102	0.34	175
18	1.25	280	60	0.60	380	104	0.08	352
18,5	1.25	0,5	62	0,30	087	105	0,07	125
19	1,05	038	64	0,60	147	106	0,06	238
19,5	0,50	120	66	0,65	263	108	0,23	377
20	0,50	215	68	0,75	383	110	0,12	116
22	2,40	368	69	0,35	046	112	0,11	319
24	4,00	090	70	0,10	271	114	0,25	177
26	3,00	226	72	0,48	008	116	0,24	298
28	2,10	368	74	1,10	137	118	0,22	054
30	0,60	131	76	0,90	272	120	0,22	242
32	1,15	352	77	0,75	347	122	0,08	350
34	2,00	090	78	0,48	180	124	0,20	185
36	1,80	194	80	0,11	320	126	0,22	372
38	1,60	280	82	0,31	060	128	0,07	110
40	1,40	382	84	0,32	190	130	0,11	315
42	1,40	096	86	0,20	320	132	0,17	225
44	0,70	236	88	0,24	358	134	0,14	314
45	0,24	023	90	0,56	008	136	0,13	081
46	0,90	117	92	0,46	156	-	-	-
48	1,80	245	94	0,28	287	-	-	-
50	2,00	371	95	0,15	287	-	-	-

Tablo 3.22

Serbest Arakesitli Tabakalı Modelde Faz ve Genlik Ölçmeleri

Vibröre Mesafe R (cm)	30 000 Hz		45 000 Hz		Vibröre Mesafe R (cm)	30 000 Hz		45 000 Hz	
	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ		Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ
10	2.35	120	18.00	218	74	0.43	115	0.90	341
12	2.40	169	4.20	071	76	0.13	026	1.10	170
14	2.00	031	6.60	390	78	1.00	196	0.50	154
16	1.90	183	4.00	262	80	1.05	326	1.15	374
18	2.10	013	7.00	216	82	0.45	092	0.11	325
20	2.40	145	8.40	054	84	0.23	322	0.75	211
22	1.70	241	2.70	383	86	0.48	200	0.60	051
24	0.35	151	6.40	220	88	0.73	312	0.70	381
26	0.55	226	2.20	160	90	0.45	048	0.50	213
28	1.10	096	7.10	034	92	0.23	173	0.50	220
30	2.20	204	4.90	269	94	0.22	270	0.80	018
32	2.00	329	4.50	224	96	0.31	353	0.16	380
34	1.20	130	3.90	058	98	0.33	023	0.70	230
36	1.00	332	3.80	026	100	0.38	122	0.30	046
38	2.30	158	6.70	253	102	0.40	250	0.32	046
40	2.50	803	2.25	132	104	0.27	209	0.24	275
42	2.00	073	2.80	042	106	0.14	093	0.20	222
44	1.05	271	1.10	277	108	0.33	104	0.32	041
46	1.30	120	4.40	292	110	0.40	205	0.06	028
48	1.60	305	2.90	095	112	0.27	372	0.29	266
50	1.40	032	1.05	022	114	0.21	119	0.05	144
52	0.60	178	2.25	270	116	0.11	127	0.19	080
54	0.20	026	1.00	253	118	0.28	210	0.26	274
56	0.35	279	2.70	090	120	0.28	334	0.08	302
58	0.95	355	1.20	318	122	0.20	098	1.10	127
60	0.70	092	2.25	272	124	0.06	278	0.06	136
62	0.60	228	2.30	119	126	0.12	261	0.12	320
64	0.45	002	0.80	083	128	0.22	320	0.04	280
66	0.08	200	1.60	332	130	0.24	061	0.10	144
68	0.90	072	0.60	255	132	0.14	225	-	-
70	0.85	198	1.35	111	134	0.09	318	-	-
72	0.70	345	0.65	380	-	-	-	-	-

Tablo 3.23
Serbest Arakesitli Tabakalı Modelde
Faz ve Genlik Ölçmeleri

$n = 77115 \text{ Hz}$

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
10	9.00	166	37	4.20	118
11	5.00	044	38	3.00	375
12	10.40	040	39	1.20	204
13	7.80	215	40	2.40	026
14	8.00	103	41	3.10	328
15	6.60	260	42	2.40	185
16	6.80	150	43	2.20	056
17	6.70	020	44	2.00	233
17,5	3.80	030	45	1.90	126
18	6.70	250	46	0.80	030
19	6.30	110	47	2.50	260
20	4.50	387	48	1.70	047
21	3.90	194	49	2.30	333
22	1.50	050	50	1.40	172
23	8.00	250	51	1.10	065
24	2.80	050	52	1.40	290
25	5.60	320	53	1.60	150
26	4.00	225	54	1.00	000
27	8.80	070	55	1.60	198
28	3.60	270	56	1.30	080
28,5	3.00	035	57	1.40	310
29.0	3.30	160	58	1.20	165
29.5	2.90	275	59	0.70	050
30	2.20	290	60	1.00	235
30.5	3.20	148	61	1.30	136
31	3.50	300	62	1.20	010
32	1.40	185	63	1.40	243
33	4.20	338	64	0.90	120
34	3.80	153	65	0.80	323
35	4.40	042	66	1.00	185
36	1.80	270	67	0.80	-

**Tam Kaygan Arakesitli Tabakalı Modelde
Paz ve Genlik Ölçümleri**

[illegible]

Tablo 3.26

Tam Kaygan Arakesitli Tabakalı Modelde
Faz ve Genlik Ölçmeleri

Vibröre Mesafe R (cm)	4 000 Hz		10 000 Hz		Vibröre Mesafe R (cm)	4 000 Hz		10 000 Hz	
	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Genlik (Volt.) A	Faz (Grad) φ		Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
7	15.00	382	-	-	64	10.00	040	0.40	124
8	21.00	010	-	-	66	12.00	077	0.51	200
10	22.00	056	2.00	284	68	12.40	120	0.43	274
12	20.00	100	1.65	370	70	8.80	146	0.43	362
14	20.0	143	1.35	048	72	6.20	205	0.40	038
16	20.00	196	1.70	119	74	9.60	270	0.50	120
18	18.50	233	1.20	221	76	9.60	300	0.60	192
20	20.00	277	0.90	318	78	9.00	329	0.40	289
22	19.00	316	0.90	387	80	8.80	375	0.32	390
24	17.00	356	1.20	072	82	8.00	040	0.45	041
26	17.50	005	1.75	156	84	10.40	078	0.38	146
28	18.00	056	0.90	243	86	10.20	112	0.28	222
30	17.50	103	1.00	321	88	8.80	150	0.34	299
32	14.0	137	1.40	388	90	6.80	201	0.47	374
34	13.00	175	1.60	060	92	7.20	255	0.33	051
36	9.20	235	1.30	143	94	13.20	290	0.30	160
38	14.20	271	1.00	230	96	9.00	315	0.33	216
40	15.20	305	0.90	328	98	7.00	355	0.30	315
42	12.80	346	0.80	021	100	7.20	034	0.46	375
44	7.60	385	0.90	087	102	10.00	078	0.21	048
46	11.60	052	0.90	175	104	9.60	110	0.42	151
48	12.80	094	1.10	234	106	8.40	128	0.28	218
50	13.20	122	0.70	345	108	6.40	167	0.34	315
52	10.0	163	0.65	025	110	8.60	240	0.46	379
54	9.40	224	0.65	107	112	8.20	291	0.28	068
56	10.50	268	0.60	188	114	7.60	318	0.31	170
58	11.60	305	0.60	267	116	5.40	354	0.40	240
60	10.40	340	0.60	357	118	4.00	038	0.30	329
62	12.40	375	0.41	036	120	8.00	074	0.45	389
-	-	-	-	-	122	9.60	086	-	-
-	-	-	-	-	124	6.60	114	-	-
-	-	-	-	-	126	3.40	155	-	-

Tablo 3.27

Tam Kaygan Arakesitli Tabakalı Modelde

Fas ve Genlik Ölçmeleri

Vibröre Mesafe R (cm)	14000 Hz		Vibröre Mesafe R (cm)	14000 Hz	
	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) φ		Genlik (Volt) A	Fas (Grad) φ
7	10.20	240	68	2.40	246
8	6.80	310	70	2.82	025
10	9.80	030	72	2.40	130
12	6.40	150	74	4.60	260
14	13.60	265	76	5.20	322
16	14.60	349	78	4.20	021
18	12.00	053	80	5.30	101
20	10.40	140	82	4.00	185
22	8.40	225	84	1.25	355
24	4.00	345	86	2.40	063
26	7.20	107	88	2.60	202
28	9.20	219	90	7.00	274
30	11.60	300	92	3.60	347
32	10.00	391	94	6.20	056
34	11.20	086	96	3.40	137
36	5.60	175	98	2.70	220
38	2.80	295	100	1.75	000
40	3.20	045	102	1.70	080
42	8.20	170	104	3.50	247
44	6.50	263	106	4.20	292
46	6.80	348	108	2.50	003
48	8.00	037	110	3.70	083
50	5.20	126	112	2.50	158
52	4.00	210	114	0.85	250
54	1.50	370	116	1.30	043
56	2.90	078	118	0.38	210
58	4.00	209	120	3.30	287
60	7.00	285	122	2.20	340
62	6.20	370	124	2.40	064
64	6.60	070	126	3.20	126
66	5.20	154	128	1.35	186

Tablo 3.28

Tam Kaygan Arakesitli Tabakalı Modelde Faz ve Genlik Ölçmeleri

Vibröre Mesafe R (cm)	18 000 Hz		20 000 Hz		Vibröre Mesafe R (cm)	18 000 Hz		20 000 Hz	
	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ		Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ
10	0.43	223	0.95	323	70	0.55	073	0.41	033
12	1.35	344	3.20	027	72	0.35	180	0.15	100
14	2.45	070	2.90	148	74	0.22	332	0.11	080
16	2.50	161	3.40	238	75	-	-	0.20	118
18	1.65	280	1.80	313	76	0.20	065	0.22	141
19	1.30	324	-	-	78	0.26	263	0.08	319
20	0.35	025	1.00	365	79	-	-	0.08	031
22	0.60	186	0.90	007	80	0.34	376	0.17	100
24	1.45	342	1.10	106	82	0.61	084	0.32	184
26	1.20	048	1.70	193	84	0.35	187	0.32	283
28	1.20	166	0.80	316	86	0.36	287	0.30	354
30	1.15	282	0.80	033	88	0.20	367	0.23	108
32	1.15	379	1.10	167	90	0.15	294	0.22	035
34	0.80	089	0.80	244	92	0.32	355	0.40	112
35	0.42	150	-	-	94	0.42	075	0.29	176
36	0.21	331	0.38	263	96	0.50	154	0.19	300
38	0.95	058	0.90	320	98	0.36	293	0.06	077
40	0.80	172	0.75	017	100	0.36	370	0.06	244
42	1.20	262	0.85	104	102	0.11	126	0.15	323
44	1.10	367	1.00	181	104	0.06	296	0.05	349
46	0.32	085	0.40	268	106	0.31	085	0.20	370
48	0.15	290	0.25	301	108	0.42	170	0.24	030
50	0.44	045	0.45	337	110	0.42	281	0.36	122
52	0.56	160	0.34	046	112	0.34	357	0.21	201
54	0.65	275	0.28	183	114	0.12	096	0.07	255
56	0.70	390	0.28	324	116	0.10	191	0.04	306
58	0.70	090	0.60	017	118	0.25	086	0.20	357
60	0.55	180	0.45	102	120	0.21	130	0.10	030
62	0.07	290	0.25	151	122	0.33	295	0.05	160
63	0.11	123	-	-	124	0.30	365	0.10	311
64	0.35	190	0.46	185	126	0.20	101	0.12	090
66	0.60	267	0.60	258	128	0.20	186	0.14	132
68	0.60	361	0.60	336	130	0.10	-	0.10	244

Tablo 3.29
Tam Kaygan Arakesitli Tabakalı Modelde Faz ve Genlik Ölçmeleri

Vibröre Mesafe R (cm)	24 000 H		27 000 H		Vibröre Mesafe R (cm)	24 000 H		27 000 H	
	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ		Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ
10	4.80	131	4.30	331	67	-	-	0.40	086
12	4.00	214	2.80	101	68	0.34	282	0.36	098
14	2.60	379	1.40	276	70	0.38	299	0.32	144
16	4.30	041	0.90	058	72	0.26	342	0.25	209
18	2.20	142	1.65	253	74	0.21	093	0.57	306
19	0.35	023	-	-	76	0.36	212	0.45	023
20	1.80	030	2.25	396	78	0.24	249	0.37	120
22	2.00	124	2.40	094	80	0.20	282	0.22	210
24	2.60	244	1.30	230	82	0.32	349	0.27	278
26	1.20	345	0.65	045	84	0.22	060	0.28	366
28	1.20	066	0.75	274	86	0.19	171	0.36	058
30	0.80	150	1.90	395	88	0.30	219	0.40	169
32	2.00	181	2.25	107	90	0.22	268	0.30	257
34	1.30	226	1.85	229	92	0.08	051	0.18	340
35	0.70	228	-	-	94	0.14	083	0.22	384
36	1.10	207	0.50	361	95	0.18	059	-	-
38	0.60	270	1.15	260	96	0.21	081	0.23	094
40	1.15	040	1.50	003	98	0.24	119	0.29	185
42	1.50	133	1.10	144	100	0.24	237	0.31	267
44	1.05	170	1.25	254	102	0.17	343	0.12	379
46	0.70	260	0.30	366	104	0.30	378	0.14	057
47	-	-	0.35	338	106	0.17	035	0.14	146
48	0.70	288	0.60	343	108	0.17	118	0.24	197
50	0.40	326	0.90	043	110	0.14	221	0.28	284
52	0.18	035	0.90	159	112	0.24	222	0.18	393
54	0.80	119	0.85	274	114	0.18	296	0.12	116
56	0.90	165	0.65	367	116	0.19	336	0.11	178
58	0.18	275	0.30	033	118	0.25	054	0.15	242
59	-	-	0.17	049	120	0.14	141	0.13	339
60	0.30	035	0.32	070	122	0.22	201	0.17	049
62	0.30	067	0.70	170	124	0.34	263	0.12	147
63	0.36	067	-	-	126	0.15	326	0.10	277
63,5	0.35	007	-	-	128	0.24	024	0.09	281
64	0.32	026	0.80	280	130	0.23	094	0.12	387
66	0.15	209	0.45	034	-	-	-	-	-

Tablo 3.30

Tan Kaygan Arakesitli Tabakalı Modelde

Faz ve Genlik Ölçmeleri

Frekans $n = 30000$ Hz

Vibröre Mesafe	Genlik (Volt)	Faz (Grad)	Vibröre Mesafe	Genlik (Volt)	Faz (Grad)	Vibröre Mesafe	Genlik (Volt)	Faz (Grad)
R (cm)	A	φ	R (cm)	A	φ	R (cm)	A	φ
10	3.40	0034	54	0.75	234	94	0.30	303
12	3.00	280	56	0.90	369	96	0.21	027
14	3.40	077	58	0.80	086	98	0.18	125
16	4.50	286	60	0.11	237	99	0.15	165
18	4.30	062	60.5	0.06	330	100	0.13	188
20	320	225	61	0.06	159	101	0.10	234
22	1.40	013	62	0.30	188	102	0.08	331
24	2.90	244	64	0.48	335	104	0.14	012
26	2.60	020	66	0.58	081	106	0.22	132
28	2.80	174	68	0.54	201	108	0.21	227
30	1.60	319	70	0.14	339	110	0.10	368
31	0.90	011	71	0.08	240	111	0.06	365
32	0.80	173	72	0.20	290	112	0.10	347
34	1.60	360	74	0.25	367	114	0.18	109
36	2.80	124	76	0.60	185	116	0.18	236
38	2.60	275	78	0.34	339	118	0.16	359
40	1.20	030	79	0.18	012	119	0.09	018
41	0.60	165	80	0.08	263	120	0.05	245
42	0.80	309	82	0.27	011	121	0.06	100
44	1.50	115	84	0.40	177	122	0.08	136
46	1.30	266	86	0.40	334	124	0.13	228
48	1.10	018	88	0.14	082	126	0.18	370
50	0.14	205	89	0.05	130	128	0.04	074
51	0.28	014	90	0.12	071	130	0.04	187
52	0.46	096	92	0.26	147	—	—	—

Tablo 3.31

Tam Kaygan Arakesitli Tabakalı Modelde

Faz ve Genlik Ölçmeleri $n = 45000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
10	4.40	229	37	2.20	215	66	0.55	081	95	0.20	308
11	5.00	371	38	2.50	346	67	0.46	206	96	0.12	056
12	3.50	176	39	1.00	177	68	0.47	325	97	0.13	228
13	4.70	294	40	1.30	211	69	0.30	080	98	0.17	370
14	5.00	038	41	1.20	394	70	0.30	229	99	0.20	098
15	4.70	132	42	1.10	155	71	0.33	288	100	0.22	205
16	1.80	276	43	2.20	292	72	0.32	136	101	0.17	327
16.5	0.90	040	44	1.20	009	73	0.40	275	102	0.07	113
17	1.80	154	45	1.00	1.80	74	0.31	028	103	0.20	322
18	3.90	278	46	0.50	335	75	0.33	182	104	0.17	039
19	4.60	395	47	0.90	106	76	0.48	303	105	0.19	151
20	3.80	114	48	0.95	242	77	0.38	049	106	0.13	317
21	2.80	250	49	1.30	262	78	0.31	185	107	0.13	065
21.5	2.20	308	50	0.90	116	79	0.35	369	108	0.11	223
22	2.25	351	51	0.70	257	80	0.34	114	109	0.15	353
23	2.60	185	52	0.85	016	81	0.33	240	110	0.10	080
24	3.20	293	53	0.90	142	82	0.40	369	111	0.10	292
25	2.00	054	54	0.80	324	83	0.16	115	112	0.08	021
26	1.70	209	55	1.15	037	84	0.18	334	113	0.10	143
27	1.50	386	56	0.90	203	85	0.27	083	114	0.08	296
28	2.60	129	57	1.25	333	86	0.34	213	115	0.04	070
29	2.80	240	58	1.00	049	87	0.33	312	116	0.08	260
30	1.80	377	59	0.45	203	88	0.19	073	117	0.13	337
31	1.50	150	60	0.52	377	89	0.24	255	118	0.12	054
32	1.70	303	61	0.64	133	90	0.22	364	119	0.09	200
33	2.00	037	62	0.85	254	91	0.23	122	120	0.05	267
34	1.80	171	63	0.60	370	92	0.16	289	—	—	—
35	2.00	301	64	0.40	127	93	0.19	046	—	—	—
36	1.60	067	65	0.24	340	94	0.27	141	—	—	—

Tablo 3.33

**Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Modelde
Fas ve Genlik Ölçümleri**

Vibröre Mesafe R (cm)	Frekanslar (n)					
	200 Hz		300 Hz		500 Hz	
	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Fas (Grad) ϕ
7	5.30	192	15.00	229	20.00	288
10	4.70	208	15.20	238	14.40	312
15	3.10	227	9.20	263	14.50	339
20	1.70	254	7.20	295	11.20	383
25	1.00	304	5.80	346	9.00	023
30	1.00	371	5.20	392	8.10	069
35	1.40	003	5.90	026	6.20	108
40	1.60	029	5.50	058	5.80	144
45	2.10	056	6.00	085	4.70	193
50	2.00	081	4.70	115	3.80	235
55	1.90	110	3.70	147	2.90	276
60	1.90	132	2.80	183	2.10	339
65	2.20	151	3.60	217	2.05	390
70	2.20	170	2.70	252	2.10	036
75	2.20	186	2.60	275	1.50	085
80	2.05	203	2.55	302	1.30	118
85	2.00	221	1.20	354	1.40	152
90	1.50	237	1.30	026	1.10	201
95	1.20	265	2.10	052	1.25	228
100	0.55	304	2.00	075	0.90	247
105	0.70	377	2.40	094	0.42	268
110	1.10	003	1.80	111	0.50	350
115	1.20	019	0.40	221	0.14	075
120	1.20	037	-	-	-	-

Tablo 3.34
Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Modelde
Faz ve Genlik Ölçmeleri

Vibröre Mesafe R (cm)	5000 Hz		10 000 Hz		Vibröre Mesafe R (cm)	5000 Hz		10 000 Hz	
	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ		Genlik (Volt) A	Faz (μ rad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ
14	2.20	090	1.10	055	70	0.26	302	0.11	057
16	2.10	134	1.20	140	72	0.38	380	0.22	075
18	2.20	194	1.05	234	74	0.39	038	0.19	160
20	2.00	242	0.90	230	76	0.40	105	0.22	242
22	1.90	293	0.90	007	78	0.31	117	0.20	326
24	1.65	340	0.65	095	80	0.34	205	0.16	027
26	1.30	375	0.55	176	82	0.23	215	0.20	090
28	1.30	032	0.75	245	84	0.22	263	0.12	188
30	1.05	080	0.75	342	86	0.20	307	0.11	253
32	0.75	122	0.60	028	88	0.17	360	0.12	340
34	0.80	166	0.60	115	90	0.15	010	00.14	020
36	0.80	224	0.40	197	92	0.11	057	0.12	125
38	0.82	281	0.28	280	94	0.11	114	0.11	211
40	0.90	350	0.56	334	96	0.10	171	0.085	300
42	0.70	394	0.48	020	98	0.14	230	0.11	370
44	0.70	053	0.33	120	100	0010	270	0.08	060
46	0.60	097	0.40	195	102	0.09	312	0.10	136
48	0.55	136	0.45	275	104	0.08	364	0.05	240
50	0.44	184	0.41	375	106	0.12	062	0.06	332
52	0.55	246	0.32	047	108	0.11	108	0.09	-
54	0.47	290	0.21	136	110	0.07	130	0.065	-
56	0.43	340	0.21	216	112	0.065	170	0.07	-
58	0.41	390	0.25	290	114	0.06	214	0.065	-
60	0.41	055	0.27	385	116	0.10	311	0.05	-
62	0.37	106	0.30	061	118	0.09	355	0.04	-
64	0.40	173	0.29	145	120	0.08	170	0.04	-
66	0.35	214	0.24	233	-	-	-	-	-
68	0.33	265	0.22	316	-	-	-	-	-

Tablo 3.35

Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Modelde

Faz ve Genlik Ölçmeleri

Vibröre Mesafe R (cm)	17000 Hz		18000 Hz		Vibröre Mesafe R (cm)	17000 Hz		18000 Hz	
	Genlik (Volt) A	Gaz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ		Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ
6	2.20	373	-	-	60	1.40	295	0.10	160
8	2.60	028	-	-	62	1.40	342	0.09	203
10	3.25	186	-	-	64	1.50	150	0.10	255
12	5.90	280	-	-	66	1.40	064	0.15	327
14	8.20	372	0.70	0.60	68	1.30	137	0.16	011
16	8.20	046	1.00	128	70	1.05	202	0.11	102
18	4.00	115	0.70	230	72	0.80	281	0.09	168
20	2.75	146	0.49	325	74	0.70	335	0.06	250
22	3.40	183	0.20	365	76	0.70	000	0.06	297
24	5.00	233	0.28	380	78	0.90	071	0.08	360
26	5.00	307	0.59	052	80	1.20	144	0.07	054
28	4.00	005	0.58	153	82	1.00	230	0.07	146
30	2.90	104	0.46	245	84	1.30	194	0.06	216
32	1.60	176	0.30	342	86	1.05	343	0.06	290
34	1.20	233	0.13	031	88	0.56	000	0.05	342
36	1.60	270	0.14	066	90	0.80	068	0.06	114
38	3.00	335	0.27	103	92	-	-	0.06	080
40	4.20	000	0.34	191	94	-	-	0.06	165
42	3.00	090	0.30	283	96	-	-	0.05	241
44	2.20	151	0.21	367	98	-	-	0.05	300
46	1.45	210	0.18	037	100	0.60	-	0.05	317
48	1.05	250	0.11	081	102	-	-	0.04	025
50	1.30	307	0.14	131	104	-	-	0.03	100
52	1.40	378	0.18	209	106	-	-	0.04	190
54	1.45	076	0.17	301	108	-	-	0.04	271
56	1.40	171	0.11	255	110	0.60	-	0.05	-
58	1.45	246	0.08	089	112	-	-	0.04	-
-	-	-	-	-	120	0.32	-	-	-

Tablo 3.36

Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Modelde
Faz ve Genlik Ölçmeleri

Vibrö Mesafe R (cm)	20 000 Hz		Vibrö Mesafe R (cm)	20 000 Hz	
	Genlik (Volt) A	Genlik (Grad) ϕ		Genlik (Volt) A	Faz (Grad) ϕ
6	7.10	333	68	0.19	166
8	5.60	038	70	0.105	300
10	6.30	100	72	0.16	088
12	8.00	178	74	0.14	202
14	10.00	280	76	0.12	302
16	10.20	368	78	0.09	318
18	5.50	070	80	0.16	350
20	4.10	154	82	0.18	033
22	1.35	228	84	0.12	124
24	2.65	273	86	0.08	229
26	2.40	366	88	0.035	-
28	2.40	089	90	0.06	-
30	2.70	190	92	0.08	-
32	1.50	300	94	0.024	-
34	11.20	195	96	0.024	-
36	0.55	045	98	0.110	-
38	0.85	093	100	0.08	-
40	1.65	173	102	0.07	-
42	1.25	278	104	0.04	-
44	1.00	296	106	0.05	-
46	0.53	108	108	0.05	-
48	0.20	253	110	0.044	-
50	0.08	210	112	0.02	-
52	0.20	334	114	0.03	-
54	0.40	029	116	0.03	-
56	0.50	130	118	0.03	-
58	0.63	230	120	0.02	-
60	0.41	330	122	0.034	-
62	0.21	384	124	0.015	-
64	0.11	175	126	0.028	-
66	0.20	060	128	0.032	-
-	-	-	130	0.025	-

Table 3.37

Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Modelde

Fas ve Genlik Ölçmeleri

 $n = 21000 \text{ Hz}$

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
8	6.00	296	50	0.25	011
10	4.60	379	52	0.10	122
12	6.20	040	54	0.11	146
14	5.20	140	56	0.15	165
16	6.10	243	58	0.17	262
18	4.80	341	60	0.10	258
20	2.40	087	62	0.12	285
22	1.10	220	64	0.21	337
24	0.48	330	66	0.14	042
26	0.40	110	68	0.08	115
28	0.52	094	70	0.05	263
30	1.25	175	72	0.07	205
32	1.60	226	74	0.05	313
34	1.45	386	76	0.03	307
36	0.52	095	78	0.08	366
38	0.08	167	80	0.08	046
40	0.27	100	82	0.08	137
42	0.19	171	84	0.05	210
44	0.12	089	86	0.45	-
46	0.23	194	88	0.035	-
48	0.32	312	90	0.05	-

Tablo 3.38

Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Modelde

Faz ve Genlik Ölçmeleri

Frekans $n = 30000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
13	1.40	350	42	0.65	342	72	0.26	005
15	2.20	158	44	0.80	135	74	0.28	191
17	2.95	355	46	0.85	307	76	0.20	370
19	2.95	130	48	0.75	095	78	0.15	172
20	2.90	214	50	0.45	300	80	0.20	381
22	2.15	394	52	0.56	110	82	0.22	147
24	1.90	211	54	0.52	288	84	0.24	338
26	2.05	010	56	0.50	068	86	0.14	132
28	2.50	188	58	0.145	253	88	0.10	337
30	2.15	341	60	0.47	045	90	0.12	136
32	1.40	152	62	0.42	243	92	0.13	318
34	1.50	375	64	0.44	025	94	0.13	107
36	1.65	142	66	0.34	213	96	0.12	306
38	1.10	331	68	0.39	385	98	0.10	096
40	1.25	112	70	0.29	210	100	0.085	300

Tablo 3.39

Yapılandırılmış Arakesitli Tabakalı Modelde

Faz ve Genlik Ölçmeleri

Frekans, $n = 45000$ Hz

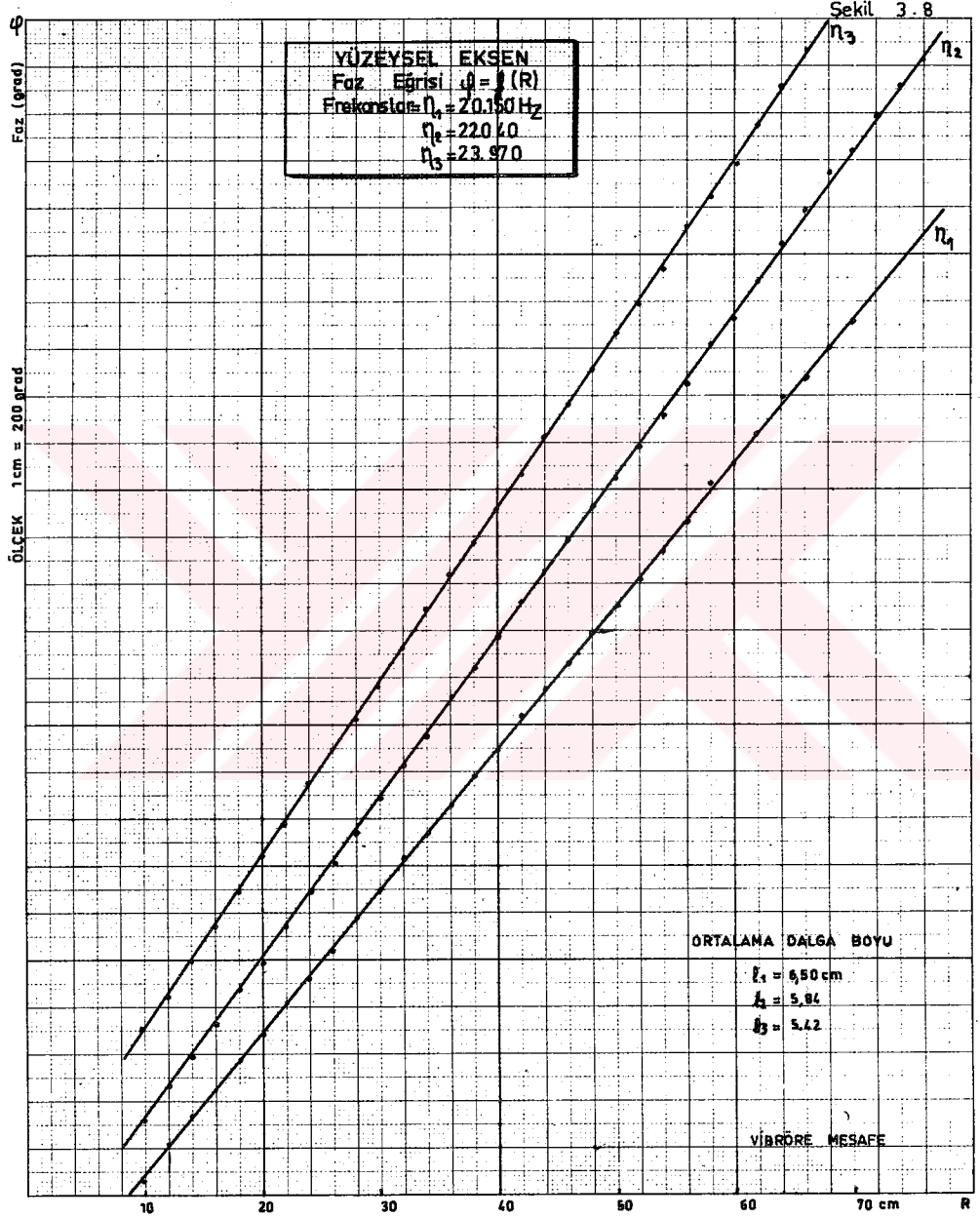
Vibröre Mesafe R(cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R(cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R(cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R(cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
13	6.50	241	41	3.50	291	69	1.50	062	97	0.47	124
14	5.50	000	42	2.80	052	70	1.30	153	98	0.50	271
15	7.00	137	43	1.55	217	71	1.20	290	99	0.43	026
16	5.80	275	44	3.20	358	72	1.20	036	100	0.52	161
17	5.60	030	45	2.40	095	73	1.20	192	101	0.60	311
18	5.60	176	46	3.10	238	74	1.20	350	102	0.39	054
19	6.30	313	47	2.50	363	75	1.15	086	103	0.34	222
20	8.00	063	48	2.60	147	76	1.10	251	104	0.34	132
21	7.80	195	49	2.50	291	77	0.90	375	105	0.38	096
22	6.40	342	50	2.50	045	78	0.90	115	106	0.33	257
23	5.30	110	51	2.50	177	79	0.90	278	107	0.40	381
24	6.50	248	52	2.30	320	80	0.80	031	108	0.34	132
25	6.50	372	53	2.20	066	81	0.90	168	109	0.34	294
26	6.50	123	54	2.00	213	82	0.90	304	110	0.35	-
27	5.50	262	55	1.70	349	83	0.95	043	111	0.34	-
28	5.50	016	56	1.70	110	84	0.90	195	112	0.37	-
29	4.60	161	57	1.70	252	85	1.00	350	113	0.25	-
30	4.40	302	58	1.70	062	86	0.90	095	114	0.25	-
31	4.50	076	59	1.80	149	87	0.80	261	115	0.26	-
32	4.80	200	60	1.75	295	88	0.60	095	116	0.20	-
33	4.60	342	61	1.80	034	89	0.42	182	117	0.20	-
34	3.40	083	62	1.60	182	90	0.68	294	118	0.25	-
35	3.80	246	63	1.90	328	91	0.44	029	119	0.24	-
36	2.90	375	64	1.80	069	92	0.46	324	120	0.29	-
37	3.20	138	65	1.40	230	93	0.50	324	121	0.23	-
38	3.70	274	66	1.65	357	94	0.49	093	122	0.23	-
39	3.60	015	67	1.30	094	95	0.43	243	123	0.20	-
40	1.90	152	68	0.80	243	96	0.48	375	124	0.18	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	125	0.17	-

Tablo 3.40

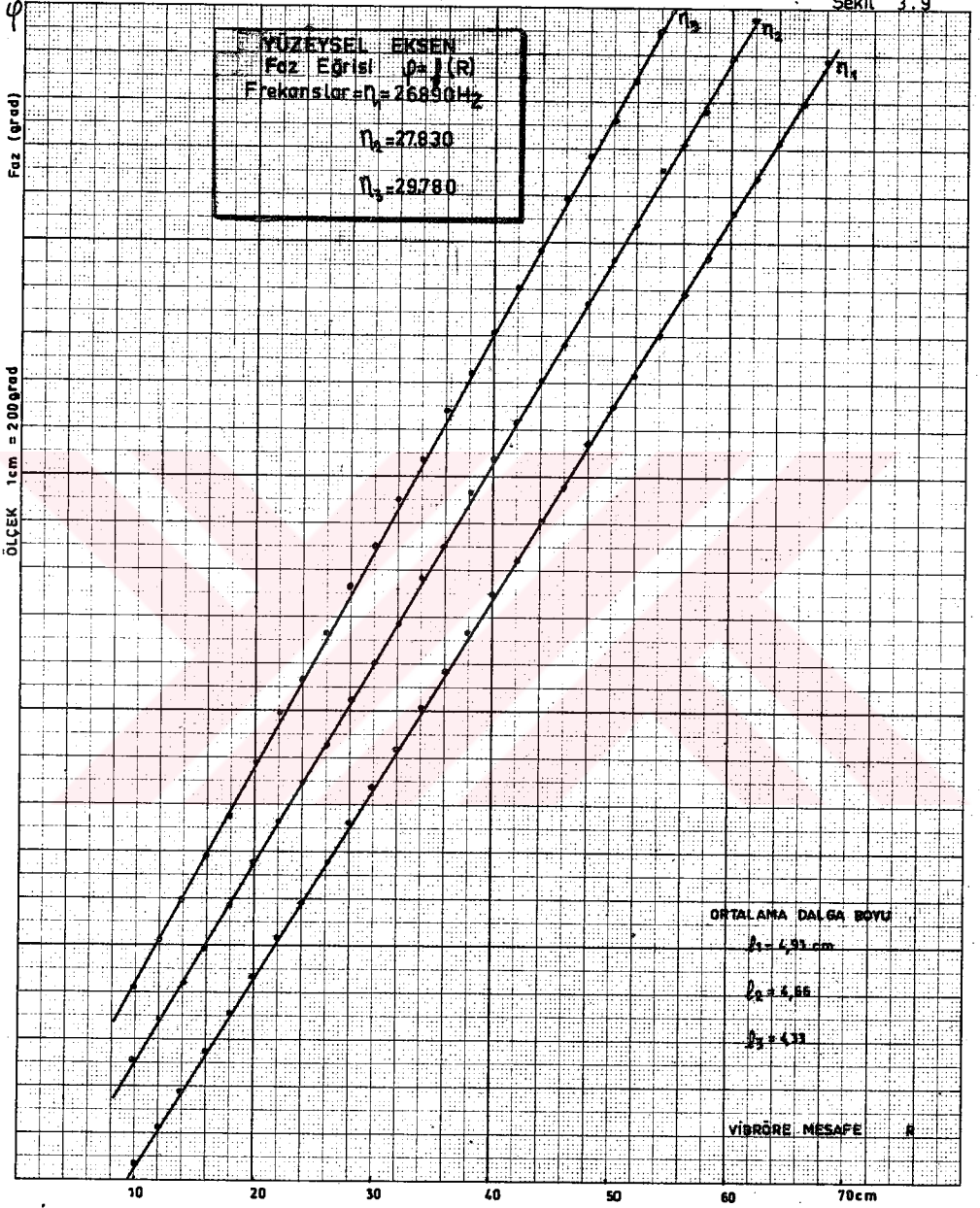
Yapıştırılmış Arakesitli Tabakalı Modelde Faz ve Genlik Ölçmeleri
Frekans $n = 70\,000$ Hz

Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ	Vibröre Mesafe R (cm)	Genlik (Volt) A	Faz (Grad) φ
13	0.09	250	47	0.024	321
14	0.12	039	48	0.034	122
15	0.10	270	49	0.024	316
16	00.12	075	50	0.030	171
17	0.12	310	51	0.030	349
18	0.125	095	52	0.023	-
19	0.11	340	53	0.032	-
20	0.085	233	54	0.024	-
21	0.015	028	55	0.031	-
22	0.10	260	56	0.024	-
23	0.12	063	57	0.028	-
24	0.07	325	58	0.03	-
25	0.11	147	59	0.02	-
26	0.12	366	60	0.025	-
27	0.10	216	61	0.012	-
28	0.115	016	62	0.024	-
29	0.105	269	63	0.015	-
30	0.10	056	64	0.022	-
31	0.06	275	65	0.022	-
32	0.08	132	66	0.02	-
33	0.065	270	67	0.015	-
34	0.06	196	68	0.010	-
35	0.085	026	69	0.023	-
36	0.07	207	70	0.010	-
37	0.08	055	71	0.022	-
38	0.05	264	72	0.018	-
39	0.06	130	73	0.017	-
40	0.065	370	74	0.021	-
41	0.06	162	75	-	-
42	0.05	084	76	0.02	-
43	0.04	176	77	-	-
44	0.035	070	78	0.021	-
45	0.035	277	79	0.015	-
46	0.040	093	80	0.015	-

EK 2 - ŞEKİLLER



Sekil 3.9



Sakıl 3.16

YÜZEYSEL EKSEN İÇİN

DISPERSİYON EĞRİSİ $c = f(\lambda)$

$C_R = 1250 \text{ mg/l}$

45

40

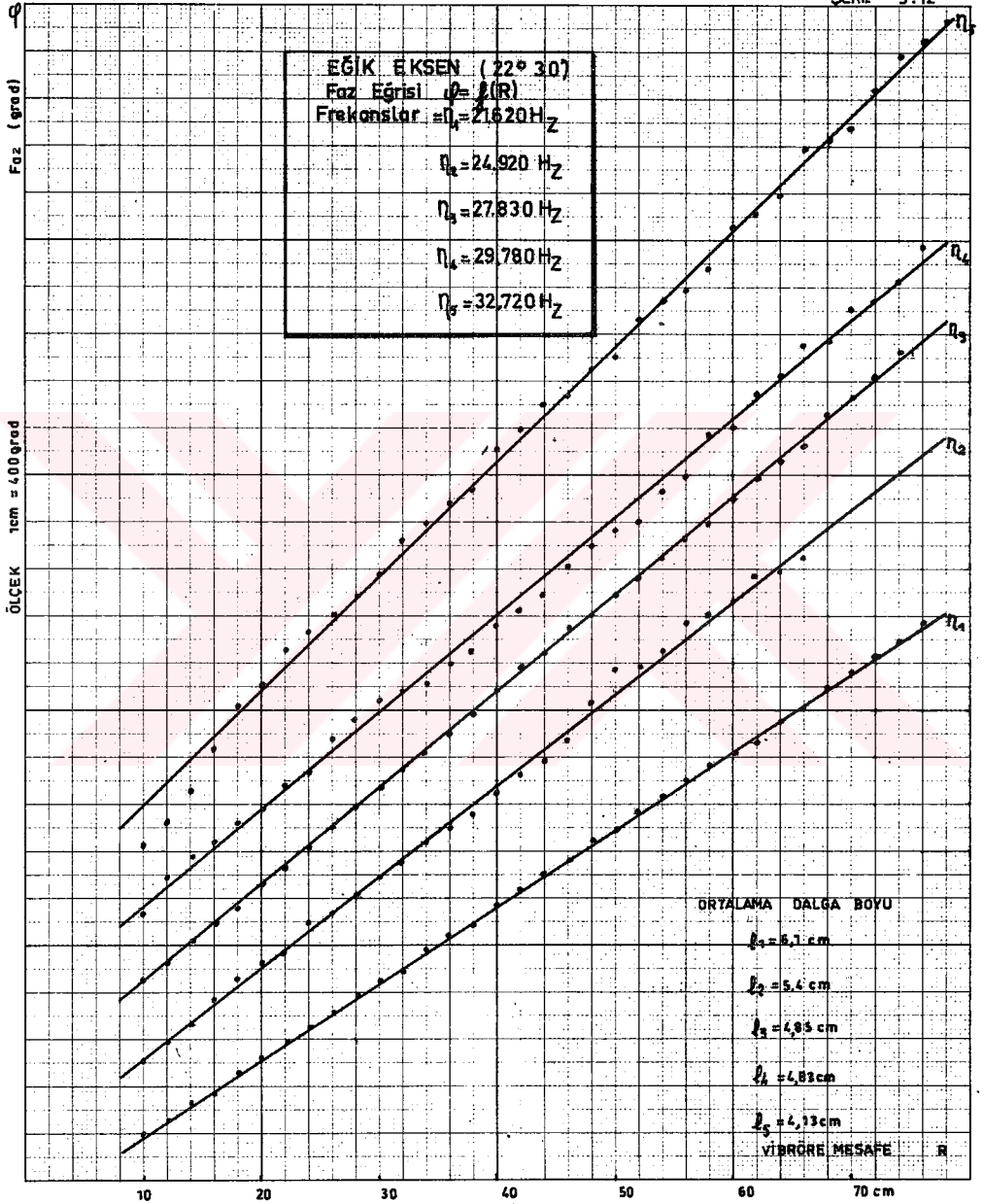
35

30

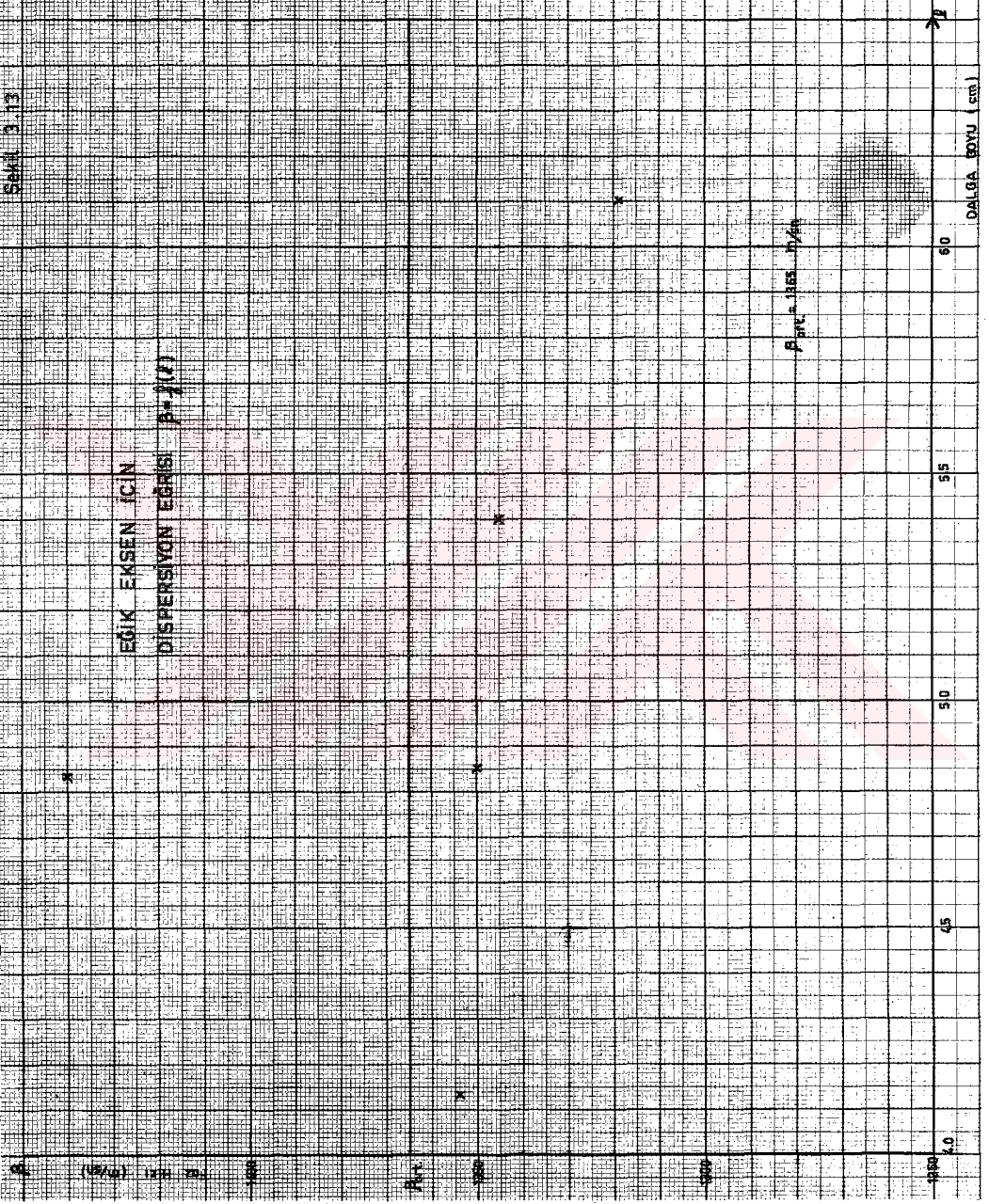
25

1500

DAĞA. SİYU (cm)



ERİK EKSEN İÇİN
DISPENSİYON EĞRİSİ $P \rightarrow J(2)$

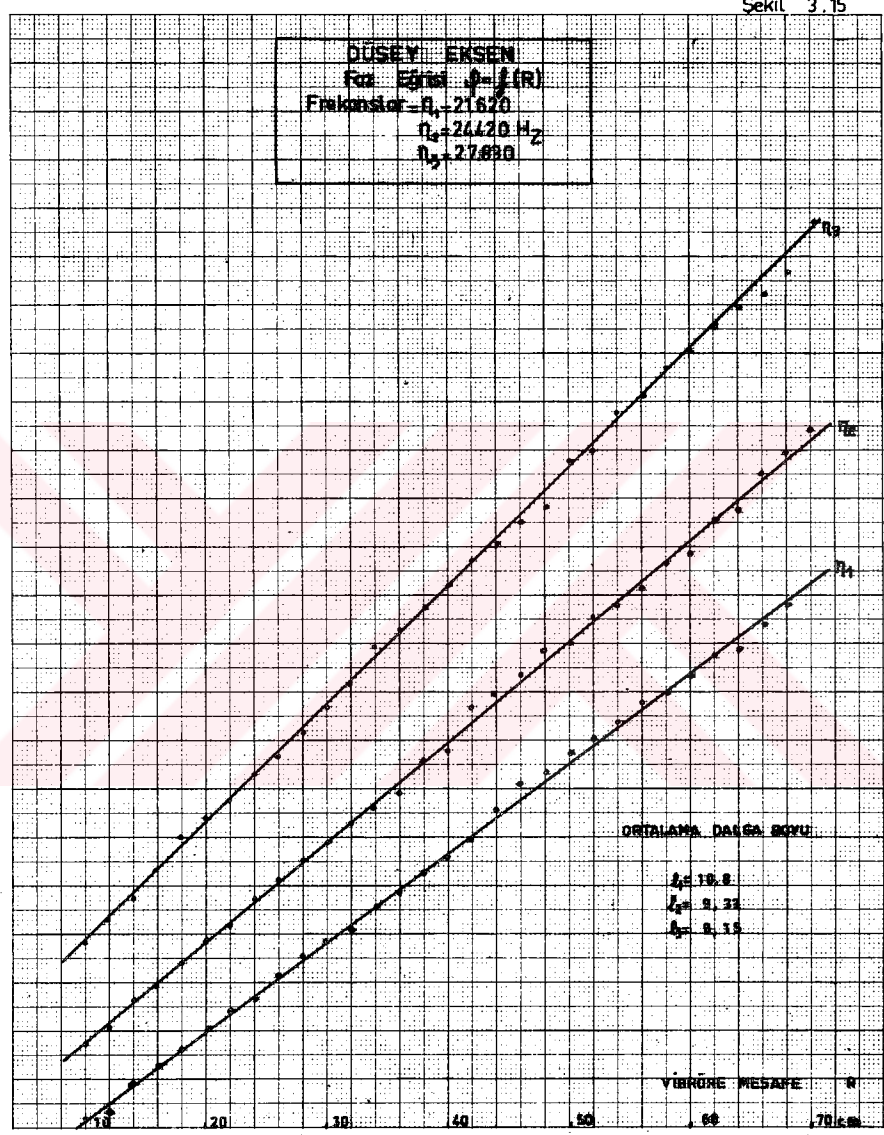


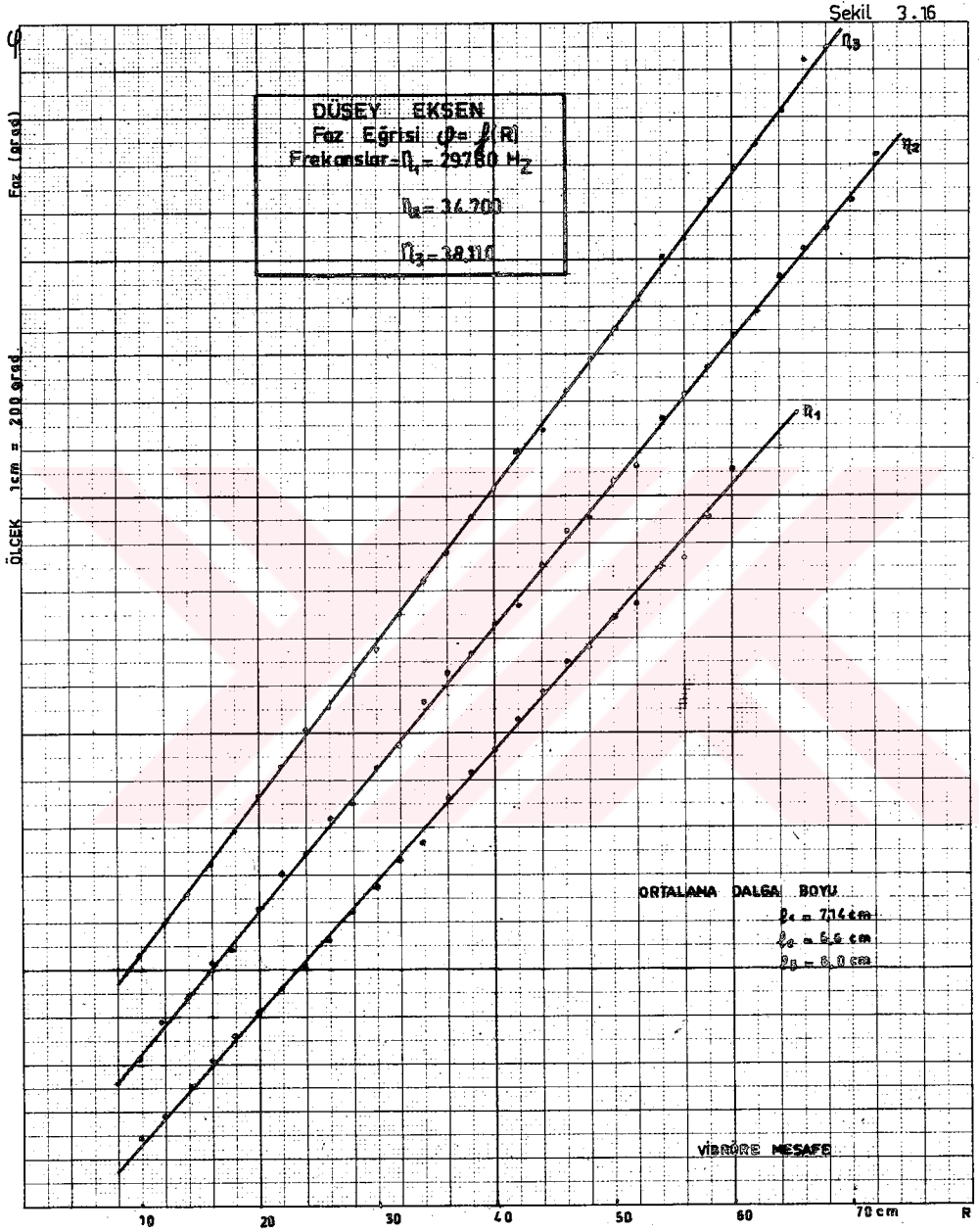
φ

Faz (grad)

ÖLÇEK 1cm = 200grad

Sekil 3.15

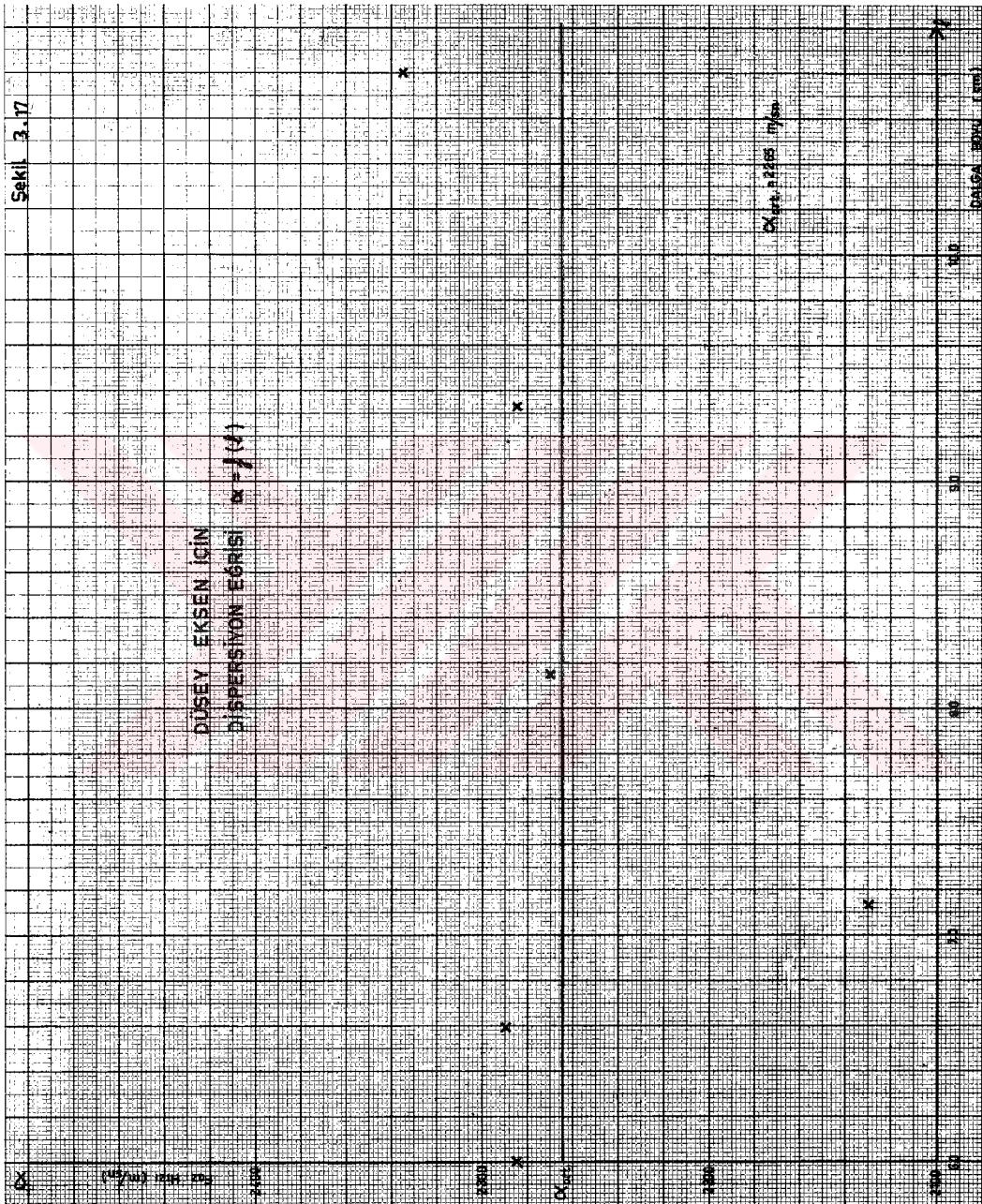




DÜŞEY EKSEN İÇİN
DISPERSİYON EĞRİSİ $\alpha = f(\lambda)$

Özellikler η/cm

DALGA BOYU λ (nm)

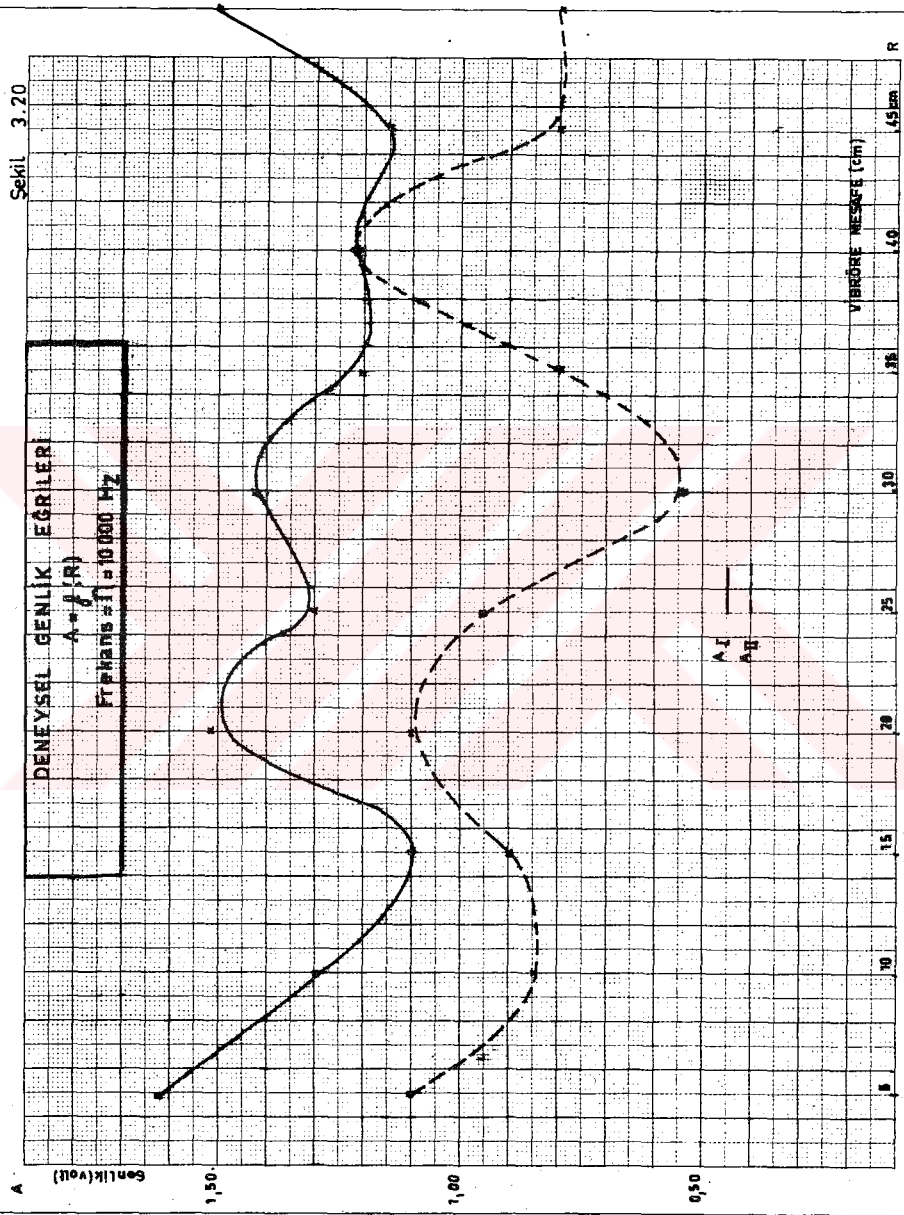


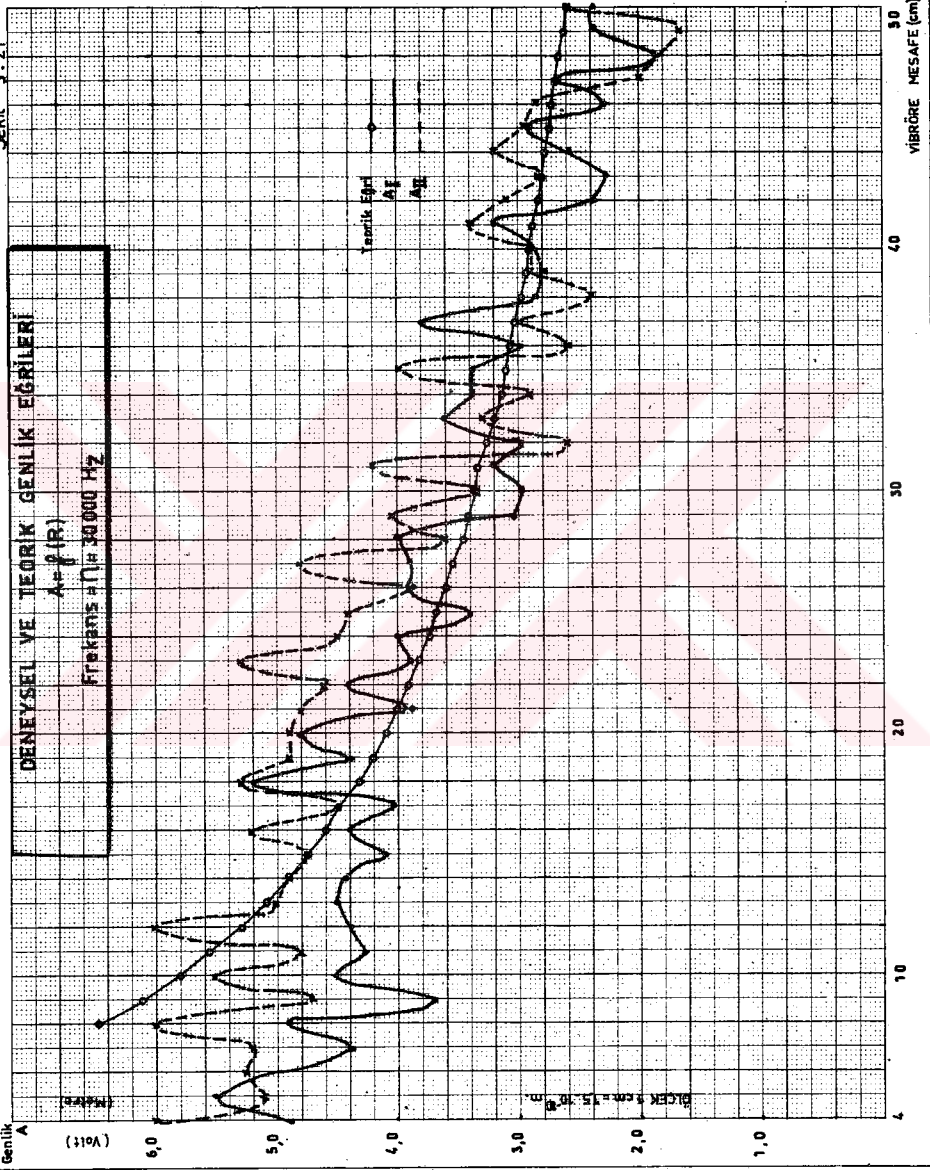
Sekil 3.20

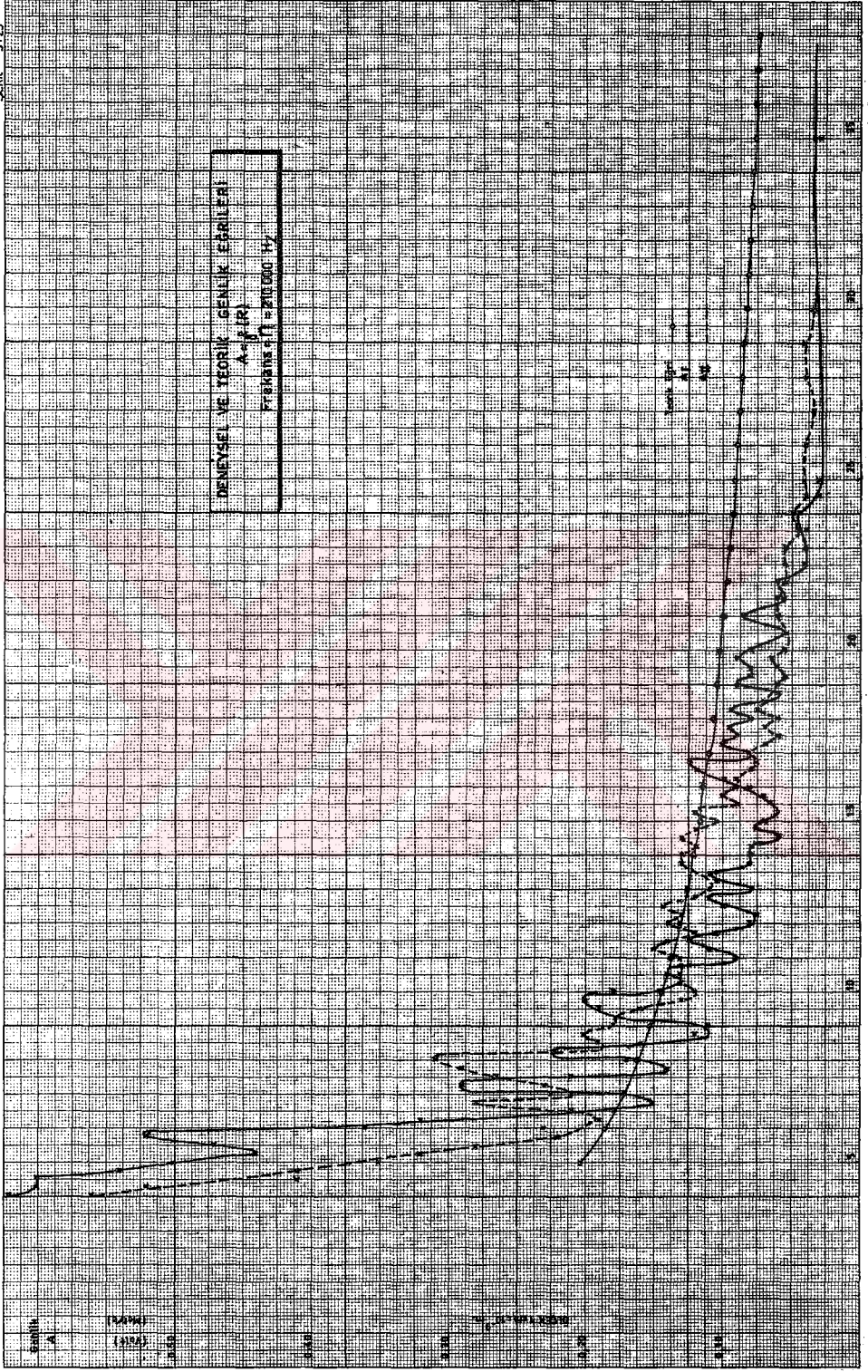
DENEYSEL GENLİK EĞRİLERİ

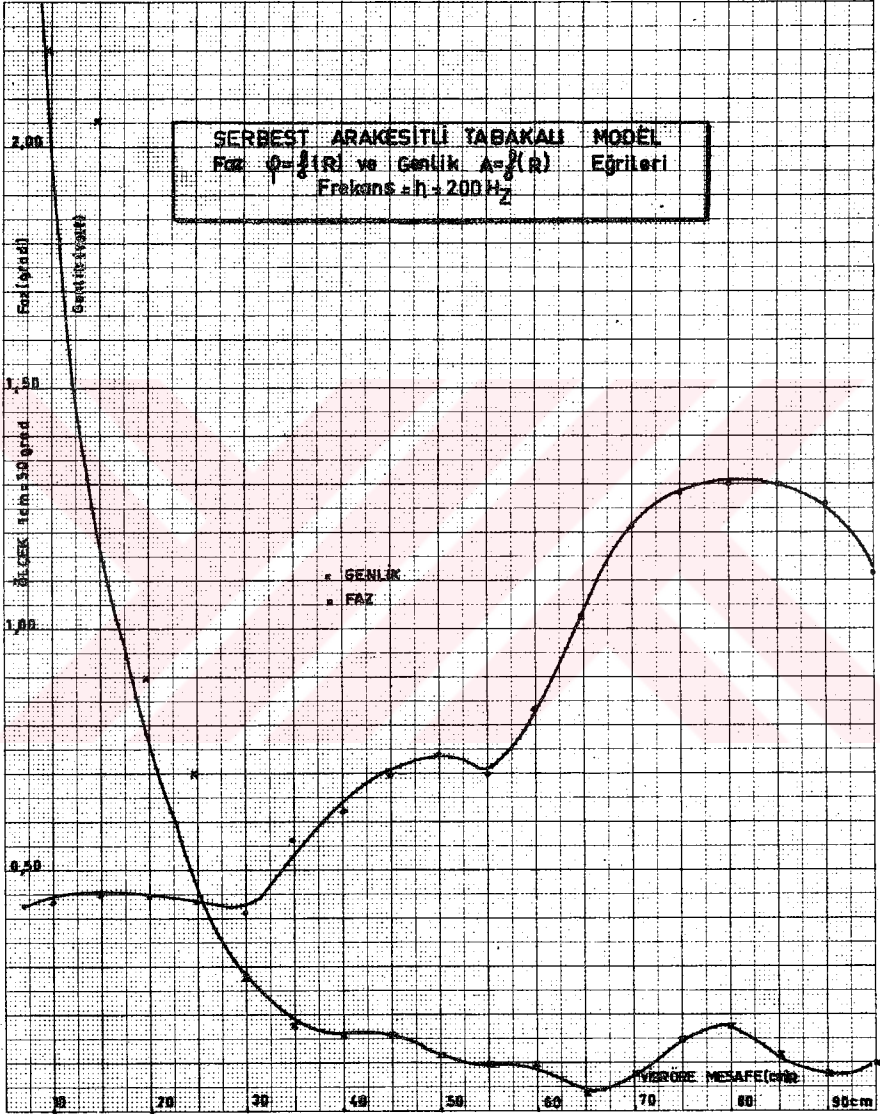
$$A = f(R)$$

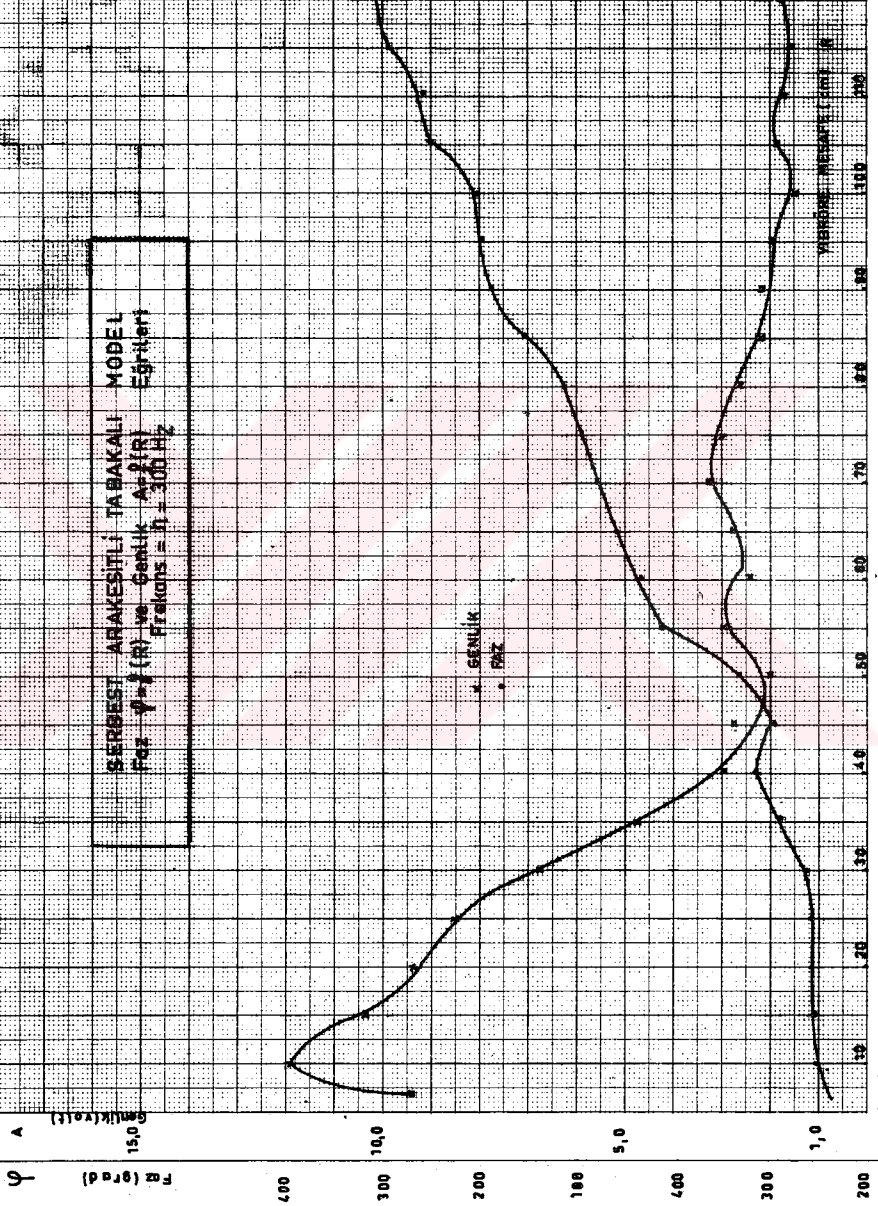
$$F_{\text{Hatis}} = f = 10.000 \text{ Hz}$$



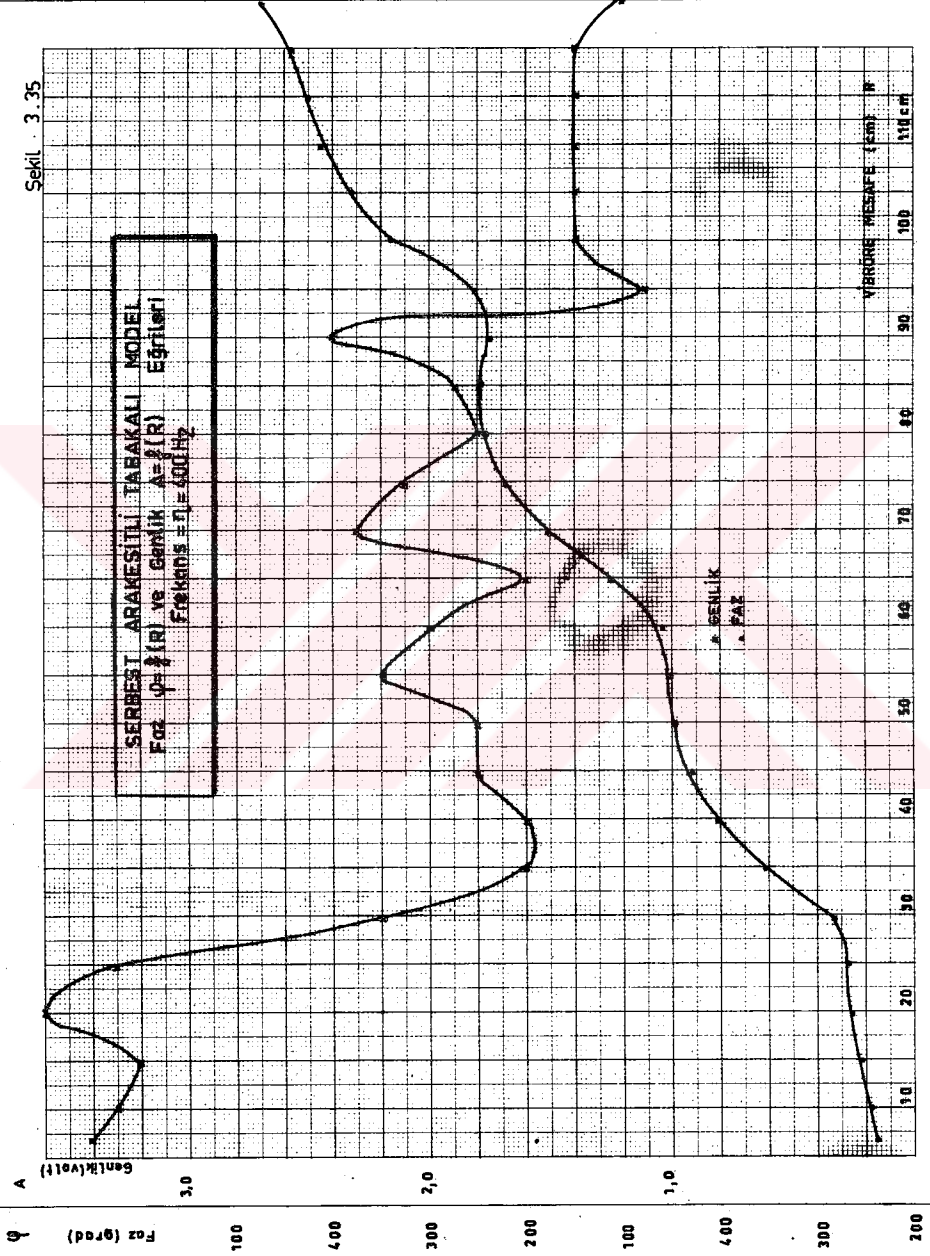








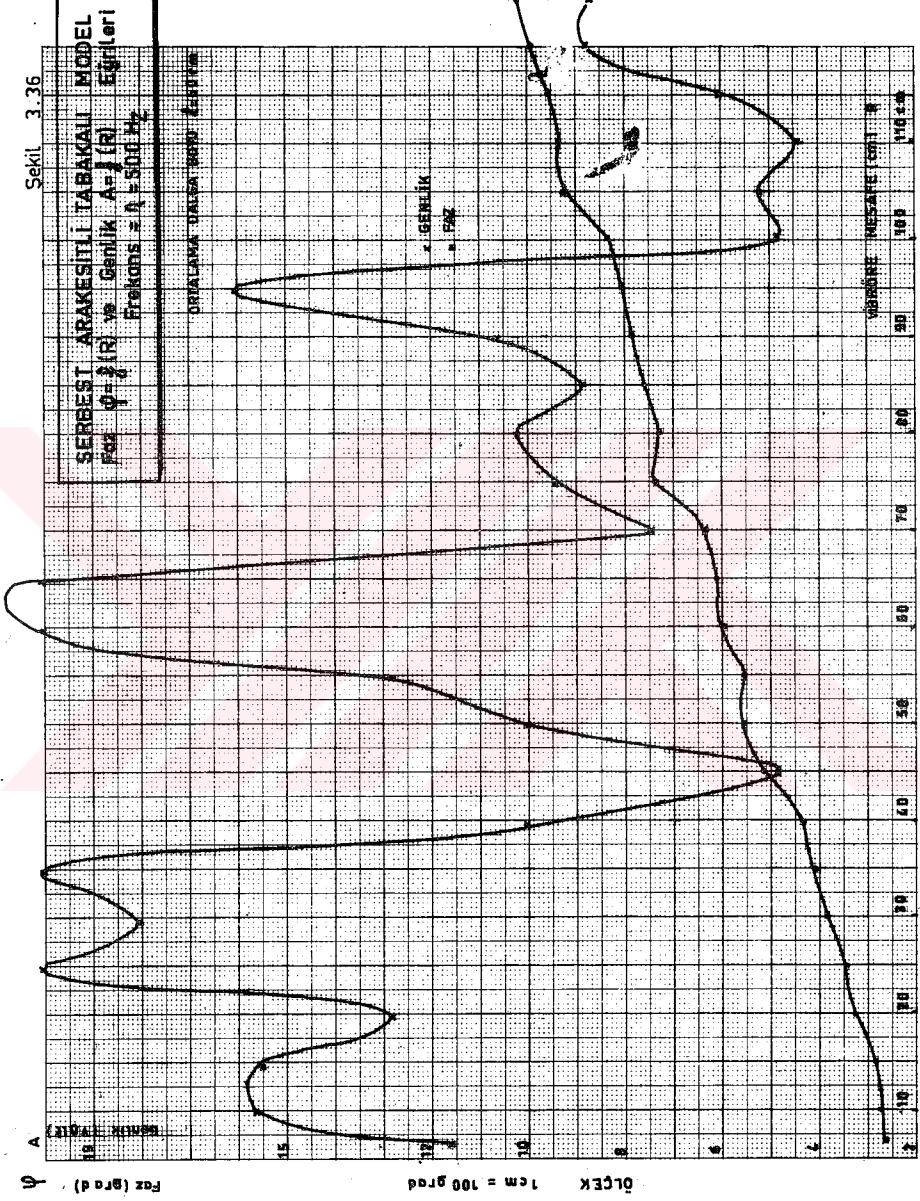
Sekil 3.35



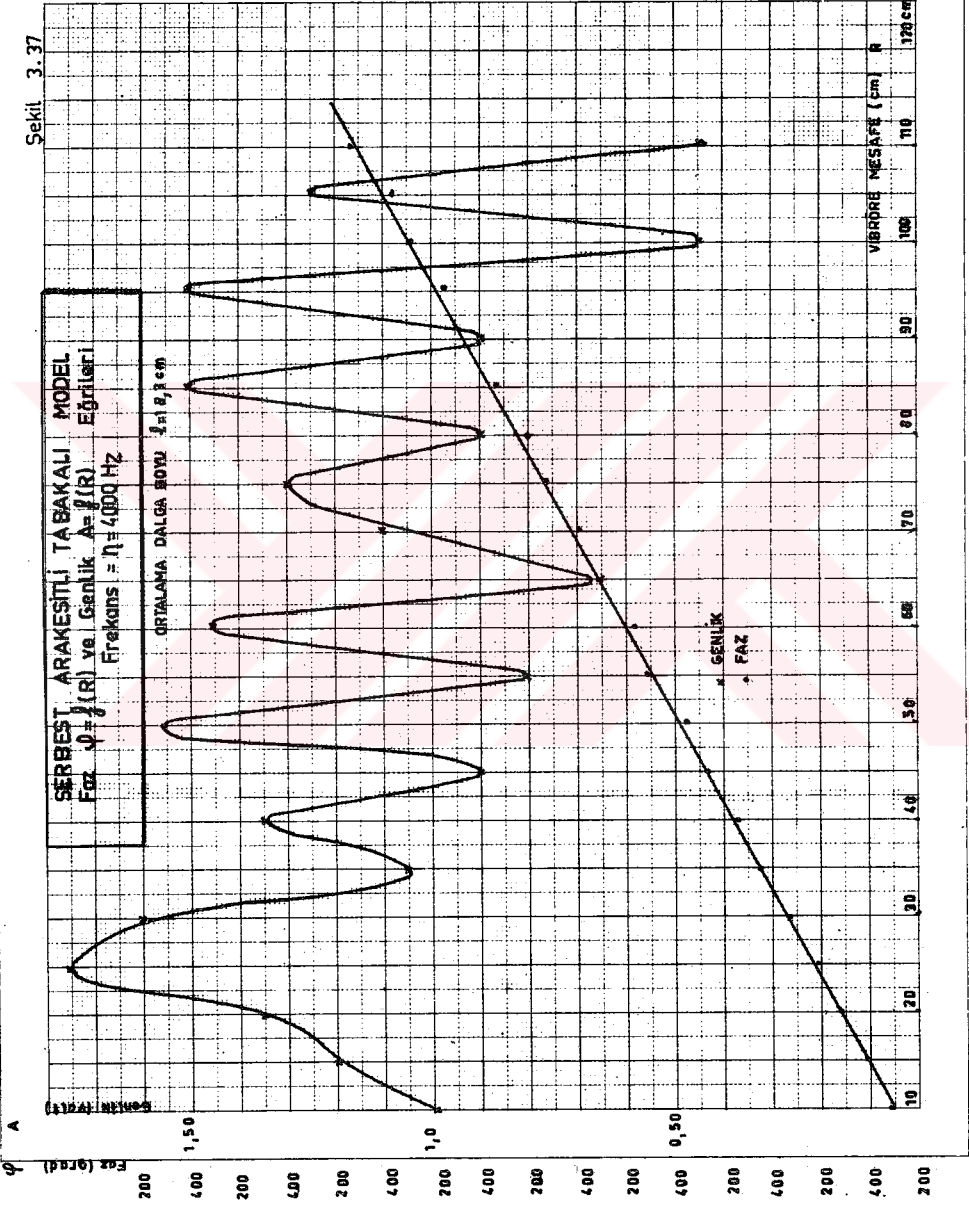
Sekil 3.36

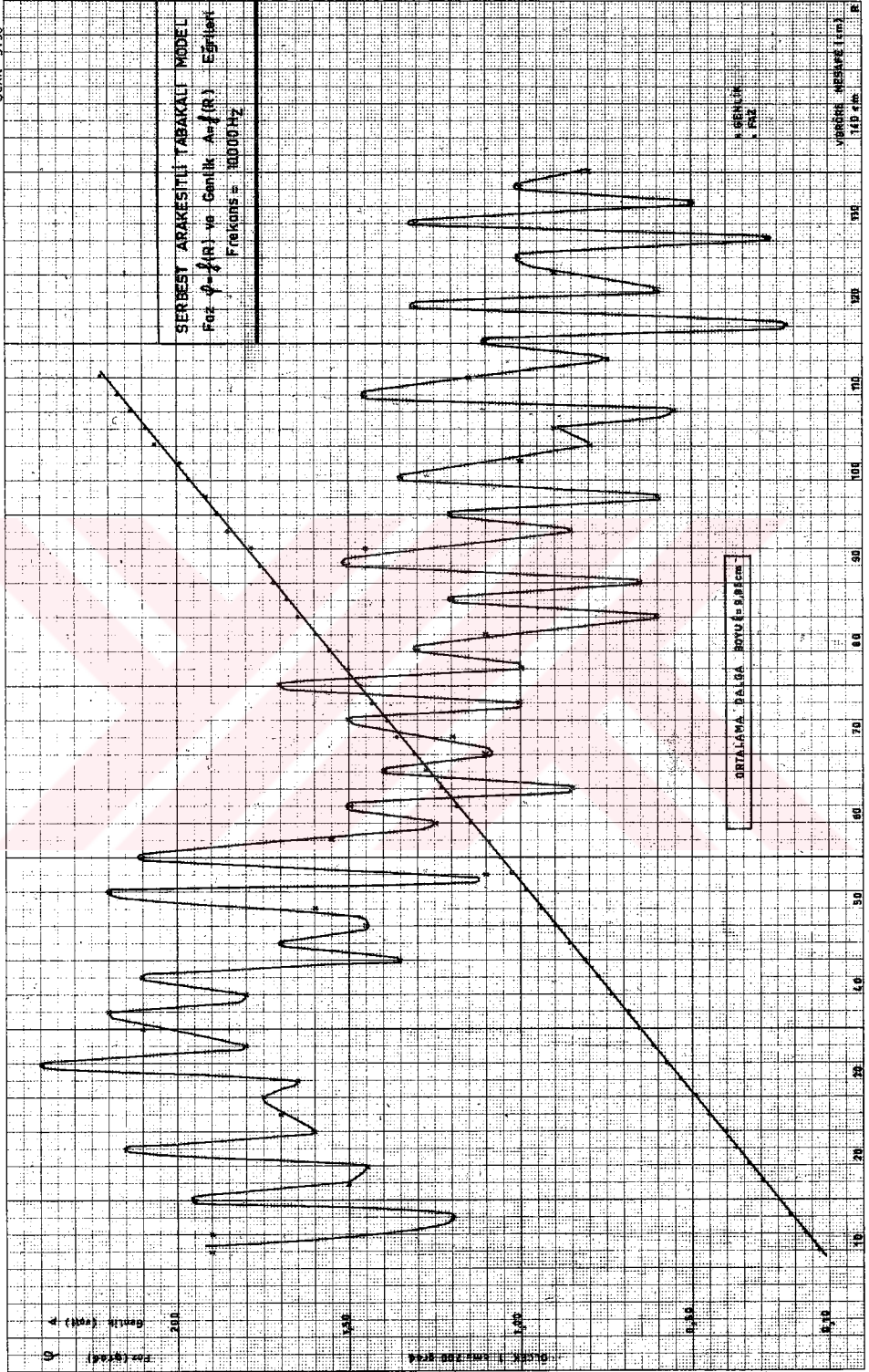
SERBEST ARAKESİTLİ TABAKALI MODEL
Faz $\phi = \frac{1}{2} R$ ve Genlik $A = \frac{1}{2} R$ eğrileri
Frekans $\omega = 1$ 500 Hz

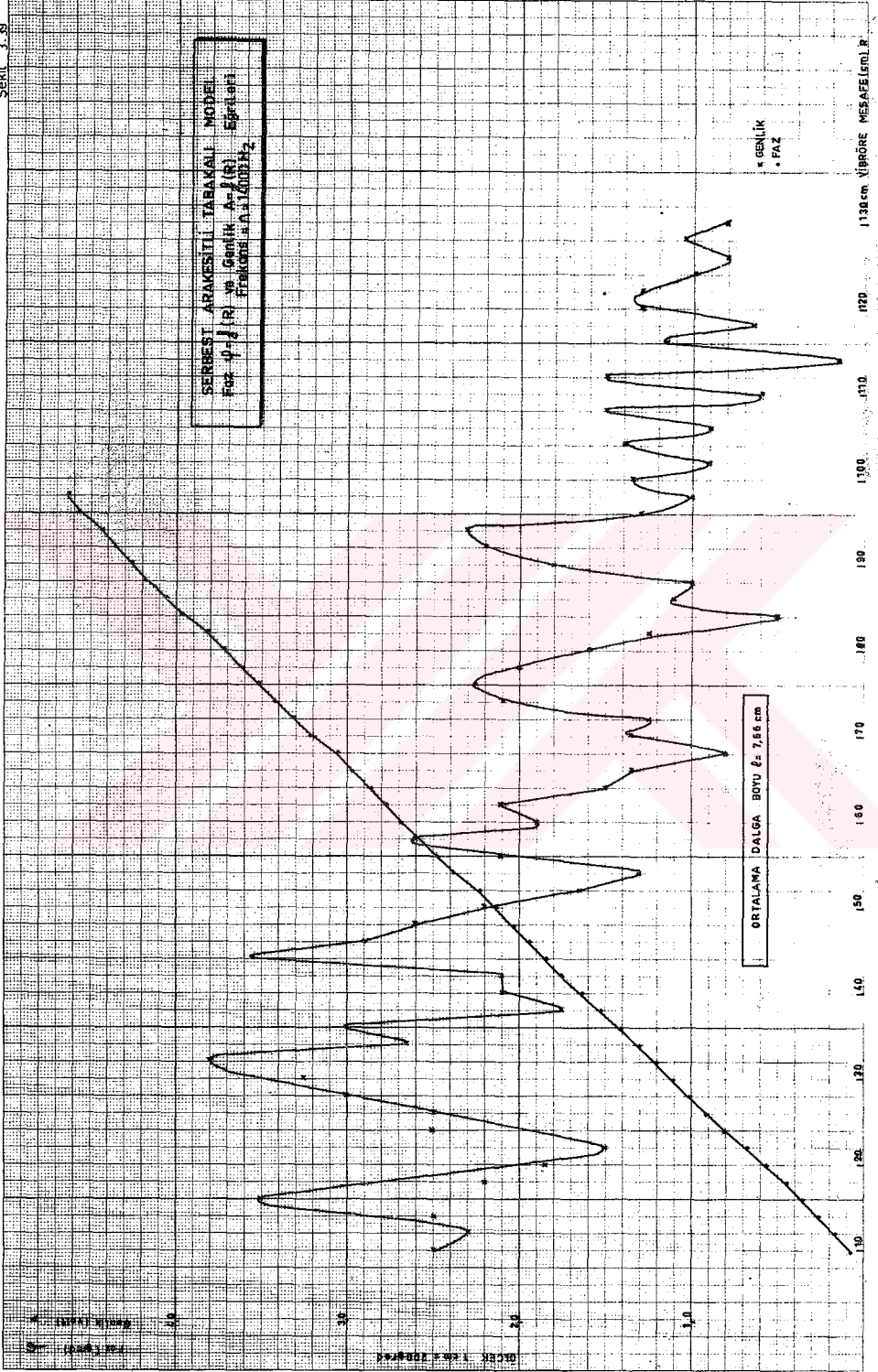
ORTALAMA DALGA BİRLİK ZEMİN

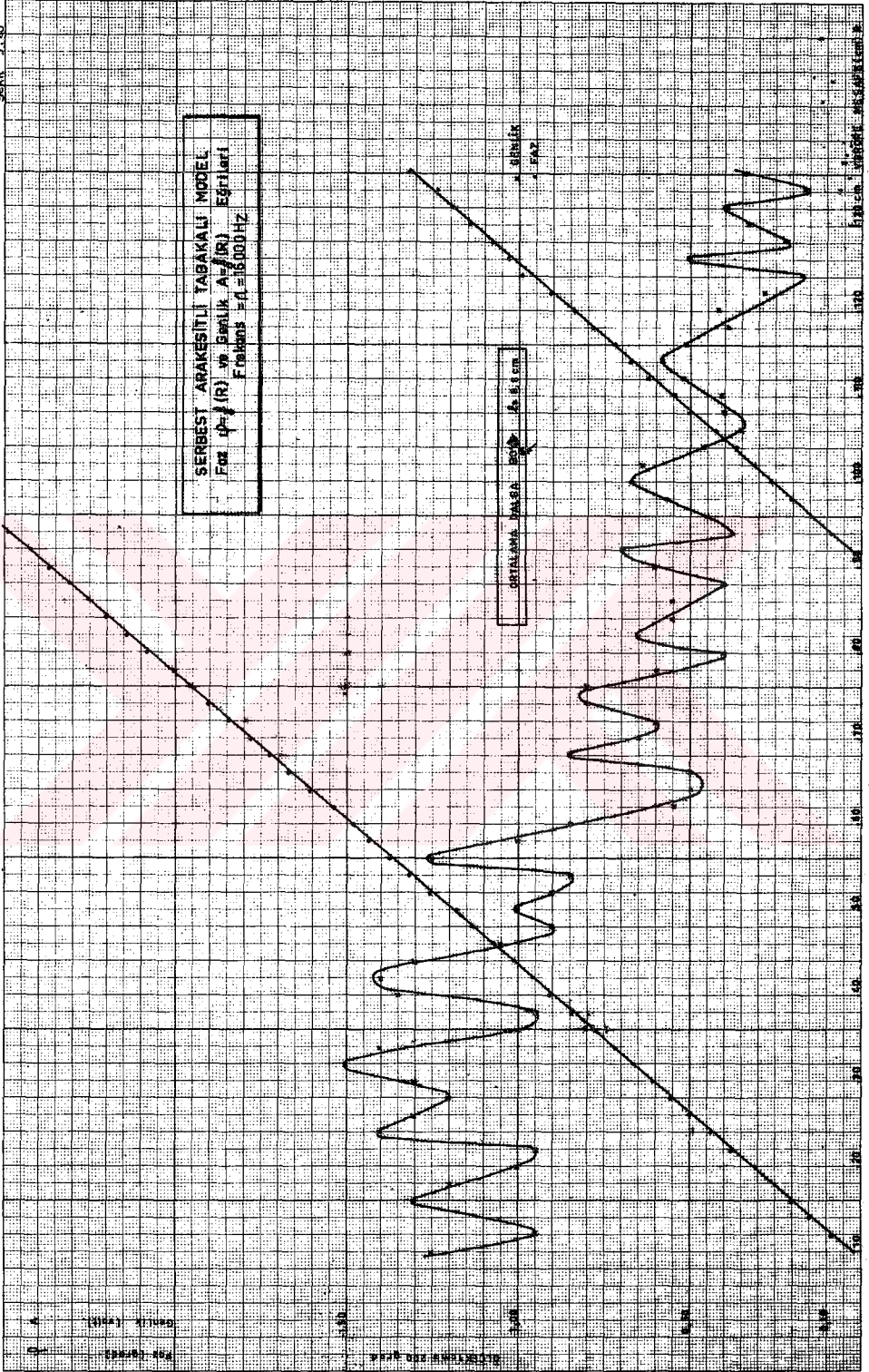


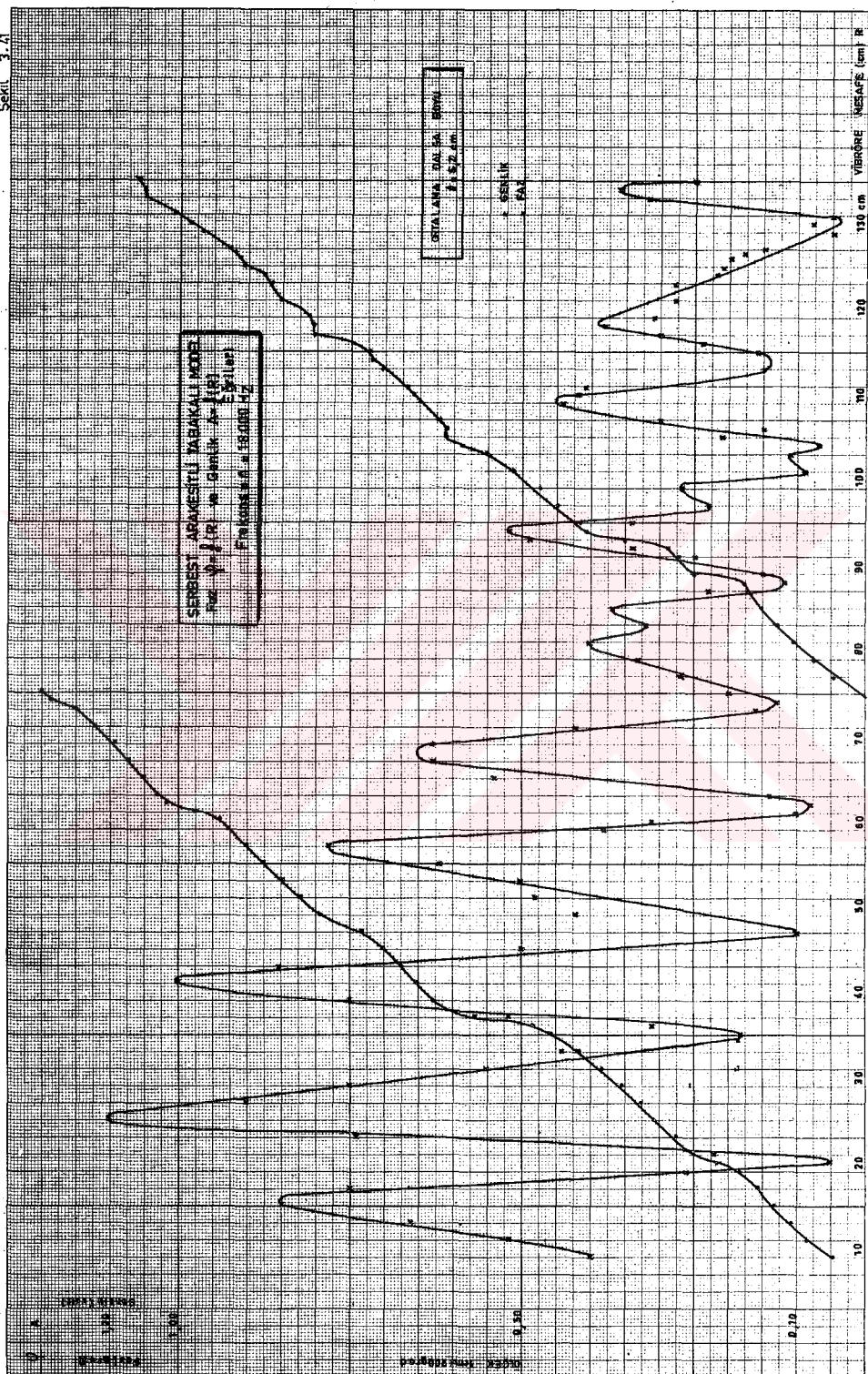
Sekil 3.37

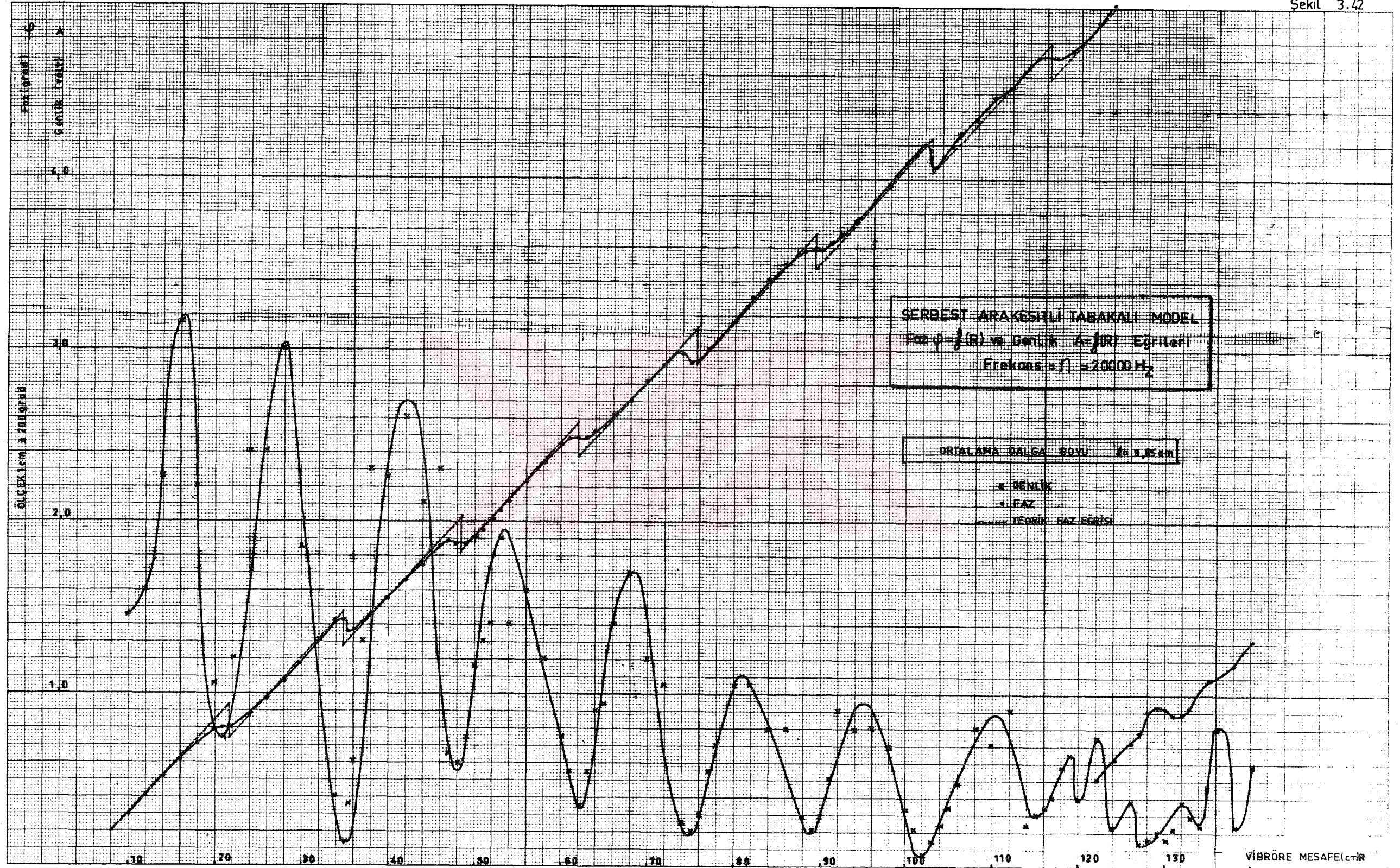


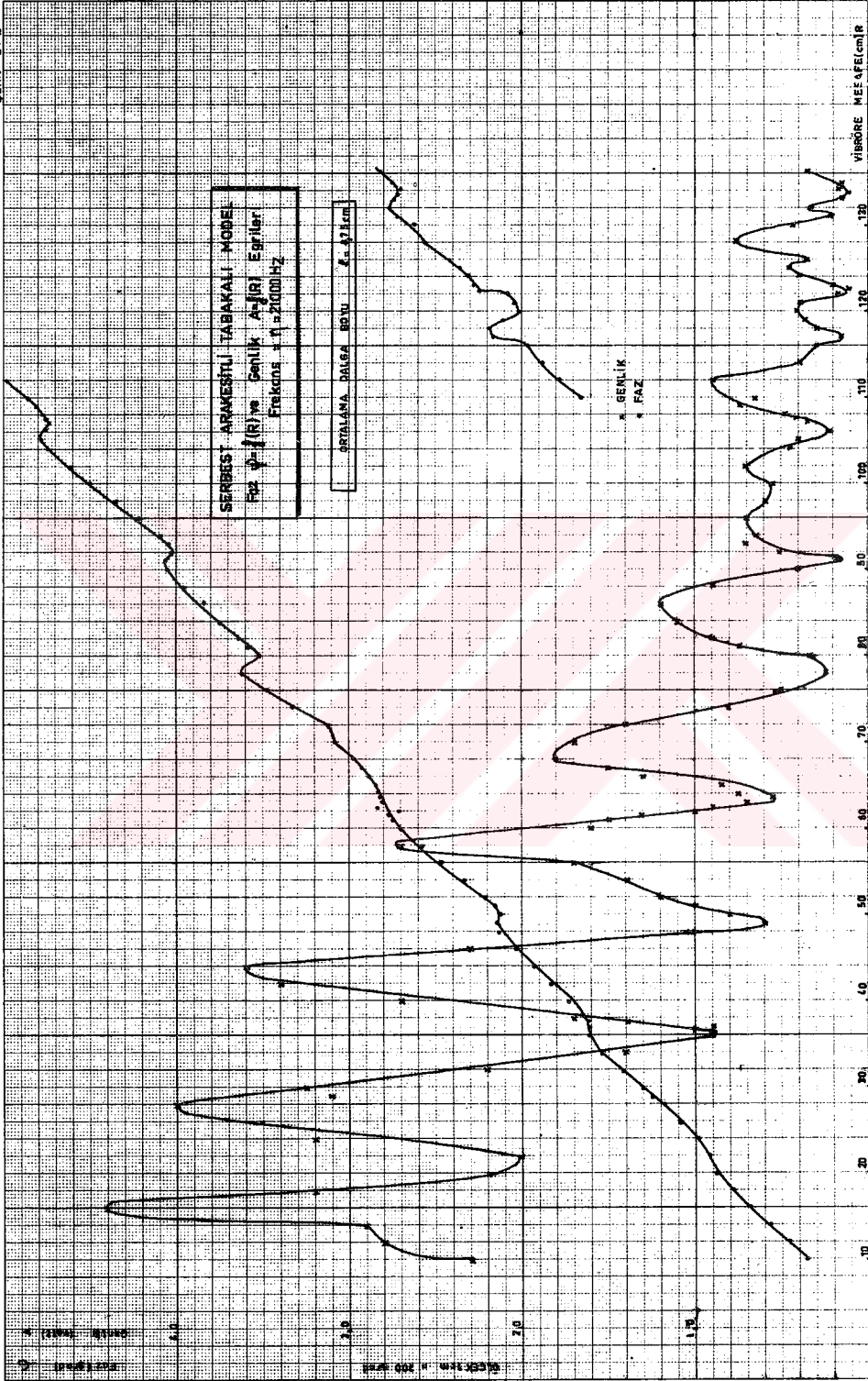


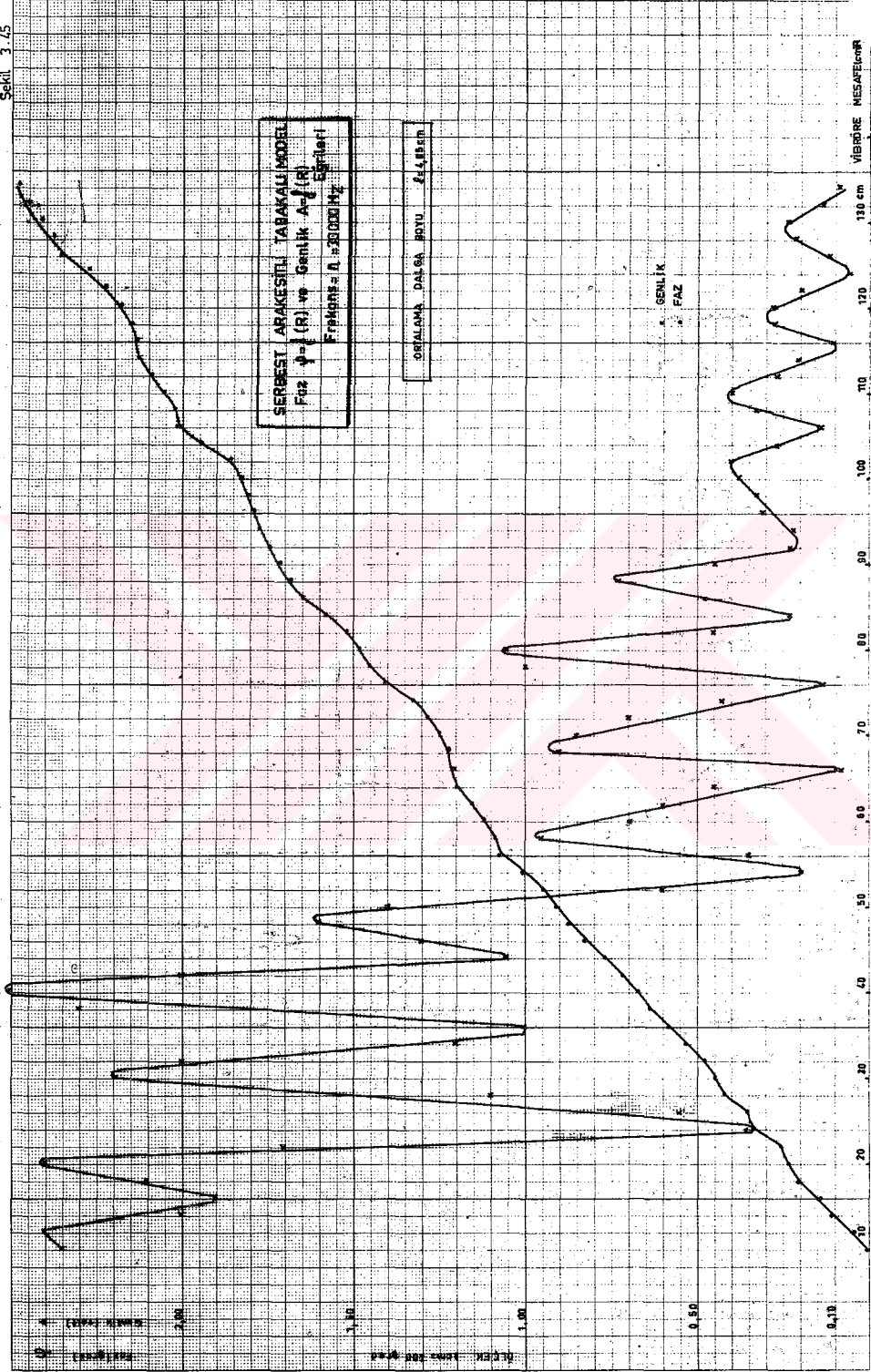


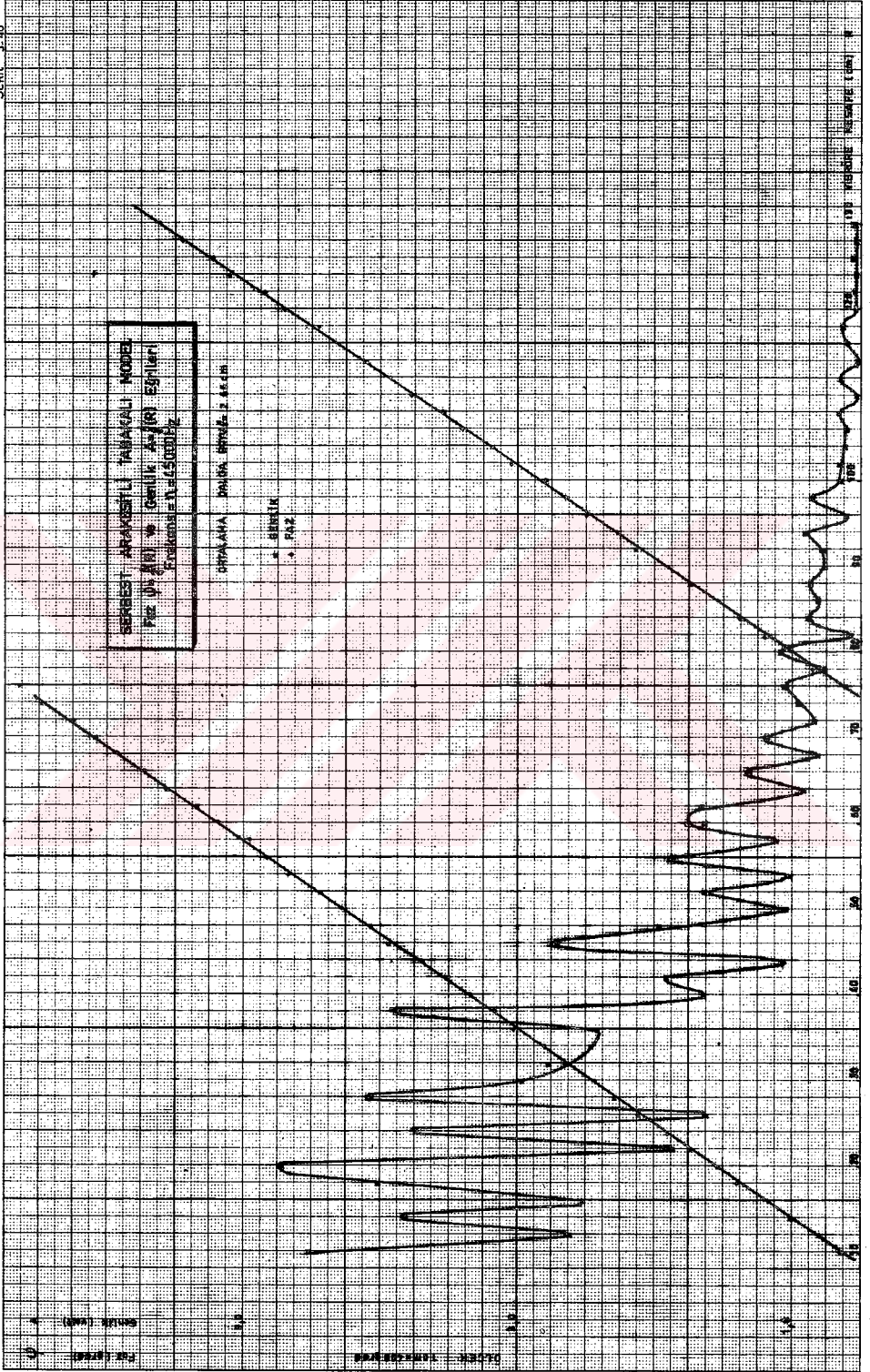


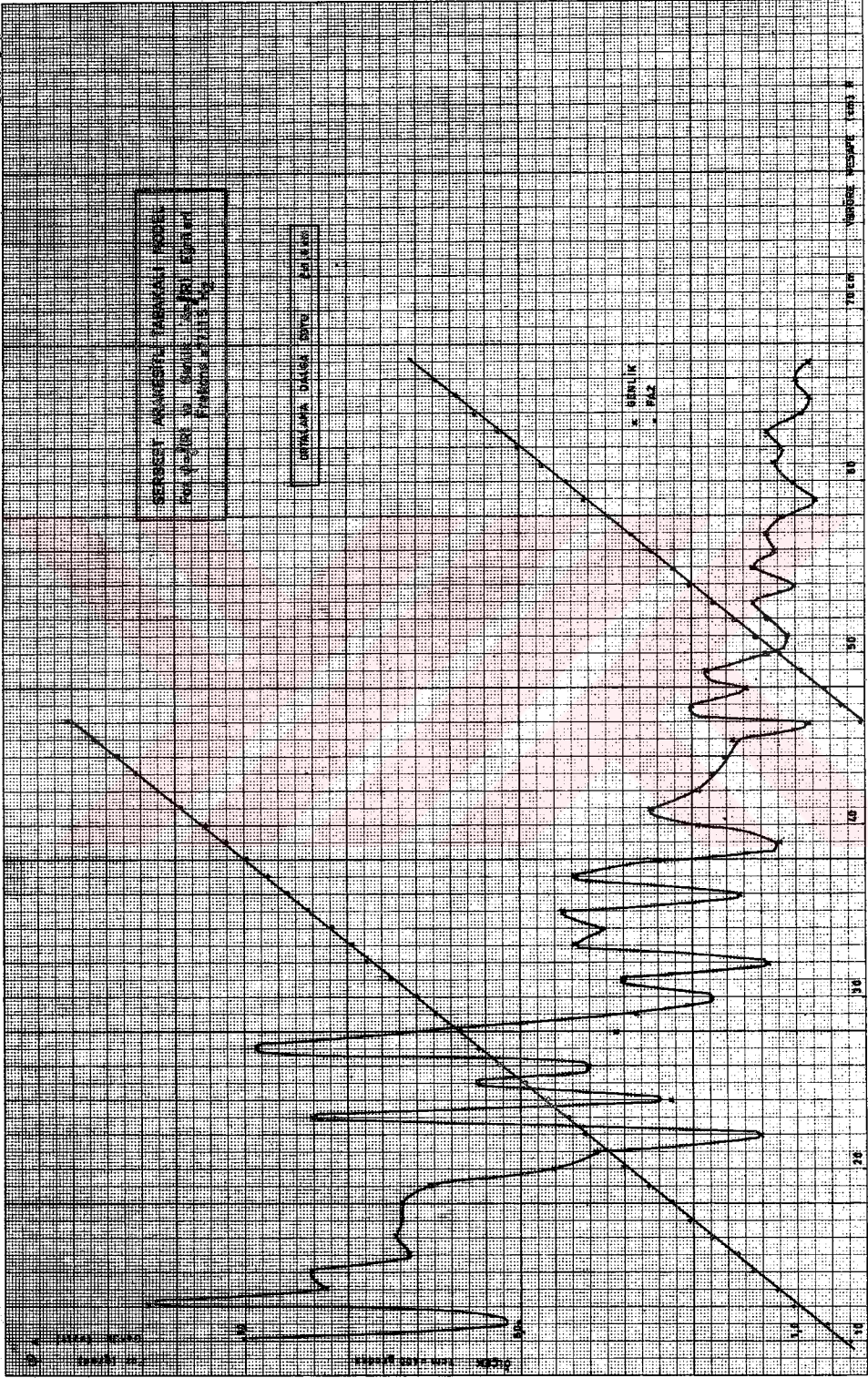


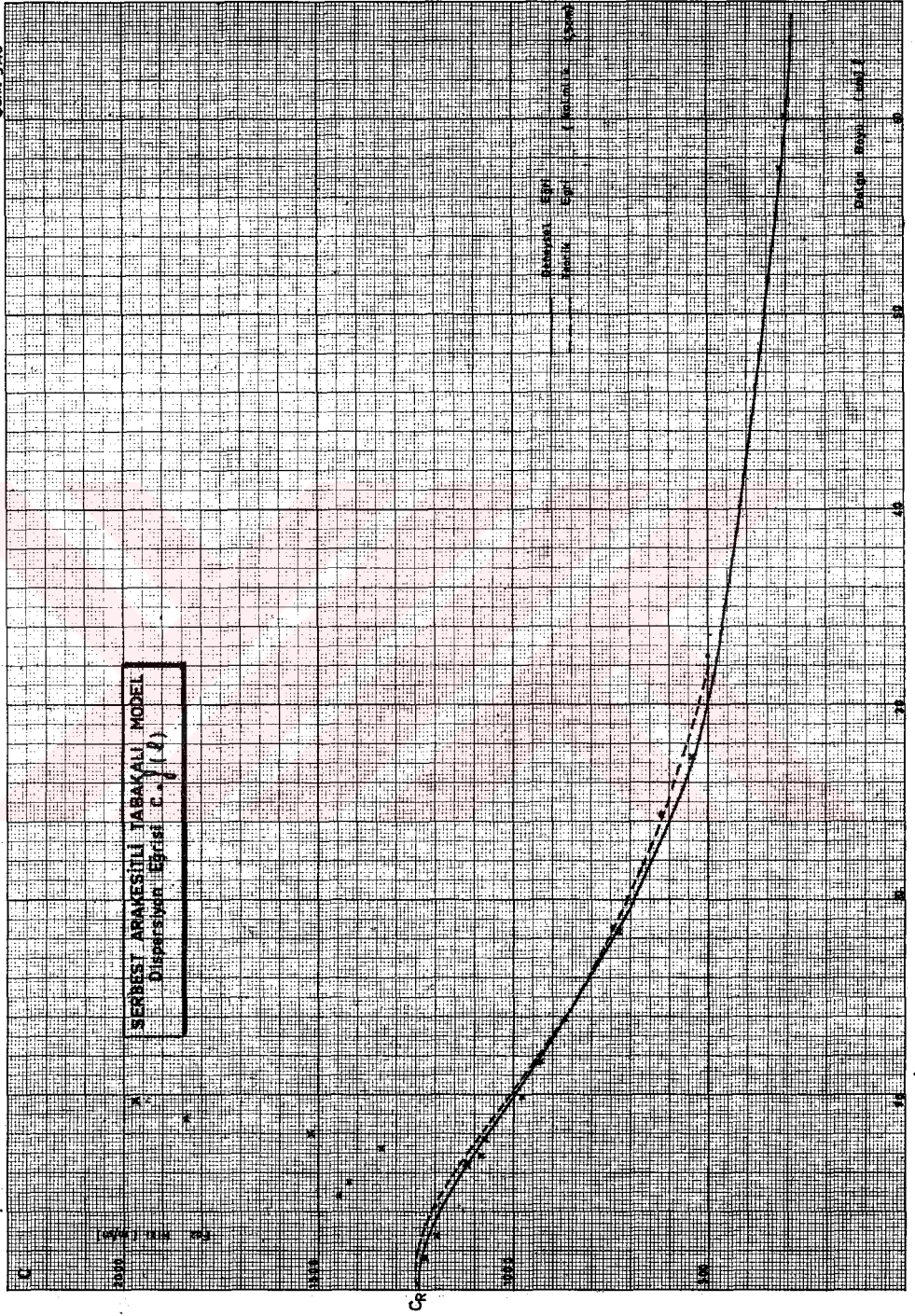




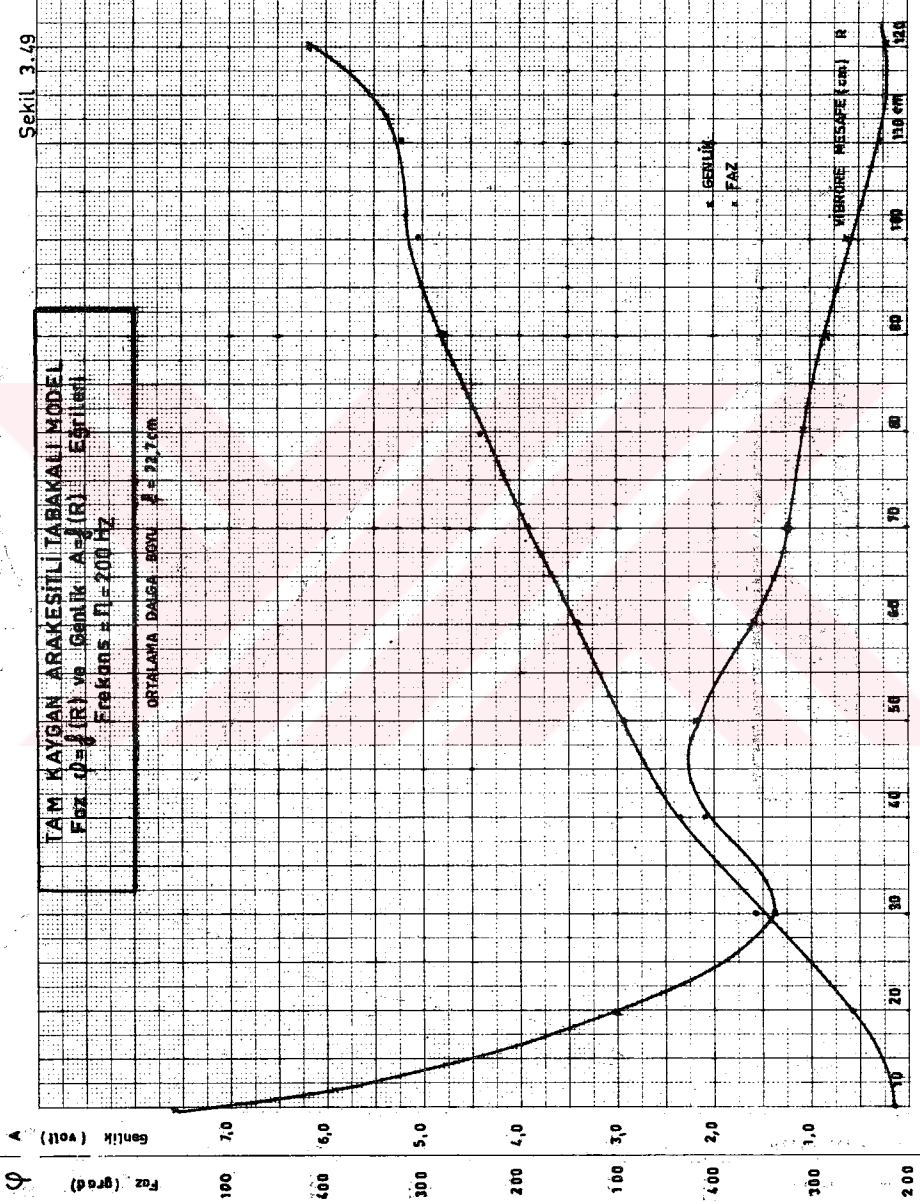




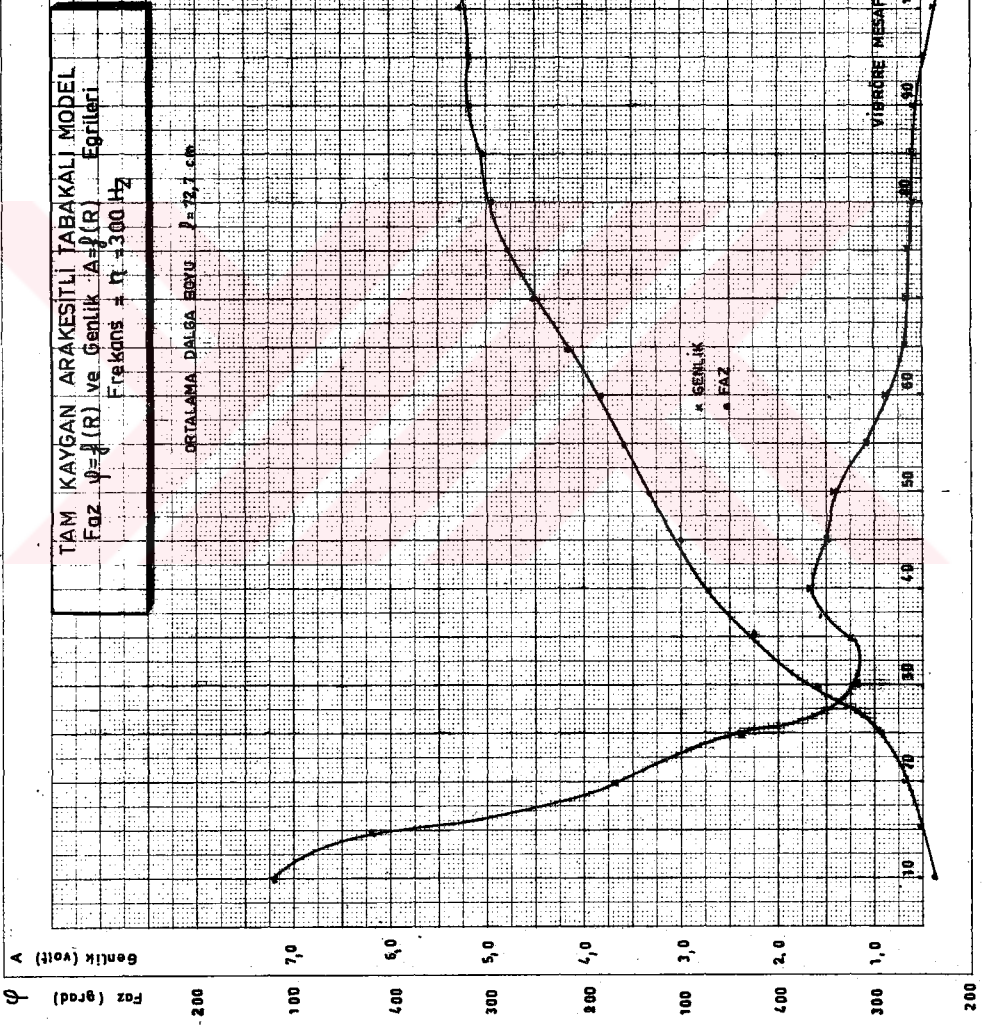




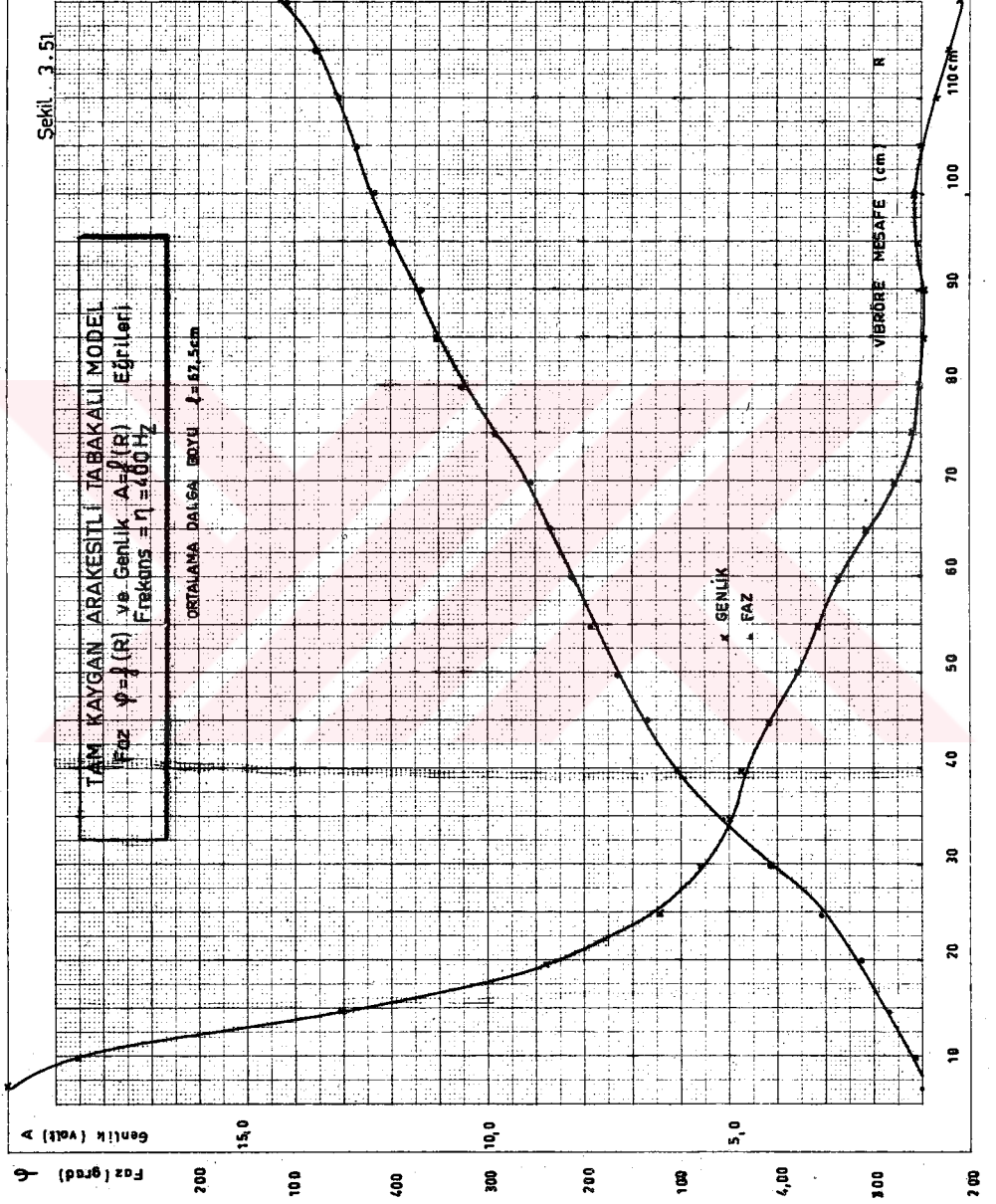
Sekil 3.49



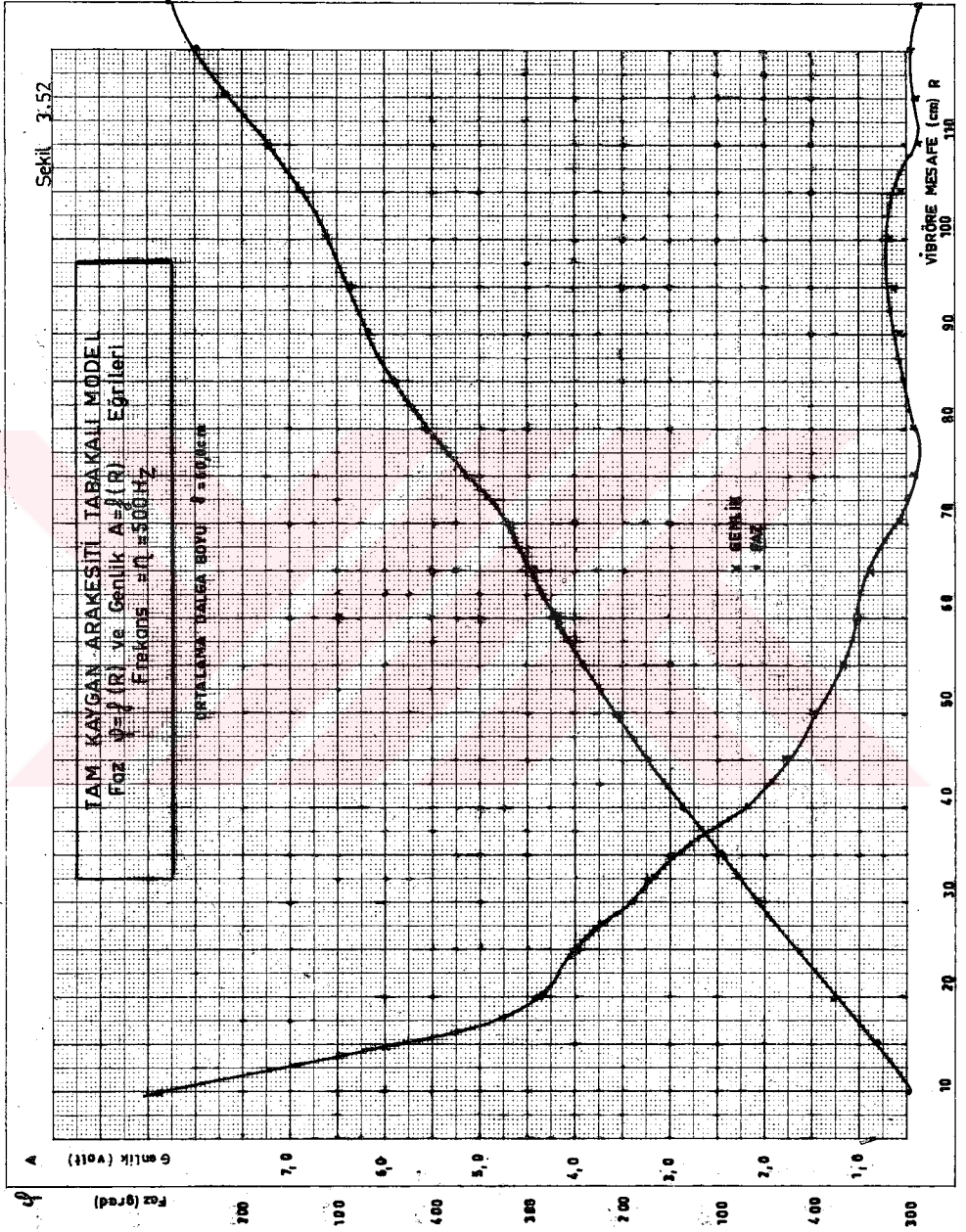
Sekil 3.50



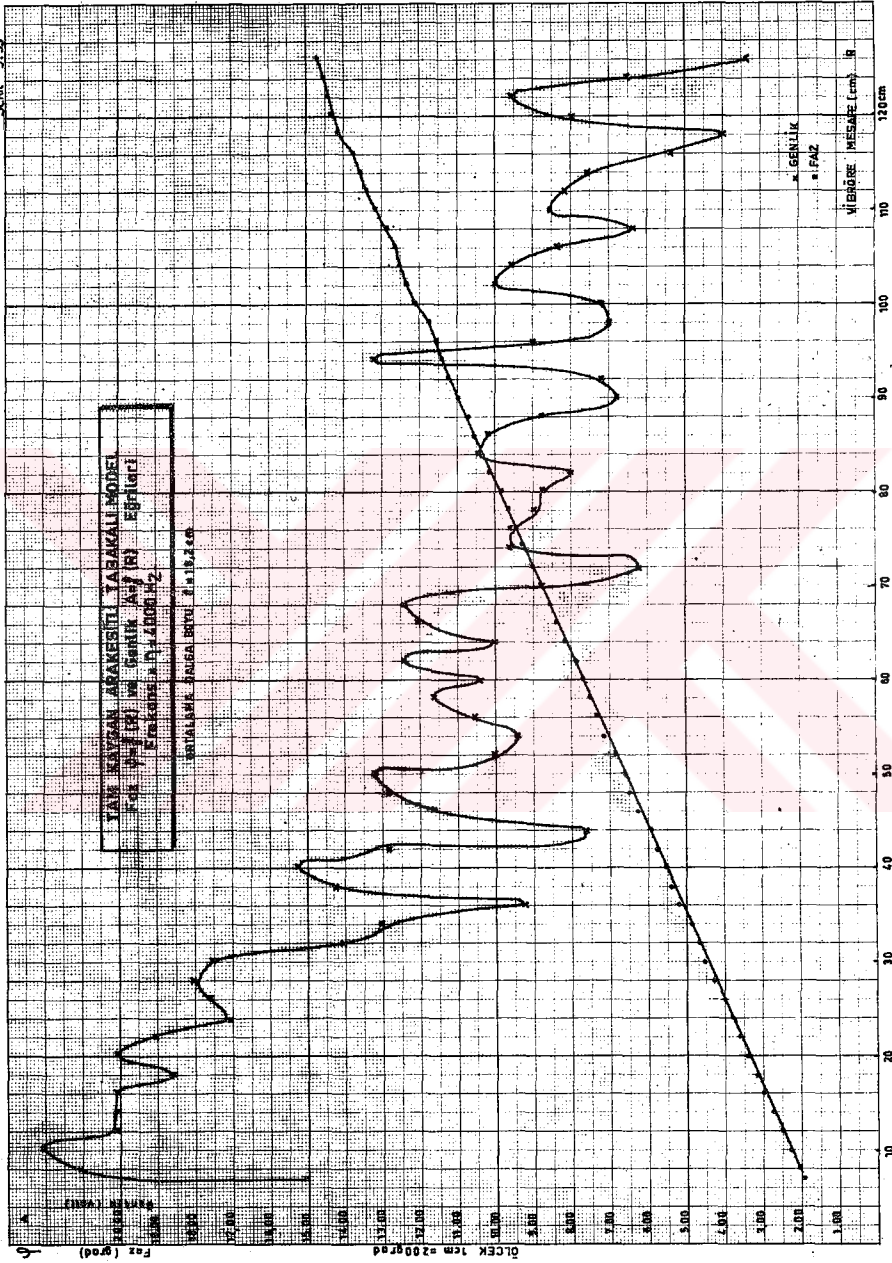
Sekil 3.51

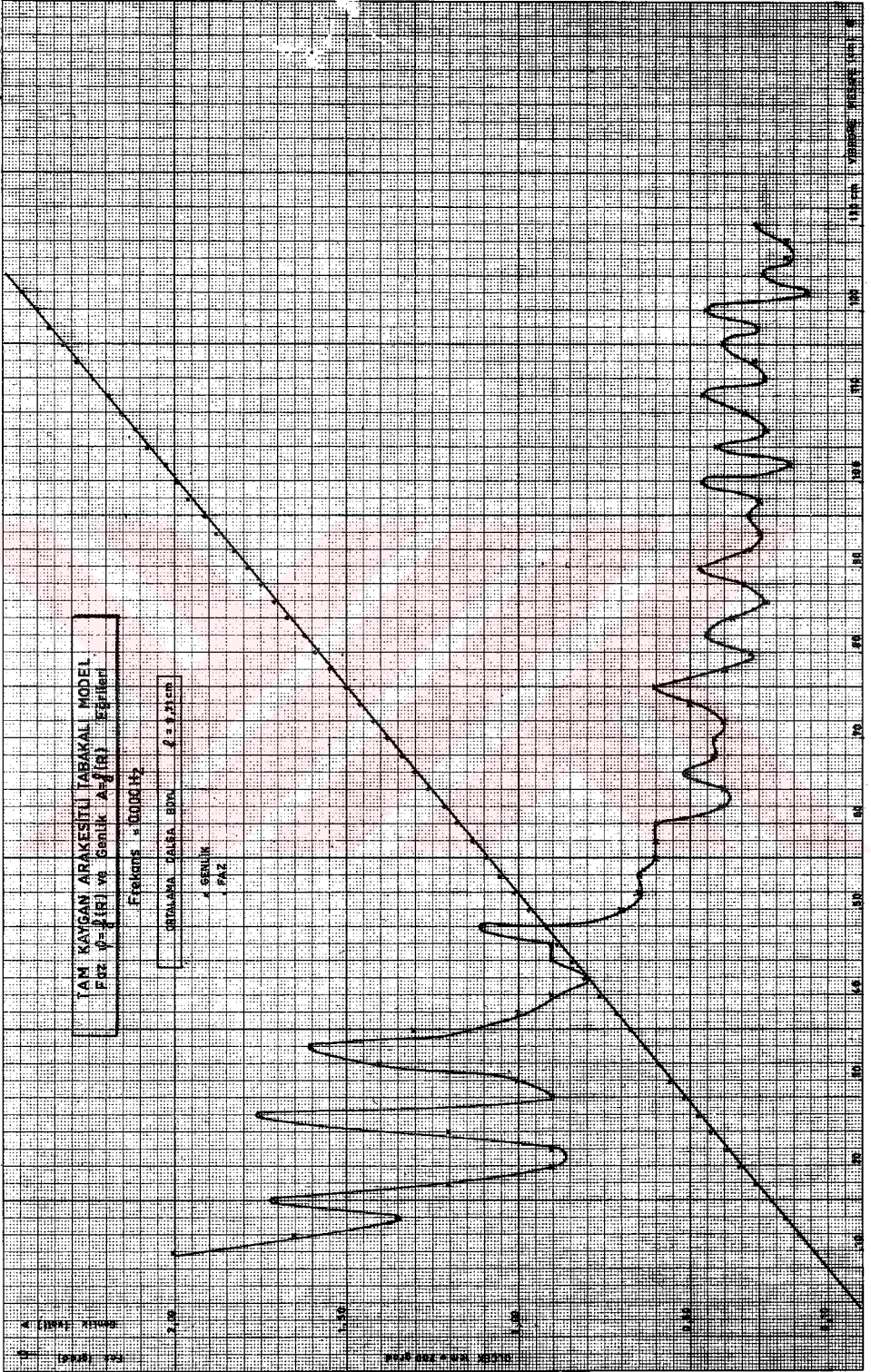


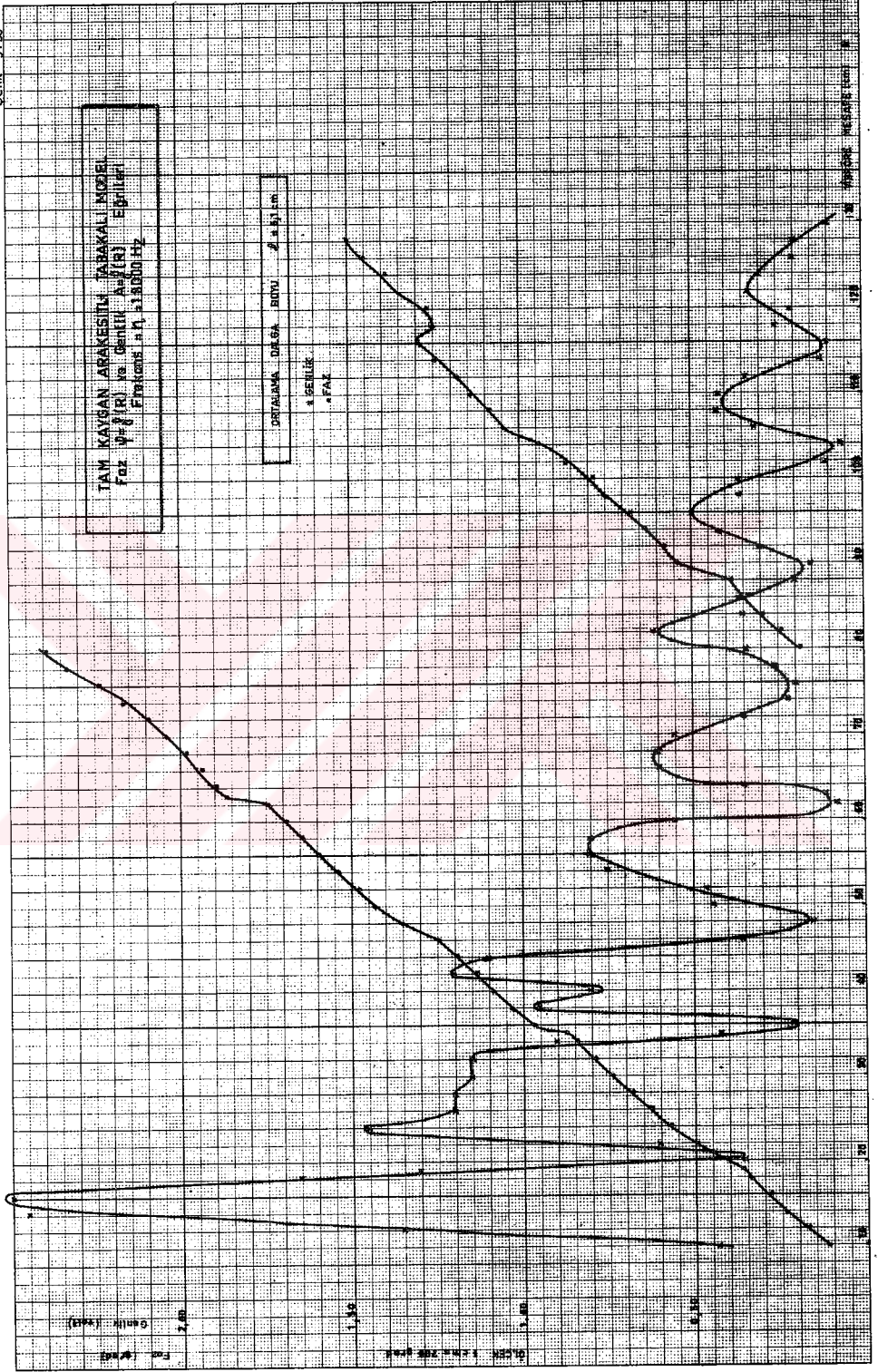
Sekil 3.52

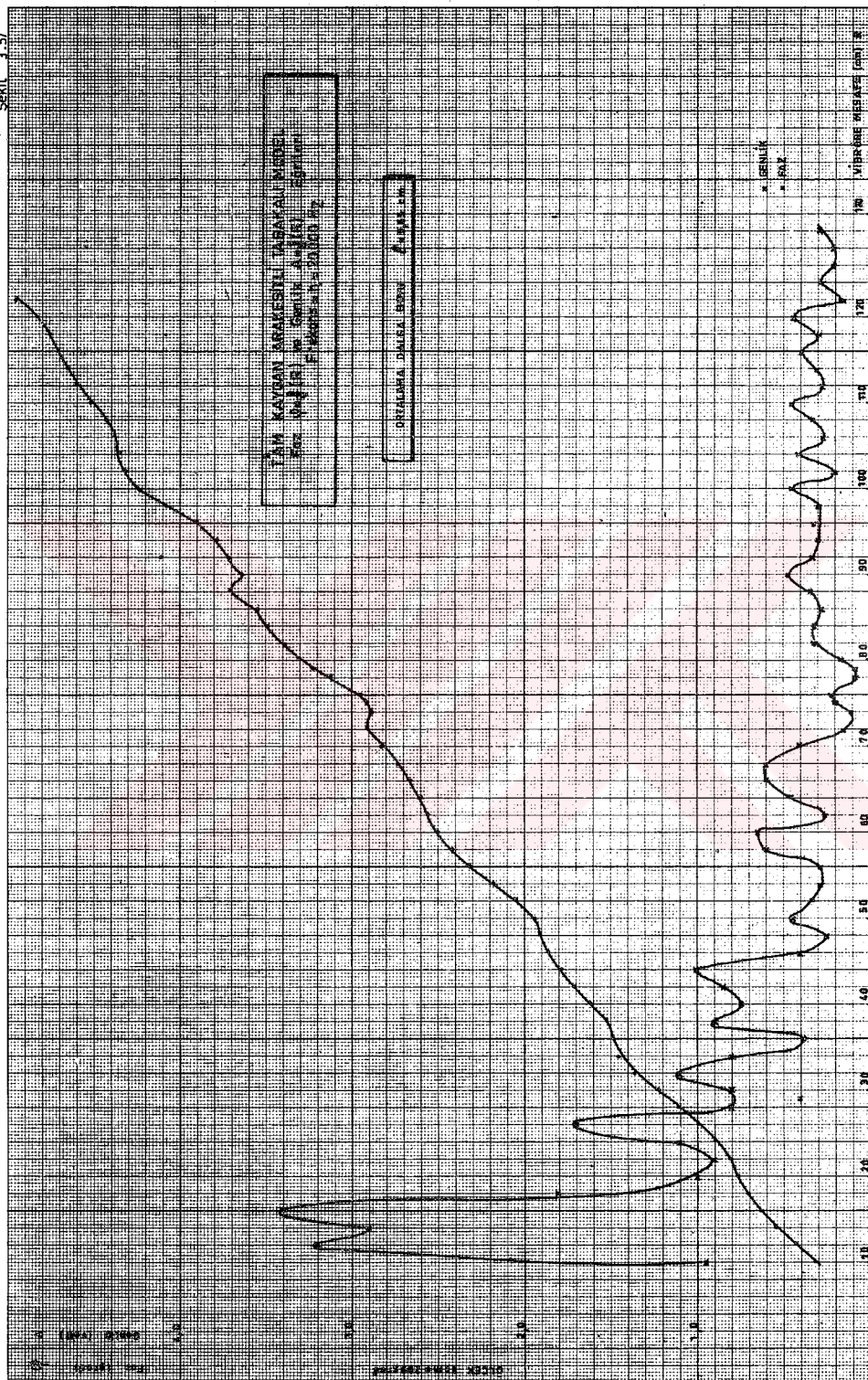


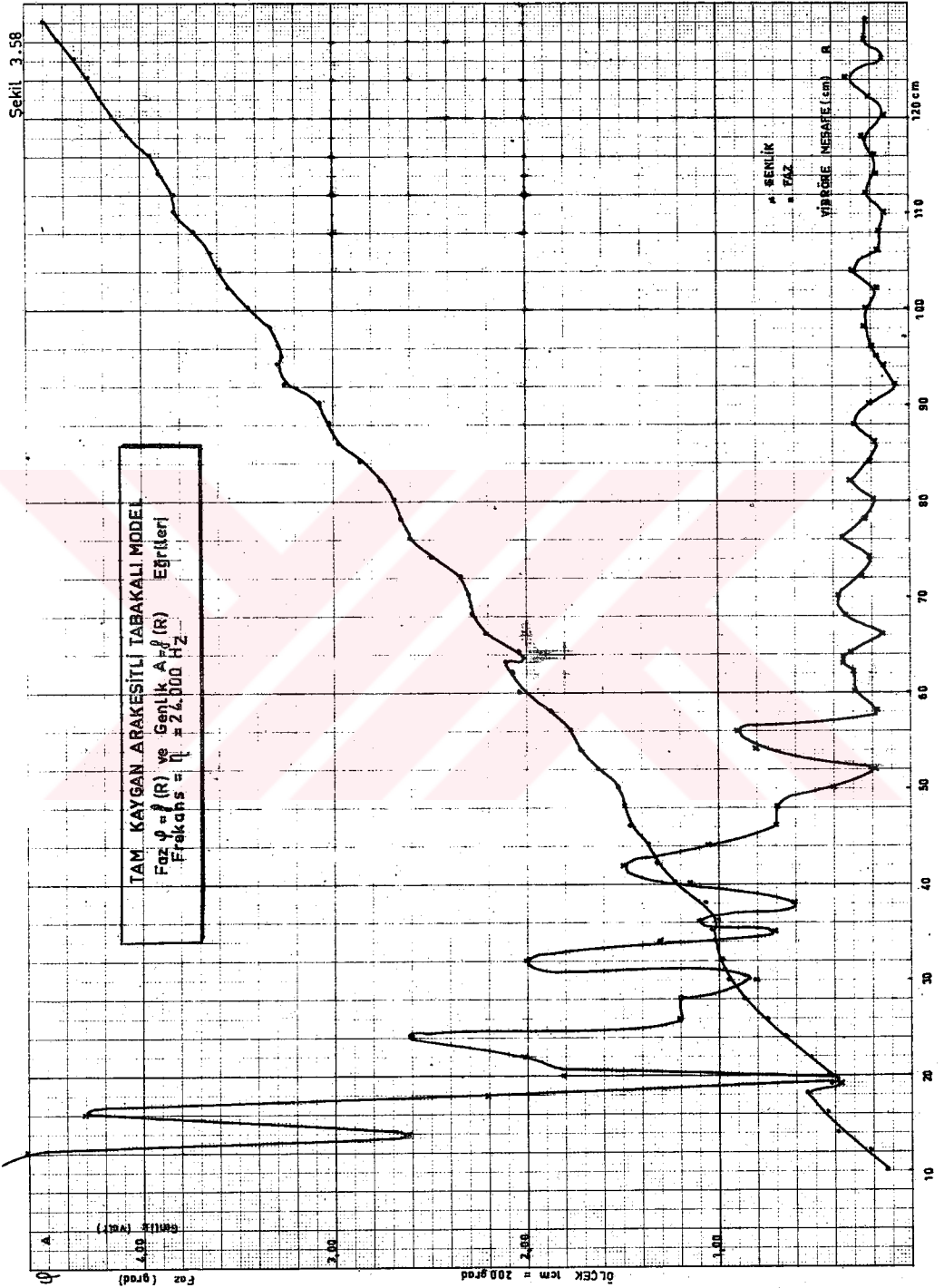
Sekel 3.53

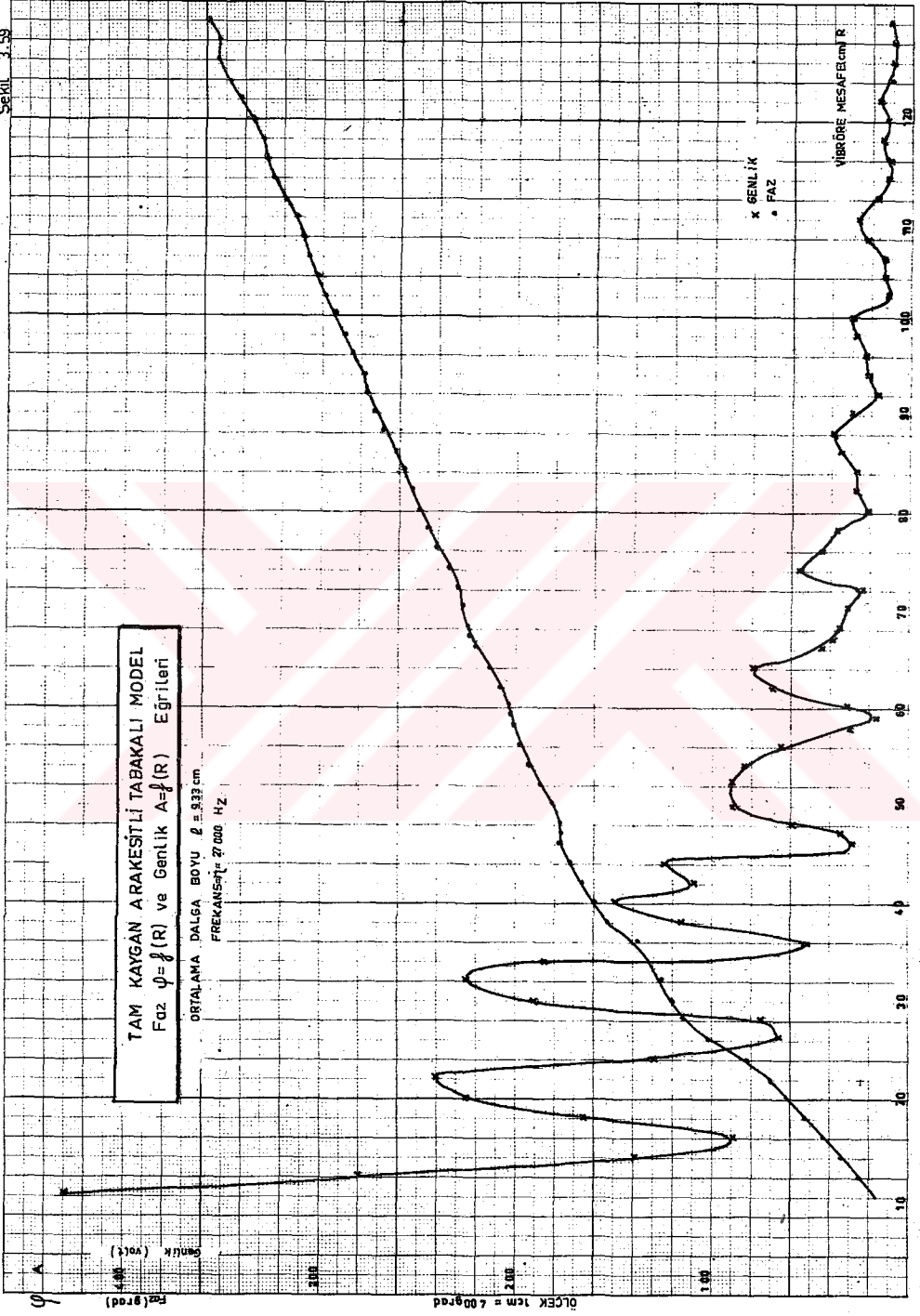


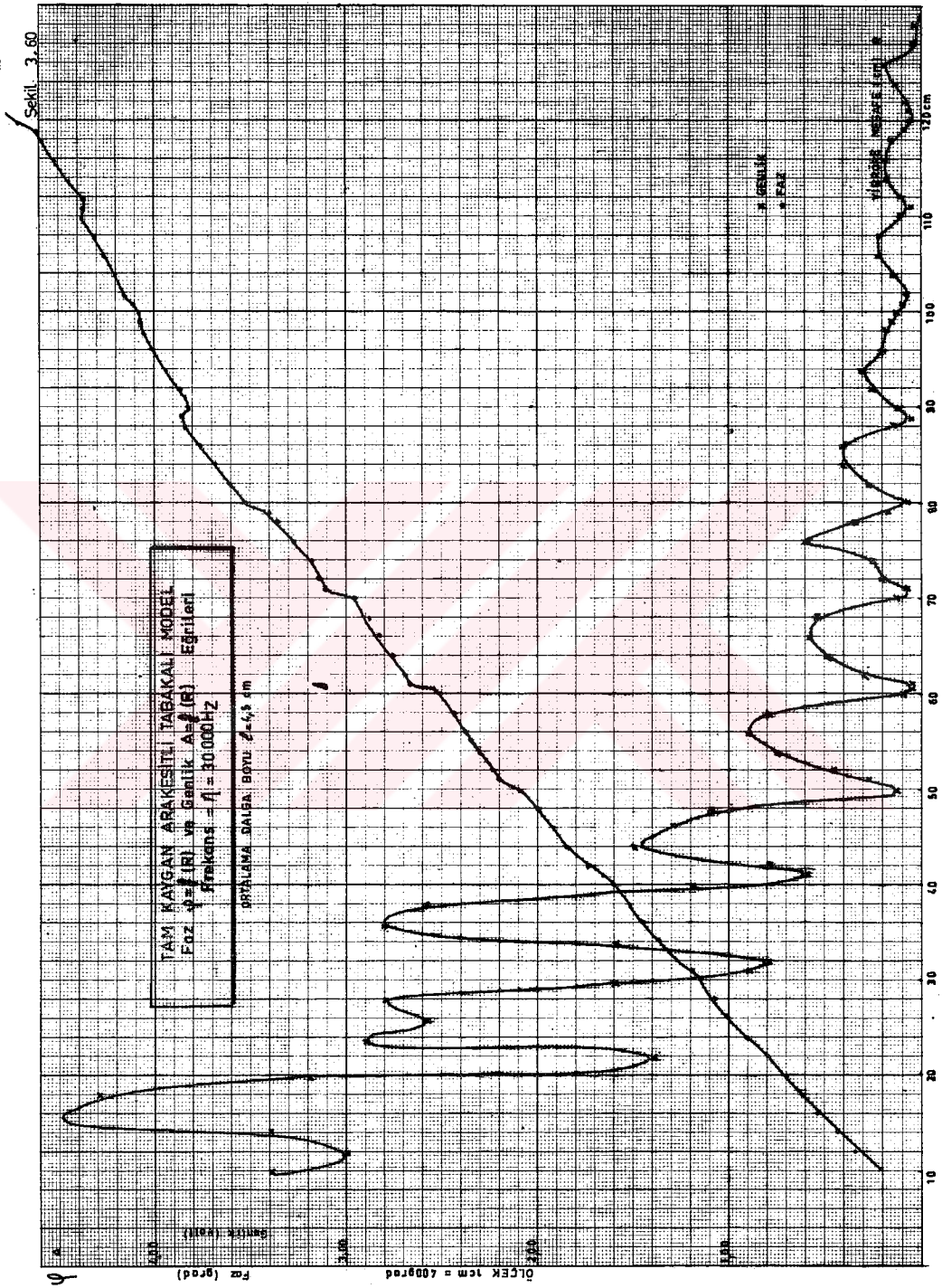


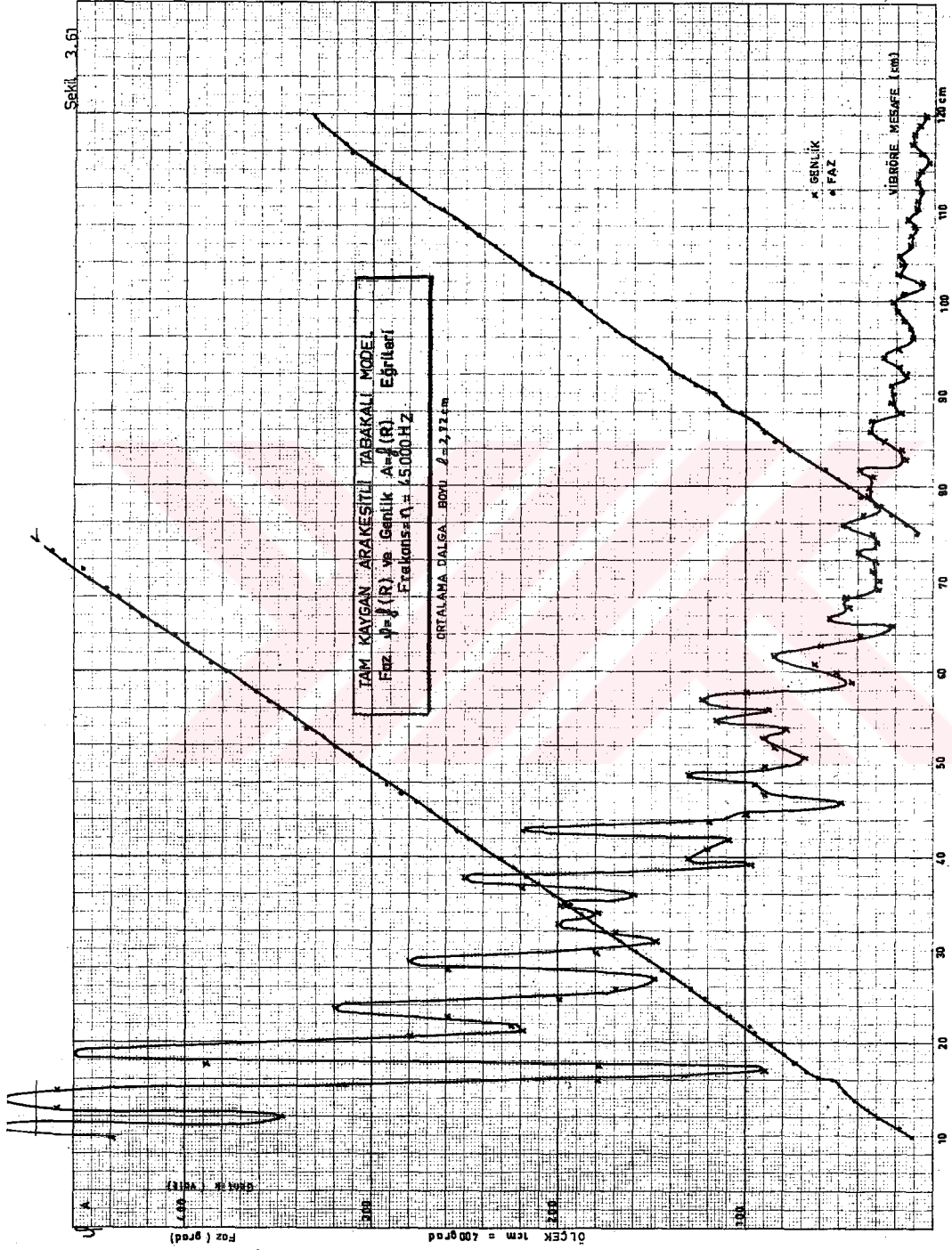


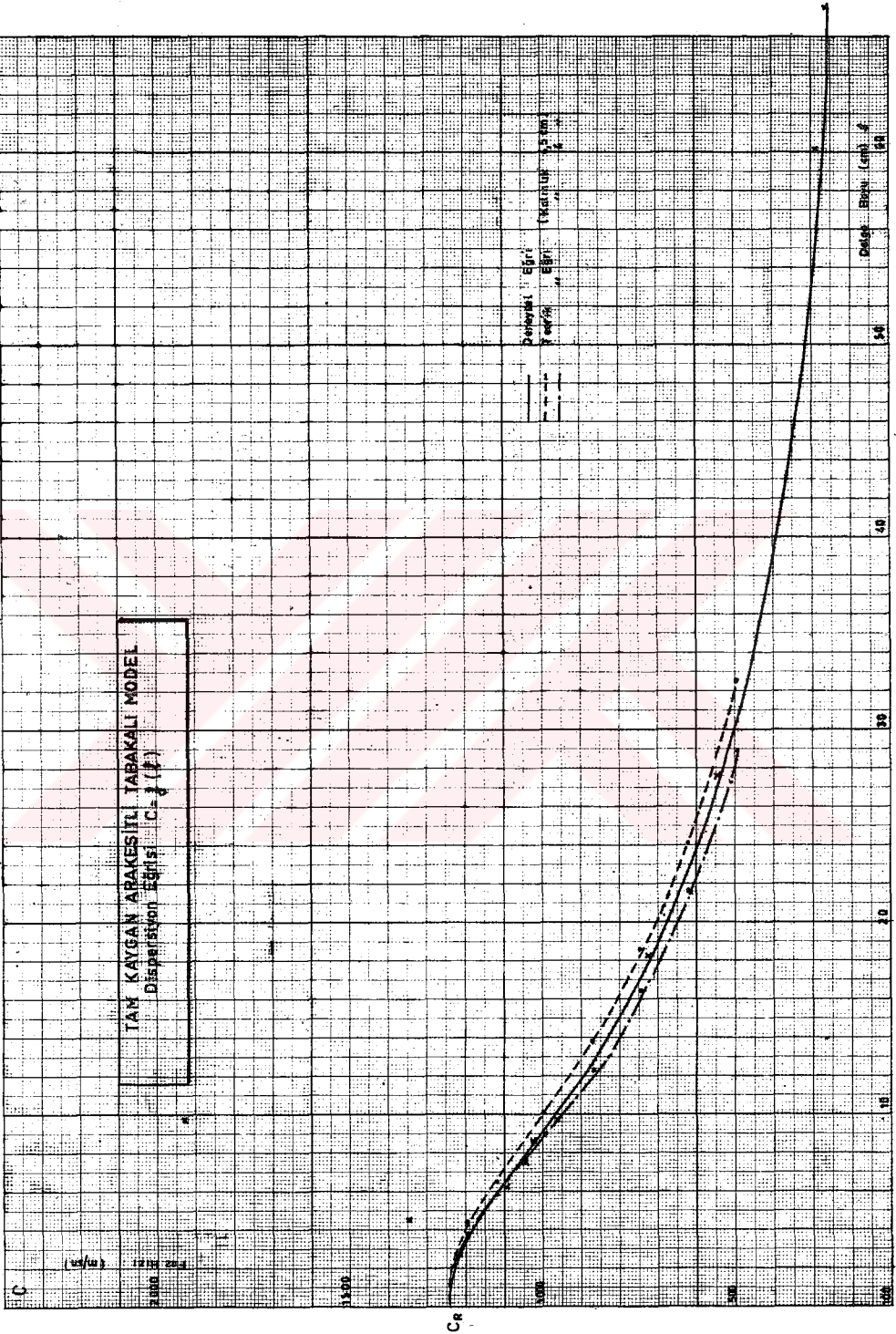




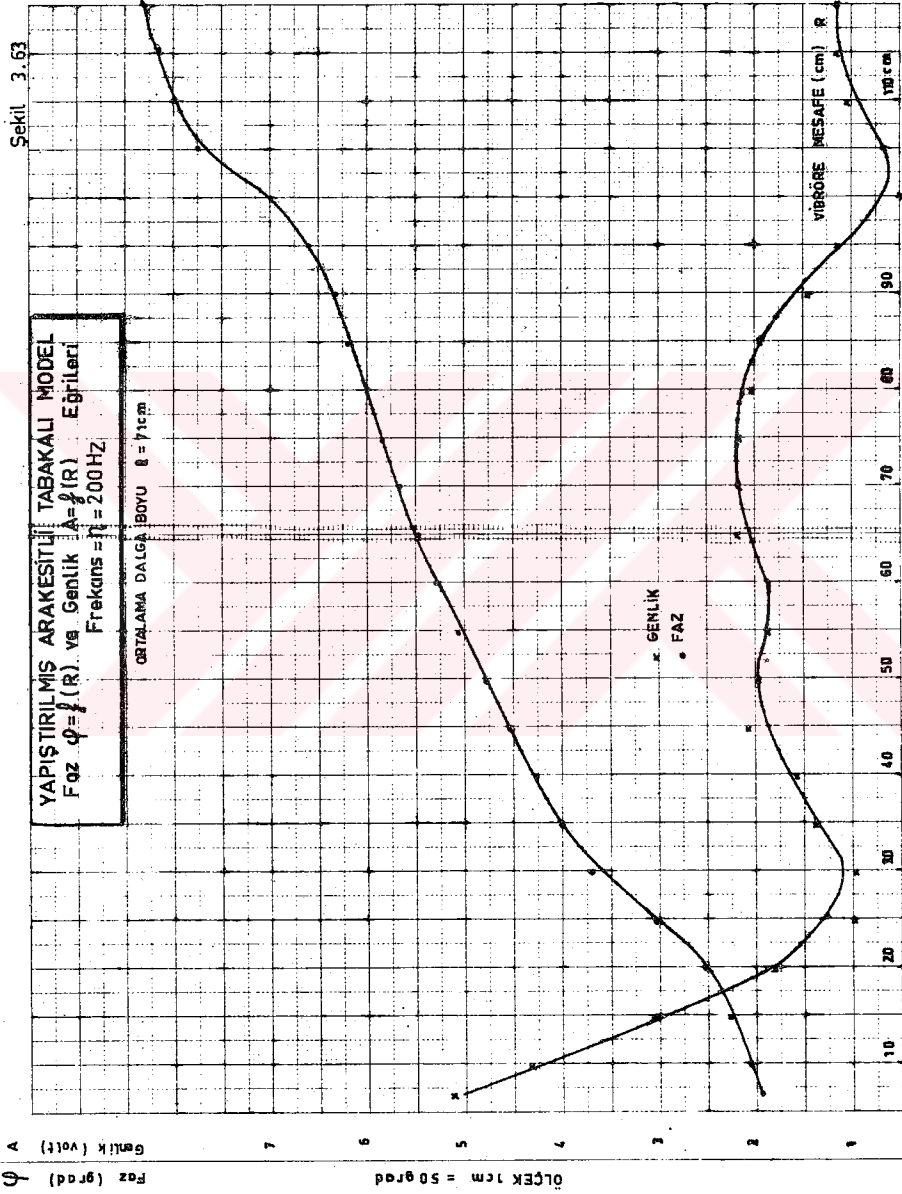




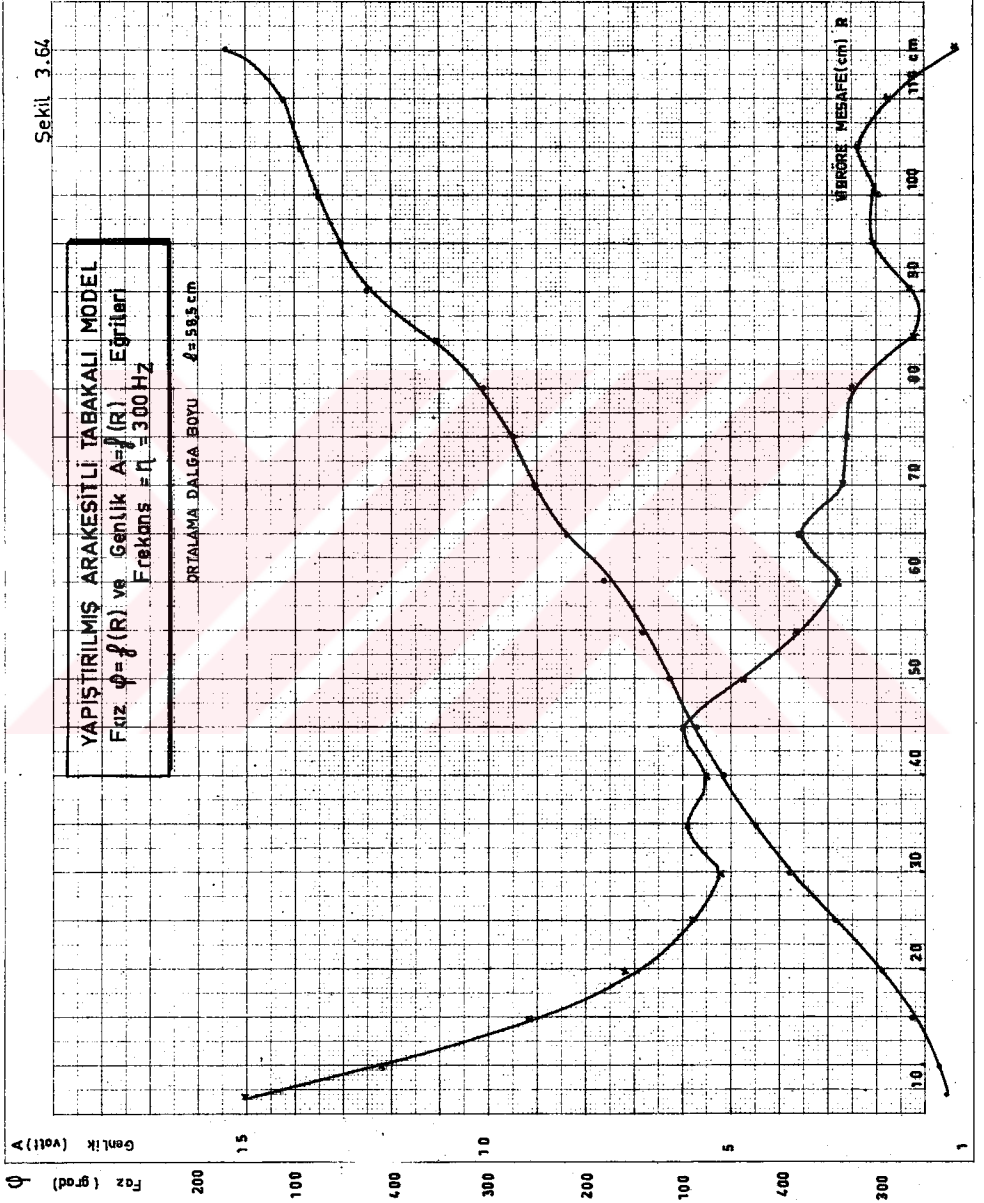




Sekil 3.63



Sekil 3.64



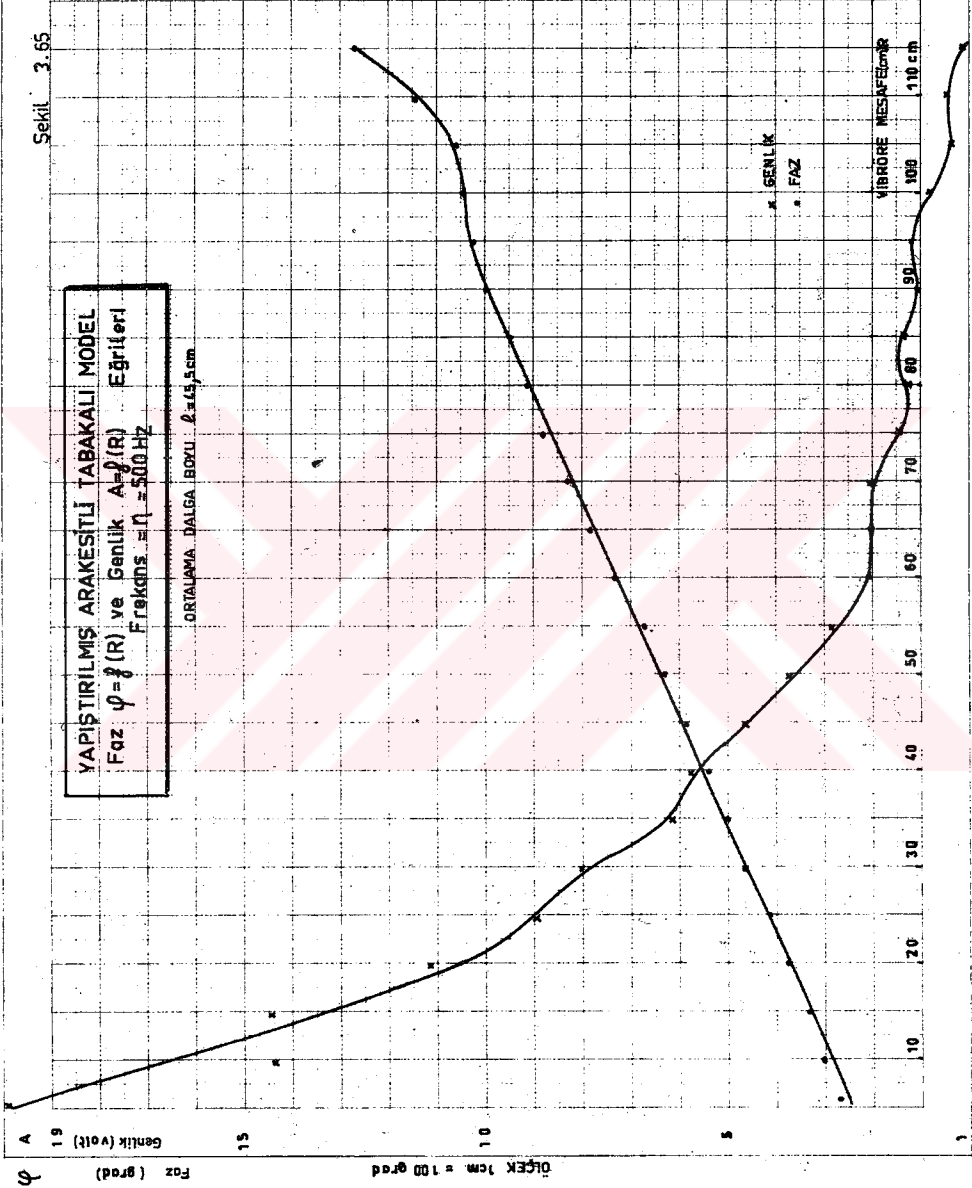
Sekil 3.65

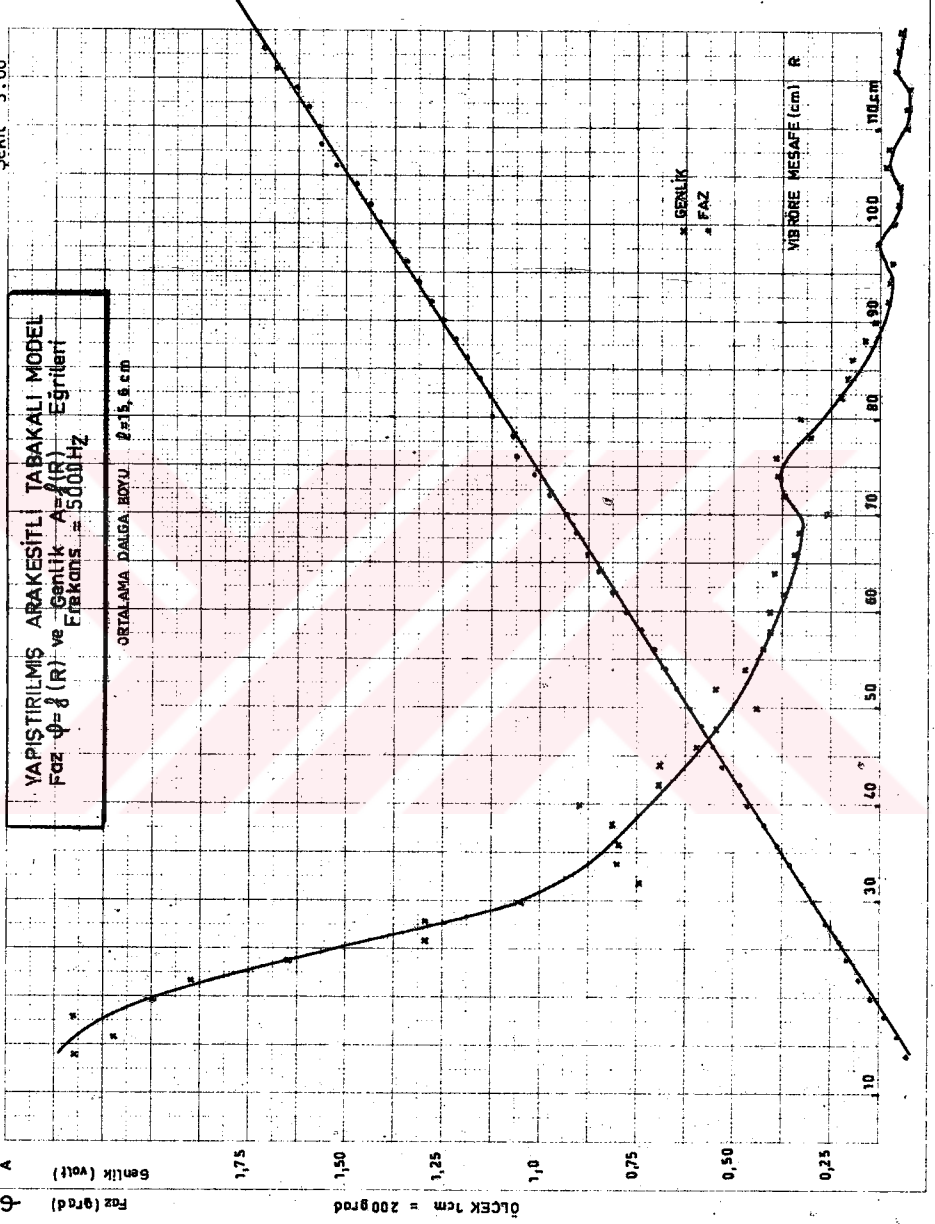
YAPIŞTIRILMIŞ ARAKESTİLİ TABAKALI MODEL

Faz $\phi = \phi(R)$ ve Genlik $A = A(R)$ Eğrileri

Frekans $\omega = 500 \text{ Hz}$

ORTALAMA DALGA BOYU: $\lambda = 15,5 \text{ cm}$

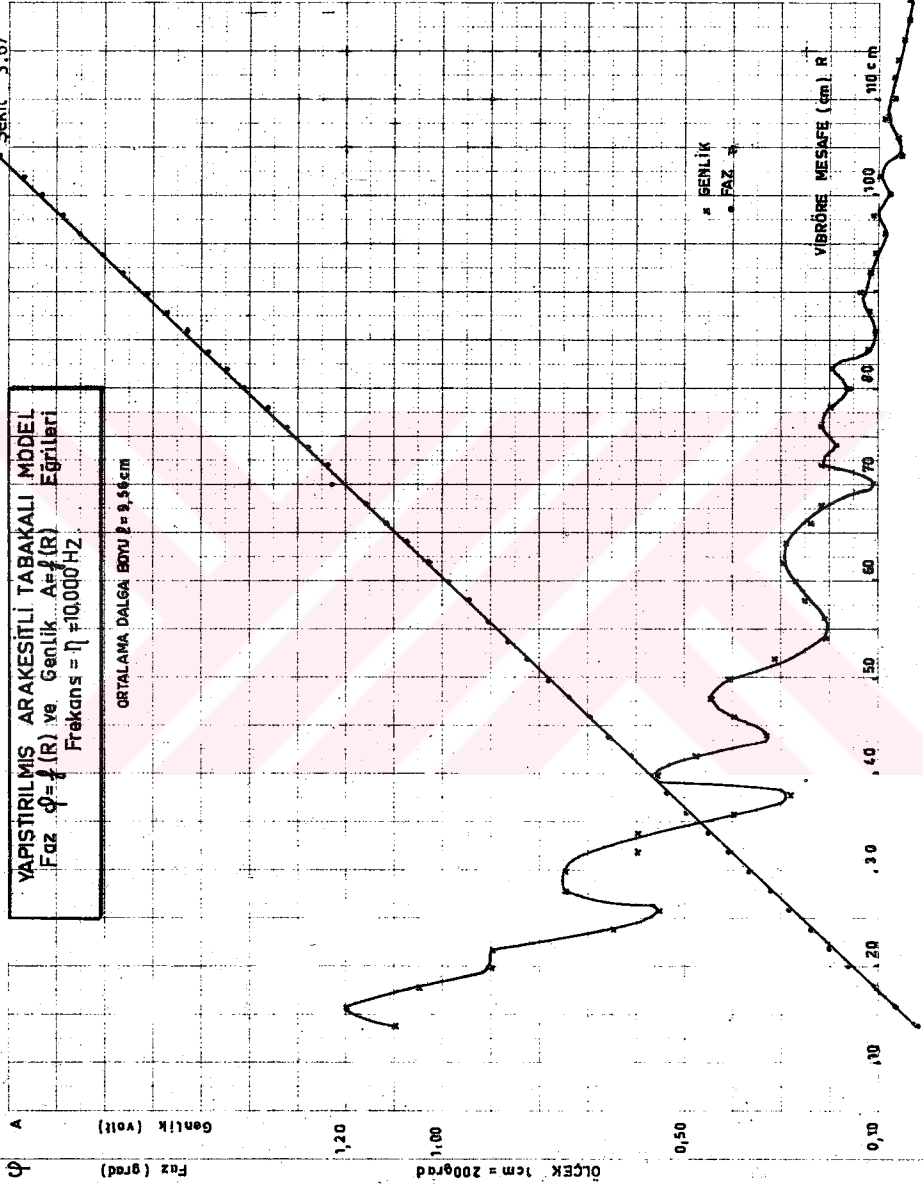




Sekil 3.67

YAPISTIRILMIS ARAKESİTLİ TABAKALI MODEL
Faz $\phi = f(R)$ ve Genlik $A = f(R)$ Eğrileri
Frekans $= \eta = 10000 \text{ Hz}$

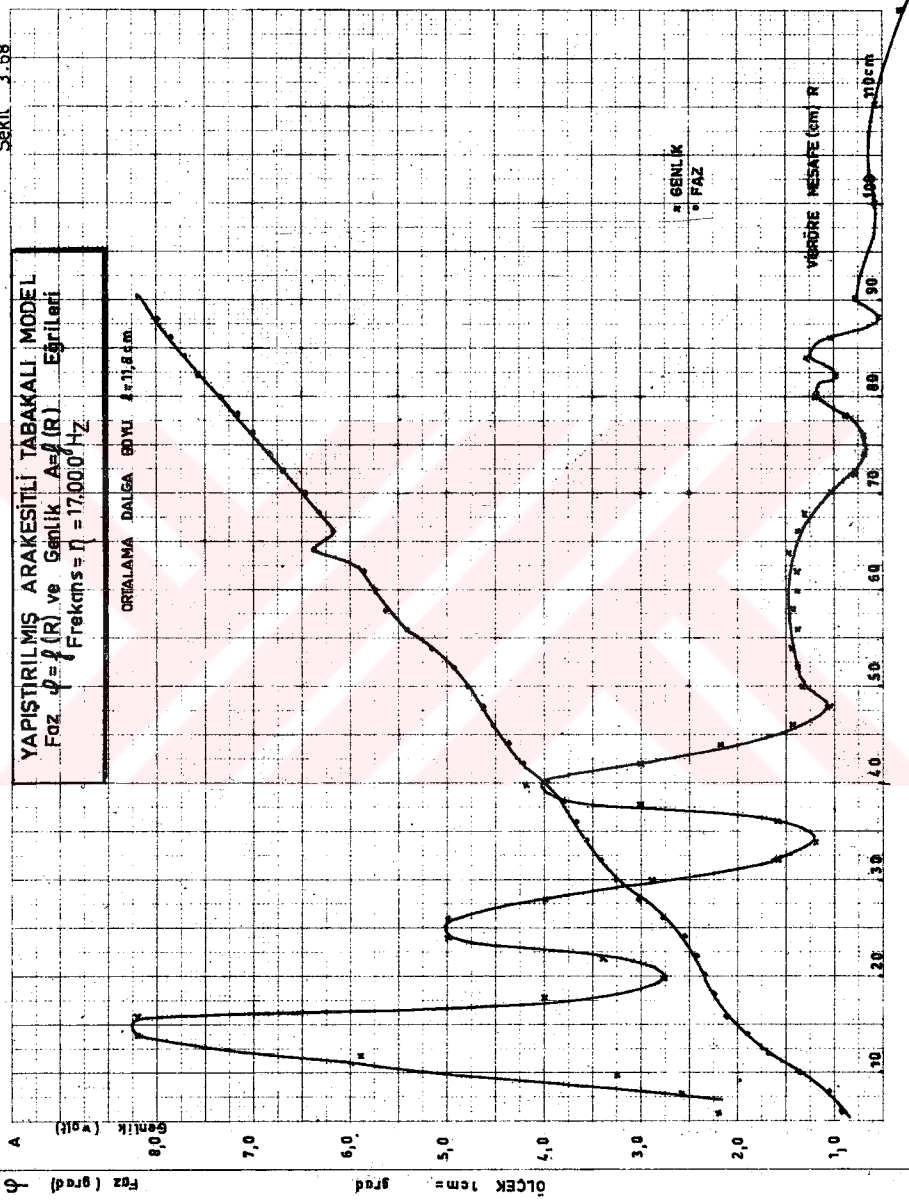
ORTALAMA DALGA BOYU $\lambda = 9,56 \text{ cm}$

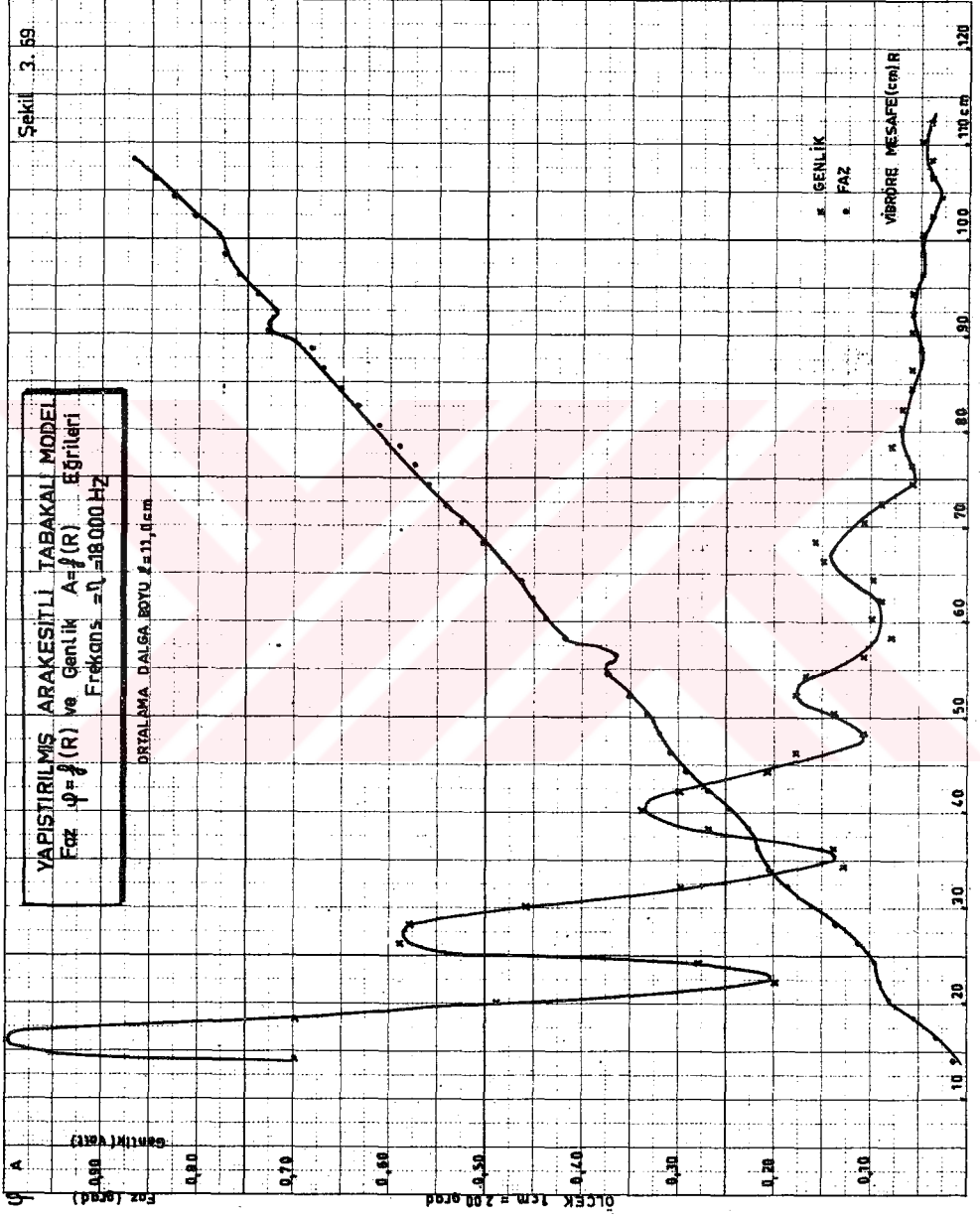


Sekil 3.68

YAPIŞTIRILMIŞ ARAKESİTLİ TABAKALI MODEL
 Faz $\phi = \phi(R)$ ve Genlik $A = A(R)$ Eğrileri
 Frekans $f = 17,000$ Hz

ORTALAMA DALGA BOYU $\lambda = 11,8$ cm

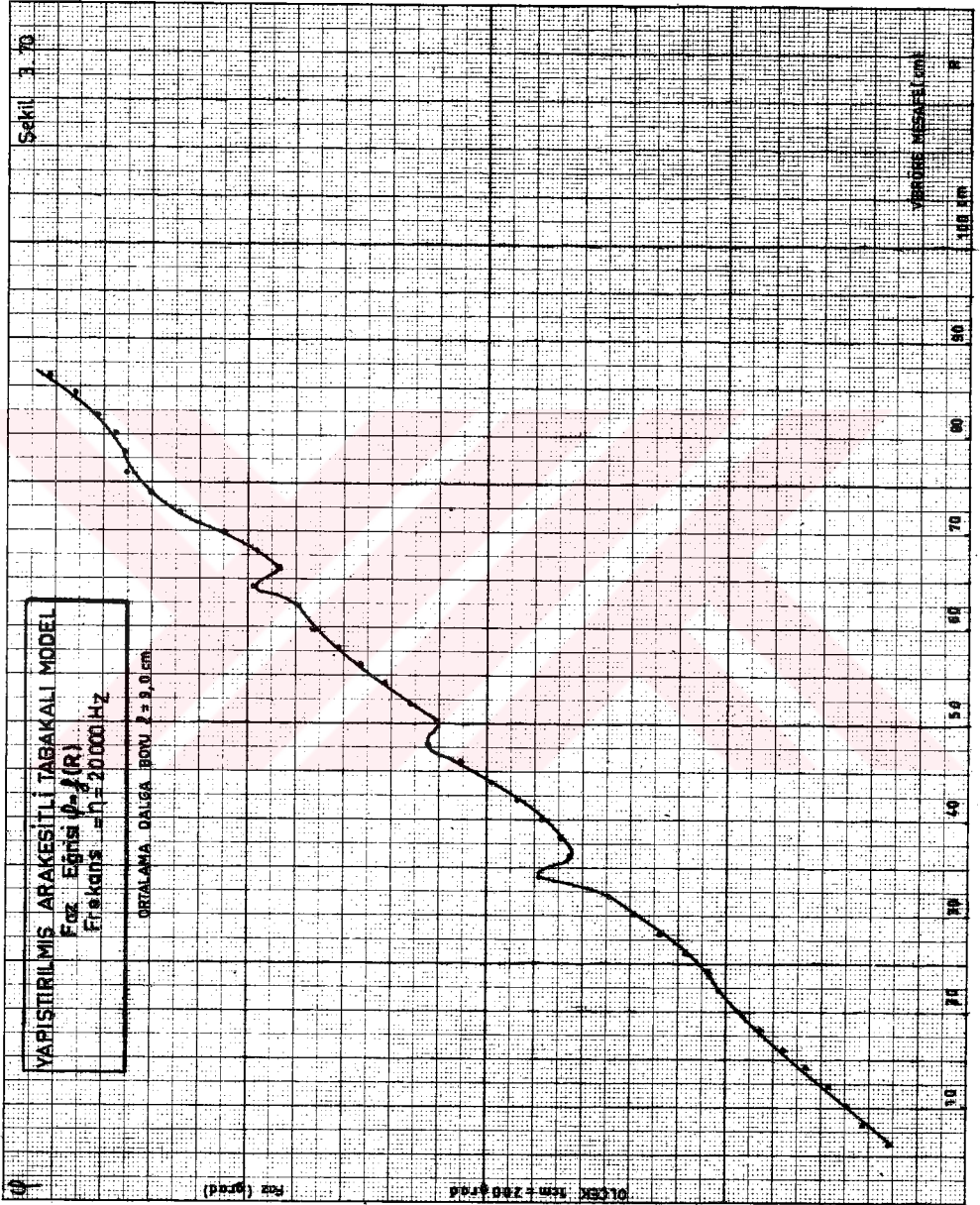




Sakıl 3.70

YAPISIRILMIS ARAKESITLI TABAKALI MODEL
Faz Egrisi $\phi - \delta (R)$
Frikans $= \eta = 20000 \text{ Hz}$

ORTALAMA DALGA BOU $\lambda = 9.0 \text{ cm}$



0

Faz (grad)

ÖLÇEK 1cm = 200 grad

VERGÜS MESAFELERİ (cm)

100 cm

50

0

50

100

150

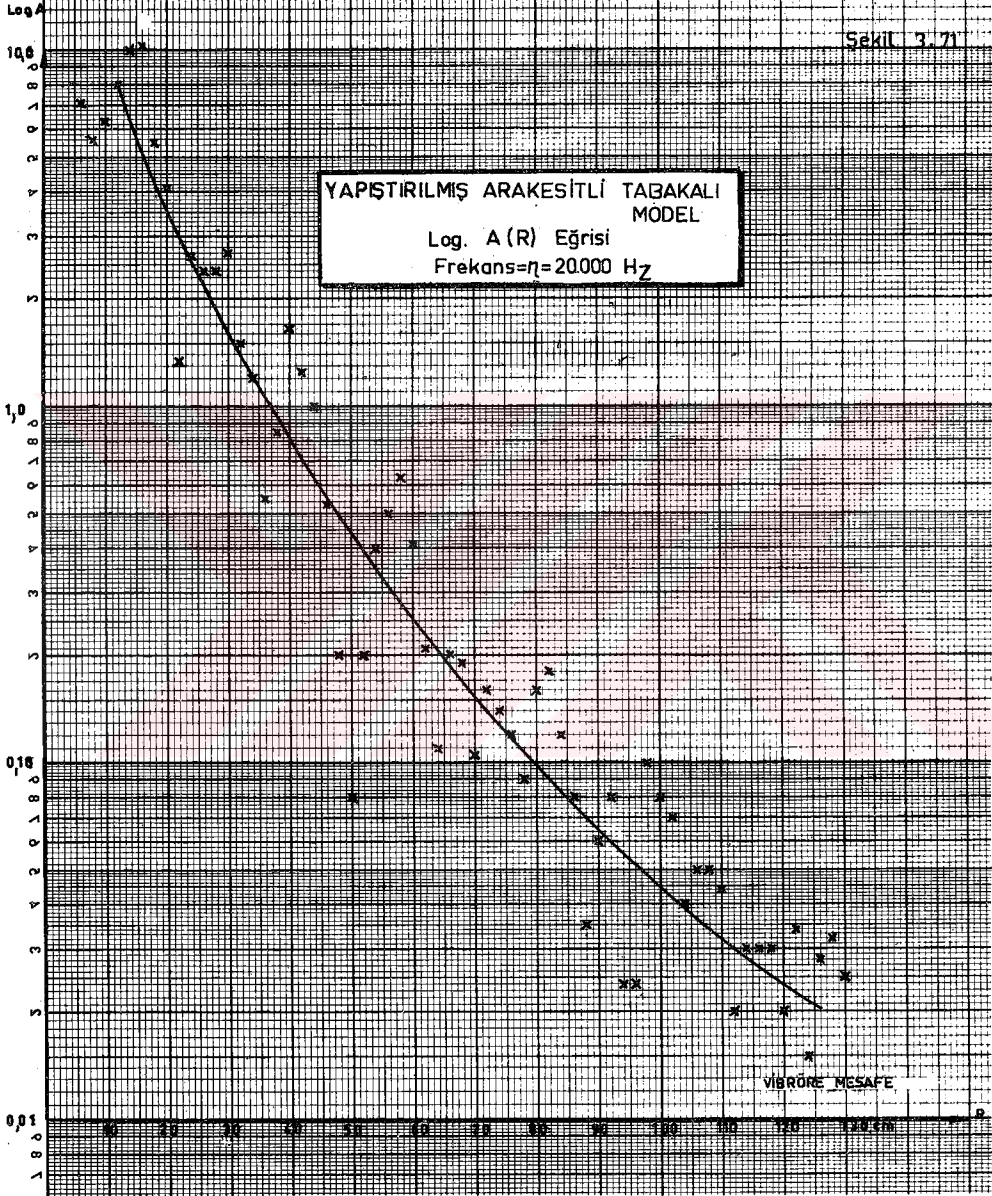
200

250

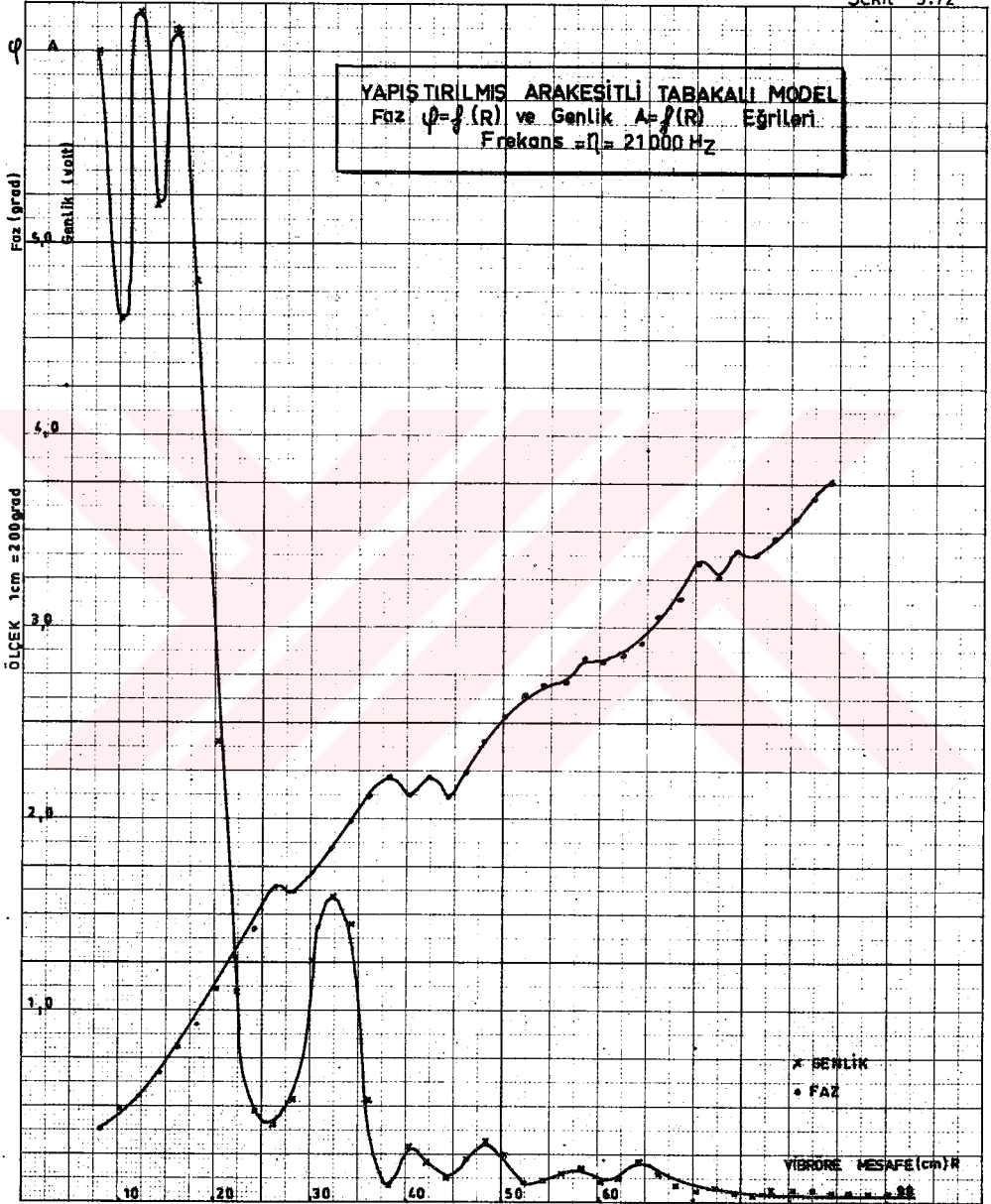
300

350

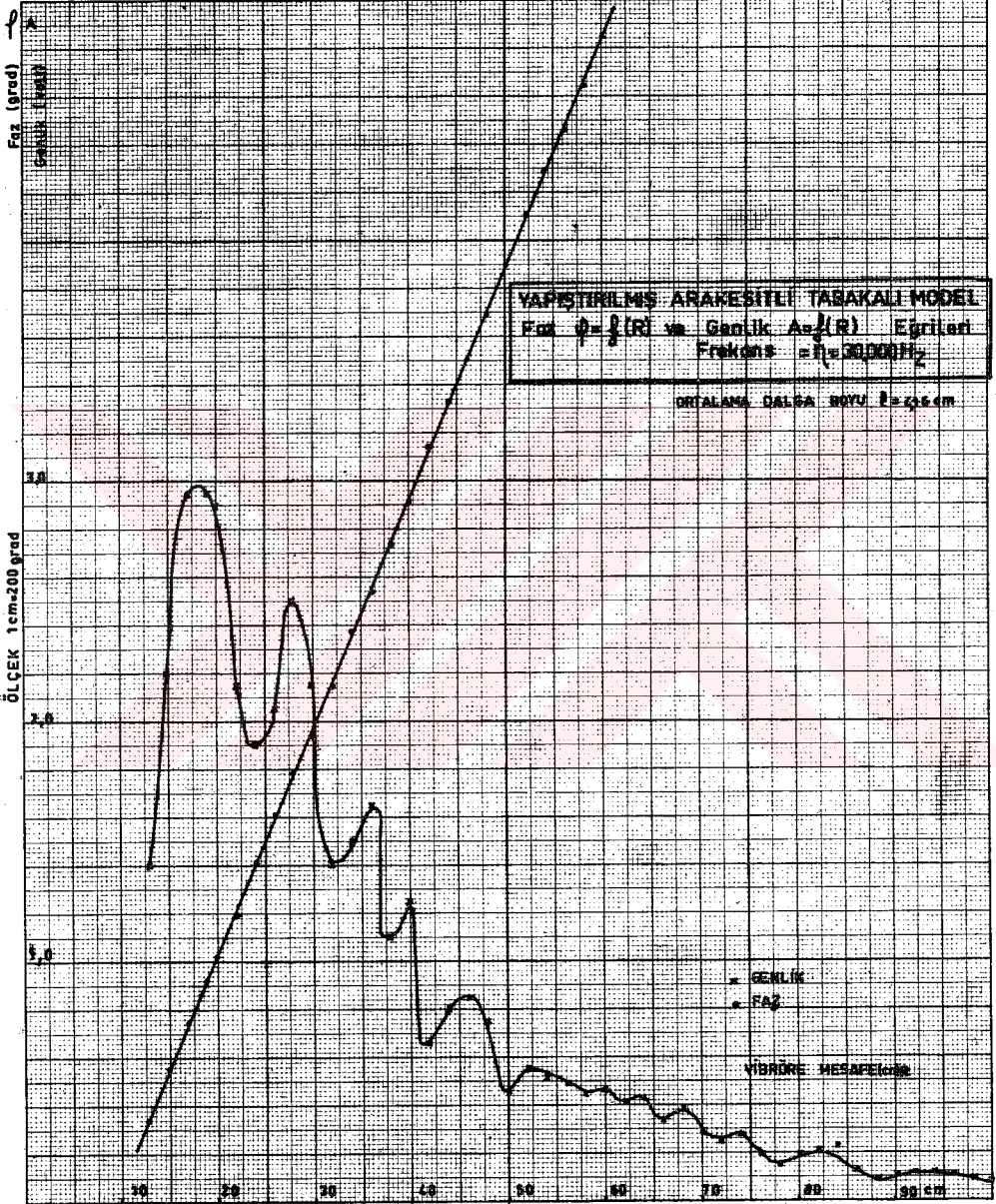
400

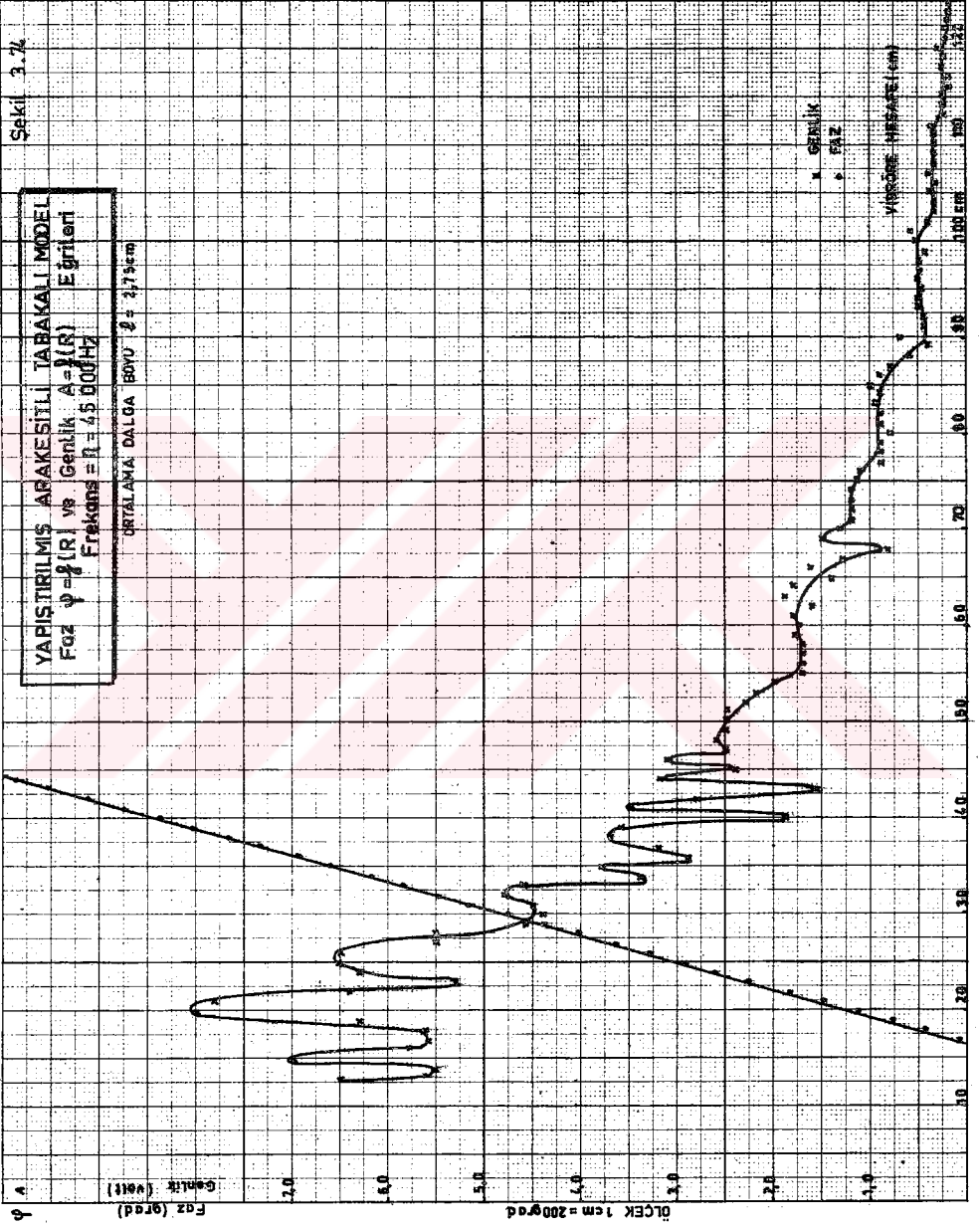


Sekil 3.72



Şekil 3.73





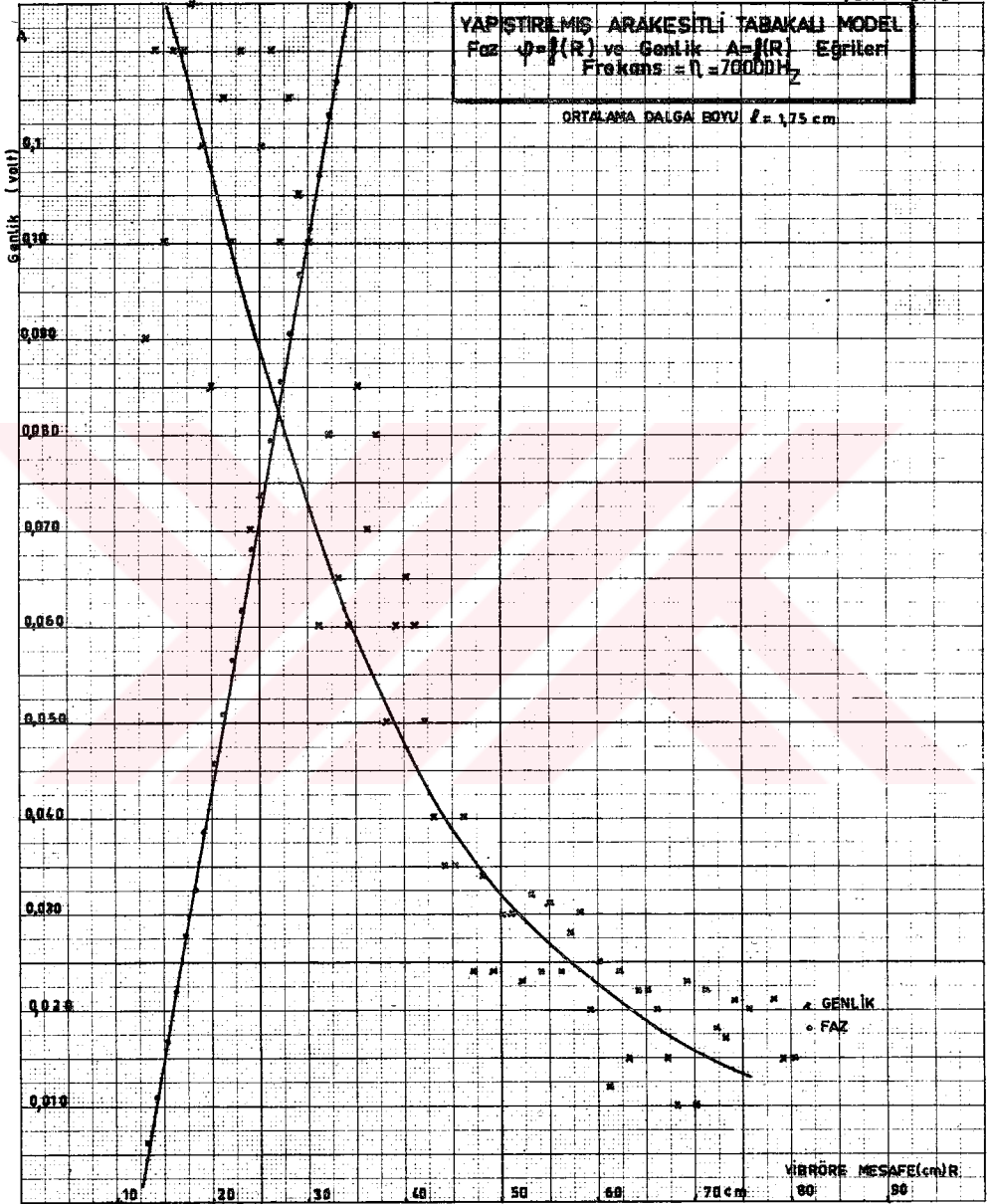
Sekil 3.75

YAPİSTIRILMIŞ ARAKESİTLİ TABAKALI MODEL
Faz $\phi = f(R)$ ve Genlik $A = f(R)$ Eğrileri
Frekans $\omega = 10000 \text{ Hz}$

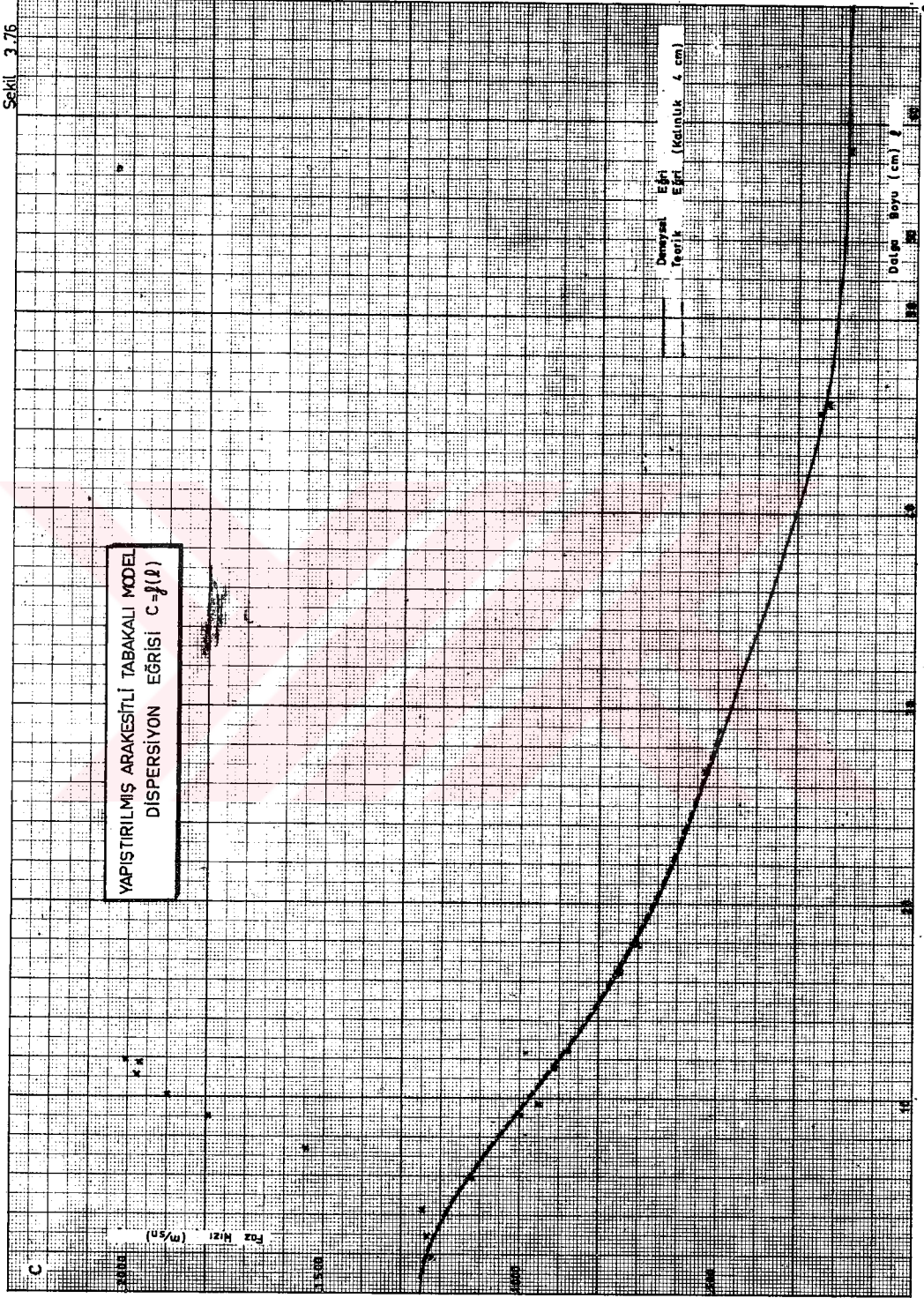
ORTALAMA DALGA BOYU $\lambda = 1,75 \text{ cm}$

Faz (grad)

ÖLÇEK 1cm = 200 grad



YAPITIRILMIŞ ARAKESİTLİ TABAKALI MODEL
DISPERSİYON EĞRİSİ $C=f(l)$



REFERANS LISTESİ

- 1 - AVRAMESCO. A. : Quelques notions théoriques relatives à la dynamique des chaussées
Bulletin de liaison du L. C. P. C. no:14
Juillet - Août 1965
- 2 - AVRAMESCO A. : Utilisation en mécanique des chaussées du vibreur Goodman
Bulletin de liaison du L. C. P. C no : 14
Juillet-Août 1965
- 3 - AVRAMESCO A. : Introduction à l'étude des ondes élastiques dans les milieux stratifiés
L. C. P. C Juin 1963
- 4 - AVRAMESCO A. : Sur la dynamique des structures élastiques stratifiées avec applications particulières au problème des chaussées
L. C. P. C. - Février 1965
- 5 - BARKAN D. D. : Dynamic of bases and foundations (Ruscadan çevirme) Mc Graw Hill -New -York 1960
- 6 - BLAIN J. : Généralités sur le principe et l'utilisation du vibreur léger Goodman
Bulletin de liaison du L.C.P.C. Special J 1968
- 7 - BRUNETTI : Etude de la dispersion des ondes de surface
L. C. P. C Décembre 1963
- 8 - BRUNETTI : La mesure des vibrations et la propagation d'ondes élastiques
L. C. P. C. Janvier 1965
- 9 - BLAIN J. : Résultats généraux obtenus à l'aide de la chaine Goodman au Laboratoire Central durant les années 1965 et 1966
Bulletin de liaison du L. C. P. C Special J 1968

- 10 - BRİCAS M. - CİNEMRE V. : İki boyutlu elastisite teorisi
İ. T. Ü. Sayı : 560 - 1963
- 11 - DALLY J. W. - RILEY W. F. : A photoelastic analysis of
stress wave propagation in a layered
media
Geophysics October, 1966
- 12 - EWING M. - JARDETZKY W. S. - PRESS F. : Elastic waves
in layered media
Mc Graw-Hill Book Company-New-York
1957
- 13 - FOUCHE M. - BENEL H. : Fizik optik-interferens ve difrak-
siyon
İ. Ü. Sayı : 416 - 1949
- 14 - FREMOND M. : Déplacements asymptotiques d'une
structure élastique stratifiée
Compte Rendu de l'Académie des
Sciences Juillet 1969
- 15 - GATFIELD E. N. - PAGE J. : La méthode d'auscultation par
ondes superficielles : techniques
expérimentales utilisées en Grande
Bretagne et applications pratiques
Bulletin de liaison du L. C. P. C Special
J 1968
- 16 - GRAMSAMMER J. C. : Première étude expérimentale de la
variation de l'amplitude au vibreur Goodman
Bulletin de liaison du L. C. P. C. Special
J 1968
- 17 - JONES R. : Surface wave technique for measuring
the elastic properties and thickness of
rods : theoretical development
Brit. J. Appl. Phys. 13, 21-29 1962
- 18 - JONES R. - THROWER : Effect of interfacial contact on the
propagation of flexural waves along a
composite plate
J. Sound. Vib. 2 (2), 167 - 74 1965

- 19 - JONES R. - THROWER E. N. : An analysis of waves in a twolayer composite plate and its application to surface wave propagation experiments on roads
J. Sound Vib. 2 (3), 328-35 1965
- 20 - JONES R. : Following changes in the properties of road bases and sub-bases by the surface wave propagation method
Civil Engineering May and June 1963
- 21 - JONES R. : Court historique de l'auscultation des sols et chaussées par ondes superficielles
Bulletin de liaison du L. C. P. C Special J 1968
- 22 - JONES R. - THROWER E. N. - GATFIELD E. N. : The surface wave method Session IV of the second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements
Ann. Arbor, Michigan 1967
- 23 - LAMB H. : On waves in an elastic plate
Proc. Roy. Soc. LONDON - 1916
- 24 - MILLON R. : Nature et vitesse des ondes observées en sismique marteau
Bull. B. R. G. M 3. 1966
- 25 - RAYLEIGH J. W. S. : The theory of sound
Dover publications - New-York 1945
- 26 - THROWER E. N. : The computation of the dispersion of elastic waves in layered media
J. Sound Vib. 2 (3) 210-26 1965
- 27 - THROWER E. N. : Etudes théoriques de la dispersion des ondes élastiques dans les chaussées
Bulletin de liaison du L. C. P. C. Special J 1968

HAL TERCÜMESİ

1942 yılında Denizli'de doğdum. Lise öğrenimimi Denizli Lisesinde tamamladıktan sonra 1959 yılında girdiğim İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesini 1964 Haziran döneminde bitirdim. Aynı yılın ağustos ayında Yollar ve Trafik Kürsüsünde teknisyen asistan olarak çalışmaya başladım. Aralık 1965 de aynı kürsüye asistan oldum, halen bu görevime devam etmekteyim. 1967-69 yılları arasında Fransa Ponts et Chaussées Merkez Laboratuvarının Yol Mekaniği bölümündeki stajım sırasında tezimle ilgili çalışmalar yaptım.

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi