

## PDE - Ders 1

Konumuz Kismi Turevsel Denklemler (partial differential equations -PDE-). Bu dersin on gerekliliklerinden en onemlisi normal diferansiyel denklemlerdir (ordinary differential equations -ODE-), cunku pek cok PDE'yi cozmenin teknigi onlari bir ODE sistemine indirgemekten geciyor. Yani PDE cozmek icin ODE cozme tekniklerini de bilmek gerekiyor. Bir diger gerekli bilgi Lineer Cebir dersi.

Bu dersin ana amaci, bir muhendislik dersi olarak, denklem cozmek, ve pek cok denklemin cikis noktasi fiziksel problemler. Mesela sicaklik yayilmasi (heat diffusion), dalga hareketi (wave motion), titresen hucre zari (vibrating membrane) gibi. Fakat PDE kavrami finansta bile ortaya cikabilen bir kavram, mesela Black-Sholes denklemlerinde oldugu gibi.

Yani dersimiz cok teori odakli olmayacak, bazi ispatlardan bahsedecegiz, ama onun haricinde teori uzerinde fazla durmayacagiz.

PDE nedir? Ilk once ODE tanimindan baslayalim.

$$y = y(x)$$

$$\frac{dy}{dx} = y$$

Baslangic sartlari

$$y(0) = y_0$$

Cozum

$$y = y_0 e^x$$

Bu bir ODE cunku sadece bir tane bagimsiz degisken var ( $x$ ), ve bir tane bagimli degisken var ( $y$ ).

PDE ise icinde kismi turevleri, ve bir veya *birden fazla* bagimsiz degiskeni barindiran bir denklemdir.

Eger gunes etrafındaki yorungeleri temsil etmek istiyorsanız gezegenleri boyutsuz parçacıklar gibi kabul ederek ODE'ler ile temsil etmek yeterli olabilir, ama diğer problemlerde daha fazla bağımsız değişken gerekeceği için ODE yetmez, mesela zaman, cismin 3D uzaydaki boyutları gibi.

Mesela bir PDE

$$u = u(x, y)$$

Cogunlukla problem taniminin ilk basinda fonksiyonel iliskiye hemen goster-mek iyi olur, mesela ustte bagimsiz degiskenler  $x, y$ , ve  $u$  bu iki degiskene bagimli. Devam edelim PDE soyle olsun

$$\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \cos(y) \frac{\partial u}{\partial y} + 3 = 0$$

Bir PDE problemine cogunlukla ek olarak sinir kosullari (boundary condition -BC-) ve baslangic kosullari (initial conditions -IC-) eklemek de gerekir.

Kismi Turev nedir?

$$u = u(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{u(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, x_{i+1}, \dots, x_n) - u(x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n)}{\Delta x_i}$$

Yani bir fonksiyonun kismi turevini almak istedigimiz degisken haricinde tum diger degiskenlerinin sabit tutuldugu bir durum.

Ornek

$$u = x_1^2 + x_1 \sin(x_2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} = 2x_1 + \sin(x_2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_2} = x_1 \cos(x_2)$$

Notasyon

Cogunlukla kismi turevler 3 farkli sekilde gosteriliyor.

$$\frac{\partial u}{\partial x} \equiv u_x \equiv \partial_x u$$

Ustte soldaki tanimi gorduk, bazen ortadaki de tercih edilebiliyor, ya da bazen en sagdaki.

PDE Derecesi

Bir PDE'nin derecesi, o denklemdaki kismi turevlerin en yuksek dereceli

olanin derecesi neyse o'dur.

Mesela

$$u_{xxx} + u_y = 5$$

derecesi 3. Ayni zamanda bu lineer ve homojen olmayan (inhomogeneous) bir PDE. Bu son iki kavrami birazdan tanimlayacagim.

Ornek

$$(u_{xx})^2 + u_x u_y = u$$

Bu 2. derece. Bu bazi insanlarin kafasini karistiriyor, cunku  $u_{xx}$ 'in karesi var. Bu ayni zamanda homojen, ve gayri lineer. Bu dersteki cogu PDE lineer olacak.

Lineer ve gayri lineerlikten bahsetmiskem, sunu ekleyelim.



Simdi diyelim ki bir girdi (input) fonksiyonu  $I(t)$  bir isleme giriyor ( $L$  operatu) ve cikti (output) olarak  $R(t)$  cikiyor. Yani sistem

$$R = \mathcal{L} I$$

Bir lineer sistemde eger girdiyi iki ile carparsaniz, cikti da iki katina cikar. O zaman kurallar

1.  $\mathcal{L}(\alpha I) = \alpha \mathcal{L}(I)$ , ki  $\alpha$  bir sabit.
2.  $\mathcal{L}(I_1 + I_2) = \mathcal{L}(I_1) + \mathcal{L}(I_2)$ , ki buna ust uste eklenebilme (superposition) prensibi deniyor. Bu prensibi bu dersteki cogu PDE'yi cozmek icin kullanacagiz. Bir lineer sistem varsa cogu zaman arka planda bir yerlerde ust uste eklenebilme prensibi geziniyordur.

Diyelim ki PDE'nizi soyle yazdiniz

$$\mathcal{L}u = f(\vec{x})$$

Burada  $u$  bagimli degisken,  $\vec{x}$  bir vektor,  $\vec{x} \in \Re^n$ , ve bu vektorun icinde birden fazla degisken var, bu degiskenlerin hepsi bagimsiz.

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1, \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Bu denkleme benzer bir diger denklem lineer cebirdeki  $A\vec{x} = \vec{b}$  denklemdir. PDE sisteminde de cevabini aradigimiz, lineer cebir sisteminde “ $A$  ile carpilip  $b$  sonucunu verecek  $\vec{x}$  hangisidir?” sorusuna benzer bir sekilde “ $\mathcal{L}$  operatoru uygulanip  $f(\vec{x})$  sonucunu verecek  $u$  hangisidir?” sorusudur.

Bu analogiden devam etmek gerekirse, belli bir noktada  $u$ ’nun icinde oldugu “fonksiyon uzayi” hakkında dusunmemiz gerekebilir,  $\vec{x}$ ’in icinde oldugu  $\Re^n$  uzayi gibi. Lineer cebir durumunda operatorun ozelliklerine bakilir, mesela “ $b$ ’nin icinde oldugu ve  $A$  operatoru uygulanip hic sonuc alinamayacak uzayin belli kismilari var midir?” gibi sorularla ugrasilabilir, bunlar  $A$ ’nin “ulasamadigi yerlerdir” vs. PDE’deki  $\mathcal{L}$  operatoru icin de benzer sorular sorulabilir.

Yani lineer cebirle pek cok kavram PDE dunyasina benziyor, orada vektor uzayi var, burada fonksiyon uzayi var. Yani bir analogi olarak bu benzerligi aklimizda tutmamiz faydali.

Bir operator su sekilde de olabilir

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}\left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \dots, u, \dots\right)$$

Yani operator kismi turevlere ve hatta  $u$ ’nun kendisine de bagimli olabilir.

Eger elimizde gayri lineer bir PDE var ise, basimiz dertte demektir. Boyle bir sistemi cozmek icin cogunlukla sayisal cozumlere basvurmak gerekir. Eger lineer ise cozumde bayagi ilerlemek mumkundur.

Lineerlik

Bir operator ve onun tanimladigi bir ust uste eklenebilme durumu dusunelim

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}(\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2) = \alpha_1 \mathcal{L}u_1 + \alpha_2 \mathcal{L}u_2$$

ki  $\alpha_1, \alpha_2$  birer tekil sayidir (scalar), ya reel, ya da kompleks.

Ornek

Birazdan bakacagimiz denklem dalga denklemi. Orada

$$u_{tt} - c^2 u_x = 0$$

Bu denklemi

$$\mathcal{L}u = 0$$

sekinde yazabiliriz ki  $\mathcal{L}$  soyle tanimli olacaktir

$$\mathcal{L} = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} = 0$$

$c$  bir sabittir.

Simdi diyelim ki su denklemi cozmemiz lazim

$$\mathcal{L}u = f$$

ki

$$\mathcal{L} : V \rightarrow V$$

Yani,  $\mathcal{L}$  bir vektor uzayini bir digerine eslemekte (map), ve yine diyelim ki bu uzaylar birer Hilbert Uzayi (bunun anlamina simdi bilmemiz gerekmiyor, ileride bu konuya donecegiz, bu kelimeyi soyle bir ortaya atmak istedim).

Yani sordugumuz Hilbert Uzayi  $V$ 'de bir  $f$ 'e esleyecek bir  $u$  fonksiyonu olup olmadigi. Bu arada tipik bir Hilbert Uzayi mesela kare alip bir sinir bolgesinde (boundary domain) entegre edince elde edilen sonlu (finite) bir sonuclarin olusturdugu uzay. Yani "derli toplu" fonksiyonlar bir anlamda, absurt sonuclar vermeyen turden, sonsuzluga dogru patlayip giden turden olanlari degil.

Faraziyeve devam edelim, diyelim ki  $V$  icinde bir baz (basis) var. Baz nedir? Lineer cebirden hatirlayalim, mesela uc boyutlu Oklidsel (Euclidian) uzayi  $\mathbb{R}^3$ .



$$\vec{x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$



Bu uzaydaki herhangi bir vektor  $\vec{r}$  ustteki uc baz vektoru kullanilarak parcalarina ayirilabilir, ya da, onlarin bir lineer kombinasyonu olarak gosterilebilir. Mesela

$$\vec{r} = x\vec{x} + y\vec{y} + z\vec{z}$$

Bu uc vektorun bu uzay icin bir “baz olusturdugu” soylenebilir, cunku bu uzaydaki her vektor bu uc vektorun bir kombinasyonu olarak temsil edilebilir. Dikkat edelim, iki baz vektor yeterli olmazdi, dort taneye gerek yok. Tami tamina uc tane vektor bu uzayin bazini olusturuyor.

Bu sonlu (finite) miktarda bir uzay, herhangi bir vektörü tanımlamak için sonlu miktarda baz vektörü yeterli. Sonsuz boyutlu bir uzay da olabilirdi, o zaman herhangi bir fonksiyonu tanımlamak için sonsuz tane baz vektörü gerekirdi. Mesela Fourier Serilerini düşünelim

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \phi_i(x)$$

ki baz fonksiyonlar  $\left\{ \phi_i(x) \right\}_{i=1}^{\infty}$ .

Bu fonksiyonların her biri trigonometrik fonksiyonlar olabilir (cos, sin) gibi, o zaman seri Fourier Serisi olur. Her halukarda, yukarıdaki tanımla diyoruz ki belli (unique)  $\alpha$  değerleri var ki, o değerleri zaten önceden bilinen baz fonksiyonları ile carpip toplayarak  $u$ 'yu oluşturabiliyoruz.

Eğer lineer operatörümüzü hatırlarsak

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}(\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2) = \alpha_1 \mathcal{L}u_1 + \alpha_2 \mathcal{L}u_2$$

Bu operatör herhangi iki katsayıyı kullanıyordu, fakat iki üstteki sonsuz tane toplamı da içerecek şekilde genişletilebilir, ve baz kavramı ile üst üste eklenbilme kavramının arasındaki alakayı gösterir.

Diyelim ki  $\mathcal{L}$ 'nin her baz vektörünü nasıl esledigini biliyoruz,

$$\mathcal{L}\phi_i = -\lambda_i \phi_i$$

Üstteki ifade  $\phi$ 'in  $L$ 'in özfonksiyonu olduğunu söylüyor aynı zamanda. Eğer alttaki acilimi yaparsak, ki bunu yapabiliriz çünkü  $\phi$ 'ler bazdırlar,

$$\begin{aligned} \mathcal{L}u &= \mathcal{L}\left(\sum_i \alpha_i \phi_i(x)\right) = \sum_i \alpha_i \left(\mathcal{L}\phi_i\right) \\ &= -\sum_i \alpha_i \lambda_i \phi_i \end{aligned}$$

Bir operatörün herhangi bir baz üzerinde nasıl işlem yaptığını anladığımız anda, o zaman  $\mathcal{L}$ 'in herhangi bir  $u$  fonksiyonu üzerinde ne etki yaptığını bilebiliriz. Diğer bir deyişle bir uzayda sonsuz tane fonksiyon olabilir, ama biz operatörümüzün bazlara nasıl etki ettiğini biliyorsak, o bazlarla oluşturulan tüm fonksiyonlara nasıl etki ettiğini de biliyoruz demektir.

Tekrar belirtelim, bu sadece  $\mathcal{L}$  lineer bir operatör olduğu zaman mümkün.

Ornek

Klasik Burger denklemi

$$u_t + uu_x = vu_{xx}$$

Denklemini

$$\mathcal{L}u = 0$$

olarak yazabiliriz, ki

$$\mathcal{L} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} - v \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

Bu gayri lineer

Ornek

$$u_{xx} + u_{yy} + \sin(u)$$

$$\mathcal{L}u = 0$$

$$\mathcal{L} = \partial_{xx} + \partial_{yy} + \sin(\cdot)$$

Ustteki ilginç bir durum sinus fonksiyonun da içi boş halde, operatör olarak kullanılmış olması. Operatör tanımında bazen böyle nokta konulduğu oluyor, ki neyin üzerinde operasyon yapıldığı anlaşılsın diye, mesela üstteki şöyle de gösteriliyor bazen

$$\mathcal{L} = \partial \cdot_{xx} + \partial \cdot_{yy} + \sin(\cdot)$$

Bu da gayri lineer çünkü sin fonksiyonu lineer değil, yani

$$\sin(u_1 + u_2) \neq \sin(u_1) + \sin(u_2)$$

Lineerlik üzerinde çok duruyoruz çünkü diferansiyel denklemimiz hakkında bilmemiz gereken en önemli bilgilerden / ipuçlarından biri bu, çünkü denkleminizin lineer ya da gayri lineer olması, bizi çok farklı çözüm teknikleri kullanmaya itecek.

Bir diğer önemli terim homojen (homogeneous), homojen olmayan (inhomogeneous) kavramı.

Homojenlik

Eğer  $u = 0$  bir çözüm ise PDE homojendir.



Yani  $\mathcal{L}u = f(\vec{x})$  denklem taniminda eger  $f(\vec{x}) = 0$  ise PDE homojendir.

Ornek

$$u_{xx} + u_y^2 = xu$$

Denklem 2. derece, gayri lineer cunku bir kare var, ve homojen cunku  $u = 0$ 'in bir cozum oldugunu gorebiliyoruz.

Ornek

$$u_x^2 + u_y = 6y \sin\left(\frac{x^3}{5}\right)$$

PDE 1. derece, gayri lineer, ve homojen degil.

Soru

Bagimsiz degiskenlere bagli bir lineer operator olabilir mi?

Cevap

Evet. Mesela  $u = u(x, y)$ , ve denklem  $xu_x + u_y = u$ .

Bu homojen bir denklem, ve  $\mathcal{L}u = 0$  olarak gosterilebilen bir denklem, ve

$$\mathcal{L} = x \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} - 1$$

ve goruldugu uzere operator taniminda bagimsiz degisken  $x$  var.

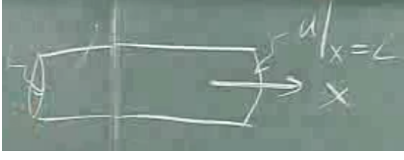
Bu lineer bir operator. Lineerligin bagli oldugu sey bagimli degiskenler, bagimsizlar degil, mesela ustteki  $x$ ,  $x^3$  gibi bir sey olabilirdi ama problem hala lineer olurdu.

Sinir kosullari da bu baglamda cok onemli, mesela diyelim ki tanimi lineer olan bir PDE var, ama problem tanimindaki sinir kosullari eger fonksiyonun gayri lineer bir kombinasyonunu iceriyorsa o zaman problemin tamami gayri lineer hale gelir.

Biraz formel olarak dusunursek, mesela tek boyutlu isi denklemi

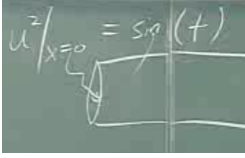
$$u_t = ku_{xx}$$

ki  $x$  mesafe belirten degisken,  $t$  zaman,



Bu denklem üstteki gibi bir borudaki isinin dagilimini, akisini gosteriyor olsun.  $u|_{x=L}$  ile gosterilen bir sinir sarti, yani  $L$  uzunlugundaki borunun en ucunda (sagindaki) olmasi sart olan isi seviyesi. Mesela bu sart  $u|_{x=L} = T_2$  olsun, ki  $T_2$  bir tekil sayi,  $100^\circ$ ,  $200^\circ$  gibi. Simdi homojenlige ne oldu? Ana denklem homojen, ama homojenlik testini sinir sartina uyguladigimiz zaman  $0 = T_2$  gibi bir sonuc aliyoruz, ki bu absurt bir sonuc demek ki sinir sarti homojen degil. O zaman bu problemin tamami homojen olamaz.

Benzer sekilde borunun oteki ucu icin tanimlanan sart gayri lineer olsa



ki bu sart o uctan bir tur sinusoidal bir enerji, isi verildigi bir durumu tarif ediyor, o zaman ana denklem lineer olsa bile, sinir sartinda gayri lineerlik oldugu icin problemin tamami gayri lineer olacaktir.

Aslinda formel olarak sinir sartlarini alip

$$\mathcal{L} = \frac{\partial}{\partial t} - k\partial_{xx}$$

operator tanimina bir sekilde dahil etmenin yollari var, ama biz bunlar cok ileri seviye teknikler, bu derste bu teknikleri gormeyecegiz.

Baslangic Sartlari

Mesela yayilma (diffusion) denklemi  $u(x, t)$  icin  $u(x, 0) = f(x)$ , yani baslangic aninda isi dagiliminin tum boru boyunca hangi seviyelerde oldugunun (burada bu dagilim  $f(x)$ ) belirtilmesi, baslangic sartini tanımlamak demektir.

Genel bir kural PDE'deki turev sayisi kadar sart tanimlanmasi gerektigidir. Mesela iki zaman turevi var ise, iki tane kosul gerekir, mesela  $t = 0$  anindaki bir kosul, arti zamana goreve turevin  $t = 0$  anindaki degeri, vs.

Soyle dusunebiliriz,  $u_{xx}$ 'in oldugu bir denklemde  $u$  elde etmek icin iki kere

entegre edilir, ve bunun sonucu olarak iki tane entegrasyon sabiti ortaya cıkar, ki bu degerler herhangi bir sayı olabilir. O iki sabiti hesaplamak için iki tane kosul gerekecektir.

Genel kurali daha somutlastırırsak, “her bağımsız değısken için gereken sınır kosulu, o bağımsız değıskenin derecesine esittir”. Tabii bu genel bir kural, bazen gercek dünyadaki fizik problemlerinde bu gecerli olmayabiliyor, bir problem için duzgün sınır kosulları bulmak başlı başına bir sanat denebilir aslında.

Ornek

Laplace denklemi

$$\nabla^2 u \equiv \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

ki  $\nabla^2$  Laplacian operatoru olarak bilinir.

Ustteki turden bir denklem hic kaynak akım verilmeyen sonsuz uzayda elektrik potansiyeli alanını temsil ediyor olabilir.

Bu denklemin bir cozumun (ki sınır şartlarına dikkat edelim) su sekilde oldugunu gostermek kolaydır:

$$u(\vec{x}) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

Bu Potansiyel Teori’sinde tipik bir problem, bir alan değıskeni var, ve orijinden uzaklastıkca bu değısken azalıyor, bu azalma  $1/\text{uzaklıgın karesi}$  oranında.

Bu “bir” cozum, fakat bir suru 2. derece turev var ortalıkta, o zaman  $x, y, z$ ’nin her türlü lineer fonksiyonu da aslında bir cozumdur. Mesela

$$u(\vec{x}) = \alpha x + \beta y + \gamma z + \delta$$

formulu de bir cozum olabilir. Niye? Herhangi bir lineer fonksiyonun iki kere turevini alırsak o fonksiyon yokolur.

Demek ki bu problemin tanımı eksik, sınır şartları da tanımlanması gerekli, aksi takdirde elde edilen sonuclar özgün olmayacak. Envai turden cozum mumkun.

Bu problem için tipik bir sınır kosulu  $\lim_{|\vec{x}| \rightarrow \infty} u = 0$  ifadesidir. Elektrik alan

ornegine donersek, elektrikalani sonsuzluga giderken sifira dusuyor demis oluyoruz. Bir sabite gidiyor da diyebilirdik, o da islerdi.

O tur bir sart

$$u(\vec{x}) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

sonucunu saglardi, diger secenekleri elemis olurdu. Bu ornegi sinir kosullarinin onemini belirtmek icin sectik, bu kosullar ana denklemin kendisi kadar onemli.

Bir nokta daha:

Soyle bir ODE dusunelim

$$\frac{du}{dt} = 1$$

Entegre edince genel cozum

$$u(t) = t + c_1$$

Fakat PDE icin

$$u = u(x, y)$$

$$u_x = xy$$

Burada  $y$  bazli bir turev yok, basit bir PDE, cozmesi kolay, fakat unutmayin, entegre edince

$$u = \frac{1}{2}x^2y + [..]$$

Noktalarin oldugu yere ne gelecek? Bir sayi sabiti degil bir fonksiyon gelecek.

$$u = \frac{1}{2}x^2y + g(y)$$

cunku  $u$ ,  $y$ 'nin bir fonksiyonu, o zaman elimize gecen  $y$ 'nin herhangi bir fonksiyonu olacak, ki bu fonksiyonun degeri sinir kosullari uzerinden tanimlanmis olmalidir. Bunu ozellikle vurgulamak istedim cunku insanlar bu detayi unutabiliyor.

Sinir kosulu nasil olabilir? Mesela  $u(\alpha, y) = f(y)$  seklinde olabilir. Bu kosulu

yerine sokunca

$$\frac{1}{2}\alpha^2 y + g(y) = f(y)$$

Bu bize  $g(y)$ 'in ne oldugunu soyler

$$g(y) = f(y) - \frac{1}{2}\alpha^2 y$$

ve bu ornek icin nihai cozum

$$u(x, y) = \frac{1}{2}x^2 y + f - \frac{1}{2}\alpha^2 y$$

Ilginc bir ornege bakalim simdi.

PDE'lerin ortaya cikabilecegi durumlardan biri, ayriksal parcaciklardan olusan bir sistemin limite gittigi andir. Bu tur sartlarda ODE'lerden olusan bir sistem limite giderken bir PDE ortaya cikartabiliyor. Sureklilik Mekanigin-den (Continuum Mechanics) bir ornek verecegiz yani.

Sistem ayriksal baslayacak, sureklilik limitine gidecek. Mesela sivilar mekaniginde (fluid mechanics) Euler denklemi, Navier-Stokes denklemleri sivi sisteminin (su gibi mesela) sureklilik limitidirler. Bu denklemler sivi icindeki ufak par-caciklari tarif etmezler, sistemin butunune bakarlar.

Hepimiz Newton Kanunu biliyoruz (ki bu kanun bu derste ihtiyacimiz olan yegane fizik bilgisi)

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(x)$$

Formul ne diyor? Kutle carpi ivme esittir kuvvet. Gayet basit.

Diyelim ki elimizde  $N$  tane tane parcacik var,  $i = 1, \dots, N$ , ve bu parcacik-lar birbirleriyle etkilesim halindeler, aralarinda bir tur cekim var belki, ya da baska bir kuvvet. O zaman her parcacik icin ayri ayri hareket kanunu isleyecek. Ve  $i$ 'inci parcacik uzerinde bir kuvvet var, ve bu kuvvet sistemdeki tum diger degiskenlerle bir sekilde bagimli.  $x$  tabii ki pozisyon degiskeni. O zaman

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_i(\vec{x})$$

Dikkat edersek,  $F$  fonksiyonuna giren parametre tum parcaciklar, yani o

parcacigin hissettigi kuvvet bir sekilde tum diger parcaciklarla alakali.

Baslangic Sarti

$i$ 'inci parcacigin baslangic konumu

$$x_i(0) = \hat{x}_i$$

Tipik olarak baslangic hizi da verilir

$$\frac{dx_i}{dt}(0) = \hat{v}_i$$

Ustteki bir baslangic deger problemi (initial value problem). Biz bu derste PDE bazinda sinir degerli problemlerle ugrasacagiz.

Bu tur baslangic deger problemleri iyi huyludur, cunku, mesela bu ornekte 2. derece bir diferansiyel denklem var elimizde, ve bagimli degisken  $x$  var, ve bize verilen kosulu anlamak icin alttaki resme bakalim



Bize verilenler,  $t = 0$  aninda  $x_i$  noktasinin oldugu yere ek olarak (soldaki nokta), bir de o noktadaki egim bilgisi. Bu tur bilgi verilince, parcacigin hangi yone gitmeye meyilli olacagini da gormus oluyoruz. Sanki bir top ateslenmis, ve topun ates ettigi anda nerede olduguna ek olarak topun nam-lusunun gosterdigi yer de bize soyleneiyor.

Bu iyi huylu bir problem. Sinir degerli denklemler cok daha karmasik ola-biliyor. Bu arada “sinir kosullu” kelimesindeki “sinir” cogunlukla bir fiziksel seye tekabul eder, mesela bir ip vardır, ve ipin “sonunda” yani sinirlarinda degerin ne olmasi gerektiği sabitlenir.

Devam edelim. Kurmak istedigimiz model bir tur “gitar teli” modeli.

$y_i = i$ 'inci parcacigin yuksekligi olsun.



Tel üzerinde bir sürü parçacık var, tel iki ucundan sabitlenmiş durumda. Bu problemde yatay hareketle ilgilenmiyoruz, sadece yukarı / aşağı hareketle ilgileniyoruz. Bir tanım daha:

$$\Delta x = x_{i+1} - x_i$$

Basitleştirme amacıyla bu tanımı yaptık. Tüm parçacıkların arasındaki mesafeyi sabit, ve aynı olarak aldık. Benzer şekilde

$$m_i \equiv m$$

Yani tüm parçacıklar aynı kütleye sahip.

Şimdi Newton Kanununu parçacıklara uygulayalım.

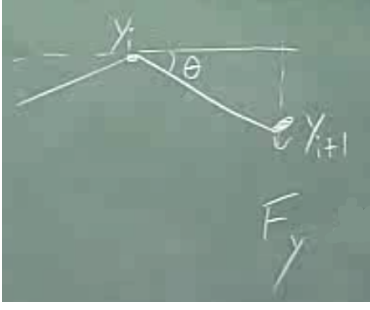
$$m \frac{d^2 Y_i}{dt^2} = \tau \left( \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\Delta x} \right) - \tau \left( \frac{Y_i - Y_{i-1}}{\Delta x} \right)$$

Bununla ne demis olduk?  $i$ 'inci parçacığın hissettiği çekimin, o parçacığın solunda bağlı olduğu diğer parçacıkla baginin ipteki eğimi ile orantili olduğunu söylemiş olduk.



$\tau$  her tel için farklı olabilecek bir gerginlik sabiti.

Üstteki formül aslında yerel türevin “ucuz” bir yaklaşıksallaması.



$$F_y \equiv \tau \sin \theta$$

Sadece sin kullandık çünkü daha önce belirttiğimiz gibi, sadece dikey hareketlere bakıyoruz, yatay hareketlerle ilgilenmiyoruz (o yüzden cos yok).

Bir yaklaşıksallama yapabiliriz şimdi, eğer  $\theta \ll 1$  ise, yani acı 1 sayısından çok küçük ise,  $\sin \theta \approx \tan \theta$  sayılabilir, bu sonuç Taylor Serileri ile alakalı.  $\tan$  fonksiyonu,  $\sin/\cos$  olduğu için ve sifra yakın değerlerde bölün hep 1'e yakın olacağı için,  $\tan$  bir nevi  $\sin$  de sayılabilir.

Bu problemde  $\tan \theta$  nasıl hesaplanır?

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \frac{\Delta y}{\Delta x} \\ &= \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\Delta x} \end{aligned}$$

Bu model bir “en yakın komşu” modeli, her parçacık yakınındaki parçacıktan etkileniyor.

Şimdi bir numara yapalım ve ana formülü şu şekilde tekrar organize ederek yazalım

$$\frac{d^2 Y_i}{dt^2} = \tau \frac{\Delta x}{m} \left[ \frac{Y_{i+1} - 2Y_i + Y_{i-1}}{\Delta x^2} \right]$$

Koseli parantez içindeki ifade 2. türevin ayrık formdaki yaklaşıksallaması bu arada.

Ayrık modelimiz böyle. Şimdi süreklilik limitine geçmek istiyorsak, mesela sonsuz sayıda parçacık olduğu bir duruma geçmek isteyebiliriz,  $\lim_{N \rightarrow \infty}$ , elimizde sonlu / belli miktarda bir tel var, bu durumda sonsuz sayıda parçacık demek bu parçacıkların arasındaki mesafenin sifra gitmesi demektir, o



zaman  $\lim_{\Delta x \rightarrow \infty}$ .

Formül için bunun anlamı nedir?  $\Delta x$  ve  $m$  arasındaki oran sonlu (finite) bir sayıya yaklaşacak demektir, ki bu sayıya yoğunluk diyebiliriz. Oran niye sifıra gitmiyor? Süreklilik sistemlerin kullanılan bir numara bu,

$$\rho = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{m}{\Delta x}$$

$\Delta x$ 'in aşağı indigini düşünüyoruz, ama olabilecek çok ufak bir hacim hayal ederek mesela molekül boyutundan daha fazla aşağı inmeyeceğini söylüyoruz,  $m$  aynı şekilde küçülüyor, ve oran bize bir yoğunluk hesabı veriyor.

Taylor Serileri hakkında hızlı bir ders

$$Y_{i+1} = Y(x_i + \Delta x)$$

Eğer  $\Delta x$  çok küçük ise

$$= \underbrace{Y(x_i)}_{Y_i} + \Delta x \frac{dY}{dx} \Big|_{x_i} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{d^2Y}{dx^2} \Big|_{x_i} + O(\Delta x^3)$$

Daha kısa bir şekilde yazalım

$$Y_{i+1} = Y_i + \Delta x Y_i' - \frac{\Delta x^2}{2} Y_i'' + \dots$$

Aynı şeyi  $Y_{i-1}$  için yapabiliriz

$$Y_{i-1} = Y_i - \Delta x Y_i' + \frac{\Delta x^2}{2} Y_i'' + \dots$$

Son iki formülü toplarsak

$$Y_{i+1} + Y_{i-1} = 2Y_i + \Delta x^2 Y_i'' + O(\Delta x^4)$$

O zaman 2. türevin  $x_i$ 'daki yaklaşık sallaşması

$$Y_i'' = \frac{Y_{i+1} - 2Y_i + Y_{i-1}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2)$$

O zaman ana formülde

$$\frac{d^2Y_i}{dt^2} = \tau \frac{\Delta x}{m} \left[ \underbrace{\frac{Y_{i+1} - 2Y_i + Y_{i-1}}{\Delta x^2}}_{\rightarrow \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}} \right]$$

Yani  $\Delta x \rightarrow 0$  iken koseli parantez ici  $\partial^2 y / \partial x^2$ 'e gider.

Simdiye kadar yazdiklarimda ODE dili kullandim, goruntu basit olsun diye, fakat unutmayalim,  $Y$  ayni zamanda  $t$ 'ye de bagli, o yuzden ustte kısmi turev kullandik.

Bu sistemin sureklilik limiti,  $\Delta x \rightarrow 0$  iken

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} = \frac{\tau}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

olacaktır. Bu denklem fizikte iyi bilinen dalga denklemdir. İnsanlar cogunlukla

$$c^2 = \frac{\tau}{\rho}$$

sekinde yazarlar ve  $c$  boylece “dalga hizi” olarak kullanilabilir (hakikaten de aynen ona esittir).

Eger teli bir noktasinda titrettigimiz dusunursek, ve telin sonlu degil sonsuz oldugunu dusunelim, o zaman “hareket eden dalgalar (traveling waves)” fenomenini goruruz. Altteki resimde  $t = 0$  aninda bir tepe noktasi var (tele vurduk), ve ikinci resimde iki tane tepe noktasi saga ve sola esit sekilde hareket ediyorlar.

