

## Isi Denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

olarak gosterilen denklem fizikte isi denklemi olarak bilinir,  $u$  fonksiyonu iki degiskenlidir  $u(x, t)$ . Ornek icin bu denklemin cozumunu tek boyutta gosterecegiz, yani bir genisligi onemli olmayan bir demir cubugu uzerinde isinin dagilmasi konusuna bakacagiz, boyutu temsil icin  $x$  degiskeni kullanılacak.  $t$  degiskeni zamani temsil ediyor olacak. Baslangic sartlari (initial conditions) olarak isinin  $t=0$  aninda demir cubuk uzerinde  $x$ 'e bagli bir sinus fonksiyonu ile dagildigini farzedecegiz, sinir sartlari ise (boundary conditions) cubugun iki ucunun sifir derecede tutulmasi olacak. Sonucta isinin nereye gidecegini tahmin ederek te soyleyebiliriz – isi demirin iki ucundan kacarak tum cubuk boyunca sifir dereceye inecektir.

Ustteki denklem bir kısmi diferansiyel denklemdir (partial differential equation).

Matematiksel cozumler ya analitik, ya da yaklasiksal olur. Biz bu ornegi cozmek icin yaklasiksal, hesapsal bir teknik kullanacagiz. Elimizde bir diferansiyel denklem varsa cozum bulmak demek bir fonksiyon bulmak demektir, bir sayi degil; yaklasiksal yontemle de oyle bir  $u$  fonksiyonu bulacagiz ki, test / belli noktalarda gercek fonksiyonla olabildigince ayni sonuclar verecek.

Cozumde sinirli farklar (finite differences) denen bir metot kullanılacak. Bu yaklasiksal metotta calculus'un sonsuz ufakliklar icin kullanılan turevleri, bildigimiz sayisal cikartma islemi uzerinden tanımlanan “farkliliklara” donusecekler. Mesela  $d^2/dx^2$  nedir?  $x$ 'e gore turevin turevidir, hesapsal olarak ise farkin farkidir. Sonsuzluktan yaklasiga soyle geceriz: Eger  $u_{j,i}$  bir 2 boyutlu dizin uzerinde  $u$  fonksiyonunun sayisal degerlerini tasiyor olsaydi, ve  $j, i$  indis degerleri  $t, x$ 'i temsil ediyorlar ise,  $x$  uzerinden birinci turev yani birinci fark (first difference) soyle olur:

$$\frac{u_{j,i+1} - u_{j,i}}{h}$$

$h$  hangi degiskenin farkini aliyorsak, o farkin buyuklugunu tanımlayan aralık degeridir,  $h = \Delta x$ , ve  $u_{j,i+1} = u(t, x + \Delta x)$ .

İkinci fark, farkin farkidir:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h} \left[ \left( \frac{u_{j,i+1} - u_{j,i}}{h} \right) - \left( \frac{u_{j,i} - u_{j,i-1}}{h} \right) \right] \\ &= \frac{u_{j,i+1} - 2u_{j,i} + u_{j,i-1}}{h^2} \end{aligned} \tag{1}$$

Bu carpimi tum  $i$  degerleri icin ve matris uzerinden temsil etmenin yolu sudur: Bir ikinci farkliliklar matrisi  $A$  yaratiriz:

$$A = \frac{1}{\Delta x^2} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \dots 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \dots 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$

Ve u degerlerinin bir vektor icine cekerez:

$$U_j = \begin{bmatrix} u_{j,0} \\ u_{j,1} \\ u_{j,2} \\ \vdots \\ u_{j,n} \end{bmatrix}$$

$AU_j$  carpiminin (1) denklemindeki toplamlari her u icin teker teker verecegini gorebiliriz. Indislerden  $j$  zaman,  $i$  mesafedir, yani ustteki denklem simdilik sadece mesafeyi yani  $x$ 'i parcalara bolmustur.

Zamani da modele dahil edelim ve cozumu elde etmeye ugrasalim. Isi denkleminin tamamini simdiye kadar elde ettiklerimizi kullanarak ve ayriksal olarak yazalim:

$$\frac{U_{j+1} - U_j}{\Delta t} = AU_j \quad (2)$$

$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx AU_j$ , ve  $\frac{\partial u}{\partial t} \approx (U_{j+1} - U_j)/\Delta t$  olarak alindi.  $U_j$  tanimindaki  $j$  indisi zaman icin kullaniliyor, mesafe yani  $x$ 'i temsil eden indislerin tamamı  $U$ 'nun icinde var zaten.

Yaklasiksal tekniklerden Crank-Nicholson'a gore  $AU_j$ 'i ardi ardina iki zaman indisi uzerinden hesaplanan bir ortalama olarak temsil edebiliriz, yani

$$AU_j \approx \frac{1}{2}(AU_{j+1} + AU_j)$$

Niye bu acilim yapildi? Cunku elimizde  $U_{j+1}$  ve  $U_j$  degerleri var, bu degerleri tekrar ortaya cikararak bir "denklem sistemi" yaratmis olacagiz, iki bilinmeyen icin iki formül yanyana gelebilecek ve cozume erisilebilecek.

Ustteki formulu (2) denklemindeki  $AU_j$  degerleri icin kullanalim ve tekrar duzenleyelim.

$$\frac{\Delta t}{2} AU_{j+1} + \frac{\Delta t}{2} AU_j = U_{i+1} - U_i$$

$$U_{i+1} - \frac{\Delta t}{2} AU_{j+1} = U_i + \frac{\Delta t}{2} AU_j$$

$$(I - \frac{\Delta t}{2}A)U_{j+1} = (I + \frac{\Delta t}{2}A)U_i$$

Artık bu formulu lineer cebirden bilinen  $Ax = b$  formuna sokarak cozebiliriz. Formaga gore formulun sag tarafi  $b$  olur, sol tarafta parantez ici  $A$  olacak,  $U_{j+1}$  ise bilinmeyen  $x$  olacak (bizim  $x$ 'ten farkli). Hesapsal kodlar bir dongu icinde, her zaman dilimi icin bilinmeyen  $U_{j+1}$  degerini bulacak. Dongunun sonunda yeni  $U_{j+1}$  eski  $U_j$  olacak ve hesap devam edecek.

Sinir Sartlari

Her iki ucta  $u$ 'nun sifir olma sarti uygulamali matematikte Dirichlet sinir sarti olarak biliniyor. Bu sart  $A$  matrisinin olusturulmasi sirasinda kendiliginden oluyor. Ufaltilmis bir D2 matrisi uzerinde gosterme gerekirse,

$$\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

degerlerinin her satirinin (1) denklemini temsil ettigini soylemistik. Eger sartlarimizdan biri  $u_1$  ve  $u_5$ 'un sifir olmasi ise, carpim sirasinda ona tekabul eden D2'nin en soldaki ve en sagdaki kolonlari tamamen sifir yapmamiz yeterli olurdu, cunku carpim sirasinda  $U_j$  icinde o kolonlar  $u_1$  ve  $u_5$  ile carpilip onu sifir yaparlardi. O zaman yeni matris soyle olurdu:

$$\begin{bmatrix} 0 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 0 \end{bmatrix}$$

Bu isler. Alternatif olarak sifir kolon yerine, o kolonlari tamamen matristen atabilirdik, ayni sekilde  $u$  degerlerini uretirken birinci ve sonuncu degerleri de atmamiz gerekirdi, nasil olsa onlar "bilinmeyen" degisken degiller. Bu yeni matris soyle olurdu:

$$\begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$

Alttaki kod icinde  $x = x[1:-1]$  ibaresi  $x$  ve dolayli olarak  $u$ 'nun ilk ve son degerlerini atmak icin kullanilmakta.

Seyrek (sparse) matrisler kullanarak cozum altta.

"""

*This program solves the heat equation  
 $u_t = u_{xx}$   
 with dirichlet boundary condition*

```

         $u(0,t) = u(1,t) = 0$ 
        with the Initial Conditions
         $u(x,0) = 10*\sin(\pi*x)$ 
        over the domain  $x = [0, 1]$ 

        The program solves the heat equation using a finite difference
        method where we use a center difference method in space and
        Crank-Nicolson in time.
    """
    import scipy as sc
    import scipy.sparse as sparse
    import scipy.sparse.linalg
    f, ax = plt.subplots()

    # Number of internal points
    N = 200

    # Calculate Spatial Step-Size
    h = 1/(N+1.0)

    # Create Temporal Step-Size, TFinal, Number of Time-Steps
    k = h/2
    TFinal = 1
    NumOfTimeSteps = 120

    # Create grid-points on x axis
    x = np.linspace(0,1,N+2)
    x = x[1:-1]

    # Initial Conditions
    u = np.transpose(np.mat(10*np.sin(np.pi*x)))

    # Second-Derivative Matrix
    data = np.ones((3, N))
    data[1] = -2*data[1]
    diags = [-1,0,1]
    D2 = sparse.spdiags(data,diags,N,N)/(h**2)

    # Identity Matrix
    I = sparse.identity(N)

    # Data for each time-step
    data = []

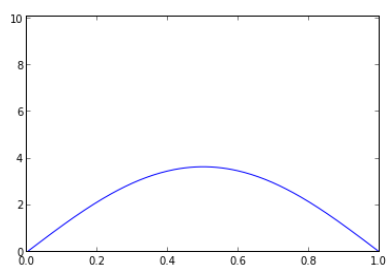
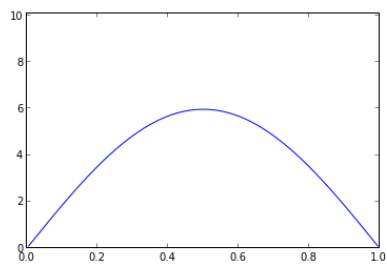
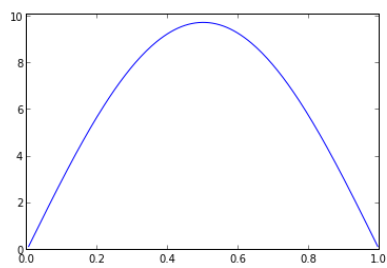
    for i in range(NumOfTimeSteps):

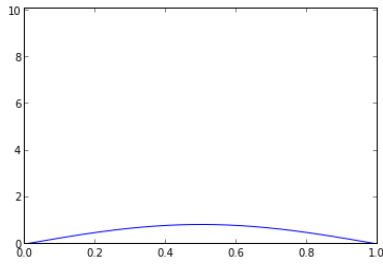
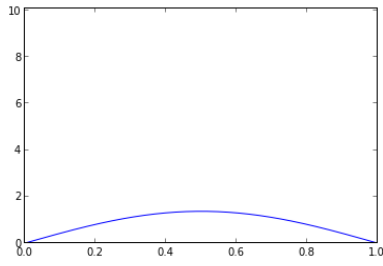
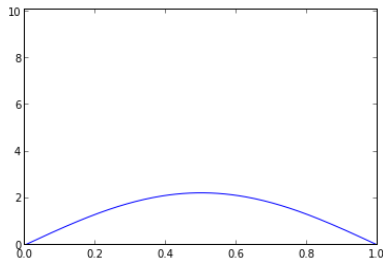
```

```

# Solve the System:
#
#  $(I - k/2*D2) u_{new} = (I + k/2*D2)u_{old}$ 
#
A = (I -k/2*D2)
b = ( I + k/2*D2 )*u
u = np.transpose(np.mat(sparse.linalg.spsolve(A, b)))
if i % 20 == 0:
    plt.plot(x, u)
    plt.axis((0,1,0,10.1))
    plt.savefig("heat-" + str(i))
    plt.hold(False)

```





Seyrek matrislerden olmadan, normal matris kullanarak olan çözüm altta.

```
import scipy.linalg
f, ax = plt.subplots()

# Number of internal points
N = 200

# Calculate Spatial Step-Size
h = 1/(N+1.0)
k = h/2

x = np.linspace(0,1,N+2)
x = x[1:-1] # get rid of the '0' and '1' at each end

# Initial Conditions
u = np.transpose(np.mat(10*np.sin(np.pi*x)))

# second derivative matrix
I2 = -2*np.eye(N)
```

```

E = np.diag(np.ones((N-1)), k=1)
D2 = (I2 + E + E.T)/(h**2)

I = np.eye(N)

TFinal = 1
NumOfTimeSteps = 100

for i in range(NumOfTimeSteps):
    # Solve the System:
    #  $(I - k/2*D2) u_{new} = (I + k/2*D2)u_{old}$ 
    A = (I - k/2*D2)
    b = np.dot((I + k/2*D2), u)
    u = scipy.linalg.solve(A, b)
    if i % 20 == 0:
        plt.plot(x, u)
        plt.axis((0,1,0,10.1))
        plt.savefig("heat-2-" + str(i))
        plt.hold(False)

```

