

## Bölüm 2

# Birinci basamaktan denklemler ve karakteristikler yöntemi

Bu bölümde birinci basamaktan

- sabit ve değişken katsayılı lineer ve quazilineer denklemlerin özel bazı doğru veya eğriler üzerinde bayağı diferensiyel denkleme nasıl dönüştüğünü,
- sözkonusu bayağı diferensiyel denklemin çözümü yardımıyla genel çözümün nasıl elde edileceğini ve
- bu tür denklemlerle oluşturulan Başlangıç Değer Problemlerin çözümlerinin varlığı ve tekliği problemlerini inceleyeceğiz. Ayrıca
- parçalı fonksiyonlar yardımıyla tanımlanan Başlangıç Değer Problemlerinin "genelleştirilmiş" çözümlerini inceleyerek
- yarı-sonsuz bölge üzerinde uygun başlangıç değer problemlerinin çözümünü örneklerle inceliyoruz.

## 2.1 Karakteristikler yöntemi ile çözüm

Karakteristikler yöntemini mümkün olabilecek basit örnekler üzerinde incelemeye başlayacağız. Ancak öncelikle aşağıda verilen zincir kuralı ile türev özelliğini hatırlayalım.

**Hatırlatma 2.1.**  $x = x(t), y = y(t)$  olmak üzere  $\Gamma = \{(x(t), y(t)) | t \in \mathbb{R}\}$  eğrisi üzerinde  $u = u(x, y)$  fonksiyonunun türevi, zincir kuralı yardımıyla

$$\frac{du(x(t), y(t))}{dt} = u_x \frac{dx}{dt} + u_y \frac{dy}{dt} \quad (2.1)$$

olarak hesaplanır.  $\Gamma$  eğrisi kartezyen formda  $y = y(x)$  bağıntısı ile verilmişse, bu durumda  $x$  değişkenini parametre olarak düşünerek,  $y = y(x)$  eğrisi üzerinde  $u = u(x, y(x))$  fonksiyonunun türevi

$$\frac{du(x, y(x))}{dx} = u_x + u_y \frac{dy}{dx} \quad (2.2)$$

olarak ifade edilir.

**ÖRNEK 2.1.**  $x, y$  bağımsız değişkenler ve  $u$  bağımlı değişken olmak üzere

$$u_x = 0, -\infty < x, y < \infty \quad (2.3)$$

denkleminin genel çözümünü belirleyiniz.

### Çözüm.

- $y = y(x)$  boyunca  $u$  bağımlı değişkeninin türevini

$$\frac{du(x, y(x))}{dx} = u_x + u_y \frac{dy}{dx} = 0 \quad (2.4)$$

olarak elde ederiz.

- 

$$\frac{dy}{dx} = y'(x) = 0$$

seçimi ile verilen (2.3) denklemini elde ederiz. Bu denklemin çözümü olarak  $x'$  ten bağımsız olan

$$y = c \quad (2.5)$$

yatay doğrularını elde ederiz.

- O halde (2.3) kısmi diferansiyel denklemi (2.5) doğruları üzerinde (2.4) ile verilen

$$\frac{du(x, c)}{dx} = 0 \quad (2.6)$$

bayağı diferansiyel denkleme dönüşür. Ancak (2.6) denklemi ise  $u$  nun söz konusu doğrular üzerinde  $x$  değişkeninden bağımsız olduğunu ifade etmektedir. O halde (2.6) denkleminin  $y = c$  doğrusu üzerinden integralini alarak

$$u(x, c) = \text{sabit} \quad (2.7)$$

elde ederiz. Şimdi (2.7) deki *sabit* değerini yorumlayalım: Söz konusu *sabit*,  $y = c$  doğrusu üzerinde  $u$  nun herhangi bir noktada, örneğin  $(x, c) = (0, c)$  noktasında, aldığı değere eşit olmalıdır, çünkü bu doğru üzerinde  $u$  fonksiyonu  $x$  ten bağımsızdır.  $u$  nun  $(0, c)$  deki değerinin bir  $f$  fonksiyonu için

$$u(0, c) = f(c)$$

olduğunu kabul edelim.

- O halde

$$\text{sabit} = f(c)$$

olmalı, yani

$$u(x, c) = f(c)$$

elde ederiz.

- $y = c$  doğrusu üzerinde gerçekleştirdiğimiz bu işlemi herhangi bir doğru üzerinde de gerçekleştirebileceğimiz için, veya kısmi diferansiyel denklemler kitaplarındaki ifadesiyle  $c$  sabitini yok ederek,

$$u(x, y) = f(y) \quad (2.8)$$

genel çözümünü elde ederiz .

**TANIM 2.1.** *Bir kısmi diferansiyel denklemin daha basit kısmi diferansiyel denkleme veya bayağı diferansiyel denkleme dönüştüğü doğru veya eğrilere denklemin karakteristikleri adı verilmektedir.*

O halde Örnek 2.1 de (2.5) doğruları (2.3) denkleminin karakteristikleridir, çünkü bu doğrular üzerinde

$$u_x = 0$$

Kısmi Diferensiyel Denklemi(KDD)

$$\frac{du(x, y(x))}{dx} = 0$$

Bayağı Diferensiyel Denkleme(BDD) dönüşmüştür. Yukarıdaki örnekte karakteristikler yönteminin bir uygulamasını gerçekleştirmiş olduk. Yöntemin adımlarını aşağıda özetliyoruz.

**Gözlem 2.1.** *Karakteristikler yöntemi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:*

1. Verilen kısmi diferensiyel denklemin daha basit kısmi diferensiyel denklem veya bayağı diferensiyel denkleme dönüştüğü ve karakteristikler adı verilen eğri(sabit katsayılı denklemler için doğru) ailesine ait diferensiyel denklem(ler) yardımıyla karakteristikler elde edilir.
2. Karakteristikler üzerinde söz konusu denklem çözülür. Bu çözümde keyfi sabit olarak Örnek 2.1 de olduğu üzere karakteristikler ailesindeki sabitin keyfi fonksiyonu alınır.
3. Elde edilen çözümde keyfi sabit(ler) mümkünse yok edilerek, karakteristikler üzerinde elde edilen çözüm genelleştirilir, diğer bir deyimle genel çözüm problemin bağımsız değişkenleri cinsinden ifade edilir.
4. Eğer denklemle birlikte yan şart verilmişse, genel çözümde ilgili yan şartları sağlayan fonksiyonlar belirlenerek istenilen özel çözüm elde edilir.

**ÖRNEK 2.2.**  *$a, b$  sıfırdan farklı sabitleri için*

$$au_x + bu_y = 0, -\infty < x, y < \infty \quad (2.9)$$

denkleminin genel çözümünü belirleyiniz.

**Çözüm.**

Denklemin her iki yanını  $a \neq 0$  ile bölerek,

$$u_x + \frac{b}{a}u_y = 0 \quad (2.10)$$

elde ederiz. Öte yandan

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b}{a} \quad (2.11)$$

eğimli doğrusu üzerinde (2.2) zincir kuralı (2.10) ve (2.11) ile

$$\frac{du(x, y(x))}{dx} = u_x + u_y \frac{dy}{dx} = 0 \quad (2.12)$$

elde ederiz. Öte yandan (2.11) karakteristik denklemini  $x$  e göre çözerek

$$dx = \frac{a}{b} dy$$

veya

$$x - \frac{a}{b}y = x_0 \quad (2.13)$$

karakteristik doğru denklemini elde ederiz. Burada  $x_0$ , karakteristik doğrunun  $x$  eksenini kesim noktasıdır. Bu doğru üzerindeki her yerde (2.12),  $u$  fonksiyonu  $x_0$  noktasındaki değerine eşit olmalıdır, eğer bu değer  $f(x_0)$  ise o halde

$$u(x, y(x)) = f(x_0) \quad (2.14)$$

çözümünü elde ederiz. Bu karakteristik için yapılan işlemi genelleştirerek, veya diğer deyimle  $x_0$  sabitini yok ederek keyfi  $f$  fonksiyonu için

$$u(x, y) = f\left(x - \frac{a}{b}y\right)$$

genel çözümünü elde ederiz.

**ÖRNEK 2.3.**  $a, b, c$  sıfırdan farklı sabitleri için

$$au_x + bu_y = c, \quad -\infty < x, y < \infty \quad (2.15)$$

denkleminin genel çözümünü belirleyiniz.

**Çözüm.**

Verilen denklemin her iki yanını  $a$  ile bölerek,

$$u_x + \frac{b}{a}u_y = \frac{c}{a} \quad (2.16)$$

elde ederiz.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b}{a} \quad (2.17)$$

eğimli  $x - \frac{a}{b}y = x_0$  karakteristiği üzerinde  $u(x, y(x))$  fonksiyonunun türevini aldıktan sonra, (2.16) ve (2.17) bağıntısını kullanarak,

$$\frac{du(x, y(x))}{dx} = u_x + u_y \frac{dy}{dx} = \frac{c}{a}$$

elde ederiz. Bu bayağı diferensiyel denklemin  $x - a/by = x_0$  karakteristiği üzerindeki integrali ile

$$u(x, y(x)) = \frac{c}{a}x + f(x_0)$$

çözümünü elde ederiz.  $x_0$  sabit değerini yok ederek,

$$u(x, y) = \frac{c}{a}x + f\left(x - \frac{a}{b}y\right)$$

genel çözümünü elde ederiz.

#### ÖRNEK 2.4.

$$\begin{aligned} 2u_x + 5u_y &= 1, -\infty < x < \infty, y > 0 \\ u(x, 0) &= e^x \end{aligned}$$

*Başlangıç Değer Probleminin çözümünü belirleyiniz.*

#### Çözüm.

$$u_x + \frac{5}{2}u_y = \frac{1}{2}$$

den

$$\frac{dy}{dx} = \frac{5}{2}$$

denklemini sağlayan  $x - \frac{2}{5}y = x_0$  karakteristiği üzerinde

$$\frac{du(x, y(x))}{dx} = u_x + \frac{5}{2}u_y = \frac{1}{2}$$

denklemini karakteristik doğru üzerinde integre ederek

$$u(x, y(x)) = \frac{1}{2}x + f(x_0)$$

elde ederiz. Aynı işlemi herhangi bir karakteristik üzerinde de tekrarlayabileceğimiz için  $x_0$  değerini yok ederek

$$u(x, y) = \frac{1}{2}x + f\left(x - \frac{2}{5}y\right)$$

elde ederiz. Ayrıca verilen başlangıç şartını kullanarak,

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= \frac{1}{2}x + f(x) \\ &= e^x \end{aligned}$$

$$\implies f(x) = e^x - \frac{1}{2}x$$

elde ederiz. O halde yan şartı sağlayan çözümünü

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \frac{1}{2}x + e^{x - \frac{2}{5}y} - \frac{1}{2}\left(x - \frac{2}{5}y\right) \\ &= \frac{1}{5}y + e^{x - \frac{2}{5}y} \end{aligned}$$

olarak elde ederiz.

**ÖRNEK 2.5.**  $a, b, c$  sıfırdan farklı sabitleri için

$$au_x + bu_y = cu, \quad -\infty < x, y < \infty \quad (2.18)$$

denkleminin genel çözümünü belirleyiniz.

**Çözüm.**

Verilen denklemin her iki yanını  $a$  ile bölerek,

$$u_x + \frac{b}{a}u_y = \frac{c}{a}u \quad (2.19)$$

elde ederiz.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b}{a}$$

eğimli  $x - \frac{a}{b}y = x_0$  karakteristiği üzerinde  $u(x, y(x))$  fonksiyonunun türevini alıp, (2.19) denklemini kullanarak,

$$\frac{du(x, y(x))}{dx} = u_x + u_y \frac{dy}{dx} = \frac{c}{a}u$$

elde ederiz. Bu denklemin belirtilen karakteristik doğru üzerinde integralini alarak keyfi  $f$  fonksiyonu için

$$u(x, y(x)) = e^{\frac{c}{a}x} f(x_0)$$

elde ederiz. Aynı işlemi herhangi bir karakteristik üzerinde de tekrarlayabileceğimiz için  $x_0$  değerini yok ederek

$$u(x, y) = e^{\frac{c}{a}x} f\left(x - \frac{a}{b}y\right)$$

çözümünü elde ederiz.

**ÖRNEK 2.6.**  $a, b, c$  sıfırdan farklı sabitleri için

$$au_x + bu_y = cu + d, -\infty < x, y < \infty \quad (2.20)$$

denkleminin genel çözümünü belirleyiniz.

**Çözüm.**

Verilen denklemin her iki yanını  $a$  ile bölerek,

$$u_x + \frac{b}{a}u_y = \frac{c}{a}u + \frac{d}{a} \quad (2.21)$$

elde ederiz.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b}{a} \quad (2.22)$$

eğimli  $x - \frac{a}{b}y = x_0$  karakteristiği üzerinde  $u(x, y(x))$  fonksiyonunun türevini aldıktan sonra, (2.21) ve (2.22) yi kullanarak,

$$\frac{du(x, y(x))}{dx} = u_x + u_y \frac{dy}{dx} = \frac{c}{a}u + \frac{d}{a}$$



elde ederiz. Birinci basamaktan sabit katsayılı bir lineer denklem olarak

$$\frac{du}{dx} - \frac{c}{a}u = \frac{d}{a}$$

denklemini için  $\lambda = e^{-(c/a)x}$  integral çarpanı ile

$$\begin{aligned} u(x, y(x)) &= e^{(\frac{c}{a})x} \left[ \int \frac{d}{a} e^{-(\frac{c}{a})x} dx + f(x_0) \right] \\ &= -\frac{d}{c} + e^{(\frac{c}{a})x} f(x_0) \end{aligned}$$

veya  $x_0$  sabitini yok ederek,

$$u(x, y) = e^{\frac{c}{a}x} f\left(x - \frac{a}{b}y\right) - \frac{d}{c}$$

genel çözümünü elde ederiz.

### 2.1.1 Cauchy probleminin çözümünün varlık ve tekliği

Bayağı diferensiyel denklemlerde başlangıç değer problemi, ilgili diferensiyel denklem ve başlangıç noktası adı verilen bir noktadaki fonksiyon ve gerekirse türev değerini içermektedir. Kısmi diferensiyel denklemlerde başlangıç değer problemleri **Cauchy problemleri** olarak adlandırılır ve çözümün varlık ve tekliği için karakteristik adı verilen doğru veya eğrilerle *tek ve yalnız bir tek noktada kesişen ve başlangıç eğrisi adı verilen eğri üzerindeki değer (veya yüksek basamaktan problemler için türev değeri veya değerlerinin)* verilmesi yeterlidir, ancak gerekli değildir!

**TEOREM 2.1.** *[2]  $a, b, c$  sabitler ve  $f = f(x, y)$  olmak üzere  $f_x, f_y$ , kısmi türevleri sürekli fonksiyonlar ve  $g', h'$  fonksiyonları da sürekli olmak üzere*

$$\begin{aligned} au_x + bu_y + cu &= f, -\infty < x, y < \infty \\ u(x, g(x)) &= h(x) \end{aligned} \quad (2.23)$$

*başlangıç değer problemi verilmiş olsun. Eğer  $y = g(x)$  eğrisi (2.23) probleminin her bir karakteristiği ile tek bir noktada kesişiyorsa, (2.23) problemi tek bir çözüme sahiptir.*

Teorem 2.1 in hipotezlerinin sağlanmaması durumunda teorem şüphesiz uygulanamaz, bu durumda çözümün varlığı veya tekliği hakkında bu teorem yardımıyla herhangi bir bilgi elde edemeyiz. Ancak çözümün mevcut olması veya birden fazla olmaması durumunda ise Teorem 2.1 in hipotezlerinden en az birisi sağlanmamış olmadığını sonucuna varabiliriz.

### ÖRNEK 2.7.

$$\begin{aligned} u_x &= 0, \\ u(0, y) &= \sin(y) \end{aligned} \quad (2.24)$$

*Başlangıç Değer Probleminin çözümünü belirleyiniz.*

### Çözüm.

Öncelikle denklemin genel çözümünü Örnek 2.1 e benzer olarak

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

olarak elde edilir. Genel çözümden,  $x = 0$  için

$$u(0, y) = f(y) = \sin(y)$$

elde ederiz. O halde problemin tek çözümünü

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

olarak elde ederiz. Bu durumda

$$\Gamma = \{(0, y) |, y \in R\} \quad (2.25)$$

başlangıç doğrusu, her bir  $y = y_0$  karakteristik doğru ile tek bir noktada, yani  $(0, y_0)$  noktasında kesişir. Dolayısıyla başlangıç doğrusu üzerinde tanımlanan fonksiyon değeri ile birlikte problem tek bir çözüme sahiptir.

### ÖRNEK 2.8.

$$\begin{aligned} u_x &= 0, \\ u(x, 0) &= \sin(x) \end{aligned} \quad (2.26)$$

*Başlangıç Değer Probleminin (BDP) çözümünün mevcut olmadığını gösteriniz.*

**Çözüm.**

Bu örnekte  $\Gamma$  eğrisi

$$\Gamma = \{(x, 0) | x \in \mathbb{R}\}$$

olarak verilmiştir. Bu durumda  $\Gamma$  eğrisi (yani  $y = 0$  doğrusu),  $y = y_0 = 0$  karakteristik doğrusu ile sonsuz sayıda noktada kesişir.  $\Gamma$  eğrisi üzerinde verilen  $\sin(x)$  başlangıç değeri ile

$$\begin{aligned} u_x &= 0, -\infty < x < \infty, y > 0 \\ u(x, 0) &= \sin(x) \end{aligned}$$

problemi çözüme sahip değildir. Çünkü  $u(x, y) = f(y)$  genel çözümünden

$$u(x, 0) = f(0) \neq \sin(x), x \in \mathbb{R}$$

elde ederiz. Bu durum bir çelişkidir, çünkü tek değişkenli bir fonksiyonunun tek bir noktadaki değeri, sabit olmayan bir fonksiyona eşit olamaz. O halde verilen başlangıç değerini sağlayan  $f$  fonksiyonu belirlenemez, yani verilen BDP çözüme sahip değildir.

**ÖRNEK 2.9.**

$$\begin{aligned} u_x &= 0, \\ u(x, 0) &= 1 \end{aligned} \tag{2.27}$$

*Başlangıç Değer Probleminin birden fazla çözüme sahip olduğunu gösteriniz.*

**Çözüm.**

Problemin genel çözümü

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

olup,

$$u(x, 0) = f(0) = 1$$

elde ederiz. Bu durumda bir çelişki söz konusu değildir, ancak  $f(0) = 1$  özelliğini sağlayan her  $f$  için bir çözüm elde edilir. Örneğin

$$u(x, y) = \cos(y), \cosh(y), y + 1, (y + 1)^2, \dots$$

fonksiyonları verilen BDP nin çözümleridirler. O halde verilen BDP sonsuz sayıda çözüme sahiptir. Bu örnekte başlangıç doğru olarak verilen  $y = 0$  doğrusunun  $y_0 \neq 0$  için hiç bir  $y = y_0$  karakteristiği ile kesişmediğine ve  $y_0 = 0$  için ise sonsuz sayıda noktada kesiştiğine dikkat edelim.

**ÖRNEK 2.10.**

$$\begin{aligned} u_y &= 0, -\infty < x < \infty, y > 1 \\ u(x, 1) &= \cos(x) \end{aligned}$$

*başlangıç değer probleminin çözümünü belirleyiniz.*

**Çözüm.**

Bu örnekte  $\Gamma$  eğrisi

$$\Gamma = \{(x, 1) | x \in \mathbb{R}\}$$

eğrisi veya kartezyen koordinat ifadesi ile  $y = 1$  doğrusu olarak verilmiştir. Bu doğru her bir  $x_0 \in \mathbb{R}$  için  $x = x_0$  karakteristik doğrusu ile tek bir noktada kesişmektedir. O halde çözüm mevcut ve tektir.

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

genel çözümünden

$$u(x, 1) = f(x) = \cos(x)$$

veya  $u(x, y) = \cos(x)$  çözümünü elde ederiz.

**ÖRNEK 2.11.** *2.2  $x, y$  bağımsız değişkenler ve  $u$  bağımlı değişken olmak üzere*

$$u_y = 0, -\infty < x, y < \infty, \quad (2.28)$$

$$u(0, y) = 2y + 1 \quad (2.29)$$

*denkleminin çözümünü belirleyiniz.*

**Çözüm.**

Örnek 2.1 e benzer olarak keyfi  $f$  fonksiyonu için

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

genel çözümünü elde ederiz.

Bu örnekte  $x = 0$  başlangıç doğrusunun,  $x_0 \neq 0$  olan hiç bir  $x = x_0$  karakteristiği ile kesişmediğine,  $x_0 = 0$  için ise sonsuz sayıda noktada kesiştiğine dikkat edelim. O halde verilen Cauchy Problemi için VTT uygulanamaz.

Genel çözümden

$$u(0, y) = f(0) = 2y + 1$$

çelişkili durumunu elde ederiz, dolayısıyla verilen başlangıç şartını sağlayan  $f$  fonksiyonunu belirleyemeyiz. O halde verilen BDP çözüme sahip değildir.

**ÖRNEK 2.12.** Yukarıda Örnek 2.2 ile verilen problemin aşağıda verilen başlangıç değerleri ile çözümlerini araştırınız.

**Çözüm.**

- $u(x, 0) = x^2$
- $u(x, \frac{b}{a}x + c) = x^2, c \in R.$
- Birinci problemde  $\Gamma = \{(x, 0) | x \in R\}$  başlangıç eğrisi 2.11 ile verilen ve  $b/a$  eğimli 2.13 karakteristik doğrularını her bir  $x_0$  için tek bir noktada kesmektedir. Bu durumda tek bir çözüm belirleyebilmeliyiz. Gerçekten de 2.14 yardımıyla

$$u(x, 0) = f(x) = x^2$$

elde ederiz. Belirlediğimiz  $f$  fonksiyonunu 2.14 da yerine yazarak

$$u(x, y) = (x - \frac{a}{b}y)^2$$

elde ederiz.

- İkinci problemde  $\Gamma = \{(x, \frac{b}{a}x + c) | x \in R\}$  başlangıç eğrisi (2.13) karakteristik doğrularına paraleldir. O halde verilen BDP Teorem 2.1 in hipotezlerini sağlamamaktadır. Dolayısıyla teorem uygulanamaz. Öte yandan (2.14) yardımıyla

$$u(x, \frac{b}{a}x + c) = f(x - \frac{a}{b}(\frac{b}{a}x + c)) = f(-\frac{ac}{b}) = x^2$$

bağıntısı ile çelişkili bir durum oluşmaktadır ve  $f$  fonksiyonu belirlenmemektedir. O halde verilen BDP çözüme sahip değildir.

**ÖRNEK 2.13.**

$$2u_x + 3u_y = -4u, -\infty < x < \infty \quad (2.30)$$

$$u(x, 0) = x^2 \quad (2.31)$$

denkleminin çözümünü belirleyiniz.

**Çözüm.**

Verilen denklemin her iki yanını 2 ile bölerek,

$$u_x + \frac{3}{2}u_y = -2u \quad (2.32)$$

elde ederiz.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{3}{2}$$

eğimli  $x - \frac{2}{3}y = x_0$  karakteristiği üzerinde  $u(x, y(x))$  fonksiyonunun türevini alıp, (2.32) denklemini kullanarak,

$$\begin{aligned} \frac{du}{dx} &= u_x + \frac{3}{2}u_y = -2u \\ u(0) &= f(x_0) \end{aligned}$$

elde ederiz. Bu denklemi çözerek

$$u = e^{-2x} f(x_0)$$

ve *sabit* değerini yok ederek

$$u = e^{-2x} f\left(x - \frac{2}{3}y\right)$$

çözümünü elde ederiz.

Verilen başlangıç şartını kullanarak

$$u(x, 0) = e^{-2x} f(x) = x^2 \Rightarrow f(x) = x^2 e^{2x}$$

elde ederiz. O halde başlangıç değerini sağlayan çözümü

$$\begin{aligned} u(x, y) &= e^{-2x} \left(x - \frac{2}{3}y\right)^2 e^{2\left(x - \frac{2}{3}y\right)} \\ &= \left(x - \frac{2}{3}y\right)^2 e^{-\frac{4}{3}y} \end{aligned}$$

olarak elde ederiz.

**ÖRNEK 2.14.**

$$\begin{aligned}u_x + u_y &= 0 \\u(x, x + 1) &= \sin(x)\end{aligned}$$

*BDP'nin çözümünün varlık ve tekliliğini araştırınız.*

**Çözüm.**

Verilen denklemin karakteristikleri

$$\frac{dy}{dx} = 1$$

denkleminin çözümü olarak

$$y = x + \text{sabit}$$

doğrularıdır. Öte yandan başlangıç doğrusu

$$y = x + 1$$

olarak verilmektedir. *sabit*  $\neq 1$  değeri için hiç bir karakteristiğin başlangıç doğrusunu kesmediği ve *sabit* = 1 için ise sonsuz sayıda noktada kestiği görülmektedir. O halde verilen BDP Teorem 2.1 in hipotezlerini sağlamamaktadır. Dolayısıyla teorem uygulanamaz.

Öte yandan

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

genel çözümünden

$$u(x, x + 1) = f(1) = \sin(x)$$

gibi çelişkili bir durum elde ederiz. Dolayısıyla verilen BDP **çözüme sahip değildir.**

**ÖRNEK 2.15.**

$$\begin{aligned}u_x + u_y &= 0 \\u(x, 2x + 1) &= \sin(x)\end{aligned}$$

*BDP'nin çözümünün varlık ve tekliliğini araştırınız.*

**Çözüm.**

Verilen denklemin karakteristikleri

$$y = x + \text{sabit}$$

doğrularıdır. Öte yandan başlangıç doğrusu

$$y = 2x + 1$$

olarak verilmektedir. başlangıç doğrusu her bir karakteristiği tek bir noktada keser. O halde Teorem 2.1 gereğince verilen BDP tek bir çözüme sahiptir. Gerçekten de

$$u = f(y - x)$$

genel çözümünden

$$u(x, 2x + 1) = f(x + 1) = \sin(x) \Rightarrow f(x) = \sin(x - 1)$$

ve dolayısıyla

$$u(x, y) = \sin(y - x - 1)$$

çözümünü elde ederiz.

**ÖRNEK 2.16.** (*Taşınım(Adveksiyon) modeli*)

$$\begin{aligned} u_t + cu_x &= 0 \\ u(x, 0) &= f(x) \end{aligned}$$

*BDP Teorem 2.1 nin hipotezlerini sağlar. Gerçekten de denklemin*

$$x - ct = x_0$$

*ile verilen karakteristikleri  $y = 0$  başlangıç doğrusunu tek bir noktada keser. O halde*

$$u(x, t) = f(x - ct)$$

*verilen problemin tek çözümüdür.*

**ÖRNEK 2.17.** (*Taşınım-reaksiyon modeli*)

$$\begin{aligned} u_t + cu_x &= -\alpha u \\ u(x, 0) &= f(x) \end{aligned}$$



*BDP Teorem 2.1 nin hipotezlerini sağlar. Gerçekten de denklemin*

$$x - ct = x_0$$

*ile verilen karakteristikleri  $y = 0$  başlangıç doğrusunu tek bir noktada keser. O halde*

$$u(x, t) = e^{-\alpha t} f(x - ct)$$

*verilen problemin tek çözümüdür.*

## 2.1.2 Değişken katsayılı lineer denklemler

**ÖRNEK 2.18.** *Aşağıda verilen*

$$\begin{aligned} u_t + xu_x &= 0, \\ u(x, 0) &= f(x) \end{aligned}$$

*denkleminin genel çözümünü belirleyiniz.*

**Çözüm.**

$$\frac{dx}{dt} = x$$

denklemini sağlayan

$$\begin{aligned} \frac{dx}{x} &= dt \\ \Rightarrow \ln |x| &= t + c_1 \\ \Rightarrow |x| &= x_0 e^t, x_0 = e^{c_1} > 0 \\ \Rightarrow x &= x_0 e^t, x_0 \in R \end{aligned}$$

karakteristikleri boyunca

$$\frac{du(t, x(t))}{dt} = u_t + u_x \frac{dx}{dt} = 0$$

olup,  $u$  karakteristik boyunca değişmemektedir, o halde

$$u(x, t) = u(x_0, 0) = f(x_0) = f(xe^{-t})$$

elde ederiz.

**ÖRNEK 2.19.**

$$u_t + (xu)_x = 0$$

denkleminin genel çözümünü belirleyiniz.

**Çözüm.**

Verilen denklemi açıkça

$$u_t + u + xu_x = 0$$

veya

$$u_t + xu_x = -u$$

olarak ifade edebiliriz. Buradan

$$\frac{dx}{dt} = x$$

karakteristikler denklemini çözerek

$$\frac{dx}{x} = dt \Rightarrow \ln(|x|) = t + c \Rightarrow x = x_0 e^t, x_0 \in \mathbb{R}$$

elde ederiz.

Karakteristikleri üzerinde

$$\frac{d}{dt}u(t, x(t)) = u_t + u_x \frac{dx}{dt} = -u$$

elde ederiz. Bu denklemi çözerek

$$\frac{du}{u} = -dt \Rightarrow \ln(|u|) = -t + F(x_0)$$

veya düzenleyerek

$$u = e^{-t} f(x_0)$$

elde ederiz.  $x_0$  parametresini yok ederek

$$u = e^{-t} f(xe^{-t})$$

genel çözümünü elde ederiz.

**ÖRNEK 2.20.**

$$u_t + (x^2 u)_x = 0$$

denkleminin genel çözümünü belirleyiniz.

**Çözüm.**

Verilen denklemi açıkça

$$u_t + 2xu + x^2 u_x = 0$$

veya

$$u_t + x^2 u_x = -2xu$$

olarak ifade edebiliriz. Buradan

$$\frac{dx}{dt} = x^2$$

karakteristikler denklemini çözersek

$$\frac{dx}{x^2} = dt \Rightarrow -\frac{1}{x} = t + c \Rightarrow -2x = \frac{2}{t + c}, c \in R$$

elde ederiz.

Karakteristikleri üzerinde

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}u(t, x(t)) &= u_t + u_x \frac{dx}{dt} \\ &= u_t + x^2 u_x = -2xu \end{aligned}$$

elde ederiz. Bu denklemden karakteristikler üzerinde

$$\frac{du}{u} = -2x dt$$

elde ederiz. Ancak bu denklemi bu şekliyle çözemeyiz. Karakteristikler üzerinde  $-2x$  için  $t$  cinsinden elde edilen değeri yerine yazarak

$$\frac{du}{u} = \frac{2}{t + c} dt$$

veya integral almak suretiyle

$$\ln(|u|) = 2 \ln(t + c) + F(c)$$

veya düzenleyerek

$$u = (t + c)^2 f(c)$$

elde ederiz.  $c$  parametresini yok ederek

$$u = \frac{1}{x^2} f\left(t + \frac{1}{x}\right)$$

genel çözümünü elde ederiz.

### ÖRNEK 2.21.

$$u_t + tu_x = 0$$

denkleminin genel çözümünü belirleyiniz.

### Çözüm.

$$\frac{dx}{dt} = t$$

karakteristikler denklemini çözerek

$$x - \frac{t^2}{2} = x_0, x_0 \in R$$

elde ederiz.

Bu karakteristikleri üzerinde

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}u(t, x(t)) &= u_t + u_x \frac{dx}{dt} \\ &= u_t + tu_x = 0 \end{aligned}$$

elde ederiz. Bu denklemden karakteristikler üzerinde

$$u = f(x_0)$$

elde ederiz.  $x_0$  parametresini yok ederek

$$u = f\left(x - \frac{t^2}{2}\right)$$

genel çözümünü elde ederiz.

### 2.1.3 Parçalı Başlangıç Değerli Cauchy Problemleri

Bu bölümde başlangıç değerleri parçalı fonksiyon olarak verilen Cauchy problemlerinin, her noktada sürekli olmayabilen ve zayıf çözüm olarak adlandırılan çözümlerinin nasıl elde edildiğini inceleyeceğiz.

#### ÖRNEK 2.22.

$$\begin{aligned} u_t + u_x &= 0 \\ u(x, 0) &= \begin{cases} 1, & |x| \leq 1 \\ 0, & \text{diğer } x \text{ ler} \end{cases} \end{aligned}$$

*probleminin çözümünü belirleyiniz.*

#### Çözüm.

Öncelikle problemin genel çözümünü

$$u(x, t) = f(x - t)$$

olarak elde ederiz. O halde

$$u(x, 0) = f(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1 \\ 0, & \text{diğer } x \text{ ler} \end{cases}$$

ve dolayısıyla

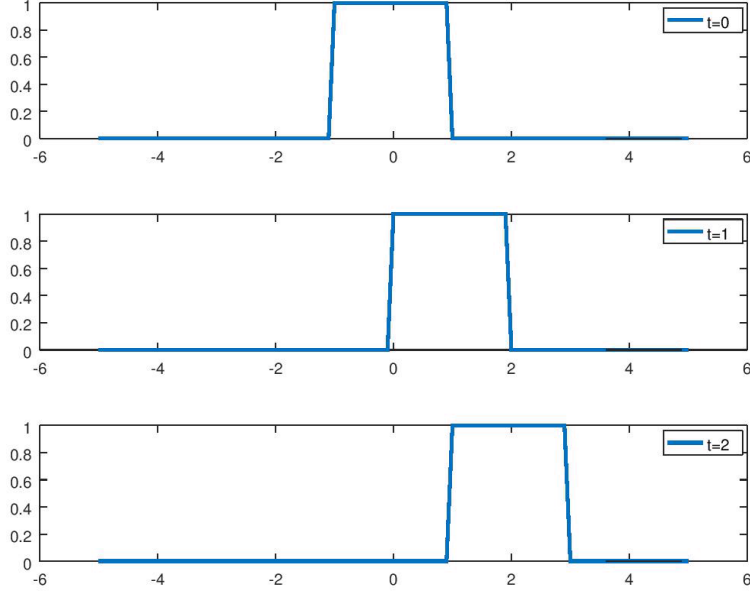
$$u(x, t) = f(x - t) = \begin{cases} 1, & |x - t| \leq 1 \\ 0, & \text{diğer } x \text{ ler} \end{cases}$$

elde ederiz. Şekil 2.1 de  $t = 0, 1$  ve  $2$  değerleri için elde edilen çözümler grafiksel olarak sunulmaktadır.

Denklemin sağ yöne doğru bir birim hızla taşınım(kimyasal yoğunluğu vb) gerçekleştirdiğine dikkat edelim.

### 2.1.4 Yarı-sonsuz bölge üzerinde adveksiyon-reaksiyon denklemi

Önceki bölümde sonsuz bölge ( $-\infty < x < \infty, t > 0$ ) üzerinde tanımlı adveksiyon veya adveksiyon-reaksiyon denklemlerinin çözümlerini inceledik. Bu bölümde ise yarı-sonsuz bölge olarak adlandıracağımız ( $0 < x < \infty, t >$



Şekil 2.1: Farklı  $t$  değerleri için çözüm.

0) bölgesi üzerinde söz konusu denklemlerin çözümlerini, fiziksel uygulamalarıyla birlikte inceleyeceğiz.

Öncelikle yarı sonsuz bölge üzerinde tanımlanan problemlerde başlangıç değerini  $(x, 0)$ ,  $x > 0$  ve  $(0, t)$ ,  $t \geq 0$  ile verilen doğrular üzerinde verilmesi gerektiğine dikkat çekmek istiyoruz.

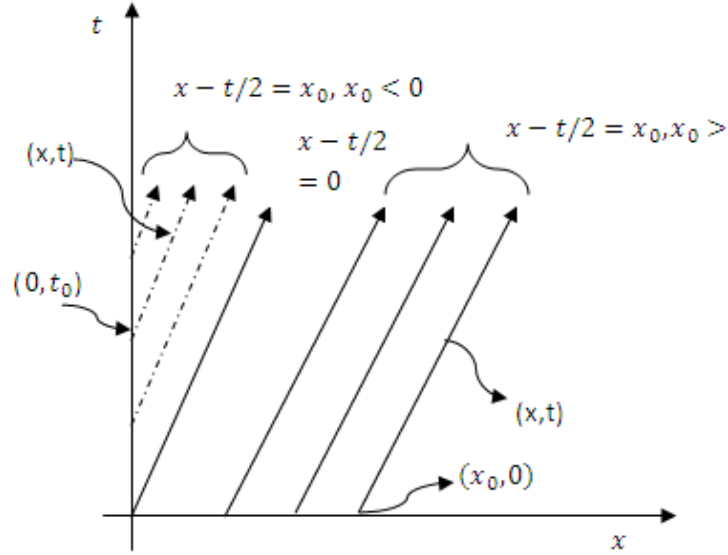
### ÖRNEK 2.23.

$$\begin{aligned} u_t + \frac{1}{2}u_x &= 0, 0 < x < \infty, t > 0 \\ u(x, 0) &= f(x) = x, x \geq 0 \\ u(0, t) &= g(t) = \sin(t), t > 0 \end{aligned}$$

probleminin çözümünü belirleyiniz.

### Çözüm.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{2}$$

Şekil 2.2:  $x$  ve  $t$  eksenini kesen karakteristikler.

denklemini sağlayan

$$x - t/2 = x_0 > 0$$

karakteristikleri üzerinde

$$u(x, t) = f(x_0) = f(x - t/2), x - t/2 \geq 0$$

çözümünü elde ederiz. Dolayısıyla verilen başlangıç şartı yardımıyla

$$u(x, 0) = f(x) = x$$

olup,

$$u(x, t) = x - t/2, x \geq t/2 > 0$$

çözümünü elde ederiz.

Şekil 2.2 de  $x_0 > 0$ ,  $x_0 = 0$  ve  $x_0 < 0$  için  $x - t/2 = x_0$  karakteristikleri görülmektedir.  $x_0 < 0$  için belirtilen karakteristik doğrular, başlangıç doğrusu olarak tanımlanan  $(0, \infty)$  doğrusunu kesmemektedir. Bu durumda  $x < t/2$  özelliğini sağlayan herhangi  $(x, t)$  noktası için  $u(x, t)$  çözümü belirlenmemektedir. Ancak  $x - t/2 = x_0, x_0 < 0$  karakteristiklerinin başlangıç doğrusu olan  $x = 0$  doğrusunun da sisteme dahil edilmesi durumunda her

$(x, t)$  noktası için çözümü belirleyebiliriz. Buarada dikkat edilmesi gereken iki nokta söz konusudur:  $x - t$  düzlemindeki herhangi bir  $(x, t)$  noktası için ya  $x \geq t/2$  veya  $x < t/2$  dir.

- $x \geq t/2$  olması durumunda  $(x, t)$  noktasının üzerinde olduğu  $x - t/2 = x_0$  karakteristiği  $x$  eksenini  $x_0 > 0$  noktasında kesmektedir. Bu durumda  $u(x, t) = f(x_0) = f(x - t/2)$  elde ederiz.
- $x < t/2$  olması durumunda  $(x, t)$  noktasının üzerinde olduğu  $x - t/2 = x_0$  karakteristiği,  $x = 0$  doğrusunu  $(0, t - x/2)$  noktasında kesmektedir. Gerçektende karakteristiğin  $x = 0$  doğrusunu kesim noktası  $(0, t_0)$  ise karakteristik denklemden

$$-t_0/2 = x_0 \implies t_0 = -2x_0 = -2(x - t/2) = t - 2x$$

elde ederiz. Bu durumda

$$u(x, t) = u(0, t_0) = u(0, t - 2x) = g(t - 2x)$$

elde ederiz. O halde problemin çözümünü

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \begin{cases} f(x - t/2) & x \geq t/2 \\ g(t - 2x) & x < t/2 \end{cases} \\ &= \begin{cases} x - t/2 & x \geq t/2 \\ g(t - 2x) & x < t/2 \end{cases} \end{aligned}$$

olarak elde ederiz.

### ÖRNEK 2.24.

$$\begin{aligned} u_t + 2u_x &= 0, 0 < x < \infty, t > 0 \\ u(x, 0) &= e^{-x}, x \geq 0 \\ u(0, t) &= \cos(t), t > 0 \end{aligned}$$

probleminin çözümünü belirleyiniz.

### Çözüm.



Yukarıdaki örnekteki yöntemimizi takip ederek

$$u(x, t) = \begin{cases} e^{-(x-2t)} & x \geq 2t \\ \cos(t - x/2) & x < 2t \end{cases}$$

elde ederiz.

Genelleştirecek olursak,

$$\begin{aligned} u_t + cu_x &= 0, 0 < x < \infty, t > 0 \\ u(x, 0) &= f(x), x \geq 0 \\ u(0, t) &= g(t), t > 0 \end{aligned}$$

probleminin çözümünü

$$u(x, t) = \begin{cases} f(x - ct) & x \geq ct \\ g(t - x/c) & x < ct \end{cases}$$

olarak elde ederiz.

### Alıştırmalar 2.1.

1. Aşağıda verilen sabit katsayılı denklemlerin genel çözümlerini belirleyiniz ve karakteristikler ailesinin grafiğini çiziniz

(a)  $u_t + 2u_x = 0$

(b)  $u_t + 2u_x = x$

(c)  $u_t + 2u_x = x + t$

(d)  $u_t + 2u_x = \sin(x)$

(e)  $u_t + 2u_x = -u + t$

(f)  $u_t + 2u_x = -u + e^{-(x-2t)}$

(g)  $u_t + \frac{1}{x}u_x = 0$

2. Aşağıda verilen değişken katsayılı denklemlerin genel çözümlerini belirleyiniz ve karakteristikler ailesinin grafiğini çiziniz

(a)  $u_t + \frac{1}{x}u_x = 0$

(b)  $u_t + (xu)_x = u$

- (c)  $u_t + t u_x = -u + 1$   
 (d)  $u_t + xt u_x = -u + t$   
 (e)  $u_t + t u_x = -2u + 3x$

3. Soru 1(a) da verilen denklemin aşağıda verilen her bir yan şart ile tek bir çözümünün mevcut olup olmadığını araştırınız. Mevcutsa çözümü belirleyiniz. Çözümün mevcut olmadığı veya birden fazla olduğu durumları inceleyiniz.

- (a)  $u(x, 0) = e^{-|x|}$   
 (b)  $u(x, 2x) = 1$   
 (c)  $u(x, 2x) = x$

4. Soru 2(a) de verilen denklemin aşağıda verilen her bir yan şart ile tek bir çözümünün mevcut olup olmadığını araştırınız. Mevcutsa çözümü belirleyiniz. Çözümün mevcut olmadığı veya birden fazla olduğu durumları inceleyiniz.

- (a)  $u(x, 0) = x^2$   
 (b)  $u(x, x^2/2) = 1$   
 (c)  $u(x, x^2/2) = x$

5. Parçalı fonksiyonlarla verilen aşağıdaki başlangıç-değer problemlerinin türevlerde sonlu sayıda noktada süreksizliğe izin veren genelleştirilmiş çözümlerini belirleyiniz ve  $t = 0, 1, 2$  değerleri için grafiklerini aynı ekseninde çizdiriniz.

(a)

$$u_t + u_x = -u, u(x, 0) = \begin{cases} 1 & -1 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{diğer } x \text{ değerleri} \end{cases}$$

(b)

$$u_t + 2u_x = 0, u(x, 0) = \begin{cases} 1 - x^2 & -1 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{diğer } x \text{ değerleri} \end{cases}$$

(c)

$$u_t + tu_x = 0, u(x, 0) = \begin{cases} 1 - |x| & -1 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{diğer } x \text{ değerleri} \end{cases}$$

(d)

$$u_t + 2u_x = -u, u(x, 0) = \begin{cases} \cos(x) & -\pi/2 \leq x \leq \pi/2 \\ 0 & \text{diğer } x \text{ değerleri} \end{cases}$$

(e)

$$u_t + xu_x = -u, u(x, 0) = \begin{cases} 1 & -1 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{diğer } x \text{ değerleri} \end{cases}$$

6. Trafik yoğunluk modeli olarak bilinen[1]

$$u_t + uu_x = 0$$

quazi-lineer denkleminin genel çözümünü belirleyerek, aşağıda verilen başlangıç değerlerini sağlayan çözümlerini araştırınız

(a)  $u(x, 0) = x$

(b)  $u(x, 0) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$

(c)  $u(x, 0) = \begin{cases} 1, & x < 0 \\ 1 - x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & x > 1 \end{cases}$

(d) (c) de hangi  $t$  anına kadar çözüm için tek değerli bir fonksiyon elde edebilirsiniz?

7. Yarı-sonsuz bölgede tanımlanan aşağıdaki başlangıç-sınır değer problemlerinin çözümlerini belirleyiniz.

(a)  $u_t + 2u_x = 0, 0 < x < \infty,$

$$u(x, 0) = x, x \geq 0, u(0, t) = \sin(t), t > 0$$

(b)  $u_t + tu_x = 0, 0 < x < \infty,$

$$u(x, 0) = x^2, x \geq 0, u(0, t) = t, t > 0$$

(c)  $u_t + xu_x = 0, 0 < x < \infty,$

$$u(x, 0) = 1, x \geq 0, u(0, t) = \cos(t), t > 0$$

$$(d) u_t + 2u_x = -u, 0 < x < \infty,$$

$$u(x, 0) = x + 1, x \geq 0, u(0, t) = 1 + \sin(t), t > 0$$

8. Aşağıda verilen ifadelerden doğru olanını belirleyiniz.

(a)  $u_x + 2u_y = 0$  denklemi  $y - x = \text{sabit}$  karakteristikleri üzerinde  $\frac{du}{dx} = 0$  denklemine dönüşür ve integral ile  $u = f(y - x)$  genel çözümünü elde ederiz.

(b)  $u_x + 2u_y = 0$  denklemi  $2y - x = \text{sabit}$  karakteristikleri üzerinde  $\frac{du}{dx} = 0$  denklemine dönüşür ve integral ile  $u = f(y - 2x)$  genel çözümünü elde ederiz.

(c)  $u_x + 2u_y = 0$  denklemi  $y - 2x = \text{sabit}$  karakteristikleri üzerinde  $\frac{du}{dy} = 0$  denklemine dönüşür ve integral ile  $u = f(y - 2x)$  genel çözümünü elde ederiz.

(d)  $u_x + 2u_y = 0$  denklemi  $y - 2x = \text{sabit}$  karakteristikleri üzerinde  $\frac{du}{dx} = 0$  denklemine dönüşür ve integral ile  $u = f(y - 2x)$  genel çözümünü elde ederiz.

9. Aşağıda verilen ifadeleri inceleyelim:

I-  $u_x = 0, u(0, y) = y$  başlangıç değer problemi tek bir çözüme sahiptir.

II-  $u_x = 0, u(x, 0) = 1$  başlangıç değer problemi tek bir çözüme sahiptir.

III-  $u_x = 0, u(x, 0) = x$  başlangıç değer problemi tek bir çözüme sahiptir.

IV-  $u_x = 0, u(x, 0) = 2$  başlangıç değer problemini sonsuz sayıda çözüme sahiptir ve bir çözümünü  $u(x, y) = y + 2$  dir. Buna göre aşağıda verilen seçeneklerden doğru olanını belirleyiniz.

(a) I yanlış; II, III, IV doğrudur.

(b) I, IV yanlış; II, III doğrudur.

(c) I, IV doğru; II, III yanlıştır.

(d) hepsi yanlıştır.

10.

$$u_t + 2xu_x = -u$$

denklemi ile ilişkili olarak aşağıdakilerin hangisi yanlıştır?

(a) denklemin karakteristikler ailesi

$$xe^{-2t} = c$$

eğri aileleridir.

(b) Karakteristikler üzerinde verilen kısmi diferensiyel denklem

$$\frac{du}{dt} = 2u$$

başağı diferensiyel denkleme dönüşür. (doğru)

(c) Keyfi  $f$  için

$$u = e^{-t} f(xe^{-2t})$$

verilen problemin genel çözümüdür.

(d)  $u(x, 0) = \sin(x)$  başlangıç değerini sağlayan çözüm

$$u = e^{-t} \sin(xe^{-2t})$$

olarak elde edilir.

11.  $u_t + 3u_x = 2$  denkleminin karakteristikler ailesi  $(x, t)$  düzleminde

(a) 3 eğimli doğrulardır

(b)  $\frac{1}{3}$  eğimli doğrulardır

(c)  $x = 3$  doğrularındır

(d)  $y = 3$  doğrularındır

12.  $u_t + 3u_x = 0$  denkleminin

$$u(x, 0) = \begin{cases} 1 - x, & -1 < x < 1 \\ 0, & \text{diğer } x \text{ ler} \end{cases}$$

başlangıç şartını sağlayan çözümü için aşağıda verilen seçeneklerden doğru olanını belirleyiniz.

(a)  $u(1, 1) = 0, u(1, \frac{1}{2}) = \frac{3}{2}$

(b)  $u(1, 1) = 0, u(1, \frac{1}{2}) = \frac{1}{2}$

(c)  $u(1, 1) = \frac{1}{2}, u(1, \frac{1}{2}) = \frac{1}{2}$

(d)  $u(1, 1) = 1, u(1, \frac{1}{2}) = \frac{3}{2}$



# Kaynaklar

- [1] Duchateau, P., Zachmann D, Applied Partial Differential Equations, Dover Pub., New York, 1989.
- [2] Coleman, P. Matthew, An introduction to Partial Differential Equations with MATLAB, Chapman& Hall/CRC, 2004.