

שעור 5

אסטרטגיות מעורבות

5.1 הגדרה של אסטרטגיות מעורבות

הגדרה 5.1 אסטרטגיות מעורבות

יהי $G = (N, (S_i)_{i \in N}, (u_i)_{i \in N})$ משחק בצורה אסטרטגית שבו קבוצות האסטרטגיות של השחקנים סופיות.

נניח כי $S_1 = (s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^n)$ קבוצת אסטרטגיות של שחקן 1, ונניח כי X_1 היא פונקצית ההסתברות של הקבוצת אסטרטגיות S_1 :

$$X_1 : S_1 \rightarrow [0, 1] .$$

קבוצת אסטרטגיה מעורבת של שחקן 1 מסומן X_1 ומוגדר להיות הקבוצה

$$X_1(S_1) = \{X_1(s_1^1), X_1(s_1^2), \dots, X_1(s_1^n)\}$$

כאשר:

$$\begin{aligned} X_1(s_1^1) &= \text{ההסתברות לשחקן 1 לשחק לפי האסטרטגיה } s_1^1, \\ X_1(s_1^2) &= \text{ההסתברות לשחקן 1 לשחק לפי האסטרטגיה } s_1^2, \\ &\text{וכן הלאה.} \end{aligned}$$

באופן כללי, נניח כי $S_i = (s_i^1, s_i^2, \dots, s_i^m)$ קבוצת אסטרטגיות של שחקן i . **קבוצת אסטרטגיה מעורבת** של שחקן i מסומן X_i ומוגדר להיות הקבוצה

$$X_i(S_i) = \{X_i(s_i^1), X_i(s_i^2), \dots, X_i(s_i^m)\}$$

כאשר:

$$\begin{aligned} X_i(s_i^1) &= \text{ההסתברות לשחקן } i \text{ לשחק לפי האסטרטגיה } s_i^1, \\ X_i(s_i^2) &= \text{ההסתברות לשחקן } i \text{ לשחק לפי האסטרטגיה } s_i^2, \\ &\text{וכן הלאה.} \end{aligned}$$

סימון: ניתן לסמן אסטרטגיה מעורבת עם אותיות גדולות, ולסמן את ההסתברויות עצמן עם אותיות קטנות. למשל

$$X(S_1) = \{X(s_1^1), X(s_1^2), \dots, X(s_1^n)\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

ז"א $x_1 = X(s_1^1)$ מסמן את ההסתברות ששחקן 1 ישחק לפי אסטרטגיה s_1^1 , ו- $x_2 = X(s_1^2)$ מסמן את ההסתברות ששחקן 2 ישחק לפי אסטרטגיה s_1^2 .

לפי תכונת החיוביות של פונקצית ההסתברות,

$$0 \leq X(s_i) \leq 1 \quad (*)1$$

לכל $s_i \in S_i$ ולפי תכונת הנרמול של פונקצית ההסתברות, אם X אסטרטגיה מעורבת של שחקן i אז מתקיים

$$X(s_i^1) + X(s_i^2) + \dots + X(s_i^n) = 1 . \quad (*)2$$

תכונות (*)1 ו- (*)2 אומרות כי הקבוצה X היא **סימפלקס**.

דוגמה 5.1 (אסטרטגיה מעורבת)

דוגמה 1 נניח שקבוצת האסורוגיות הטהורות של שחקן היא 1

$$S_1 = \{A, B, C\} .$$

את האסטרטגיות המעורבת X שבה הוא בוחר כל אסטרטגיה טהורה בהסתברות $\frac{1}{3}$ נסמן על יד

$$X(S_1) = \{X(A), X(B), X(C)\} \\ = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)$$

דוגמה 2 אם $S_1 = \{H, T\}$, האוסף של כל האסטרטגיות המעורבות, X של שחקן 1 מסומן

$$\Sigma_1 = \{ \{X(H), X(T)\} = (x_1 \ x_2) \mid 0 \leq x_1, x_2 \leq 1, x_1 + x_2 = 1 \} .$$

במקרה זה הקבוצה Σ_1 שקולה לקטע ב- \mathbb{R}^2 המחבר את $(1, 0)$ עם $(0, 1)$.

דוגמה 3 אם $S_2 = \{L, M, R\}$, אוסף של כל האסטרטגיות המעורבות Y של שחקן 2 מסומן

$$\Sigma_2 = \{ \{Y(L), Y(M), Y(R)\} = (y_1 \ y_2 \ y_3) \mid 0 \leq y_1, y_2, y_3 \leq 1, y_1 + y_2 + y_3 = 1 \} .$$

במקרה זה Σ_2 שקולה למשולש ב- \mathbb{R}^3 שקדקודיו הם הנקודות $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ ו- $(0, 0, 1)$.

דוגמה 5.2 (וקטור אסטרטגיות מעורב)

נתון המשחק G באסטרטגיות טהורות הנתון למטה:

$I \backslash II$	A	B
	α	β
α	1, 1	2, -7
β	3, -2	5, 6

נניח כי באסטרטגיות מעורבות שחקן 1 משחק לפי אסטרטגיה A בהסתברות $\frac{1}{3}$ ולפי אסטרטגיה B בהסתברות $\frac{2}{3}$, ושחקן 2 משחק לפי אסטרטגיה α בהסתברות $\frac{2}{5}$ ולפי אסטרטגיה β בהסתברות $\frac{3}{5}$. וקטור האסטרטגיות המעורב של שחקן 1 הוא

$$X = (x_1, x_2) = \left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3}\right)$$

ווקטור האסטרטגיות המעורב של שחקן 2 הוא

$$Y = (y_1, y_2) = \left(\frac{2}{5}, \frac{3}{5}\right) .$$

המשחק בצורה אסטרטגית מעורבת הינה

$I \backslash II$	$\frac{1}{3}(A)$	$\frac{2}{3}(B)$
	$\frac{2}{5}(\alpha)$	$\frac{3}{5}(\beta)$
$\frac{2}{5}(\alpha)$	1, 1	2, -7
$\frac{3}{5}(\beta)$	3, -2	5, 6

שימו לב X ו- Y הם סימפלקסים, בגלל ש- $x_1 + x_2 = 1$ ו- $y_1 + y_2 = 1$.

דוגמה 5.3 (וקטור אסטרטגיות מעורב)

נתון המשחק G באסטרטגיות טהורות הנתון למטה:

$I \backslash II$	L	C	R
t	0, 2	2, -7	3, 2
m	3, -2	5, 4	2, 9
b	3, -2	5, 6	7, -8

נניח כי באסטרטגיות מעורבות שחקן 1 משחק לפי אסטרטגיה L בהסתברות $\frac{1}{7}$, לפי אסטרטגיה C בהסתברות $\frac{2}{7}$, ולפי אסטרטגיה R בהסתברות $\frac{4}{7}$, ושחקן 2 משחק לפי אסטרטגיה t בהסתברות $\frac{1}{9}$, לפי אסטרטגיה m בהסתברות $\frac{4}{9}$, ולפי אסטרטגיה b בהסתברות $\frac{5}{9}$. וקטור האסטרטגיות המעורב של שחקן 1 הוא

$$X = (x_1, x_2, x_3) = \left(\frac{1}{7}, \frac{2}{7}, \frac{4}{7} \right)$$

ווקטור האסטרטגיות המעורב של שחקן 2 הוא

$$Y = (y_1, y_2, y_3) = \left(\frac{1}{9}, \frac{4}{9}, \frac{5}{9} \right).$$

המשחק בצורה אסטרטגית מעורבת הינה

$I \backslash II$	$\frac{1}{7} (L)$	$\frac{2}{7} (C)$	$\frac{4}{7} (R)$
$\frac{1}{9} (t)$	0, 2	2, -7	3, 2
$\frac{4}{9} (m)$	3, -2	5, 4	2, 9
$\frac{5}{9} (b)$	3, -2	5, 6	7, -8

שימו לב X ו- Y הם סימפלקסים, בגלל ש- $x_1 + x_2 + x_3 = \frac{1}{7} + \frac{2}{7} + \frac{4}{7} = 1$ ו- $y_1 + y_2 + y_3 = \frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{5}{9} = 1$.

הגדרה 5.2 ההרחבה של משחק לאסטרטגיות מעורבות

יהי $G = (N, (S_i)_{i \in N}, (u_i)_{i \in N})$ משחק בצורה אסטרטגית. ההרחבה של G לאסטרטגיות מעורבות הוא המשחק

$$\Gamma = (N, (\Sigma_i)_{i \in N}, (U_i)_{i \in N}) \quad (5.1)$$

כאשר:

Σ_i מסמן את האוסף של כל האסטרטגיות המעורבות $X_i(S_i)$ של שחקן i , ו- U_i מסמן את פונקציית התשלום של שחקן i אשר מוגדרת

$$U_i(X_1, \dots, X_N) = \sum_{s_1 \in S_1, \dots, s_N \in S_N} u_i(s_1, \dots, s_N) X_1(s_1) X_2(s_2) \dots X_N(s_N). \quad (5.2)$$

דוגמה 5.4 (פונקצית התשלום של משחק באסטרטגיות מעורבות)

נתון המשחק G באסטרטגיות טהורות:

$I \backslash II$	a	b
α	1, 1	2, -7
β	3, -2	5, 6

ונתון הוקטור האסטרטגיות המעורבות של שחקן 1:

$$X = (x_1, x_2) = \left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3}\right)$$

והוקטור אסטרטגיות מעורבות של שחקן 2:

$$Y = (y_1, y_2) = \left(\frac{2}{5}, \frac{3}{5}\right).$$

ההרחבה של המשחק לאסטרטגיות מעורבות הינה

$I \backslash II$	$x_1(a)$	$x_2(b)$	$=$	$I \backslash II$	$\frac{1}{3}(a)$	$\frac{2}{3}(b)$
$y_1(\alpha)$	1, 1	2, -7		$\frac{2}{5}(\alpha)$	1, 1	2, -7
$y_2(\beta)$	3, -2	5, 6		$\frac{3}{5}(\beta)$	3, -2	5, 6

פונקצית התשלום של שחקן i היא התוחלת התשלום של שחקן i :

$$U_1(X, Y) = 1x_1x_2 + 2x_2y_1 + 3x_1y_2 + 5x_2y_2 = \frac{59}{15}.$$

$$U_2(X, Y) = 1x_1x_2 - 7x_2y_1 - 2x_1y_2 + 6x_2y_2 = \frac{4}{15}.$$

ניתן לרשום את פונקצית התשלום במונחי המטריצות התשלומים של שחקן 1 ו- שחקן 2 בנפרד. המטריצות התשלומים של המשחק הינה

$$U = \begin{pmatrix} (1, 1) & (2, -7) \\ (3, -2) & (5, 6) \end{pmatrix}$$

והמטריצות התשלומים של השחקנים הנפרדים הינן

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 5 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & -7 \\ -2 & 6 \end{pmatrix}.$$

 A המטריצת התשלומים של שחקן 1 ו- B המטריצת התשלומים של שחקן 2. במונחי A ו- B הפונקציות התשלומים שלהם באסטרטגיות מעורבות הן

$$U_1(X, Y) = X^t A Y = (x_1 \ x_2) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$$

$$U_2(X, Y) = X^t B Y = (x_1 \ x_2) \begin{pmatrix} 1 & -7 \\ -2 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$$

דוגמה 5.5 (וקטור אסטרטגיות מעורב)

נתון המשחק G באסטרטגיות טהורות:

$I \backslash II$	L	C	R
t	0, 2	2, -7	3, 2
m	3, -2	5, 4	2, 9
b	3, -2	5, 6	7, -8

ונתון וקטור האסטרטגיות המעורבות של שחקן 1:

$$X = (x_1, x_2, x_3) = \left(\frac{1}{7}, \frac{2}{7}, \frac{4}{7} \right)$$

ווקטור האסטרטגיות המעורבות של שחקן 2:

$$Y = (y_1, y_2, y_3) = \left(\frac{1}{9}, \frac{4}{9}, \frac{5}{9} \right).$$

המשחק בצורה אסטרטגית מעורבת הינה

$I \backslash II$	$x_1(L)$	$x_2(C)$	$x_3(R)$		$I \backslash II$	$\frac{1}{7}(L)$	$\frac{2}{7}(C)$	$\frac{4}{7}(R)$
$y_1(t)$	0, 2	2, -7	3, 2	=	$\frac{1}{9}(t)$	0, 2	2, -7	3, 2
$y_2(m)$	3, -2	5, 4	2, 9		$\frac{4}{9}(m)$	3, -2	5, 4	2, 9
$y_3(b)$	3, -2	5, 6	7, -8		$\frac{5}{9}(b)$	3, -2	5, 6	7, -8

פונקצית התשלום של שחקן i היא התוחלת התשלום של שחקן i :

$$U_1(X, Y) = 0 \cdot x_1 x_2 + 2x_2 y_1 + 3x_1 y_2 + 3x_3 y_1 + 3x_1 y_2 + 5x_2 y_2 + 2x_3 y_2 + 3x_1 y_3 + 5x_2 y_3 + 7x_3 y_3 = \frac{107}{21}.$$

$$U_2(X, Y) = 2x_1 y_1 - 7x_1 y_2 + 2x_1 y_3 - 2x_2 y_1 + 4x_2 y_2 + 9x_2 y_3 - 2x_3 y_1 + 6x_3 y_2 - 8x_3 y_3 = \frac{10}{21}.$$

ניתן לרשום את פונקצית התשלום במונחי המטריצות התשלומים של שחקן 1 ו-2 בשחקן 2 בנפרד. המטריצות התשלומים של המשחק הינה

$$U = \begin{pmatrix} (0, 2) & (2, -7) & (3, 2) \\ (3, -2) & (5, 4) & (2, 9) \\ (3, -2) & (5, 6) & (7, -8) \end{pmatrix}$$

והמטריצות התשלומים של השחקנים הנפרדים הינן

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 3 \\ 3 & 5 & 2 \\ 3 & 5 & 7 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 2 & -7 & 2 \\ -2 & 4 & 9 \\ -2 & 6 & -8 \end{pmatrix}.$$

 A המטריצת התשלומים של שחקן 1 ו- B המטריצת התשלומים של שחקן 2. במונחי A ו- B הפונקציות התשלומים שלהם באסטרטגיות מעורבות הן

$$U_1(X, Y) = X^t A Y = (x_1 \ x_2 \ x_3) \begin{pmatrix} 0 & 2 & 3 \\ 3 & 5 & 2 \\ 3 & 5 & 7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}$$

$$U_2(X, Y) = X^t B Y = (x_1 \ x_2 \ x_3) \begin{pmatrix} 2 & -7 & 2 \\ -2 & 4 & 9 \\ -2 & 6 & -8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}$$

5.2 שיווי משקל נאש ועקרון האדישות

הגדרה 5.3 שיווי משקל האש באסטרטגיות מעורבות

$\hat{X}^* = (X_1^*, \dots, X_N^*)$ וקטור אסטרטגיות $\Gamma = (N, (\Sigma_i)_{i \in N}, (U_i)_{i \in N})$ $G = (N, (S_i)_{i \in N}, (u_i)_{i \in N})$ הוא שיווי משקל באסטרטגיות מעורבות אם התנאי הבא מתקיים

$$U_i(\hat{X}^*) \geq U_i(X_i, \hat{X}_{-i}^*) \quad (5.3)$$

משפט 5.1 עקרון האדישות

יהי \hat{X}^* שיווי משקל במשחק בצורה אסטרטגית, ותהייה s_i ו- \hat{s}_i שתי אסטרטגיות טהורות של שחקן i . אם $X_i^*(s_i) > 0$ וכן $X_i^*(\hat{s}_i) > 0$ אזי

$$U_i(s_i, X_{-i}^*) = U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*) \quad (5.4)$$

הוכחה: נניח בשלילה כי משוואה (5.4) אינה מתקיימת ובלי הגבלת הכלליות נניח כי

$$U_i(s_i, X_{-i}^*) > U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*) \quad (5.5)$$

תהי σ_i האסטרטגיה של שחקן i המוגדרת באופן הבא:

$$X_i(t_i) \triangleq \begin{cases} X_i^*(t_i) & t_i \notin \{s_i, \hat{s}_i\} \\ 0 & t_i = \hat{s}_i \\ X_i^*(s_i) + X_i^*(\hat{s}_i) & t_i = s_i \end{cases}$$

$$U_i(X_i, X_{-i}^*) = \sum_{t_i \in S_i} X_i(t_i) U_i(t_i, X_{-i}^*) \quad (5.6)$$

$$= \sum_{t_i \notin \{s_i, \hat{s}_i\}} X_i^*(t_i) U_i(t_i, X_{-i}^*) + (X_i^*(s_i) + X_i^*(\hat{s}_i)) U_i(s_i, X_{-i}^*) \quad (5.7)$$

$$> \sum_{t_i \notin \{s_i, \hat{s}_i\}} X_i^*(t_i) U_i(t_i, X_{-i}^*) + X_i^*(s_i) U_i(s_i, X_{-i}^*) + X_i^*(\hat{s}_i) U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*) \quad (5.8)$$

$$= \sum_{t_i \in S_i} X_i^*(t_i) U_i(t_i, X_{-i}^*) \quad (5.9)$$

$$= U_i(X^*) \quad (5.10)$$

קיבלנו כי $U_i(X_i, X_{-i}^*) > U_i(X^*)$ בסתירה לכך ש- X^* שיווי משקל.

דוגמה 5.6 ()

נתון משחק שני שחקנים (שאינו סכום אפס) בצורה אסטרטגית על ידי המטריצה הבאה.

$I \backslash II$	L	R
T	1, 8	9, 2
B	7, 1	2, 5

מצאו את השיווי משקל באסטרטגיות מעורבות.

פתרון:

$I \backslash II$	$y(L)$	$(1-y)(R)$
$x(T)$	1, 8	9, 2
$(1-x)(B)$	7, 1	2, 5

$$U_1(x, y) = (2(1-x) + 9x)(1-y) + (7(1-x) + x)y = -13xy + 7x + 5y + 2.$$

$$U_2(x, y) = (5(1-x) + 2x)(1-y) + (7x + 1)y = 10xy - 3x - 4y + 5.$$

לפי עקרון האדישות:

$$\begin{aligned} U_1(T, y^*) &= U_1(B, y^*) \\ \Rightarrow U_1(1, y^*) &= U_1(0, y^*) \\ \Rightarrow 9 - 8y^* &= 2 + 5y^* \\ \Rightarrow y^* &= \frac{7}{13}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_2(x^*, L) &= U_2(x^*, R) \\ \Rightarrow U_2(x^*, 1) &= U_2(x^*, 0) \\ \Rightarrow 1 + 7x^* &= 5 - 3x^* \\ \Rightarrow x^* &= \frac{2}{5}. \end{aligned}$$

לכן השיווי משקל הוא

$$X^* = \left(\frac{2}{5}, \frac{3}{5}\right), \quad Y^* = \left(\frac{7}{13}, \frac{6}{13}\right).$$

דוגמה 5.7 ()

נתון משחק שני שחקנים (שאינו סכום אפס) בצורה אסטרטגית על ידי המטריצה הבאה.

$I \backslash II$	L	R
T	5, 5	-2, -2
B	4, 4	3, 3

מצאו את השיווי משקל באסטרטגיות מעורבות.

פתרון:

$I \backslash II$	$y(L)$	$(1-y)(R)$
$x(T)$	5, 5	-2, -2
B	4, 4	3, 3

$$U_1(x, y) = (3(1-x) - 2x)(1-y) + (4(1-x) + 5x)y = 6xy - 5x + y + 3.$$

$$U_2(x, y) = (3(1-x) - 2x)(1-y) + (4(1-x) + 5x)y = 6xy - 5x + y + 3.$$

לפי עקרון האדישות:

$$U_1(T, y^*) = U_1(B, y^*)$$

$$\Rightarrow U_1(1, y^*) = U_1(0, y^*)$$

$$\Rightarrow -2 + 7y^* = 3 + y^*$$

$$\Rightarrow y^* = \frac{5}{6}.$$

$$U_2(x^*, L) = U_2(x^*, R)$$

$$\Rightarrow U_2(x^*, 1) = U_2(x^*, 0)$$

$$\Rightarrow 4 + x^* = 3 - 5x^*$$

$$\Rightarrow x^* = -\frac{1}{6} \notin [0, 1].$$

אין השיווי משקל באסטרטגיות מעורבות.

משפט 5.2 נוסחאות שיווי משקל למשחק שני-שחקנים ריבועי

יהי $G = (\{1, 2\}, \{S_1, S_2\}, \{u_1, u_2\})$ משחק שני שחקנים ריבועי שבו לכל שחקן יש n אסטרטגיות טהורות.

יהי $X^* = \begin{pmatrix} x_1^* \\ \vdots \\ x_n^* \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$ וקטור אסטרטגיות שיווי משקל של שחקן 1,

יהי $Y^* = \begin{pmatrix} y_1^* \\ \vdots \\ y_n^* \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$ וקטור אסטרטגיות שיווי משקל של שחקן 2

תהי $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ מטריצת התשלומים של שחקן 1, תהי $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ מטריצת התשלומים של שחקן 2,

ויהו U_1^* ו- U_2^* התשלומי שיווי משקל של שחקן 1 ושחקן 2 בהתאמה.

אזי

$$X^{*t} = \frac{e^t A^{-1}}{\langle e, A^{-1} e \rangle}, \quad U_1^* = \langle X^*, A Y^* \rangle = \frac{1}{\langle e, A^{-1} e \rangle}$$

$$Y^* = \frac{B^{-1} e}{\langle e, B^{-1} e \rangle}, \quad U_2^* = \langle X^*, B Y^* \rangle = \frac{1}{\langle e, B^{-1} e \rangle}.$$

כאשר $e = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$ וקטור של \mathbb{R}^n שבו כל איבר שווה ל-1.

הוכחה:

- לפי עקרון האדישות,

$$X^{*t}A = u_1 e^t .$$

לכן

$$X^{*t} = u_1 e^t A^{-1} .$$

מכיוון שהסכום של ההסתברויות שווה ל-1 אז

$$1 = X^{*t}e = u_1 e^t A^{-1}e \quad \Rightarrow \quad u_1 = \frac{1}{e^t A^{-1}e} = \frac{1}{\langle e, A^{-1}e \rangle} .$$

על ידי הצבה בביטוי הקודם נקבל

$$X^{*t} = \frac{e^t A^{-1}}{\langle e, A^{-1}e \rangle} .$$

- באותה מידה לפי עקרון האדישות,

$$BY^* = u_2 e .$$

לכן

$$Y^* = u_2 B^{-1}e .$$

מכיוון שהסכום של ההסתברויות שווה ל-1 אז

$$1 = e^t X^* = u_2 e^t B^{-1}e \quad \Rightarrow \quad u_2 = \frac{1}{e^t B^{-1}e} = \frac{1}{\langle e, B^{-1}e \rangle} .$$

על ידי הצבה בביטוי הקודם נקבל

$$Y^* = \frac{A^{-1}e}{\langle e, B^{-1}e \rangle} .$$

•

$$\begin{aligned} U_1^* &= \langle X^*, AY^* \rangle = X^{*t}AY^* \\ &= \frac{e^t A^{-1}AB^{-1}e}{\langle e, A^{-1}e \rangle \langle e, B^{-1}e \rangle} \\ &= \frac{e^t B^{-1}e}{\langle e, A^{-1}e \rangle \langle e, B^{-1}e \rangle} \\ &= \frac{\langle e, B^{-1}e \rangle}{\langle e, A^{-1}e \rangle \langle e, B^{-1}e \rangle} \\ &= \frac{1}{\langle e, A^{-1}e \rangle} . \end{aligned}$$

•

$$\begin{aligned} U_2^* &= \langle X^*, BY^* \rangle = X^{*t}BY^* \\ &= \frac{e^t A^{-1}BB^{-1}e}{\langle e, A^{-1}e \rangle \langle e, B^{-1}e \rangle} \\ &= \frac{e^t A^{-1}e}{\langle e, A^{-1}e \rangle \langle e, B^{-1}e \rangle} \\ &= \frac{\langle e, A^{-1}e \rangle}{\langle e, A^{-1}e \rangle \langle e, B^{-1}e \rangle} \\ &= \frac{1}{\langle e, B^{-1}e \rangle} . \end{aligned}$$

דוגמה 5.8 ()

$I \backslash II$	a	b	c
α	1, 1	1, 2	2, 1
β	1, 2	3, 1	0, 1
γ	2, -1	1, 1	1, 2

פתרון:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 3 & 0 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

$$A^{-1} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} -3 & -1 & 6 \\ 1 & 3 & -2 \\ 5 & -1 & -2 \end{pmatrix}, \quad B^{-1} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} -1 & 3 & -1 \\ 5 & -3 & -1 \\ -3 & 3 & 3 \end{pmatrix}.$$

לכן

$$U_1^* = \frac{1}{\langle e, A^{-1}e \rangle} = \frac{4}{3}.$$

$$U_2^* = \frac{1}{\langle e, B^{-1}e \rangle} = \frac{6}{5}.$$

$$X^* = U_1^* e^t A^{-1} = \left(\frac{1}{2} \quad \frac{1}{6} \quad \frac{1}{3} \right),$$

$$Y^* = U_2^* B^{-1} e = \left(\frac{1}{5} \quad \frac{1}{5} \quad \frac{3}{5} \right).$$

מסקנה 5.1 נוסחאות שיווי משקל למשחק שני-שחקנים סכום-אפס ריבועי

במשחק סכום אפס ריבועי שבו לכל שחקן יש n אסטרטגיות טהורות. אם A המטריצת המשחק אז הווקטורי אסטרטגיות שיווי משקל X^* ו- Y^* של שחקן 1 (שחקן השורות) ושחקן 2 (שחקן העמודות), והתשלום שיווי משקל נתונים על ידי

$$X^{*t} = \frac{e^t A^{-1}}{\langle e, A^{-1}e \rangle}, \quad Y^* = \frac{B^{-1}e}{\langle e, B^{-1}e \rangle}, \quad U = \langle X^*, AY^* \rangle = \frac{1}{\langle e, A^{-1}e \rangle}.$$

משפט 5.3

יהי $G = (N, (S_i)_{i \in N}, (u_i)_{i \in N})$ משחק בצורה אסטרטגית ו- Γ ההרחבה שלו לאסטרטגיות מעורבות. וקטור אסטרטגיות מעורבות σ^* הוא שיווי משקל באסטרטגיות מעורבות במשחק Γ אם ורק אם לכל שחקן $i \in N$ ולכל אסטרטגיה טהורה $s_i \in S_i$ מתקיים

$$U_i(\hat{X}^*) \geq U_i(s_i, X_{-i}^*). \quad (5.11)$$

הוכחה: \hat{X}^* שיווי משקל באסטרטגיות מעורבות במשחק Γ אז

$$U_i(\hat{X}^*) \geq U_i(X_i, X_{-i}^*)$$

לכל שחקן i ולכל אסטרטגיה מעורבת $X_i \in \Sigma_i$.

כל אסטרטגיה טהורה היא אסטרטגיה מעורבת, אז

$$U_i(\hat{X}^*) \geq U_i(s_i, X_{-i}^*)$$

לכל שחקן i ולכל אסטרטגיה טהורה $s_i \in S_i$.

להוכחת הכיוון ההפוך, נניח כי וקטור האסטרטגיות המעורבות \hat{X}^* מקיים את המשוואה (5.11) לכל שחקן $i \in N$ ולכל אסטרטגיה טהורה $s_i \in S_i$.
אזי לכל אסטרטגיה מעורבת X_i של שחקן i :

$$U_i(X_i, X_{-i}^*) = \sum_{s_i \in S_i} X_i(s_i) U_i(s_i, X_{-i}^*) \quad (5.12)$$

$$\leq \sum_{s_i \in S_i} X_i(s_i) U_i(\hat{X}^*) \quad (5.13)$$

$$= U_i(\hat{X}^*) \sum_{s_i \in S_i} X_i(s_i) = U_i(\hat{X}^*), \quad (5.14)$$

כאשר השוויון (5.12) נובע מכך ש- U_i היא פונקציה מולטי-לינארית והאי-שוויון (5.13) נובע מהאי-שוויון (5.11).
בפרט, \hat{X}^* הוא שיווי משקל באסטרטגיות מעורבות ב- Γ . ■

מסקנה 5.2

יהי \hat{X}^* שיווי משקל במשחק בצורה אסטרטגית, ותהייה s_i ו- \hat{s}_i שתי אסטרטגיות טהורות של שחקן i .

(1) אם $U_i(s_i, X_{-i}^*) < U_i(\hat{X}^*)$ אז $X_i^*(s_i) = 0$.

(2) אם $U_i(s_i, X_{-i}^*) < U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*)$ אז $X_i^*(s_i) = 0$.

(3) אם $X_i^*(s_i) > 0$ ו- $X_i^*(\hat{s}_i) > 0$ אז $U_i(s_i, X_{-i}^*) = U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*)$.

(4) אם s_i נשלטת חזק על ידי \hat{s}_i אז $X_i^*(s_i) = 0$.

הוכחה:

(1) נניח $U_i(s_i, X_{-i}^*) < U_i(\hat{X}^*)$.

נניח בשלילה כי $X_i^*(s_i) > 0$. לפי עקרטו האדישות לכל אסטרטגיה טהורה \hat{s}_i עבורה $X_i^*(\hat{s}_i) > 0$ מתקיים

$$\text{לכן } U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*) = U_i(s_i, X_{-i}^*)$$

$$\begin{aligned} U_i(\hat{X}^*) &= \sum_{\hat{s}_i \in S_i} X_i^*(\hat{s}_i) U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*) \\ &= \sum_{\substack{\hat{s}_i \in S_i \\ X_i^*(\hat{s}_i) > 0}} X_i^*(\hat{s}_i) U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*) \\ &= \sum_{\substack{\hat{s}_i \in S_i \\ X_i^*(\hat{s}_i) > 0}} X_i^*(\hat{s}_i) U_i(s_i, X_{-i}^*) \\ &= U_i(s_i, X_{-i}^*) \end{aligned}$$

בסתירה לכך ש- $U_i(s_i, X_{-i}^*) < U_i(\hat{X}^*)$.

(2)

$$U_i(s_i, X_{-i}^*) < U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*) \stackrel{\text{אדישות}}{=} U_i(\hat{X}^*)$$

ז"א $U_i(s_i, X_{-i}^*) < U_i(\hat{X}^*)$ ולכן לפי סעיף א' $X_i^*(s_i) = 0$.

(3) עקרון האדישות (משפט 5.1).

(4) נניח כי s_i נשלטת חזק על ידי \hat{s}_i . אזי

$$u_i(s_i, s_{-i}) < u_i(\hat{s}_i, s_{-i}) \quad \forall s_{-i} \in S_{-i}.$$

מכאן

$$\begin{aligned} U_i(s_i, X_{-i}^*) &= \sum_{s_{-i} \in S_{-i}} X_{-i}^*(s_{-i}) u_i(s_i, s_{-i}) \\ &< \sum_{s_{-i} \in S_{-i}} X_{-i}^*(s_{-i}) u_i(\hat{s}_i, s_{-i}) \\ &= U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*) \end{aligned}$$

ז"א

$$U_i(s_i, X_{-i}^*) < U_i(\hat{s}_i, X_{-i}^*)$$

ולכן לפי סעיף ב' $X_i^*(s_i) = 0$.

■

5.3 דוגמאות

דוגמה 5.9 (מלחמת המינים)

המשחק הבא נקרא "מלחמת המינים". זוג מתכונן בילוי לערב שבת. האפשרויות העומדות לרשותם הן קונצרט (C) או צפיייה שמשחק כדורגל (F). הגבר מעדיף צפיייה במשחק הכדורגל, בעוד האישה מעדיפה את הוקנצרט, אך שניהם מעדיפים להיות יחד גם אם הבילוי המשותף הוא הפחות עדיף בעיניהם. מצאו את כל שיווי המשקל של המשחק.

$I \backslash II$	F	C
F	2, 1	0, 0
C	0, 0	1, 2

מצאו כל שיווי משקל של המשחק.

פתרון:

קודם כל נשים לב שיש למשחק שיווי משקל באסטרטגיות טהורות:

$I \backslash II$	F	C
F	<u>2</u> , <u>1</u>	0, 0
C	0, 0	<u>1</u> , <u>2</u>

כעת נבדוק אם יש שיווי משקל באסטרטגיות מעורבות.

$I \backslash II$	$y(F)$	$(1-y)C$
$x(F)$	<u>2</u> , <u>1</u>	0, 0
$(1-x)(C)$	0, 0	<u>1</u> , <u>2</u>

לפי עקרון האדישות:

$$U_1(F, y^*) = U_1(C, y^*) \Rightarrow 2y^* = (1-y^*) \Rightarrow y^* = \frac{1}{3}.$$

$$U_2(x^*, F) = U_2(x^*, C) \Rightarrow x^* = 2(1-x^*) \Rightarrow x^* = \frac{2}{3}.$$

לכן הווקטור אסטרטגיות $\sigma^* = (X^*, Y^*)$ כאשר

$$X^* = \left(\frac{2}{3}(F), \frac{1}{3}(C) \right), \quad Y^* = \left(\frac{1}{3}(F), \frac{2}{3}(C) \right)$$

הוא שיווי משקל באסטרטגיות מעורבות.

דוגמה 5.10 ()

במשחק הבא מצאו את כל שיווי המשקל של המשחק.

$I \backslash II$	L	R
T	4, -4	-4, 4
M	-4, 4	4, 3
B	-4, 2	3, 1

פתרון:

נבדוק אם קיים שיווי משקל באסטרטגיות טהורות לפי שיטת תשובות הטובות ביותר:

$I \backslash II$	L	R
T	$\underline{4}, -4$	$-4, \underline{4}$
M	$-4, \underline{4}$	$\underline{4}, 3$
B	$-4, \underline{2}$	$3, 1$

לפיכך לא קיים שיווי משקל באסטרטגיות טהורות.

לפי משפט נאש בהכרח קיים שיווי משקל באסטרטגיות מעורבות. אסטרטגיה B נשלטת על ידי M לכן שחקן 1 ישחק לפי אסטרטגיה B בהסתברות 0. לכן המשחק באסטרטגיות מעורבות הינו

$I \backslash II$	$y(L)$	$(1-y)(R)$
$x(T)$	$4, -4$	$-4, 4$
$(1-x)(M)$	$-4, 4$	$4, 3$
$0(B)$	$-4, 2$	$3, 1$

לפי עקרון האדישות אם x^* שיווי משקל אז שחקן 2 אדיש בין האסטרטגיה L לבין האסטרטגיה R :

$$U_2(x^*, L) = U_2(x^*, R) \Rightarrow -4x^* + 4(1-x^*) = 4x^* + 3(1-x^*) \Rightarrow -7x^* = -1 \Rightarrow x^* = \frac{1}{7}.$$

לפי עקרון האדישות אם y^* שיווי משקל אז 1 אדיש בין האסטרטגיה T לבין האסטרטגיה M :

$$U_1(T, y^*) = U_1(M, y^*) \Rightarrow 4y^* - 4(1-y^*) = -4y^* + 4(1-y^*) \Rightarrow 16y^* = 8 \Rightarrow y^* = \frac{1}{2}.$$

לכן $\sigma^* = (X^*, Y^*)$ שיווי משקל של המשחק באסטרטגיות מעורבות כאשר

$$X^* = \left(\frac{1}{7}, \frac{6}{7}\right), \quad Y^* = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right).$$

■

דוגמה 5.11 ()

נתון המשחק הבא.

$I \backslash II$	L	C	R
T	$0, 0$	$7, 6$	$6, 7$
M	$6, 7$	$0, 0$	$7, 6$
B	$7, 6$	$6, 7$	$0, 0$

מצאו את כל שיווי המשקל של המשחק.

פתרון:

המטריצת התשלומים של שחקן I היא

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 7 & 6 \\ 6 & 0 & 7 \\ 7 & 6 & 0 \end{pmatrix}$$

לכן $|A| = 559$

$$A^{-1} = \frac{1}{559} \begin{pmatrix} -42 & 49 & 36 \\ 36 & -42 & 49 \\ 49 & 36 & -42 \end{pmatrix}^t = \frac{1}{559} \begin{pmatrix} -42 & 36 & 49 \\ 49 & -42 & 36 \\ 36 & 49 & -42 \end{pmatrix}.$$

המטריצת התשלומים של שחקן II היא

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 6 & 7 \\ 7 & 0 & 6 \\ 6 & 7 & 0 \end{pmatrix}$$

לכן $|B| = 559$

$$B^{-1} = \frac{1}{559} \begin{pmatrix} -42 & 36 & 49 \\ 49 & -42 & 36 \\ 36 & 49 & -42 \end{pmatrix}^t = \frac{1}{559} \begin{pmatrix} -42 & 49 & 36 \\ 36 & -42 & 49 \\ 49 & 36 & -42 \end{pmatrix}.$$

מכאן

$$\langle e, A^{-1}e \rangle = \frac{1}{559} \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 43 \\ 43 \\ 43 \end{pmatrix} \right\rangle = \frac{129}{559}.$$

לכן התשלומי שיווי משקל הינם

$$u_1^* = \frac{1}{\langle e, A^{-1}e \rangle} = \frac{559}{129}$$

$$\langle e, B^{-1}e \rangle = \frac{1}{559} \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 43 \\ 43 \\ 43 \end{pmatrix} \right\rangle = \frac{129}{559}.$$

לכן התשלומי שיווי משקל הינם

$$u_2^* = \frac{1}{\langle e, B^{-1}e \rangle} = \frac{559}{129}$$

$$X^* = \frac{e^t A^{-1}}{\langle e, A^{-1}e \rangle} = \frac{559}{129} \cdot \frac{1}{559} (43 \quad 43 \quad 43) = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$Y^* = \frac{B^{-1}e}{\langle e, B^{-1}e \rangle} = \frac{559}{129} \cdot \frac{1}{559} \begin{pmatrix} 43 \\ 43 \\ 43 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

