

# Mathematics



## חוברת סיכום קורס

### הסתברות

### תוכן עניינים

6	הקדמה
7	מושגי בסיס
7	קומבינטוריקה
12	מושגי בסיס בהסתברות
12	אקסיומות פונקציית ההסתברות
12	תכונות הנובעות מאקסיומת ההסתברות
13	חוקי דה-מורגן
14	<b>הסתברויות מותנות</b>
14	הסתברות מותנית
14	נוסחת ההסתברות השלמה
14	נוסחת בייס
15	<b>מאורעות בלתי תלויים</b>
15	הגדרה
15	חוסר תלות בשלוש
15	חוסר תלות המאורעות המשלימים
16	חוסר תלות המאורעות המשלימים לשלשה ב"ת
16	חוסר תלות המאורעות המשלימים ל- ח-יה בלתי תלויה
16	הסתברות מותנית למאורע משלים
17	<b>משתנים מקרים בדידים</b>
17	הגדרה
17	תכונות של פונקציית ההסתברות של מ"מ בדיד
17	<b>משתנים מקרים רציפים</b>
17	הגדרה
17	תכונות של פונקציית ההסתברות של מ"מ רציף

18.....טבלת משתנים מקרים בדידים נפוצים

19.....טבלת משתנים מקרים רציפים נפוצים

20.....**פונקציית התפלגות**

20.....הגדרה

20.....תכונות פונקציית התפלגות

20.....משפט – הקשר בין פונקציית ההתפלגות לפונקציית הצפיפות

20.....משפט – פירוק פונקציית ההתפלגות לבדיד ורציף

21.....**טרנספורמציה של משנה מקרי**

21.....משפט הטרנספורמציה

21.....משפט הטרנספורמציה – הרחבה

21.....אלגוריתם לתרגילי טרנספורמציה

22.....אלגוריתם לתרגילי טרנספורמציה עם שני משתנים

23.....**תוחלת**

23.....הגדרה (בדיד)

23.....הגדרה (רציף)

23.....למה – סימטריית פונקציית צפיפות ההסתברות

23.....טענה – נוסחת הזנב

24.....תכונות התוחלת

24.....משפטי תוחלת

24.....**משתנה מקרי מעורב**

24.....הגדרה

25.....משפט – תוחלת של פונקציה של משתנה מקרי

25.....**מומנטים**

25.....הגדרה

26.....**שונות**

26.....הגדרה

26.....תכונות השונות

26.....משפטי שונות

27.....**פונקציה יוצרת מומנטים**

27.....הגדרה

27.....תכונות פונקציה יוצרת מומנטים

27.....משפט – מומנט מסדר k-י

28.....פונקציות יוצרות מומנטים ידועות

29.....טרנספורמציה של פי"מ – תכונות

30.....**פונקציה אופיינית**

30..... הגדרה

30..... תכונות פונקציה אופיינית

31..... **אי-שיויונות**

31..... אי-שיויון צ'בישב

31..... אי-שיויון מרקוב

31..... אי-שיויון ינסן

32..... אי-שיויון צ'רנוף

33..... **וקטור אקראי בדיד**

33..... הגדרה

33..... תכונות של פונקציית הסתברות של וקטור אקראי בדיד

33..... פונקציית הסתברות משותפת ופונקציית הסתברות שולית

35..... **וקטור אקראי רציף**

35..... הגדרה

35..... תכונות פונקציית הצפיפות המשותפת

35..... פונקציית צפיפות משותפת ופונקציית צפיפות שולית

36..... **פונקציית התפלגות של וקטור אקראי**

36..... הגדרה

36..... תכונות פונקציית ההתפלגות של וקטור אקראי

37..... הקשר בין פונקציית ההתפלגות לפונקציית הצפיפות של וקטור אקראי  $(X, Y)$

38..... **וקטור אקראי בלתי תלוי**

39..... **קונבולוציה**

39..... הגדרה

39..... סכום משתנים מקרים

39..... קונבולוציות מוכרות

40..... **התפלגויות מיוחדות**

40..... התפלגות חי בריבוע

40..... צפיפות ריילי

41..... **התפלגות מינימום ומקסימום**

42..... מינימום בין מ"מ גיאומטריים

42..... מינימום בין מ"מ מעריכיים

43..... **תוחלת של פונקציה של וקטור אקראי**

43..... משפט

43..... **טרנספורמציות של וקטור אקראי**

43..... משפט

44..... **התפלגות מותנית**

44..... הגדרה

44..... פונקציית הצפיפות המותנית

44..... התוחלת המותנית

44..... פונקציית ההסתברות המותנית

44..... הגדרה

44..... פונקציית ההתפלגות המותנית

45..... פונקציית הצפיפות המותנית

45..... פונקציית הצפיפות השולית

45..... משפט – "נוסחת הצפיפות השלמה":

45..... משפט – "נוסחת בייס לצפיפות":

46..... **תוחלת מותנית**

46..... הגדרה

46..... הגדרה

47..... **משפטי החלקה**

47..... משפט החלקה

47..... תוחלת מותנית

47..... הסתברות שלמה לתוחלת

47..... הסתברות שלמה לתוחלת מותנית

47..... שונות מוחלקת

47..... שונות מותנית

48..... **קווריאנס**

48..... הגדרה

48..... תכונות הקווריאנס

49..... **משתנים מקריים בלתי מתואמים**

49..... הגדרה – משתנים מקריים בלתי מתואמים

49..... משפט – הקשר בין מ"מ בלתי-תלויים למ"מ בלתי מתואמים

49..... משפט – שונות מ"מ בלתי מתואמים

49..... **אי-שוויון קושי-שוורץ**

49..... משפט

50..... **קורלציה**

50..... הגדרה

50..... תכונות הקורלציה

51..... **סדרת משתנים מקריים בלתי תלויים מפולגים זהה – i.i.d**

52..... **חוק המספרים הגדולים**

52..... **משפט הגבול המרכזי**

53..... **התפלגות נורמלית רב-מימדית**

53..... טענה – הקשר בין מטריצת A למטריצת הקווריאנס

53..... הגדרה – מטריצה חיובית

54..... שתי טענות על מטריצה חיובית

54..... טענה חשובה

54..... תכונות של וקטור אקראי גאוסי

55..... נירמול וא"ג

55..... משפט

55..... מקסימום של וא"ג

55..... אי-תלות ואי-תאימות בין רכיבי וקטור אקראי גאוסי

56..... שתי טענות חשובות והשגיאות הנפוצות הנלוות להן

56..... **חזאים**

56..... הגדרה – חזאי כללי

56..... הגדרה – חזאי לינארי

57..... **סימולציה**

57..... משפט – סימולציה

57..... אלגוריתם לפתרון שאלות סימולציה

58..... **הקשר בין מ"מ מעריכי, גאמא ופואסון**

58..... משפט – הקשר בין פואסון למעריכי

58..... משפט – הקשר בין מעריכי לפואסון

58..... משפט – הקשר בין מעריכי לגאמא

58..... נוסחת הסתברות הזנב הימיני

59..... **סטטיסטי הסדר**

60..... סטטיסטי הסדר עבור התפלגות אחידה

60..... **התפלגות בטא**

61..... התפלגות בטא עבור סטטיסטי הסדר מפולגים באחידות

61..... תוחלת מ"מ בטא

# הקדמה

שלום,

לפניכם חוברת הניתנת לכל מי שצופה בקורס עם חן הררי באתר סטאדיס [www.Studies.co.il](http://www.Studies.co.il). נא קראו בעיון את הדברים הבאים לפני שאתם מתחילים לעבוד עם החוברת.

## איך לעבוד נכון עם חוברת סיכום קורס?

1) יש הבדל מהותי בין סיכום שלכם לבין סיכום של מישהו אחר – סיכום שלנו תמיד נקלט הרבה יותר טוב בראש שלנו מאשר סיכום של מישהו אחר, ולכן כדי שהסיכום הזה יקלט טוב, אני מציע לכם בחום לעבוד לפי עקרון מוביל אחד וחשוב: להפוך את הסיכום הזה – לשלכם.

אז איך עושים את זה? באופן הבא:

**מדגשים**, מקיפים, ממרקרים, ממלבנים, כותבים הערות קטנות בצד וכד'.

זה נכון רק כאשר מרחב המדגם הוא סימטרי!

$$P(A) = \frac{|A|}{|\Omega|}$$

וגם כותבים ממש על גבי הנוסחאות עצמן כמו למשל כך:

ובקיצור עושים כל מה שצריך כדי להפוך את הסיכום הזה לשלכם.

2) אחד המפתחות להצלחה בקורס הזה הוא: לשנן, לשנן, ואז עוד קצת לשנן. לפעמים שואלים אותי – חן, מה אנחנו בשיעור היסטוריה? מה לשנן, זו מתמטיקה! אז אני תמיד עונה: "המתמטיקה בנויה על שלוש רגליים – הבנה, תרגול ושינון" (ולא ניתן להתחמק מהרגל השלישית!).

בקורס אנחנו עובדים על שני החלקים הראשונים: הבנה ותרגול.

שינון – זה עליכם. והחוברת הזאת נועדה בדיוק בשביל זה. השינון נועד לתת לכם רצף מחשבתי כדי שתוכלו לנסח דרך פתרון קוהרנטית טבעית ורציפה ללא צורך לעבור דרך חיפוש נוסחה כזאת או אחרת בדף הנוסחאות. משננים ואז הכל נמצא בראש שלנו ויכול להישלף מהזיכרון בקלות בשעת מבחן.

בהצלחה!

## מושגי בסיס

### קומבינטוריקה

#### תמורות

מספר האפשרויות לסדר  $n$  עצמים שונים בשורה הוא  $n!$

דוגמא: כמה אפשרויות ישנן להושיב 6 ילדים בשורה?

תשובה:  $6! = 720$

מספר האפשרויות לסידור  $n$  עצמים שונים במעגל הוא  $(n-1)!$

דוגמא: בכמה אופנים ניתן להושיב 6 אורחים סביב שולחן עגול?

תשובה: נושיב את אחד האורחים, אין חשיבות לאיפה הוא יושב כי השולחן עגול. כעת נותר לסדר 5 אורחים ביחס אליו (יצרנו "עוגן" לבעיה), במילים אחרות שאר חמשת האורחים מתיישבים למעשה על "ספסל" (אומנם מעוגל) בן 5 מקומות, לכן מספר האפשרויות להושיב אותם הוא  $5! = 120$

#### תמורות עם חזרות

מספר האפשרויות לסידור  $n$  עצמים מ- $m$  סוגים שונים בשורה:  $k_1$  עצמים מסוג 1,  $k_2$  עצמים מסוג

$$2, \dots, k_m \text{ עצמים מסוג } m, \text{ כך ש- } k_1 + k_2 + \dots + k_m = n \text{ הוא } \frac{n!}{k_1! k_2! \dots k_m!}$$

דוגמא: ישנם 9 כדורים בשק. 4 אדומים, 3 כחולים ו-2 ירוקים. כמה אפשרויות ישנן לסדר אותם בתשעה תאים (כאשר כל תא יכול להכיל עד כדור אחד בלבד)?

$$\frac{9!}{4!3!2!} = 1260 \text{ תשובה}$$

### חליפות

מספר האפשרויות לבחור  $k$  עצמים מתוך  $n$  עצמים, עם חשיבות לסדר וּללא חזרות, מסומן ע"י  ${}^n P_k$ ,

$${}^n P_k = \frac{n!}{(n-k)!} \quad \text{כאשר:}$$

דוגמא: כמה אפשרויות ישנן לסדר 3 כדורים שונים זה מזה בחמישה תאים (כאשר בכל תא יכול להיכנס עד כדור אחד בלבד)?

תשובה: בבעיה זו הסדר משנה (כי צבעי הכדורים שונים זה מזה) ואין חזרות (כי לא ניתן לחזור על בחירה של תא מסוים ולהכניס לשם יותר מכדור אחד), לכן זו בעיית חליפות והתשובה היא:

$${}^5 P_3 = \frac{5!}{(5-3)!} = \frac{5!}{2!} = 5 \cdot 4 \cdot 3 = 60$$

### צירופים

מספר האפשרויות לבחור  $k$  עצמים מתוך  $n$  עצמים, ללא חשיבות לסדר וּללא חזרות, מסומן ע"י

$${}^n C_k = \frac{n!}{(n-k)!k!} \quad \text{כאשר: } {}^n C_k$$

דוגמא: כמה אפשרויות ישנן לסדר 3 כדורים זהים זה לזה בחמישה תאים (כאשר בכל תא יכול להיכנס עד כדור אחד בלבד)?

תשובה: בבעיה זו הסדר לא משנה (כי צבעי הכדורים זהים זה לזה) ואין חזרות (כי לא ניתן לחזור על בחירה של תא מסוים ולהכניס לשם יותר מכדור אחד), לכן זו בעיית צירופים והתשובה היא:

$${}^5 C_3 = \frac{5!}{(5-3)!3!} = \frac{5!}{2!3!} = 10$$

### חליפות עם חזרות

מספר האפשרויות לבחור  $k$  עצמים מתוך  $n$  עצמים, עם חשיבות לסדר ועם חזרות הוא  $n^k$ .

דוגמא: כמה אפשרויות ישנן לפיצוח קוד נעילה בן 4 ספרות לנייד?

תשובה: בבעיה זו ישנן 10 אפשרויות לבחירת כל ספרה (0,1,...,9) מתוך ארבעת הספרות של הקוד. כמו-כן זו בעיה עם חשיבות לסדר הספרות (הקוד 1234 הוא קוד שונה מאשר 4321 למשל) ועם חזרות (הקוד 1111 למשל הוא לגיטימי) ולכן זו בעיית חליפות עם חזרות והתשובה היא:  $10^4 = 10,000$ .

דוגמא נוספת: סדרה בינארית היא סדרה שמכילה רק אפסים ואחדים. כמה אפשרויות ישנן ליצור סדרה בינארית באורך  $n$ ? תשובה:  $2^n$



**צירופים עם חזרות**

מספר האפשרויות לבחור  $k$  עצמים מתוך  $n$  עצמים, ללא חשיבות לסדר ועם חזרות, הוא:

$$\binom{n+k-1}{k} = \frac{(n+k-1)!}{k!(n-1)!}$$

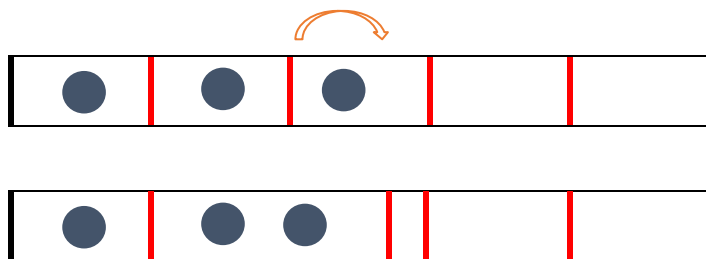
דוגמא

כמה אפשרויות ישנן לסדר 3 כדורים זהים לזה ב- 5 תאים, כך שקיבולת כל תא אינה מוגבלת?

**שיטת המחיצות הנעות (Stars and bars)**

תשובה:

במקום לחשוב על מבנה של תאים קשיחים, נחשוב על תא אחד ארוך עם מחיצות פנימיות שיכולות לנוע ולשנות מיקום. למשל, בדוגמא שלנו ישנן חמישה תאים, כלומר ישנן 4 מחיצות שמפרידות בין תא לתא (באדום בשרטוט) ובנוסף לשתי מחיצות בקצוות (בשחור). המחיצות בקצוות לא מעניינות אותנו מכיוון שאותם אנחנו נועלים ולא מזיזים. לעומתן המחיצות הפנימיות ניתנות להזזה.



נערוך ספירת מלאי:

לחמישה תאים ישנן 4 מחיצות נעות זהות.

בנוסף יש לנו בדוגמא 3 כדורים זהים.

לכן בסך הכל יש לנו כאן 7 עצמים שיכולים לנוע ולהתערבב: 4 מחיצות זהות ו- 3 כדורים זהים.

בצורה זו חזרנו לבעיית צירופים קלאסית וכעת ניתן לשאול את השאלה השקולה הבאה:

**כמה אפשרויות ישנן לסדר 3 עצמים זהים מסוג אחד ו- 4 עצמים זהים מסוג שני בשורה?**

והתשובה תהיה:  $\frac{7!}{3!4!} = 35$ . אם לחלופין נרצה לעבוד לפי הנוסחה אזי נאמר כי בבעיה זו הסדר לא משנה (כי צבעי הכדורים זהים זה לזה) ויש חזרות (כי ניתן לחזור על בחירה של תא מסוים ולהכניס לשם יותר מכדור אחד) ולכן זו בעיית צירופים עם חזרות והתשובה היא כאמור:

$$\binom{5+3-1}{3} = \frac{(5+3-1)!}{3!(5-1)!} = \frac{7!}{3!4!} = 35$$

דוגמא כללית להבנת הנוסחה

כמה אפשרויות ישנן לסדר  $k$  כדורים זהים זה לזה ב-  $n$  תאים, כך שקיבולת כל תא אינה מוגבלת?

תשובה

נערוך ספירת מלאי בשיטת המחיצות הנעות:

ל-  $n$  התאים ישנן  $n-1$  מחיצות נעות זהות.

בנוסף ישנם  $k$  כדורים זהים.

בסך הכל ישנם  $n-1+k$  עצמים משני סוגים:  $k$  כדורים ו-  $n-1$  מחיצות. מספר האפשרויות לסידורם

$$\binom{n+k-1}{k} = \frac{(n+k-1)!}{k!(n-1)!} \quad \text{בשורה הוא:}$$

## טבלת סיכום

**טבלת הבחירה – מספר האפשרויות לבחירת k עצמים מתוך n עצמים:**

עם חזרות	ללא חזרות	
<b>חליפות עם חזרות</b> $n^k$	<b>חליפות</b> ${}^n P_k = \frac{n!}{(n-k)!}$	עם חשיבות לסדר
<b>צירופים עם חזרות</b> $\binom{n+k-1}{k} = \frac{(n+k-1)!}{k!(n-1)!}$	<b>צירופים</b> ${}^n C_k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$	ללא חשיבות לסדר

**טבלת התמורות – מספר האפשרויות לסידור n עצמים:**

עם חזרות	ללא חזרות	
<p>סידור n עצמים מ- m סוגים שונים בשורה:</p> $\frac{n!}{k_1! k_2! \dots k_m!}$ <p>, <math>k_1 + k_2 + \dots + k_m = n</math></p>	<p>סידור n עצמים בשורה: <math>n!</math></p> <p>סידור n עצמים במעגל: <math>(n-1)!</math></p>	<b>תמורות</b>

## מושגי בסיס בהסתברות

$\Omega$  = מרחב המדגם, היא קבוצת כל התוצאות האפשריות.

$|\Omega|$  = גודל מרחב המדגם, שווה למספר האיברים שבה.

מרחב מדגם סימטרי – לכל תוצאה במרחב יש הסתברות שווה (מילה המרמזת על כך – "באקראי").

$A \subseteq \Omega$  - תת-קבוצה של מרחב המדגם, היא קבוצת התוצאות הרצויות.

**מסקנה:** במרחב מדגם סימטרי מתקיים:  $P(A) = \frac{|A|}{|\Omega|}$  ("רצוי" חלקי "מצוי").

## אקסיומות פונקציית ההסתברות

פונקציה  $P(x)$  נקראת פונקציית הסתברות אם היא מקיימת את שלושת האקסיומות הבאות:

$$P(\phi) = 0 \quad (1)$$

$$P(\Omega) = 1 \quad (2)$$

(3) אם  $\{A_i \cap A_j = \phi, \forall i \neq j\}$  (כלומר אם  $A_1, A_2, \dots$  מאורעות זרים) אזי:

$$P\left(\bigcup_i A_i\right) = \sum_i P(A_i)$$

כאשר  $\{A_i\}_{i=1}^{\infty}$  קבוצה בת מנייה.

## תכונות הנובעות מאקסיומת ההסתברות

(א) אם  $A \subseteq B$  אזי  $P(A) \leq P(B)$ .

$$P(A^c) = 1 - P(A) \quad (ב)$$

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (ג)$$

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B) + P(C) - [P(A \cap B) + P(A \cap C) + P(B \cap C)] + P(A \cap B \cap C) \quad (\text{ד})$$

**(ד') הכללה:**

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) - [P(A_1 \cap A_2) + \dots + P(A_{n-1} \cap A_n)] + \\ + [P(A_1 \cap A_2 \cap A_3) + \dots + P(A_{n-2} \cap A_{n-1} \cap A_n)] - \dots \pm P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n)$$

כאשר הסימן במחובר האחרון נקבע ע"פ זוגיות  $n$ : אם  $n$  א"ז ניקח מינוס (כמו בתכונה (ב)), אם  $n$  זוגי ניקח פלוס (כמו בתכונה (ג)).

### חוקי דה-מורגן

$$\left( \bigcap_{i=1}^N A_i \right)^C = \bigcup_{i=1}^N A_i^C \qquad \left( \bigcup_{i=1}^N A_i \right)^C = \bigcap_{i=1}^N A_i^C$$

# הסתברויות מותנות

## הסתברות מותנית

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

אם  $P(B) > 0$  אזי:

## נוסחת ההסתברות השלמה

אם  $\Omega = \bigcup_{k=1}^N B_k$  ( $N$  סופי או  $\infty$  בר-מנייה),  $P(B_k) > 0$ ,  $\forall k \neq j, B_k \cap B_j = \emptyset$  אזי:



$$P(A) = \sum_{k=1}^N P(A|B_k)P(B_k)$$

## נוסחת בייס

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

אם  $P(B) > 0$  אזי:

או בניסוח שקול:

אם:  $\Omega = \bigcup_i A_i \Leftrightarrow \sum_i P(A_i) = 1$  כאשר  $A$  סופי או בר-מנייה),

$(\forall i \neq j, A_i \cap A_j = \emptyset) \Leftrightarrow \forall i \neq j, P(A_i \cap A_j) = 0$ ,

$P(A_j) > 0$ ,

אזי:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_j P(B|A_j)P(A_j)}$$

כאשר במכנה מופיע  $P(B) = \sum_j P(B|A_j)P(A_j)$  לפי נוסחת ההסתברות השלמה.

## מאורעות בלתי תלויים

הגדרה:  $A$  ו-  $B$  מאורעות בלתי תלויים זה בזה אם מתקיים:

$$P(A \cap B) = P(A)P(B)$$

הערה: אם בנוסף  $P(B) > 0$  אזי:

$$P(A|B) = P(A)$$

### חוסר תלות בשלוש

$A, B$  ו-  $C$  מאורעות ב"ת בשלוש אם:  $P(A \cap B \cap C) = P(A)P(B)P(C)$ .

הערה: זה לא אומר שהם גם ב"ת בזוגות!

כלומר כדי להוכיח ש-  $\{A, B, C\}$  משפחה של מאורעות ב"ת (גם בזוגות וגם בשלוש), צריך להוכיח

חוסר תלות בין כל הזוגות:

$$P(A \cap B) = P(A)P(B), P(A \cap C) = P(A)P(C), P(B \cap C) = P(B)P(C)$$

וגם חוסר תלות בשלוש:  $P(A \cap B \cap C) = P(A)P(B)P(C)$ .

ניתן להכליל תכונה זאת לחוסר תלות בין משפחה של מאורעות  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$  - כדי להוכיח

ש-  $A$  היא משפחה של מאורעות ב"ת זה בזה צריך להוכיח חוסר תלות לכל תת-קבוצה של  $A$  (זוגות,

שלוש וכן הלאה).

### חוסר תלות המאורעות המשלימים

אם  $(A, B)$  ב"ת אזי גם:  $(A, B^C)$ ,  $(A^C, B)$ ,  $(A^C, B^C)$  מאורעות ב"ת.

## חוסר תלות המאורעות המשלימים לשלשה ב"ת

אם  $(A, B, C)$  ב"ת אזי גם:

$$\text{מאורעות ב"ת.} \begin{cases} (A^c, B^c, C^c), \\ (A^c, B^c, C), (A, B^c, C^c), (A^c, B, C^c) \\ (A^c, B, C), (A, B^c, C), (A, B, C^c) \end{cases}$$

## חוסר תלות המאורעות המשלימים ל- $n$ -יה בלתי תלויה

אם  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$  ב"ת אזי גם  $(B_1, B_2, \dots, B_n)$  ב"ת כאשר  $B_i = \{A_i \text{ or } A_i^c\}$ .

בסך הכל ישנן  $2^n$  אפשרויות של  $n$ -יות בלתי תלויות.

## הסתברות מותנית למאורע משלים

$$P(A^c | B) = 1 - P(A | B)$$



## משתנים מקרים בדידים

הגדרה:  $X$  הוא משתנה מקרי (מ"מ) בדיד אם הטווח שלו סופי או ניתן להימנות.

$P_X(k)$  היא פונקציית ההסתברות של  $X$  ומתארת את פריסת ההסתברויות של תוצאות  $X$ .

תכונות של פונקציית הסתברות של מ"מ בדיד

$$(1) \quad \forall k, P_X(k) \geq 0$$

$$(2) \quad \sum_k P_X(k) = 1$$

## משתנים מקרים רציפים

הגדרה:  $X$  הוא משתנה מקרי (מ"מ) רציף בהחלט אם קיימת פונקציה  $f_X(x)$  כך ש-

$$P(a < X < b) = \int_a^b f_X(x) dx$$

כאשר  $f_X(x)$  נקראת פונקציית הצפיפות של  $X$ .

### הערות

(1) אם  $X$  מ"מ רציף אזי  $P(X = a) = 0$ .

(2) אם  $X$  מ"מ בדיד אזי האינטגרל הופך לסכום:

$$P(a \leq X \leq b) = \sum_{a \leq k \leq b} P_X(k) = \sum_{a \leq k \leq b} P(X = k)$$

תכונות של פונקציית הסתברות של מ"מ רציף

$$(1) \quad f_X(x) \geq 0$$

$$(2) \quad P(\overbrace{-\infty < X < \infty}^{\Omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx = 1$$

(3) פונקציית הצפיפות נקבעת היחידות עד כדי מספר סופי או ניתן להימנות של נקודות.

טבלת משתנים מקרים בדידים נפוצים

הסתברות	שונות $var(x) = \sigma^2$	תוחלת $EX = \mu$	פונקציית ההסתברות	מטרה	סימון $X \sim$	מח"ש $X$
$q = 1 - p$	$pq$	$p$	$P_x(k) = \begin{cases} p, & k=1 \\ q, & k=0 \end{cases}$	חישוב הנזחה בניסוי כרנאלי בנ"ב	$Bern(p)$	ברנסי
סוג $n$ ניסויים בנ"ב ו- $p$ קבוע $Bin(n, p) \sim pois(\frac{n^2}{p})$ $Bin(n, p) + Bin(m, p) = Bin(n+m, p)$ $Bin(pois(\lambda), p) \sim pois(\lambda p)$ דאטא י"א: $Bin(pois(\lambda), p) \sim pois(\lambda p)$ עבור חישוב הנזכרון:	$npq$	$np$	$P_x(k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}, k=0,1,\dots,n$ 	הסתברות ל- $k$ הצלחות מתוך $n$ ניסויים	$Bin(n, p)$	בינומי
$p(x+k+1 x) = p(x x)$	$\frac{q}{p^2}$	$\frac{1}{p}$	$P_x(k) = pq^{k-1}, k=1,2,\dots$ 	הסתברות ל- $k$ ניסויים הראשונים עד לראשון בשנייה מתקבל אצלנו	$Geom(p)$	גיאומטרי <small>* חישוב מח"ש פירמאטית בניסויים בנ"ב עם <math>p</math></small>
$pois(\lambda_1) * pois(\lambda_2) = pois(\lambda_1 + \lambda_2)$	$\lambda$	$\lambda$	$P_x(k) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^k}{k!}$  מקום בקנה $k = [n-1]$	$X$ חטף מח"ש בקיץ המבולע במוסולי עם כרמל- $\lambda$	$pois(\lambda)$	פואסוני
		$\mu = np_i$	$P_x(X_1 = n_1, X_2 = n_2, \dots, X_k = n_k) = \frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_k!} p_1^{n_1} p_2^{n_2} \dots p_k^{n_k}$	$\vec{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ $n$ מח"ש חניוניים $k$ מח"ש האקסטריוויט בניסויים $p_i$ = ההסתברות לקבלת טיפוס $i$	$Mult(p_1, p_2, \dots, p_k)$	מולטיפלית
$pasc(r, p) = Geom(p)$ $pasc(r, p) * pasc(s, p) = pasc(r+s, p)$ בהצבר $y = x+r$ כל $k$ (הוא)	$r \cdot \frac{q}{p^2}$	$r \cdot \frac{q}{p}$	$P_x(k) = \binom{k+r-1}{k} p^r q^k = \binom{k+r-1}{r-1} p^r q^k$	$X$ = מס' הנסיונות לכניסה לחדר עם $r$	$NegBin(r, p)$	בינומי שלילי
בהצבר $y = x+r$ כל $k$ (הוא)	$r \cdot \frac{q}{p^2}$	$\frac{r}{p}$	$P_y(k) = \binom{k-1}{k-r} p^r q^{k-r} = \binom{k-1}{r-1} p^r q^{k-r}$	$y$ = מס' הניסויים הראשונים עד להצלחה עם $r$	$pasc(r, p)$	פסק

שונות $var(x) = \sigma^2$	תוחלת $EX = \mu$	פונקציית ההסתברות	מטרה	סימון $X \sim$	מח"ש $X$
$n \frac{D}{N} \cdot \frac{N-D}{N} \cdot \frac{N-n}{N-1}$	$\frac{nD}{N}$	$P_x(k) = \frac{\binom{D}{k} \binom{N-D}{n-k}}{\binom{N}{n}}$ $k=0,1,2,\dots,n$	מספר הצלחות ב- $n$ ניסויים מתוך $N$ הכאושניים בהינתן $D$ הצלחות בסך הכל מתוך $N$	$X \sim HG(N, D, n)$	היפר-גאומטרי

הצורה טובה לביטוי שבין "אין במזרה", כמו הוצאת כדורים משקלם של החברה, כך שהסתברות "הצלחה" כל הניסויים מתחילה.  
הנכנסים היא החברה, הבטוח יותר מוכר לבינומי  $Bin(n, p)$   
 $p = \frac{D}{N}$  קבוע

**טבלת משתנים מקרים רציפים נפוצים**

הערות	שונות $var X = \sigma^2$	תוחלת $EX = \mu$	סוג צ"ח / הצפייה	סמן $X$	מג"ח $X$
<p>אם <math>X \sim U[a, b]</math>, תאריך נתיב</p> <p>דילוק: <math>X = a + (b-a)U[0,1]</math></p> <p>צ"ח: <math>Z = \frac{X-a}{b-a}</math>, <math>Z \sim U[0,1]</math></p>	$\frac{(b-a)^2}{12}$	$\frac{b+a}{2}$	$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & \text{אחרת} \end{cases}$	$U[a, b]$	אחיד
<p>תכונת חוסר הזיכרון:</p> $P(X > t+s   X > t) = P(X > s)$ <p>התוחלת היא <math>k</math>: <math>m_k = \frac{k!}{\lambda^k}</math></p> <p>אם <math>X \sim \text{Exp}(\lambda)</math></p> <p>צ"ח: <math>Z = \lambda X</math></p> <p>טווח: <math>Z \sim \text{Exp}(1)</math></p>	$\frac{1}{\lambda^2}$	$\frac{1}{\lambda}$	$f_X(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$	$\text{Exp}(\lambda)$	אסרטיבי (קאסטינצנאל)
<p><math>m_{2k} = (2k-1)!!</math>, <math>k=1,2,\dots</math></p> <p><math>m_{2k-1} = 0</math></p>	1	0	$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}$	$N(0, 1)$	גאוסית תקינה
<p>אם: <math>Z \sim N(0, 1)</math>, <math>X \sim N(\mu, \sigma^2)</math></p> $P(a < X < b) = P\left(\frac{a-\mu}{\sigma} < Z < \frac{b-\mu}{\sigma}\right)$ <p>טווח: <math>X = \mu + \sigma Z</math></p>	$\sigma^2$	$\mu$	$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$N(\mu, \sigma^2)$	גאוסית כללית
<p><math>\Gamma(r, \lambda) + \Gamma(s, \lambda) = \Gamma(r+s, \lambda)</math></p> <p><math>\Gamma(1, \lambda) = \text{Exp}(\lambda)</math></p>	$\frac{r}{\lambda^2}$	$\frac{r}{\lambda}$	$f_X(x) = \frac{\lambda^r}{(r-1)!} x^{r-1} e^{-\lambda x}$	$\Gamma(r, \lambda)$	גאומטרית

$m_k = \frac{(r+k-1)!}{(r-1)!} \cdot \frac{1}{\lambda^k}$  : המומנט ה- $k$  של מ"מ  $\text{Gamma}(r, \lambda)$

# פונקציית התפלגות

הגדרה: למ"מ  $X$  נגדיר פונקציית התפלגות:  $F_X(x) = P(X \leq x)$ .

## תכונות פונקציית התפלגות

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} F_X(x) = 0 \quad (1)$$

$$P(\overbrace{-\infty < X < \infty}^{\Omega}) = \lim_{x \rightarrow \infty} F_X(x) = 1 \quad (2)$$

(3)  $F_X(x)$  פונקציה לא יורדת.

(4)  $F_X(x)$  רציפה מימין (ערך הפונקציה הוא תמיד הגבול מימין).

(5) אם  $X$  מ"מ רציף (בהחלט) אזי  $F_X(x)$  היא פונקציה רציפה.

$$P(X = x) = F_X(x) - \lim_{y \rightarrow x^-} F_X(y) \quad (6)$$

ערך הקפיצה של  $F_X(x)$  בנקודה  $x$  (אם  $X$  מ"מ

בדיד אזי מקבלים את ההסתברות לקבל ערך  $x$ , אם  $X$  מ"מ רציף אזי מקבלים  $P(X = x) = 0$ ,

לכן (6) גורר את (5)).

## משפט – הקשר בין פונקציית ההתפלגות לפונקציית הצפיפות

אם  $X$  מ"מ רציף אזי:  $F_X'(x) = f_X(x)$  בכל  $x$  בו  $F_X$  גזירה.

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(u) du$$

ניסוח שקול:

## משפט – פירוק פונקציית ההתפלגות לבדיד ורציף

יהי  $X$  מ"מ ותהי  $F_X(x)$  פונקציית ההתפלגות שלו, אזי קיים קבוע  $0 \leq \alpha \leq 1$  וקבוע  $\beta = 1 - \alpha$

וקיימת פונקציית התפלגות בדידה  $F_X^d(x)$  וקיימת פונקציית התפלגות רציפה  $F_X^c(x)$  כך ש-

$$F_X(x) = \alpha F_X^d(x) + \beta F_X^c(x)$$

, כאשר  $\alpha$  שווה לסכום הקפיצות.



# טרנספורמציה של משנה מקרי

## משפט הטרנספורמציה

יהי  $X$  מ"מ בעל צפיפות  $f_X(x)$  ותהי  $h(x)$  פונקציה מונטונית ממש ( $\Leftarrow$  חח"ע) וגזירה בתומך של  $x$ .

$$f_Y(y) = \left[ \left[ h^{-1}(y) \right]' \right] f_X(h^{-1}(y)) \quad \text{נגדיר } Y = h(x) \text{ אזי:}$$

הערה חשובה: מ"מ שומר על סוגו (אחיד/בינומי/... וכד') תחת טרנספורמציה לינארית.

## משפט הטרנספורמציה – הרחבה

יהי  $X$  מ"מ בעל צפיפות  $f_X(x)$  ותהי  $Y = h(x)$  פונקציה גזירה כך שלכל  $y$  יש מספר סופי של

מקורות  $x_1, x_2, \dots, x_k$  (בתומך של  $X$ ) בהתאם, אזי לכל  $y$  קיימות פונקציות הפוכות:

$$f_Y(y) = \sum_i^k \left[ \left[ h_i^{-1}(y) \right]' \right] f_X(h_i^{-1}(y))$$

## אלגוריתם לתרגילי טרנספורמציה

יהי  $X$  מ"מ, ו-  $Y = h(X)$  טרנספורמציה שלו. רוצים את פונקציית הצפיפות של  $Y$ :  $f_Y(y) = ?$ .

(1) שרטוט הטרנספורמציה – נשרטט את פונקציית הטרנספורמציה  $Y = h(X)$  (שימו-לב אילו ערכים  $Y$  יכול לקבל).

(2) חישוב פונקציית ההתפלגות – נרצה לחשב את פונקציית ההתפלגות של  $Y$ . לפי ההגדרה מתקיים כי:

$$F_Y(y) = P(Y \leq y) = P(h(X) \leq y)$$

שימו-לב, זאת שאלה הסתברותית ששואלת: לאילו ערכים של  $X$ , גרף הפונקציה  $Y = h(X)$  נמצא

מתחת לגרף הקו האופקי  $Y = y$ .

(3) חלוקה לפי תחומים של  $y$  – נפתור את השאלה ההסתברותית לעיל בהתאם לערכים השונים ש-  $Y = y$

יכול לקבל. נעזר בגרף הטרנספורמציה ובגרף פונקציית הצפיפות  $f_X(x)$ .

(4) בדיקה – נבדוק כי פונקציית ההתפלגות שקיבלנו תואמת את תכונות פונקציית התפלגות (מונוטונית לא יורדת,

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} F_Y(y) = 0, \lim_{x \rightarrow \infty} F_Y(y) = 1 \text{ (רציפות מימין וכו').}$$

(5) גזירה – לקבלת הצפיפות נגזור את ההתפלגות:  $f_Y(y) = F_Y'(y)$ .

### אלגוריתם לתרגילי טרנספורמציה עם שני משתנים

יהי  $(X, Y)$  וקטור אקראי עם פונקציית צפיפות משותפת  $(x, y) \in D$ ,  $f_{X,Y}(x, y)$  ויהי וקטור

הטרנספורמציה  $(U, V) = (h_1(X), h_2(X))$ . רוצים את פונקציית הצפיפות המשותפת של  $(U, V)$ :

$$f_{U,V}(u, v) = ?$$

נעבוד לפי השלבים הבאים:

(1) הפיכת הקשר – נגדיר מערכת של שני מ"מ ונהפוך את הקשר ביניהם.

(2) חישוב היעקביאן – נחשב את יעקביאן המערכת

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}$$

(3) נוסחת הטרנספורמציה – נשתמש בנוסחת הטרנספורמציה:

$$f_{U,V}(u, v) = |J| f_{X,Y}(x(u, v), y(u, v)), \quad (u, v) \in \Delta$$

(4) התחום החדש – נעבור מהתחום  $D$  במישור  $xy$  לתחום  $\Delta$  במישור  $uv$ .

# תוחלת

**הגדרה (בדיד):** יהי  $X$  מ"מ בדיד בעל הסתברות  $P_X(k)$ . התוחלת של  $X$  היא:

$$EX = \sum_k k P_X(k)$$

\*כאשר סוכמים על מספר סופי או ניתן להימנות של  $x$ -ים ובתנאי שהסכום מוגדר היטב.

**הגדרה (רציף):** יהי  $X$  מ"מ רציף בעל צפיפות  $f_X(x)$ . התוחלת של  $X$  היא:

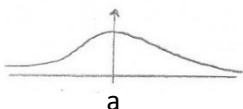
$$EX = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx$$

בתנאי שהאינטגרל מוגדר היטב. נשים-לב כי התוחלת מתפרקת לשני אינטגרלים, כלומר לשני מספרים:

$$EX = \int_{-\infty}^0 x f_X(x) dx + \int_0^{\infty} x f_X(x) dx = I_- + I_+$$

התוחלת יכולה להיות סופית או אינסופית אך כאשר  $I_+ = \infty$  וגם  $I_- = -\infty$  אז היא אינה מוגדרת!

## למה – סימטריית פונקציית צפיפות ההסתברות



אם פונקציית הצפיפות  $f_X(x)$  סימטרית סביב  $a$ :  $f_X(a+x) = f_X(a-x)$

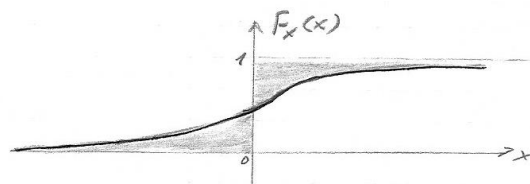
ואם התוחלת קיימת, אזי  $EX = a$ .

## טענה – נוסחת הזנב

השטח מתחת לגרף ההתפלגות עבור  $x \leq 0$  ומעל הגרף עבור  $x > 0$  (כבאיות) שווה לתוחלת של  $X$ .

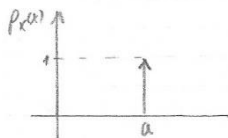
במילים אחרות, אם התוחלת קיימת וסופית אזי:

$$\left. \begin{aligned} I_+ &= \int_0^{\infty} x f_X(x) dx = \int_0^{\infty} (1 - F_X(x)) dx \\ I_- &= \int_{-\infty}^0 x f_X(x) dx = - \int_{-\infty}^0 F_X(x) dx \end{aligned} \right\} \Rightarrow EX = \int_0^{\infty} (1 - F_X(x)) dx - \int_{-\infty}^0 F_X(x) dx$$



$$EX = \sum_{k=1}^{\infty} kP(X = k) = \sum_{k=1}^{\infty} P(X \geq k)$$

יש גם גרסה למ"מ בדיד חיובי (" $I_+$  בדיד"):



**תכונות התוחלת**

(1) אם  $X = a$ , קבוע אזי  $EX = Ea = a$ .

(2)  $E(X + a) = EX + a$  (i)  $E(cX) = cEX$  (ii) , קבוע  $c$ .

$$E(g(x) + h(x)) = E(g(x)) + E(h(x)) \quad (3)$$

**משפטי תוחלת** (ראה משפט ההחלקה)

$$E[E[X | Y]] = EX$$

(1) משפט ההחלקה:

$$E[h(Y)X | Y] = h(Y)E[X | Y]$$

(2) תוחלת מותנית:

$$EX = \sum_i E[X | A_i]P(A_i)$$

(3) הסתברות שלמה לתוחלת:

$$E[X | Y] = \sum_i E[X | Y, A_i]P(A_i | Y)$$

(4) הסתברות שלמה לתוחלת מותנית:

**משתנה מקרי מעורב**

הגדרה:  $X$  נקרא מ"מ מעורב אם פונקציית ההתפלגות שלו ניתנת לכתיבה בצורה הבאה:

$$F_X(x) = \alpha F_X^d(x) + \beta F_X^c(x)$$

כך ש-  $\alpha + \beta = 1$ .

אם  $Y \sim F^{(d)}$  הוא המ"מ הבדיד כאשר  $F^{(d)}$  היא פונקציית ההתפלגות הבדידה שלו,

וכי  $Z \sim F^{(c)}$  הוא המ"מ הרציף כאשר  $F^{(c)}$  היא פונקציית ההתפלגות הרציפה שלו,

אזי נוכל להגדיר את התוחלת של מ"מ מעורב:  $EX = \alpha EY + \beta EZ$



## משפט – תוחלת של פונקציה של משתנה מקרי

יהי  $X$  מ"מ בעל צפיפות  $f_X(x)$  ו-  $Y = h(x)$  פונקציה רציפה פרט למספר סופי של נקודות).

$$EY = Eh(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) f_X(x) dx$$

אם  $EY$  קיימת אזי:

$$EY = Eh(x) = \sum_x h(x) P_X(x)$$

ובמקרה הבדיד:

## מומנטים

הגדרה: יהי  $X$  מ"מ. המומנט מסדר  $k$  של  $X$  הוא:  $m_k = EX^k$

כאשר  $k = 0, 1, 2, \dots$  ובתנאי שתוחלת זו קיימת.

### הערות

(1) אם  $k$  זוגי,  $m_k$  תמיד מוגדר היטב.

(2)  $m_0 = 1$ .

## שוונות

**הגדרה:** יהי מ"מ  $X$  בעל תוחלת  $EX = \mu$ . השונות של  $X$  היא:

$$\sigma_X^2 = \text{var}(X) = E(X - \mu)^2$$

כאשר **סטיית התקן** מוגדרת להיות:  $\sigma_X = \sqrt{\text{var}(X)}$

**תכונה מהותית של השונות:**  $E(X - \mu)^2 \leq E(X - a)^2$

מכאן נרשום נוסח שקול לשונות:  $\text{var}(X) = EX^2 - (EX)^2$

### תכונות השונות

(1) אם  $X = a$ ,  $a$  קבוע אזי:  $\text{var}(X) = 0$ .

(2) אם  $\text{var}(X) = 0$ , אז קיים קבוע  $a$  כך ש-  $X = a$ .

$$\text{var}(X + a) = \text{var}(X) \quad (3)$$

$$\text{var}(cX) = c^2 \text{var}(X), \quad c \text{ קבוע.} \quad (4)$$

### משפטי שונות

$$\text{var}(Y) = E \text{var}(Y | X) + \text{var}(E(Y | X)) \quad (1) \text{ שונות מוחלקת (ראה סעיף 24.1):}$$

$$\text{var}(Y | X) = E[Y^2 | X] - (E[Y | X])^2 \quad (2) \text{ שונות מותנית (ראה סעיף 24.1):}$$

$$\text{var}(X + Y) = \text{var}(X) + \text{var}(Y) + 2\text{cov}(X, Y) \quad (3) \text{ שונות של סכום מ"מ (ראה סעיף 25):}$$

(4) אם  $X, Y$  בלתי תלויים (למעשה מספיק לדרוש בלתי מתואמים – ראה סעיף 26) אזי:

$$\text{var}(X + Y) = \text{var}(X) + \text{var}(Y)$$

### הערות

(1) נשים-לב כי בסטיית התקן יתקיים:  $\sigma_{cX} = |c| \sigma_X$ .

(2) כדי לבדוק שהשונות מוגדרת היטב מספיק לבדוק שהמומנט השני  $m_2 = EX^2$  קיים וסופי כיוון שזה גורר שהמומנט הראשון קיים וסופי ומכאן גם השונות מוגדרת היטב. ובאופן כללי: אם המומנט מסדר  $n$  קיים וסופי אזי גם המומנט מסדר  $m$  קיים וסופי כך ש-  $m < n$ .

## פונקציה יוצרת מומנטים

הגדרה: יהי  $X$  מ"מ. אזי לכל  $s \in \mathbb{R}$  פונקציית יוצרת המומנטים של  $X$  מוגדרת להיות:

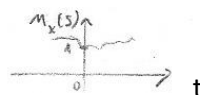
$$M_X(t) = Ee^{tx}$$

### תכונות פונקציה יוצרת מומנטים

(1)  $M_X(t)$  מוגדרת לכל  $t$ .

(2)  $M_X(t)$  יכולה להיות סופית או אינסופית.

(3) נסמן את הקטע:  $I_X = \{t \mid M_X(t) < \infty\}$ , אזי לכל  $x$ , אפס תמיד שייך לקטע:  $0 \in I_X$ ,



ובנוסף  $M_X(0) = 1$ .

טענה:  $I_X$  תמיד קטע (פתוח, סגור, סופי, אינסופי, שילובים שלהם ואף  $I_X = [0, 0] = \{0\}$ ).

הערה: נשים-לב כי פונקציה יוצרת מומנטים היא למעשה התמרת לפלס של פונקציית הצפיפות

$$M_X(t) = Ee^{tx} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} f_X(x) dx = \mathbb{L}[f_X(x)](t) : X \text{ עבור מ"מ } X$$

### משפט – מומנט מסדר k-

נניח ש-  $I_X$  מכיל קטע פתוח סביב  $t = 0$  ( $(-\delta, \delta) \subset I_X$ ) וש-  $M_X(t)$  גזירה  $k$  פעמים ב-

$$m_k = M_X^{(k)}(t) \Big|_{t=0} : t = 0 \text{ אזי קיים המומנט מסדר } k \text{ של } X \text{ ומתקיים:}$$

למשל נשים-לב כי:

$$m_1 = M_X'(0) = EX \quad \text{התוחלת:}$$

$$m_2 = M_X''(0) = EX^2 \quad \text{השונות (אם } EX = 0 \text{):}$$

### שימושים

אם ניתן לכתוב את  $M_X(t)$  כטור מהצורה:  $\sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n$ , כאשר הפיתוח נכון עבור סביבה כלשהי

באפס:  $t \in (-\delta, \delta)$ , אזי המומנט ה-  $n$  הוא:  $m_n = n! a_n$ .

**פונקציות יוצרות מומנטים ידועות**

המומנט ה- $k$ : $m_k = EX^k$	פי"ח	מ"ח
	$M_X(t) = e^{-\lambda(1-e^t)}$	$X \sim Pois(\lambda)$
	$M_X(t) = (q + pe^t)^n$	$X \sim Bin(n, p)$
	$M_X(t) = \begin{cases} \frac{pe^t}{1-qe^t} & , t < \ln\left(\frac{1}{q}\right) \\ \infty & , else \end{cases}$	$X \sim Geom(p)$
	$M_X(t) = \begin{cases} \left(\frac{pe^t}{1-qe^t}\right)^r & , t < \ln\left(\frac{1}{q}\right) \\ \infty & , else \end{cases}$	$X \sim Pasc(r, p)$
$EX^k = \frac{k!}{\lambda^k}$	$M_X(t) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda - t} & , t < \lambda \\ \infty & , else \end{cases}$	$X \sim Exp(\lambda)$
$EX^k = \frac{(r+k-1)!}{(r-1)!} \cdot \frac{1}{\lambda^k}$	$M_X(t) = \left(1 - \frac{t}{\lambda}\right)^{-r}$	$X \sim Gamma(r, \lambda)$
$EZ^{2k} = (2k-1)!!$ $EZ^{2k-1} = 0$ $k = 1, 2, \dots$	$M_X(t) = e^{t\mu + \frac{1}{2}t^2\sigma^2}$ $M_Z(t) = e^{\frac{1}{2}t^2}$	$X \sim N(\mu, \sigma^2)$ $Z \sim N(0, 1)$
	$M_X(t) = \frac{e^{tb} - e^{ta}}{t(b-a)}$	$X \sim U(a, b)$

## טרנספורמציה של פי"מ – תכונות

(1) ישנה התאמה חח"ע בין פי"מ של מ"מ לבין התפלגות שלו.

(2) יהי  $X$  מ"מ ו-  $Y = aX + b$ , אזי:  $M_Y(t) = Ee^{t(ax+b)} = e^{bt} M_X(at)$

(3) יהיו  $X_1, X_2, \dots, X_n$  מ"מ ב"ת ו-  $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ , אזי:

$$M_Y(t) = M_{X_1}(t) \cdot M_{X_2}(t) \cdot \dots \cdot M_{X_n}(t)$$

אם המשתנים הם גם שווי התפלגות (כלומר i.i.d) אזי:  $M_Y(t) = (M_{X_1}(t))^n$

ואם הם גם בעלי תוחלת 0 ושונות 1, אזי  $M_{\frac{Y}{n}}(t) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} e^{\frac{t^2}{2}}$ , שזו בדיוק פי"מ של מ"מ נורמלי סטנדרטי

$.N(0,1)$

## פונקציה אופיינית

הגדרה: יהי  $X$  מ"מ, נגדיר פונקציה אופיינית:  $\varphi_X(t) = Ee^{itx}$

הערה: נשים-לב כי פונקציה יוצרת מומנטים היא למעשה התמרת פורייה של פונקציית הצפיפות

$$\varphi_X(t) = Ee^{itx} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{itx} f_X(x) dx = \mathbb{F}[f_X(x)](t) : X \text{ עבור מ"מ } f_X(x)$$

### תכונות פונקציה אופיינית

$$(1) \varphi_X(t) \text{ מוגדר וסופי לכל } t.$$

$$(2) |\varphi_X(t)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} e^{itx} f_X(x) dx \right| \leq \int_{-\infty}^{\infty} |e^{itx}| |f_X(x)| dx \leq \int_{-\infty}^{\infty} |f_X(x)| dx = 1 \text{ (כי } |e^{itx}| \leq 1 \text{)} , \varphi_X(0) = 1$$

$$(3) \text{ בהנחה ש- } \varphi_X^{(k)}(t) \text{ קיימת אזי מתקיים: } \varphi_X^{(k)}(0) = i^k m_k.$$

$$(4) \text{ אם } X \text{ ו- } Y \text{ ב"ת אזי: } \varphi_{X+Y}(t) = \varphi_X(t) \varphi_Y(t)$$

$$(5) \varphi_{aX+b}(t) = e^{itb} \varphi_X(at)$$

## אי-שיויונות

### אי-שיויון צ'בישב

יהי  $X$  מ"מ בעל תוחלת  $EX = \mu$  וסטיית תקן  $\sigma_X = \sigma$  אזי:

$$(1) \quad P(|X - \mu| > b) \leq \frac{\sigma^2}{b^2}$$

במילים: ההסתברות ש-  $X$  חורג מהתוחלת שלו ביותר מ-  $b$  יחידות, חסומה מלמעלה על-ידי השונות

מחולקת ב-  $b^2$ . בהצבת: " $a$  סטיות תקן"  $b = a\sigma$  מקבלים:

$$(2) \quad P(|X - \mu| > a\sigma) \leq \frac{1}{a^2}$$

כאשר (1) ו- (2) שקולים. הערה: ככל ש-  $b$  גדול יותר כך אי-השיויון מדויק יותר.

### אי-שיויון מרקוב

$$P(|X| \geq a) \leq \frac{E|X|}{a}$$

לכל  $a > 0$

אם  $\varphi(x)$  פונקציה מונוטונית עולה לכל  $x \geq 0$ ,  $a \geq 0$  ו-  $\varphi(a) > 0$  אזי:

$$P(|X| \geq a) \leq \frac{E\varphi(|X|)}{\varphi(a)}$$

### אי-שיויון ינסן

יהי  $X$  מ"מ ו-  $h(x)$  פונקציה קמורה (מחייכת  $\cup$ ):  $h''(x) > 0$ , בהנחה שהתוחלות קיימות

$$Eh(X) \geq h(EX)$$

וסופיות מתקיים:

דוגמא:  $h(x) = x^2$  פונקציה קמורה לכל  $x$ , אזי לפי א"ש ינסן:  $EX^2 \geq (EX)^2$ , ואכן:

$$EX^2 - (EX)^2 = \text{var}(X) = \sigma^2 \geq 0$$

תוספת: אם קיים קטע  $I$  כך ש-  $P(x \in I) = 1$ , ו-  $h(x)$  קמורה רק ב-  $I$  אזי המשפט עדיין תקף.

הערה: עבור אותם תנאים אבל עם פונקציה קעורה (בוכייה  $\cap$ ):  $h''(x) < 0$ :  $Eh(X) \leq h(EX)$

### אי-שוויון צ'רנוף

יהי  $X$  מ"מ עם פיי"מ  $M_X(t) = Ee^{tX}$  מוגדרת וסופית כך ש-  $t > 0$ , אזי לכל  $a > 0$  מתקיים:

$$P(X \geq a) \leq M_X(t)e^{-ta}, \quad t > 0$$

### הסבר

מכיוון שפונקציית האקספוננט היא מונוטונית עולה ממש תמיד ניתן לרשום:

$$P(X \geq a) = P(e^X \geq e^a)$$

נשים-לב כי זה ישאר נכון גם לכל מספר  $t > 0$  שנוסיף באופן הבא:

$$P(X \geq a) = P(e^X \geq e^a) = P(e^{tX} \geq e^{ta})$$

כעת אם נפעיל את א"ש מרקוב עבור המ"מ  $e^{tX}$  אזי נקבל:

$$P(X \geq a) = P(e^X \geq e^a) = P(e^{tX} \geq e^{ta}) = \frac{Ee^{tX}}{e^{ta}} = M_X(t)e^{-ta}, \quad t > 0$$

### חסם צ'רנוף

מכיוון שאי-שוויון צ'רנוף נכון לכל  $t > 0$ , נרצה למצוא  $t$  שעבורו הביטוי באגף ימין מינימלי, לכן נוכל לרשום זאת באופן שקול בעזרת האינפימום כך (זה נותן לנו את חסם צ'רנוף):

$$P(X \geq a) \leq \inf_{t>0} \{M_X(t)e^{-ta}\}$$

בצורה אף יותר קומפקטית ושקולה, אפשר גם להשתמש בחוקי חזקות ומכיוון שמתקיים:

$$M_X(t)e^{-ta} = e^{\ln M_X(t)} e^{-ta} = e^{\ln M_X(t) - ta}$$

כמו-כן מכיוון שפונקציית האקספוננט מונוטונית עולה ממש, כדי להביא אותה לערך מינימלי מספיק להביא את המעריך שלה לערך מינימלי ואז נקבל:

$$P(X \geq a) \leq \inf_{t>0} \{M_X(t)e^{-ta}\} = \inf_{t>0} \{e^{\ln M_X(t) - ta}\} = e^{\inf_{t>0} \{\ln M_X(t) - ta\}}$$

וזוהו חסם צ'רנוף.

### הערה

באופן דומה עבור  $t < 0$  מתקבל:

$$P(X \leq a) \leq \inf_{t<0} \{M_X(t)e^{-ta}\}$$



## וקטור אקראי בדיד

הגדרה: נתונים  $n$  משתנים מקריים  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . אזי:

(1) הוקטור  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  נקרא וקטור אקראי (ו"א).

(2) נאמר שוקטור אקראי הוא בדיד אם הוא יכול לקבל רק מספר סופי או ניתן להימנות של ערכים (וקטוריים).

(3) אם  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  וקטור אקראי בדיד, פונקציית ההסתברות שלו נתונה על-ידי:

$$\begin{aligned} P_{X_1, X_2, \dots, X_n}(X_1, X_2, \dots, X_n) &= P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = \\ &= P(\{X_1 = x_1\} \cap \{X_2 = x_2\} \cap \dots \cap \{X_n = x_n\}) \end{aligned}$$

### תכונות של פונקציית ההסתברות של וקטור אקראי בדיד

$$P_{X_1, X_2, \dots, X_n}(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0 \quad (\text{א})$$

$$\sum_{x_1} \dots \sum_{x_n} P_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1 \quad (\text{ב})$$

(ג) אם ו"א  $(X, Y)$  בדיד אזי גם  $X$  בדיד וגם  $Y$  בדיד (וכנ"ל גם למקרה הכללי).

### פונקציית ההסתברות משותפת ופונקציית ההסתברות שולית

עבור ו"א  $(X, Y)$  בדיד מתקיים:

$$P_X(x) = \sum_y P_{XY}(x, y)$$

כאשר  $P_{XY}(x, y)$  נקראת פונקציית ההסתברות המשותפת של  $(X, Y)$ ,

ו-  $P_X(x)$  נקראת פונקציית ההסתברות השולית של  $X$ .

### הכללה

עבור ו"א  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  בדיד מתקיים:

$$P_{X_k}(x_k) = \sum_{X_1, X_2, \dots, X_{k-1}, X_{k+1}, \dots, X_n} P_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

כאשר  $P_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  נקראת פונקציית ההסתברות המשותפת של  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,

ו-  $P_{X_k}(x_k)$  נקראת פונקציית ההסתברות השולית של  $X_k$ .

**הערה:** אם נתונה פונקציית ההסתברות המשותפת, ניתן לחשב ממנה את פונקציית ההסתברות השולית

(לפי הנוסחה לעיל), בעוד שאם נתונות אפילו כל פונקציות ההסתברות השוליות, לא ניתן לדעת מהן את

פונקציית ההסתברות המשותפת!

## וקטור אקראי רציף

**הגדרה:** וקטור אקראי  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  נקרא רציף (בהחלט) אם קיימת פונקציה

$f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  כך שלכל קבוצה "טובה"  $A$  ב-  $\mathbb{R}^n$  מתקיים:

$$P((X_1, X_2, \dots, X_n) \in A) = \int \int \dots \int_A f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

כאשר  $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  היא פונקציית הצפיפות המשותפת של  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ .

### תכונות פונקציית הצפיפות המשותפת

$$f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n = 1 \quad (2)$$

(3) אם ו"א  $(X, Y)$  רציף אזי גם  $X$  רציף וגם  $Y$  רציף (וכנ"ל גם למקרה הכללי).

(4)  $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}$  נקבעת ביחידות עד כדי קבוצות של  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  שנפחן במימד  $n$  שווה לאפס.

### פונקציית צפיפות משותפת ופונקציית צפיפות שולית

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(x,y) dy$$

עבור ו"א  $(X, Y)$  רציף מתקיים:

כאשר  $f_{X,Y}(x,y)$  נקראת פונקציית הצפיפות המשותפת של  $(X, Y)$

ו-  $f_X(x)$  נקראת פונקציית הצפיפות השולית של  $X$ .

**הכללה:** עבור ו"א  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  רציף מתקיים:

$$f_{X_1}(x_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_2 dx_3 \dots dx_n$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{n-1}$

כאשר  $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  נקראת פונקציית הצפיפות המשותפת של  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,

ו-  $f_{X_1}(x_1)$  נקראת פונקציית הצפיפות השולית של  $X_1$  (ובדומה ל-  $X_k$  - שם לא סוכמים על  $k$ ).

השטח הולך וקטן

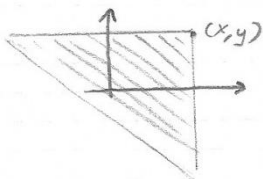


# פונקציית התפלגות של וקטור אקראי

הגדרה: לוקטור אקראי  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  נגדיר פונקציית התפלגות:

$$F_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n)$$

מקרה פרטי  $n = 2$ :



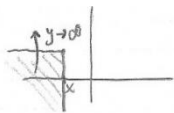
$$F_{X,Y}(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y)$$

## תכונות פונקציית ההתפלגות של וקטור אקראי

(1)  $F_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  לא יורדת בכל רכיב בנפרד (למשל ב-  $n = 2$  זאת-אומרת שאם

$$X_2 \geq X_1 \text{ אזי } F_{X,Y}(x_2, y) \geq F_{X,Y}(x_1, y)$$

ע הולך וגדל ולא קטן  
לקבלים את שתי הצ' המיושר  
למשלם  $x - 8$

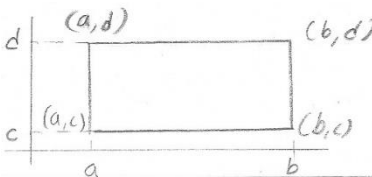


(2) ב-  $n = 2$  :  $\lim_{x \rightarrow -\infty} F_{X,Y}(x, y) = \lim_{y \rightarrow -\infty} F_{X,Y}(x, y) = 0$

(3)  $\lim_{y \rightarrow \infty} F_{X,Y}(x, y) = P(X \leq x) = F_X(x)$

$\lim_{x \rightarrow \infty} F_{X,Y}(x, y) = P(Y \leq y) = F_Y(y)$

(4)  $P((x, y) \in \text{Rectangle}) = F(b, d) - F(a, d) - F(b, c) + F(a, c)$



## הקשר בין פונקציית ההתפלגות לפונקציית הצפיפות של וקטור אקראי

(X, Y)

$$(1) \quad F_{X,Y}(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f_{X,Y}(u, v) du dv$$

$$(2) \quad f_{X,Y}(x, y) = \frac{\partial^2 F_{X,Y}(x, y)}{\partial x \partial y}$$

הכללה:

$$(1) \quad F_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n) = \\ = \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_2} \dots \int_{-\infty}^{x_n} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) du_1 du_2 \dots du_n$$

$$(2) \quad f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial F_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_n}$$

## וקטור אקראי בלתי תלוי

נניח ש-  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  וקטור אקראי רציף או בדיד. נאמר ש-  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  בלתי-תלוי אם:

$$F_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{X_1}(x_1) F_{X_2}(x_2) \dots F_{X_n}(x_n)$$

באופן כללי כאשר יש צפיפות:

$$\text{במקרה הרציף. } f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f_{X_i}(x_i) \Leftrightarrow (X_1, X_2, \dots, X_n) \text{ ו"א ב"ת}$$

$$\text{במקרה הבדיד. } P_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P_{X_i}(x_i) \Leftrightarrow (X_1, X_2, \dots, X_n) \text{ ו"א ב"ת}$$

### הערות

(1) וקטור אקראי אשר התחום בו צפיפותו חיובית הוא לא תחום מלבני מקביל לצירים – משתניו לא ב"ת!

(2) אם  $X$  ו-  $Y$  ב"ת אזי גם  $h(X)$  ו-  $g(Y)$  ב"ת לכל זוג פונקציות דטרמיניסטיות  $h$  ו-  $g$ .

(3)  $X$  ו-  $Y = g(X)$  ב"ת  $\Leftrightarrow \text{Var}(Y) = 0$ .

## קונבולוציה

הגדרה: נתונות שתי פונקציות אינטגרביליות  $g$  ו- $h$ , הפעולה:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} g(u)h(x-u)du = (g * h)(u)$$

נקראת הקונבולוציה של  $g$  ו- $h$ . הערה: נשים-לב כי  $g * h = h * g$

### סכום משתנים מקרים

במקרה הרציף, כאשר נתונות  $f_U(u)$  ו- $f_V(v)$ ,  $U$  ו- $V$  ב"ת, ונגדיר  $X = U + V$  אזי:

$$f_U * f_V = f_{U+V}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_U(s) f_V(x-s) ds$$

ובמקרה הדיסקרטי, כאשר נתונות  $P_U(k)$  ו- $P_V(k)$  חיוביות רק ב- $k$  שלם,  $U$  ו- $V$  ב"ת (בדידים) אזי:

$$P_{U+V}(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} P_U(k) P_V(n-k)$$

### קונבולוציות מוכרות

אם  $X$  ו- $Y$  מ"מ בלתי-תלויים, ומתקיים  $Z = X + Y$ , אזי:

$$\begin{aligned} (1) & \overbrace{Bin(n, p)}^{X \sim} * \overbrace{Bin(m, p)}^{Y \sim} = \overbrace{Bin(n+m, p)}^{Z \sim} \\ (2) & pois(\lambda_1) * pois(\lambda_2) = pois(\lambda_1 + \lambda_2) \\ (3) & Geom(p) * Geom(p) = pasc(2, p) \\ (4) & pasc(r, p) * pasc(s, p) = pasc(r+s, p) \\ (5) & Exp(\lambda) * Exp(\lambda) = Gamma(2, \lambda) \\ (6) & Gamma(r, \lambda) * Gamma(s, \lambda) = Gamma(r+s, \lambda) \\ (7) & N(\mu_X, \sigma_X^2) * N(\mu_Y, \sigma_Y^2) = N(\mu_X + \mu_Y, \sigma_X^2 + \sigma_Y^2) \end{aligned}$$

## התפלגויות מיוחדות

### התפלגות חי בריבוע

יהיו  $n$  מ"מ  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  בלתי-תלויים ומפולגים נורמלי-סטנדרטי, כלומר

$$i \in \{1, 2, \dots, n\}, Z_i \sim N(0, 1)$$

נגדיר את סכום הריבועים של המ"מ לעיל כ-

$$R_n^2 = Z_1^2 + Z_2^2 + \dots + Z_n^2, \quad R_n^2 \in (0, \infty)$$

אזי נאמר כי  $R_n^2$  מפולג "חי בריבוע" (chi-square):  $R_n^2 \sim \chi_n^2$  ומתקיים הקשר הבא:

$$R_n^2 \sim \chi_n^2 = \text{Gamma} \left( \frac{n}{2}, \frac{1}{2} \right)$$

מכאן ניתן להגיע לתוחלת ולשונות של  $R_n^2$ :

$$E[R_n^2] = \frac{r}{\lambda} = \frac{\frac{n}{2}}{\frac{1}{2}} = n$$

$$\text{var}(R_n^2) = \frac{r}{\lambda^2} = \frac{\frac{n}{2}}{\frac{1}{4}} = 2n$$

### צפיפות ריילי

יהיו  $X \sim N(0, 1)$ ,  $Y \sim N(0, 1)$  נורמליים סטנדרטיים בלתי-תלויים.

נגדיר מ"מ:  $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$  אשר מתאר את רדיוס המעגל הנמדד מראשית הצירים.

אזי צפיפות ההסתברות של  $R$  נקראת צפיפות ריילי ונתונה על-ידי:

$$f_R(r) = re^{-\frac{r^2}{2}}, \quad r > 0$$



## התפלגות מינימום ומקסימום

יהיו  $X_1, X_2, \dots, X_n$  מ"מ בלתי-תלויים.

אם נגדיר:  $X_{\min} = \min\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ,  $X_{\max} = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  אזי:

בבואנו לחשב את פונקציית ההתפלגות של שני מ"מ אלו, נזכור שני כללי אצבע:

1. אם המקסימום קטן ממספר כלשהו ( $X_{\max} \leq x$ ), אזי כולם קטנים ממנו.

2. אם המינימום גדול ממספר כלשהו ( $X_{\min} \geq x$ ), אזי כולם גדולים ממנו.

מכאן, ניתן לחשב את פונקציות ההתפלגות (וע"י גזירה את הצפיפות) של שני מ"מ אלו:

פונקציית ההתפלגות של  $X_{\max}$ :

$$\begin{aligned} F_{\max}(x) &= P(X_{\max} \leq x) = \\ &= P(X_1 \leq x, X_2 \leq x, \dots, X_n \leq x) \stackrel{\text{independent}}{=} \\ &= P(X_1 \leq x) \cdot P(X_2 \leq x) \cdot \dots \cdot P(X_n \leq x) = \\ &= F_{X_1}(x) \cdot F_{X_2}(x) \cdot \dots \cdot F_{X_n}(x) \end{aligned}$$

פונקציית ההתפלגות של  $X_{\min}$ :

$$\begin{aligned} F_{\min}(x) &= P(X_{\min} \leq x) = 1 - P(X_{\min} > x) = \\ &= 1 - P(X_1 > x, X_2 > x, \dots, X_n > x) \stackrel{\text{independent}}{=} \\ &= 1 - P(X_1 > x) \cdot P(X_2 > x) \cdot \dots \cdot P(X_n > x) = \\ &= 1 - (1 - F_{X_1}(x)) \cdot (1 - F_{X_2}(x)) \cdot \dots \cdot (1 - F_{X_n}(x)) \end{aligned}$$

### מינימום בין מ"מ גיאומטריים

אם  $X_1 \sim \text{Exp}(p_1)$  ו-  $X_2 \sim \text{Exp}(p_2)$  מ"מ בלתי-תלויים, ומתקיים  $Y = \min(X_1, X_2)$ , אזי:

$$Y \sim \text{Geom}(1 - q_1 q_2)$$

(כאשר  $p + q = 1$ )

### מינימום בין מ"מ מעריכיים

אם  $X_1 \sim \text{Exp}(\lambda_1)$  ו-  $X_2 \sim \text{Exp}(\lambda_2)$  מ"מ בלתי-תלויים, ומתקיים  $Y = \min(X_1, X_2)$ , אזי:

$$Y \sim \text{Exp}(\lambda_1 + \lambda_2)$$

**הכללה:** יהיו  $X_1, X_2, \dots, X_n$  מ"מ ב"ת מעריכיים כך ש-  $X_i \sim \text{Exp}(\lambda_i)$ .

אם  $Y = \min(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , אזי:  $Y \sim \text{Exp}(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)$ .

# תוחלת של פונקציה של וקטור אקראי

## משפט

יהי  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  ו"א בעל צפיפות  $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ו-  $Y = h(x_1, x_2, \dots, x_n)$  אזי:

$$EY = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h(x_1, x_2, \dots, x_n) f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

בתנאי שהתוחלת קיימת.

## מסקנות מהנוסחה (n=2)

(1)  $E(X + Y) = EX + EY$       אם  $(X, Y)$  אזי  $EXY = EX \cdot EY$       (2)

# טרנספורמציות של וקטור אקראי

**משפט:** יהי  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  ו"א בעל צפיפות  $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ותהי

$T(x_1, x_2, \dots, x_n) = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  טרנספורמציה חד-חד-ערכית וגזירה –

$$f_{Y_1, Y_2, \dots, Y_n}(y_1, y_2, \dots, y_n) = \frac{\left| \frac{\partial \vec{x}}{\partial \vec{y}} \right|}{J} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(T^{-1}(y_1, y_2, \dots, y_n)) \quad \text{אזי:}$$

## הערות

(1) המשמעות ש-  $T$  היא טרנספורמציה חד-חד-ערכית וגזירה היא שאם

$$y_1 = h_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad y_2 = h_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad \dots, \quad y_n = h_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

אזי כל פונקציות ה-  $h_i$  גזירות.

(2) עבור  $n = 2$  מקבלים:  $f_{U,V}(u,v) = |J_s(u,v)| f_{X,Y}(T^{-1}(u,v))$

$$|J_s(u,v)| = \begin{vmatrix} x_u' & x_v' \\ y_u' & y_v' \end{vmatrix} \quad \text{כאשר היעקביאן הוא:}$$

## התפלגות מותנית

### הגדרה

$A$  מאורע כך ש-  $P(A) > 0$ ,  $X$  מ"מ. אזי פונקציית ההתפלגות המותנית של  $X$  בהינתן  $A$  היא:

$$F_{X|A}(x|A) = P(X \leq x | A) = \frac{P(\{X \leq x\} \cap A)}{P(A)}$$

פונקציית הצפיפות המותנית של  $X$  בהינתן המאורע  $A$  היא:

$$f_{X|A}(x|A) = \frac{d}{dx} F_{X|A}(x|A)$$

התוחלת המותנית של  $X$  בהינתן המאורע  $A$  היא:

$$E(X | A) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_{X|A}(x|A) dx$$

פונקציית ההסתברות המותנית למ"מ  $X$  בהינתן מאורע  $A$ :

$$P_{X|A}(X = x | A) = \frac{P(\{X = x\} \cap A)}{P(A)}$$

הגדרה:  $(X, Y)$  וקטור אקראי בעל צפיפות משותפת  $f_{X,Y}(x, y)$ , אזי:

פונקציית ההתפלגות המותנית של  $Y$  בהינתן  $X$  היא:

$$F_{Y|X}(y|x) = \frac{\frac{\partial}{\partial x} F_{X,Y}(x, y)}{f_X(x)}$$

פונקציית הצפיפות המותנית של  $Y$  בהינתן  $X$  היא:

$$f_{Y|X}(y|x) = \frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_X(x)}$$

פונקציית הצפיפות השולית של  $Y$  מתוך הו"א  $(X, Y)$  היא:

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(x,y) dx$$

משפט – "נוסחת הצפיפות השלמה":

$$(1) \quad f_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{Y|X}(y|x) f_X(x) dx$$

משפט – "נוסחת בייס לצפיפות":

$$(2) \quad f_{Y|X}(y|x) = \frac{f_{X|Y}(x|y) f_Y(y)}{f_X(x)}$$

# תוחלת מותנית

**הגדרה:** התוחלת המותנית של  $Y$  בהינתן  $X$  היא:  $E(Y | X) = \underbrace{E(Y | X = x)}_{h(x)}|_{x=X}$

כלומר  $E(Y | X)$  הוא בעצמו מ"מ שתלוי ב-  $X$ . אם נשתמש בצפיפות המותנית, נוכל להגיע להגדרה הבאה:

**הגדרה:** התוחלת המותנית של  $Y$  בהינתן  $X$  היא:  $E(Y | X = x) = \int_{-\infty}^{\infty} y f_{Y|X}(y | x) dy$

נפתח את הנוסחה, נעזר במשפטים לעיל (1) ("צפיפות שלמה") ו- (2) ("בייס לצפיפות"):

$$E(Y | X) = \int_{-\infty}^{\infty} y f_{Y|X}(y | x) dy \stackrel{(2)}{=} \int_{-\infty}^{\infty} y \frac{f_{X|Y}(x | y) f_Y(y)}{f_X(x)} dy =$$

$$= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y f_{X|Y}(x | y) f_Y(y) dy}{f_X(x)} \stackrel{(1)}{=} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y f_{X|Y}(x | y) f_Y(y) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} f_{X|Y}(y | x) f_Y(x) dy}$$

$$E(Y | X) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y f_{X|Y}(x | y) f_Y(y) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} f_{X|Y}(y | x) f_Y(x) dy}$$

קיבלנו:

## משפטי החלקה

$$E[E[X|Y]] = EX$$

משפט ההחלקה:

$$E[h(Y)X|Y] = h(Y)E[X|Y]$$

תוחלת מותנית:

$$EX = \sum_i E[X|A_i]P(A_i)$$

הסתברות שלמה לתוחלת:

$$E[X|Y] = \sum_i E[X|Y, A_i]P(A_i|Y) \quad \text{הסתברות שלמה לתוחלת מותנית:}$$

$$\text{var}(Y) = E[\text{var}(Y|X)] + \text{var}(E[Y|X])$$

שונות מוחלקת:

$$\text{var}(Y|X) = E[Y^2|X] - (E[Y|X])^2$$

שונות מותנית:

## קווריאנס

### הגדרה

אם המומנטים מסדר 2 של המ"מ  $X$  ו-  $Y$  קיימים וסופיים ( $EX^2, EY^2 < \infty$ ) אזי נגדיר את הקווריאנס:

$$\sigma_{XY} = \text{cov}(X, Y) = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]$$

$$\boxed{\text{cov}(X, Y) = EXY - EXEY}$$
 מכאן נרשום נוסח שקול לקווריאנס:

### תכונות הקווריאנס

$$\sigma_{XX} = \sigma_X^2 \Rightarrow \text{cov}(X, X) = \text{var}(X) > 0 \quad (1)$$

$$\text{cov}(X_1 + X_2, Y) = \text{cov}(X_1, Y) + \text{cov}(X_2, Y) \quad (2)$$

$$\text{cov}(aX, Y) = a \text{cov}(X, Y) \quad (3) \text{ קבוע } a.$$

$$\text{cov}(X, Y) = \text{cov}(Y, X) \quad (4)$$

**סיכום תכונות (2), (3) ו-(4),**  $a, b, c, d$  קבועים:

$$\text{cov}(aX_1 + bX_2, cY_1 + dY_2) = ac \text{cov}(X_1, Y_1) + ad \text{cov}(X_1, Y_2) + bc \text{cov}(X_2, Y_1) + bd \text{cov}(X_2, Y_2)$$

$$\text{cov}(c, Y) = 0 \quad (5) \text{ קבוע } c.$$

$$\text{cov}(X + c, Y) = \text{cov}(X, Y) \quad (6) \text{ קבוע } c.$$



## משתנים מקריים בלתי מתואמים

נשים-לב שאם הקווריאנס מתאפס אזי תוחלת המכפלה מתפרקת למכפלת התוחלות:

$$\text{cov}(X, Y) = 0 \Leftrightarrow EXY = EXEY$$

### הגדרה – משתנים מקריים בלתי מתואמים

$$\text{cov}(X, Y) = 0 \Leftrightarrow (X, Y) \text{ בלתי מתואמים}$$

### משפט – הקשר בין מ"מ בלתי-תלויים למ"מ בלתי מתואמים

$$(X, Y) \text{ בלתי-תלויים} \Leftarrow (X, Y) \text{ בלתי מתואמים}$$

#### הערות

(1) ההיפך לא נכון! כלומר יתכן מצב שבו  $\text{cov}(X, Y) = 0$  אבל  $X, Y$  לא ב"ת.

(2) אם הקווריאנס לא מתאפס אזי  $X, Y$  לא ב"ת (זו דרך טובה להפריך אי-תלות!), כלומר:

$$\text{cov}(X, Y) \neq 0 \Leftarrow (X, Y) \text{ לא ב"ת}$$

### משפט – שונות מ"מ בלתי מתואמים

$$\text{var}(X + Y) = \text{var}(X) + \text{var}(Y) \quad \text{אם } (X, Y) \text{ בלתי מתואמים אזי:}$$

$$\text{כי באופן כללי: } \text{var}(X + Y) = \text{var}(X) + \text{var}(Y) + 2\text{cov}(X, Y)$$

## אי-שוויון קושי-שוורץ

$$|\sigma_{XY}| \leq \sigma_X \sigma_Y$$

משפט: לכל  $X, Y$ :

$$|\text{cov}(X, Y)| \leq \sqrt{\text{var}(X)} \sqrt{\text{var}(Y)}$$

# קורלציה

## הגדרה

אם המומנטים השניים של המ"מ  $X, Y$  קיימים וסופיים ( $EX^2, EY^2 < \infty$ ) והשונויות שלהם חיוביות ממש ( $\text{var}(X), \text{var}(Y) > 0$ ) אזי נגדיר את הקורלציה בין  $X$  ל- $Y$ :

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{var}(X)} \sqrt{\text{var}(Y)}}$$

## תכונות הקורלציה

$$\rho_{X,Y} = \rho_{Y,X} \quad (1)$$

$$\rho_{aX,Y} = \text{sign}(a) \rho_{X,Y} \quad (2)$$

$$\rho_{X+a,Y} = \rho_{X,Y} \quad (3)$$

$$|\rho_{X,Y}| \leq 1 \quad (4) \quad (\text{מסקנה מאי-שוויון קושי-שוורץ})$$

## סדרת משתנים מקריים בלתי תלויים מפולגים זהה – i.i.d

$$X_i = \begin{cases} 1, & p \\ 0, & q \end{cases} \quad \text{נגדיר סדרה של משתנים מקריים בלתי תלויים ומפולגים זהה:}$$

$$\text{כך ש- } EX_i = \mu, \text{ var}(X_i) = \sigma^2.$$

ונגדיר את המ"מ  $S_n$  כ- "מספר ההצלחות ב-  $n$  הניסויים הראשונים":  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$ , אזי:

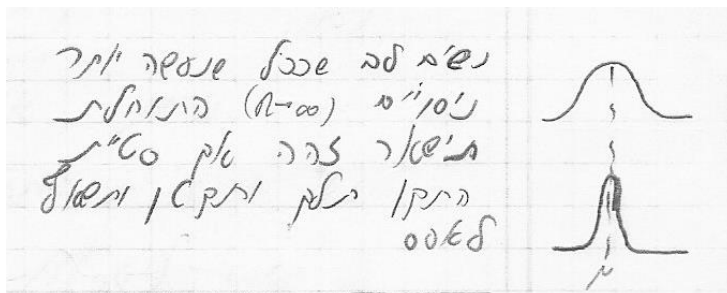
$$\begin{cases} ES_n = E\left[\sum_{i=1}^n X_i\right] = \sum_{i=1}^n EX_i = n\mu \\ \text{var}(S_n) = \text{var}\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = \sum_{i=1}^n \text{var}(X_i) = n\sigma^2 \end{cases}$$

\*מלינאריות התוחלת

\*\*המ"מ ב"ת זה בזה.

נגדיר כעת מ"מ  $Y_n$  - "ממוצע ההצלחות ב-  $n$  ניסויים":  $Y_n = \frac{S_n}{n}$ , אזי:

$$\begin{cases} EY_n = E\frac{S_n}{n} = \frac{n\mu}{n} = \mu \\ \text{var}(Y_n) = \text{var}\left(\frac{S_n}{n}\right) = \frac{1}{n^2} \text{var}(S_n) = \frac{1}{n^2} n\sigma^2 = \frac{\sigma^2}{n} \end{cases}$$



## חוק המספרים הגדולים

תהי  $\{x_i\}_{i=1}^{\infty}$  סדרה של משתנים מקריים *i.i.d* כך ש-  $EX_i = \mu$ ,  $\text{var}(X_i) = \sigma^2$ , אזי לכל  $\delta > 0$ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{S_n}{n} - \mu\right| > \delta\right) = 0$$

ואומרים: " $\frac{S_n}{n} \rightarrow \mu$ " בהסתברות"

### מסקנה

נניח ש-  $P(A) = p$ . אם נחזור על הניסוי הרבה פעמים ונספור את המספר היחסי של הפעמים שהצלחנו, אז כאשר  $n$  גדול, המספר היחסי בו  $A$  מתמשש קרוב ל-  $p$ .

## משפט הגבול המרכזי

תהי  $\{x_i\}_{i=1}^{\infty}$  סדרה של משתנים מקריים *i.i.d* כך ש-  $EX_i = \mu$ ,  $\text{var}(X_i) = \sigma^2$ , ונגדיר את

המ"מ  $S_n$  כ- "מספר ההצלחות ב-  $n$  הניסויים הראשונים":  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$ .

(א) אם נניח  $\mu = 0$  אזי: " $\frac{S_n}{\sqrt{n}} \rightarrow N(0, \sigma^2)$ " בהתפלגות".

המשמעות היא שפונקציות ההתפלגות של  $\frac{S_n}{\sqrt{n}}$  שואפות לזו של גאوسی  $N(0, \sigma^2)$ .

(ב) אם נניח  $\mu$  כלשהו אזי: " $\frac{S_n - n\mu}{\sqrt{n}} \rightarrow N(0, \sigma^2)$ " בהתפלגות".

המשמעות היא שאם  $X$  הוא מ"מ כלשהו בעל תוחלת  $\mu$  ושונות  $\sigma^2$  ויש סיבה לחשוב עליו כסכום של מספר גדול של מ"מ *i.i.d*, אזי אפשר לבצע את הקירוב:

$$X \sim N(\mu, \sigma^2) = N(n\mu_i, n\sigma_i^2)$$

## התפלגות נורמלית רב-מימדית

וקטור אקראי (ו"א):  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  נקרא וקטור אקראי גאוס (וא"ג) אם קיימת מטריצה  $A$

$$f_{\vec{X}}(\vec{x}) = ce^{-\frac{1}{2}(\vec{x}-\overline{EX})^T A(\vec{x}-\overline{EX})}$$

כך ש:

$\vec{X}$  נקרא וא"ג סימטרי אם וקטור התוחלות שלו אפס:  $\overline{EX} = \vec{0}$  ואז פונקציית הצפיפות שלו היא:

$$f_{\vec{X}}(\vec{x}) = ce^{-\frac{1}{2}\vec{x}^T A\vec{x}}$$

### טענה – הקשר בין מטריצת $A$ למטריצת הקווריאנס

אם  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  וא"ג (סימטרי או כללי) עם מטריצה  $A$  אזי:  $\sum_{\vec{X}} = A^{-1}$ ,

כאשר  $\sum_{\vec{X}}$  היא מטריצת הקווריאנס של  $\vec{X}$  (ראה סעיף 26, "הרחבה – מטריצת קווריאנס").

$$f_{\vec{X}}(\vec{x}) = ce^{-\frac{1}{2}(\vec{x}-\overline{EX})^T \sum_{\vec{X}}^{-1}(\vec{x}-\overline{EX})}$$

מכאן, אם  $\vec{X}$  וא"ג אזי פונקציית הצפיפות שלו תהיה מהצורה:

$$f_{\vec{X}}(\vec{x}) = ce^{-\frac{1}{2}\vec{x}^T \sum_{\vec{X}}^{-1} \vec{x}}$$

ואם  $\vec{X}$  וא"ג סימטרי אזי פונקציית הצפיפות שלו תהיה מהצורה:

הערה: לא כל  $A$  יכולה לשמש לתבנית הריבועית ( $A$  צריכה להיות מטריצה חיובית).

### הגדרה – מטריצה חיובית

מטריצה  $A$  מוגדרת חיובית אם לכל  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ :  $\vec{X}^T A \vec{X} = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j \geq 0$

ושיוויון מתקיים רק עבור  $(X_1, X_2, \dots, X_n) = (0, 0, \dots, 0)$ .

### שתי טענות על מטריצה חיובית

(1) מטריצה  $A$  מוגדרת חיובית  $\Leftrightarrow$  כל הערכים העצמיים (ע"ע) של  $A$  חיוביים (ונזכור כי הערכים העצמיים של מטריצה סימטרית הם ממשיים).



(2) מטריצה  $A$  מוגדרת חיובית  $\Leftrightarrow$  כל המינורים הראשיים של  $A$  חיוביים.

טענה חשובה:  $f_{\vec{x}}(\vec{x}) = ce^{-\frac{1}{2}\vec{x}^T A \vec{x}}$  היא פונקציית צפיפות  $\Leftrightarrow A$  מוגדרת חיובית

### תכונות של וקטור אקראי גאوسی

(1) אם  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  וא"ג אזי כל אחד ממשנתנו הוא מא"ג.

(2) אם  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  וא"ג אזי כל תת-וקטור שלו הוא גם וא"ג.

(3) אם  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  וא"ג אזי כל טרנספורמציה לינארית שלו  $Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n$  היא מא"ג.

(4) אם  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  וא"ג ו-  $\vec{Y} = M\vec{X}$  (כאשר  $M$  היא מטריצה לא סינגולרית:  $\det(M) \neq 0$ ), אזי גם  $\vec{Y}$  וא"ג.

(5) אם  $\vec{X}$  וא"ג סימטרי,  $\vec{Y} = M\vec{X}$ , כאשר  $M$  היא מטריצה  $n \times n$  לא סינגולרית ( $\det(M) \neq 0$ ), אזי גם  $\vec{Y}$  הוא וא"ג סימטרי עם פונקציית צפיפות:

$$f_{\vec{y}}(\vec{y}) = c |\det M^{-1}| e^{-\frac{1}{2}(\vec{y}^T M^{-1})^T A (M^{-1}\vec{y})}$$

במילים אחרות:  $\vec{Y}$  הוא גם וא"ג סימטרי עם מטריצה  $\tilde{A} = (M^{-1})^T A (M^{-1})$ .

## נירמול וא"ג

לכל מטריצה מוגדרת חיובית  $A$  יש מטריצה  $B$  מוגדרת חיובית כך ש-  $B^2 = A \iff B = A^{\frac{1}{2}}$  ומכאן נקבל את המשפט הבא:

## משפט

אם  $\vec{X}$  וא"ג סימטרי עם מטריצה  $A$  סימטרית ונגדיר:  $\vec{Y} = A^{\frac{1}{2}} \vec{X}$ , אזי  $\vec{Y}$  וא"ג סימטרי עם מטריצת

$$\text{היחידה: } (M^{-1})^T A (M^{-1}) = A^{-\frac{1}{2}} A^{\frac{1}{2}} A^{\frac{1}{2}} A^{-\frac{1}{2}} = I$$

למשל עבור  $n = 1$ :  $f_X(x) = ce^{-\frac{1}{2\sigma^2}x^2}$ , כלומר  $A = \frac{1}{\sigma^2}$   $\iff A^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sigma}$  ולפי המשפט:

$$X \sim N(0, \sigma^2) \text{ מא"ג, } Y = \frac{1}{\sigma} X \sim N(0, 1) \text{ מא"ג עם מטריצת היחידה.}$$

## מקסימום של וא"ג

המקסימום של פונקציית הצפיפות  $f_{\vec{X}}(\vec{x})$  מתקבל בוקטור התוחלות  $\vec{EX}$ .

## אי-תלות ואי-תאימות בין רכיבי וקטור אקראי גאوسی

באופן כללי ראינו כי מתקיים:

$$X_i, X_j \text{ בלתי-תלויים} \iff X_i, X_j \text{ בלתי מתואמים}$$

אבל בתוך משפחת הצפיפויות הגאוסיות החץ הופך לדו-כיווני, כלומר:

$$X_i, X_j \text{ בלתי-תלויים} \iff X_i, X_j \text{ בלתי מתואמים} \quad \text{אם } \vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n) \text{ וא"ג אזי לכל } i \neq j$$

במילים אחרות, אם  $X_i, X_j$  הם מ"מ השייכים לוא"ג ומצאנו כי  $\text{cov}(X_i, X_j) = 0$ , אזי הם גם

ב"ת!

**שתי טענות חשובות והשגיאות הנפוצות הנלוות להן**

(1) **היזהרו:** אם  $X$  מא"ג,  $Y$  מא"ג  $\nRightarrow (X, Y)$  וא"ג.

**טענה חשובה:** אם  $X$  מא"ג,  $Y$  מא"ג ו-  $(X, Y)$  **ב"ת**  $\Leftarrow (X, Y)$  וא"ג.

(2) **היזהרו:** אם  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  וא"ג  $\nRightarrow$  רכיביו ב"ת זה בזה.

**טענה חשובה:**  $A$  אלכסונית  $\Leftrightarrow$  רכיביו ב"ת זה בזה.

**הסבר:**  $A$  אלכסונית  $\Leftrightarrow \Sigma_{\vec{X}}$  אלכסונית  $\Leftrightarrow \forall i \neq j: \text{cov}(X_i, X_j) = 0 \Leftrightarrow X_i, X_j$  ב"ת.

או לפי צפיפויות:  $A$  אלכסונית  $\Leftrightarrow \forall i \neq j: f_{X_i, X_j} = f_{X_i} \cdot f_{X_j} \Leftrightarrow X_i, X_j$  ב"ת.

**חזאים**

**הגדרה – חזאי כללי**

$(X, Y)$  וקטור אקראי, החזאי האופטימלי של  $Y$  באמצעות  $X$  הוא:

$$Y = h(x) = E[Y | X = x]$$

כך שלכל פונקציה אחרת  $g$  מתקיים:

$$E(Y - h(X))^2 \leq E(Y - g(X))^2$$

**הערה:** אם  $(X, Y)$  הם ב"ת, אזי  $E[X | Y] = EX$ .

**הגדרה – חזאי לינארי**

$(X, Y)$  וקטור אקראי, החזאי האופטימלי הלינארי של  $Y$  באמצעות  $X$  הוא:

$$Y_L = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\text{var}(X)}(X - EX) + EY$$

$$\frac{Y_L - EY}{\text{var}(Y)} = \rho_{X, Y} \frac{X - EX}{\text{var}(X)}$$

או בצורה אחרת:



# סימולציה

## משפט – סימולציה

יהי  $X$  מ"מ כלשהו עם פונקציית התפלגות  $F_X(x)$  מונוטונית עולה ממש ומספר אקראי  $u \sim U[0,1]$ .

נגדיר  $Y = F_X^{-1}(U)$ , אזי:  $F_X = F_Y$ , כלומר  $Y$  מתפלג כמו  $X$ .

### הסבר

$$F_Y(x) = P(Y \leq x) \stackrel{Y \triangleq F_X^{-1}(U)}{=} P(F_X^{-1}(U) \leq x) \stackrel{F_X \text{ strictly monotonic increasing}}{=} P(U \leq F_X(x)) = F_X(x)$$

$$\Rightarrow F_Y = F_X$$

## אלגוריתם לפתרון שאלות סימולציה

(1) בהינתן מ"מ  $X$  עם פונקציית צפיפות הסתברות  $f_X(x)$  נחשב את פונקציית ההתפלגות שלו:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(t) dt$$

(2) נדגום מספר אקראי  $u \sim U[0,1]$ .

(3) נפתור את המשוואה  $u = F_X(x)$  (כלומר נבודד את  $x$  הפותר את המשוואה).

# הקשר בין מ"מ מעריכי, גאמא ופואסון

$N_t$  – מספר המופעים בקטע  $[0, t]$ .

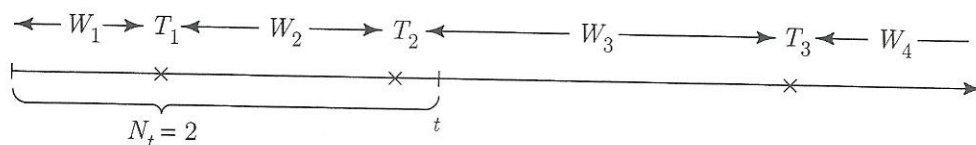
$T_i$  – זמן המופע ה-  $i$ , כאשר  $i = \{1, 2, 3, \dots\}$

$W_i = T_i - T_{i-1}$  – זמן בין מופעים (waiting time).

נשים-לב כי:  $T_i = W_1 + W_2 + \dots + W_i$  (כאשר  $T_0$  מוגדר להיות אפס).

## Section 4.2. Exponential and Gamma Distributions 289

### Summary of Properties of a Poisson ( $\lambda$ ) Arrival Process



תמונה מספר הלימוד Probability של Jim Pitman, עמוד 289

### משפט – הקשר בין פואסון למעריכי

אם  $N_t \sim pois(\lambda t)$  לכל  $t$  וגם  $N_t - N_s$  ב"ת ב-  $N_s$  לכל  $0 \leq s \leq t$ , אזי:

$W_i \sim Exp(\lambda)$  וב"ת זה בזה.

### משפט – הקשר בין מעריכי לפואסון

אם  $W_i \sim Exp(\lambda)$  וב"ת זה בזה, אזי  $N_t \sim pois(\lambda t)$ .

### משפט – הקשר בין מעריכי לגאמא

אם  $W_i \sim Exp(\lambda)$  וב"ת זה בזה, אזי  $T_i \sim Gamma(i, \lambda)$ .

### נוסחת הסתברות הזנב הימיני

$$P(T_i > t) = P(N_t \leq i-1) = \sum_{k=0}^{i-1} e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}$$

במילים: ההסתברות לכך שזמן המופע ה-  $i$  התרחש אחרי זמן  $t$ , שווה להסתברות שהתרחשו לכל היותר  $i-1$  מופעים בקטע  $[0, t]$ .

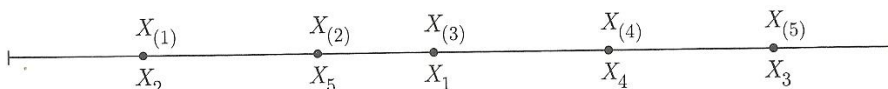
## סטטיסטי הסדר

יהיו  $X_1, X_2, \dots, X_n$  מ"מ מפולגים זהה ובלתי-תלויים (i.i.d).

נסמן ב-  $X_{(1)}$  את הקטן מכל ה-  $X$  ים, את הבא אחריו נסמן ב-  $X_{(2)}$  וכך הלאה:

$$X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)}$$

בצורה זו נסדר את ה-  $X$  ים בסדר עולה כמו למשל באיור הבא:



תמונה מספר הלימוד Probability של Jim Pitman, עמוד 325

נשים-לב למשל שמתקיים בפרט כי:

$$X_{(1)} = \min \{ X_1, X_2, \dots, X_n \}$$

$$X_{(n)} = \max \{ X_1, X_2, \dots, X_n \}$$

נפתח את הנוסחה לצפיפות ההסתברות של  $X_{(k)}$ , כלומר ה-  $X$  ה-  $k$ -י בסדר העולה (כך שיש  $k-1$

$X$  ים קטנים ממנו):

$$\begin{aligned} f_{X_{(k)}}(x) dx &= \\ P(x \leq X_{(k)} \leq x + dx) &= \\ P(x \leq \text{one of the } X\text{'s} \leq x + dx, \text{ exactly } k-1 \text{ of the others } < x) &= \\ \text{identical} &= nP(x \leq X_1 \leq x + dx, \text{ exactly } k-1 \text{ of the others } < x) = \\ \text{independent} &= nP(x \leq X_1 \leq x + dx)P(\text{exactly } k-1 \text{ of the others } < x) = \\ &= nf_{X_1}(x) dx \binom{n-1}{k-1} (F_{X_1}(x))^{k-1} (1 - F_{X_1}(x))^{n-k} \end{aligned}$$

ומכאן קיבלנו את נוסחת צפיפות ההסתברות של  $X_{(k)}$ :

$$f_{X_{(k)}}(x) = nf_{X_1}(x) \binom{n-1}{k-1} (F_{X_1}(x))^{k-1} (1 - F_{X_1}(x))^{n-k}$$

### סטטיסטי הסדר עבור התפלגות אחידה

יהיו  $X_1, X_2, \dots, X_n$  מ"מ בלתי-תלויים ומפולגים זהה (i.i.d) כך ש-  $X_1 \sim U[0,1]$ .

$$f_{X_1}(x) = \begin{cases} 1 & , 0 < x < 1 \\ 0 & , else \end{cases} \quad \text{פונקציית צפיפות ההסתברות הינה:}$$

$$F_{X_1}(x) = \begin{cases} 1 & , x > 1 \\ x & , 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & , x < 0 \end{cases} \quad \text{פונקציית התפלגות ההסתברות הינה:}$$

אם נציב בנוסחה הכללית שקיבלנו נקבל כי פונקציית צפיפות ההסתברות של  $X_{(k)}$  הינה:

$$f_{X_{(k)}}(x) = n \binom{n-1}{k-1} x^{k-1} (1-x)^{n-k}, \quad 0 < x < 1$$

## התפלגות בטא

התפלגות בטא היא למעשה הכללה של ההתפלגות האחידה לעיל ומאותו המבנה. ניקח  $r, s > 0$ , אזי התפלגות בטא על קטע  $(0,1)$  מוגדרת על-ידי הצפיפות הבאה:

$$f_{X_{(k)}}(x) = \frac{1}{B(r,s)} x^{r-1} (1-x)^{s-1}, \quad 0 < x < 1$$

$$B(r,s) = \int_0^1 x^{r-1} (1-x)^{s-1} dx$$

כאשר:

$B(r,s)$ , נקראת פונקציית בטא ומשמשת כקבוע הנרמול אשר גורם לאינטגרל על  $f_{X_{(k)}}(x)$  להיות 1.

## התפלגות בטא עבור סטטיסטי הסדר מפולגים באחידות

אם  $X_1, X_2, \dots, X_n \sim U[0,1]$  מ"מ i.i.d, אזי  $X_{(k)} \sim \text{Beta}(k, n-k+1)$ .

נזכר כי מצפיפות גאמא כי  $\Gamma(r) = (r-1)!$  עבור  $r$  חיובי ושלם, מכאן נקבל נוסחה להערכת פונקציית בטא:

$$B(r, s) = \int_0^1 x^{r-1} (1-x)^{s-1} dx = \frac{\Gamma(r)\Gamma(s)}{\Gamma(r+s)}$$

נוסחה זו תקפה לא רק ל- $r$  ו- $s$  שלמים וחיוביים, אלא לכל  $r$  ו- $s$  חיוביים (לא בהכרח שלמים).

## תוחלת מ"מ בטא

תוחלת של מ"מ  $X_{(k)} \sim \text{Beta}(r, s)$  כללי:  $EX_{(k)} = \frac{r}{r+s}$

תוחלת של מ"מ  $X_{(k)} \sim \text{Beta}(k, n-k+1)$  עבור סטטיסטי הסדר המפולגים באחידות:  $EX_{(k)} = \frac{k}{n+1}$