מתמטיקה בדידה (03681118; 2021B)

רון מיכלמן

תוכן העניינים

חלק I
לוגיקה

הלוגיקה המתמטית היא ענף במתמטיקה שעוסק בביטוי טענות מתמטיות פשוטות ומורכבות. היא מאפשרת הסרת רב משמעות שקיימת בשפות בני אדם ע"י קביעת כללים מדויקים להצגת טענות שונות באופן שניתן להבנה בצורה אחת בלבד. הלוגיקה גם עוסקת במערכות כללים להסקת מסקנות תקפות מתוך נתונים או הנחות שברשותנו.

דוגמה 0.1 (אי־ודאות בשפה)**.** כשאתם במסעדה ומבקשים קולה המלצרית שואלת "האם תרצה רגיל **או** זירו?" כמובן שהמילה או במקרה זה מתייחסת לבחירה בין אחד מהשניים ולא לשניהם, לעומת זאת כששואלים "האם אתה רעב **או** צמא?" מתכוונים האם אתה אחד מהשניים (ואולי גם שניהם במקביל), כלומר למילה **או** יש דו משמעות על פי הקונטקסט.

הלוגיקה התחילה את דרכה ביוון העתיקה כענף בפילוסופיה, אולם בעקבות התפתחויות רבות ומשמעותיות בכיוונים הפורמאליים שלה היא נחשבת כיום כאמור גם לענף במתמטיקה. הלוגיקה משמשת כבסיס התיאורטי המרכזי למדעי המחשב. היא הכרחית, למשל, כאשר אנו מעוניינים "לדבר" עם מכונה (כמו מחשב), זאת משום שתקשורת עם מחשב חייבת להיות מאוד מדויקת וחד משמעית, ועליה לעמוד בכללים לוגיים שנקבעו מראש. פיתוח חשיבה לוגית נחוץ גם להתמודדות עם בעיות שונות ומגוונות, בעיקר בתחומי המדע והטכנולוגיה, שדורשות ניתוח מדויק ומסודר של תהליכים ורעיונות. בנוסף, היכולת לנמק טענות באופן מדויק תוך הימנעות מכשלים לוגיים שיפגעו בתקפות המסקנות היא כלי מרכזי במתמטיקה ובמדעי המחשב.

הערה 0.1 (הנחות מוצא). כל הלוגיקה בפרק זה מבוסס על מערכת האקסיומות ZF, מעבר לפרק זה נשתמש תמיד במערכת האקסיומות ZFC (אנו מניחים בקורס זה את אקסיומת הבחירה).

1 תחשיב הפסוקים

הגדרה 1.1 (הצרנה)**.** הפיכת פסוק מילולי לשפה של צורות מתמטיות.

הגדרה 1.2 (פסוק יסודי)**.** טענה עצמית שיכולה להיות אמת או שקר.

דוגמה 1.1. "יורד גשם בחוץ" זהו פסוק יסודי מכיוון שזוהי טענה שיכולה להיות אמת או שקר ואינה מורכבת מתת פסוקים שיכולים להיות אמת או שקר.

1.1 קשרים בין פסוקים

הגדרה 1.3 (קשר הדיסיונקציה)**.** "A או B" ומתמטית $A \vee B$.

הגדרה 1.4 (קשר הקוניונקציה)**.** "A וגם B" ומתמטית $A \wedge B$.

הגדרה 1.5 (קשר האימפליקציה). "A גורר את B" ובצורה המקובלת יותר "אם A אז B" ומתמטית $A \Longrightarrow B$, בביטוי A נקרא הרישא ו־B נקרא הסיפא.

הגדרה 1.6 (קשר השלילה). "לא A" ומתמטית $\neg A$, נהוגים גם הסימונים $\sim A$, $\overline{A}$.

הגדרה 1.7 (תחשיב הפסוקים). טענה המורכבת מצירופים של פסוקים יסודיים וקשרים יסודיים.

דוגמה 1.2. נניח כי A, B, C פסוקים יסודיים אזי פסוקים כגון

- $A \Longrightarrow B$.
- $(A \vee B) \wedge (C \vee B)$.
- $((A \vee B) \Longrightarrow \neg A) \Longrightarrow C$.

הערה 1.1. ביטויים מהצורה

- $A \Longrightarrow$.
- $A \wedge \vee B$.
- $A \wedge B \Longrightarrow C$.

כלומר ביטויים חסרי משמעות או ביטויים עם דו משמעות אינם נחשבים כפסוקים בתחשיב הפסוקים.

1.2 ערכים של פסוקים

הגדרה 1.8 (השמה של ערך אמת). עבור פסוק יסודי A נגדיר אם הוא אמת (בסימון T, true) או שקר (בסימון F, false), ונסמן את ערכו בתור $V(A)$.

הערה 1.2. במערכת הלוגית שאנחנו מתעסקים בה טענה היא או שקר או אמת ולא שניהם, ומתמטית $((V(A) = \text{true}) \vee (V(A) = \text{false})) \wedge ((V(A) \neq \text{true}) \vee (V(A) \neq \text{false}))$.

טענה 1.1. נניח $A_1, \ldots, A_n$ פסוקים יסודיים אזי יש 2^n השמות ערכי אמת לפסוקים.

הוכחה. כל פסוק יסודי A_i (כאשר i מספר בין 1 ל־n) יכול להיות true או false ולא שניהם, לכן לכל A_i יש 2 אפשרויות ואין קשר בין הפסוקים (מהיותם יסודיים ולכן בחירת ערכיהם שרירותית) אז יש $2 \cdot \ldots \cdot 2 = 2^n$ השמות של ערכי אמת. ■

הערה 1.3 (שקר גורר הכל). יהיו A, B פסוקים יסודיים אזי $(V(A) = \text{false}) \Longrightarrow (V(A \Longrightarrow B) = \text{true})$, כלומר "אם שקר אז משהו" זוהי תמיד טענת אמת.

הגדרה 1.9 (טבלת אמת). טבלה אשר מסכמת את ערכו של פסוק בשינוי ערכם של פסוקי היסוד בו (והטבלה הזאת היא סופית בגודל ואף מגודל 2^n).

דוגמה 1.3 (טבלאות אמת). יהיו A, B ערכי אמת

A	B	$A \vee B$
true	true	true
true	false	true
false	true	true
false	false	false

A	B	$A \wedge B$
true	true	true
true	false	false
false	true	false
false	false	false

A	B	$A \Longrightarrow B$
true	true	true
true	false	false
false	true	true
false	false	true

A	$\neg A$
true	false
false	true

1.3 שקילות של פסוקים

הגדרה 1.10 (שקילות פסוקים). יהיו C, D פסוקים נגיד שהם שקולים ונסמן $C \equiv D$ אם לכל השמה של ערכי אמת (לפסוקים היסודיים המרכיבים אותם) מתקיים $V(C) = V(D)$.

טענה 1.2. יהיו A, B, C פסוקים אזי

1. $A \wedge B \equiv B \wedge A$.
2. $A \vee B \equiv B \vee A$.
3. $A \wedge (B \wedge C) \equiv (A \wedge B) \wedge C$.
4. $A \vee (B \vee C) \equiv (A \vee B) \vee C$.

הוכחה. יהיו A, B, C פסוקים נבנה עבור כל פסוק טבלת אמת, כאשר שני פסוקים עם אותה טבלת אמת מעידה של שקילותם (כי טבלת אמת מייצגת את ערך הפסוק בכל בחירות השמות ערך האמת)

A	B	$A \wedge B$	$B \wedge A$	$A \vee B$	$B \vee A$
true	true	true	true	true	true
true	false	false	false	true	true
false	true	false	false	true	true
false	false	false	false	false	false

A	B	C	$A \wedge B$	$B \wedge C$	$(A \wedge B) \wedge C$	$A \wedge (B \wedge C)$	$A \vee B$	$B \vee C$	$(A \vee B) \vee C$	$A \vee (B \vee C)$
true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true
true	false	true	false	false	false	false	true	true	true	true
false	true	true	false	true	false	false	true	true	true	true
false	false	true	false	false	false	false	false	true	true	true
true	true	false	true	false	false	false	true	true	true	true
true	false	false	false	false	false	false	true	false	true	true
false	true	false	false	false	false	false	true	true	true	true
false	false	false	false	false	false	false	false	false	false	false

■

טענה 1.3. יהיו A, B, C פסוקים אזי

1. $A \Longrightarrow B \equiv (\neg A) \vee B$.
2. $A \Longrightarrow B \equiv (\neg B) \Longrightarrow (\neg A)$.
3. $\neg(\neg A) \equiv A$.
4. $A \wedge (B \vee C) \equiv (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$.
5. $A \vee (B \wedge C) \equiv (A \vee B) \wedge (A \vee C)$.

6. $\neg(A \Longrightarrow B) \equiv A \wedge (\neg B)$.

הוכחה. נוכיח את 2 וכל שאר הטענות ישארו כתרגיל לקורא, יהיו A, B, C פסוקים אזי

A	B	$\neg A$	$\neg B$	$A \Longrightarrow B$	$(\neg B) \Longrightarrow (\neg A)$
true	true	false	false	true	true
true	false	false	true	false	false
false	true	true	false	true	true
false	false	true	true	true	true

. ■

טענה 1.4 (כללי דה מורגן)**.** יהיו A, B פסוקים אזי $\neg(A \wedge B) \equiv (\neg A) \vee (\neg B)$, $\neg(A \vee B) \equiv (\neg A) \wedge (\neg B)$.

הוכחה. יהיו A, B פסוקים אזי

A	B	$\neg A$	$\neg B$	$A \wedge B$	$A \vee B$	$\neg(A \wedge B)$	$(\neg A) \vee (\neg B)$	$\neg(A \vee B)$	$(\neg A) \wedge (\neg B)$
true	true	false	false	true	true	false	false	false	false
true	false	false	true	false	true	true	true	false	false
false	true	true	false	false	true	true	true	false	false
false	false	true	true	false	false	true	true	true	true

■

הגדרה 1.11 (אם ורק אם (אם"ם))**.** יהיו A, B פסוקים נגדיר $A \Longleftrightarrow B \equiv (A \Longrightarrow B) \wedge (B \Longrightarrow A)$.

הגדרה 1.12 (טאוטולוגיה)**.** פסוק A שבעבור כל השמת ערכי אמת מקיים $V(A) = \text{true}$.

הגדרה 1.13 (סתירה)**.** פסוק A שבעבור כל השמת ערכי אמת מקיים $V(A) = \text{false}$.

תרגיל 1.1. יהי A פסוק אזי (A סתירה)$\Longleftrightarrow$($\neg A$ טאוטולוגיה).

טענה 1.5. יהי P פסוק אזי $P \Longrightarrow P$, $P \vee \neg P$ הן טאוטולוגיות.

הגדרה 1.14 (פסוק נובע סמנטית)**.** פסוק α נובע סמנטית מהפסוקים $\alpha_1 \ldots \alpha_n$ אם השמה המקיימת $V(\alpha_i) = \text{true}$ לכל i בין 1 ל־n גוררת כי מתקיים $V(\alpha) = \text{true}$.

דוגמה 1.4. נגדיר $\alpha_1 = \neg(A \Longrightarrow B)$, $\alpha_2 = B$ וכן $\alpha = A$. נשים לב כי אם $V(\alpha_1) = V(\alpha_2) = \text{true}$ אזי $V(\neg(A \Longrightarrow B)) = \text{true}$ ולכן $V(A \Longrightarrow B) = \text{false}$ כמו כן $V(B) = \text{true}$ ולכן לא אפשרי שמתקיים $V(A) = \text{true}$ כי אם זה מתקיים אז נקבל $V(A \Longrightarrow B) = \text{true}$ בסתירה למה שהסקנו כבר, לכן $V(A) = \text{false}$ ובפרט $V(\neg A) = \text{true}$ כלומר $V(\alpha) = \text{true}$, אזי α נובע סמנטית מ־α_1, α_2.

2 תחשיב היחסים

הגדרה 2.1 (פרידיקט n מקומי)**.** טענה ב־n משתנים.

דוגמה 2.1 (פרידיקטים)**.** הטענה "קיים x המקיים $x^2 = -1$" זהו פרידיקט חד מקומי (על איזה תחום הוא מוגדר? האם יש לו משמעות לכל אובייקט מתמטי?), הטענה "לכל x, y מתקיים $x > y$" זהו פרידיקט דו מקומי (שוב אנו לא בטוחים מאיזה תחום x, y הגיעו, האם הם מספרים? אולי הם בכלל אובייקט שרירותי?).

2.1 כמתים

הגדרה 2.2 (כמת קיים)**.** מסמל כי קיים אובייקט שמקיים את הפרידיקט, מסומן בעזרת $\exists$.

הגדרה 2.3 (כמת לכל)**.** מסמל כי לכל אובייקט מתקיים הפרידיקט, מסומן בעזרת $\forall$.

הגדרה 2.4 (טענה)**.** טענה בתחשיב היחסים הוא ביטוי מהצורה $\exists x.P\left(x\right)$ או $\forall y.Q\left(y\right)$ כאשר P, Q פרידיקטים או בעצמם טענות בתחשיב היחסים.

דוגמה 2.2 (טענות בתחשיב היחסים)**.** הטענה $\exists x.\forall y.x < y$ מסמלת "קיים x עבורו לכל y מתקיים $x < y$", הטענה $\forall x, y.\left(x < y\right) \implies \left(x < y\right)$ מסמלת "לכל x, y אם $x < y$ אז $x < y$".

2.1.1 קיום ויחידות

הגדרה 2.5 (קיים יחיד)**.** מסמל כי קיים ויחיד אובייקט שמקיים את הפרידיקט, מסומן בעזרת $\exists!$. מתמטית תהא ϕ טענה אזי נגדיר $\exists!x.\phi\left(x\right) \equiv \left(\exists x.\phi\left(x\right)\right) \wedge \left(\forall x, y.\phi\left(x\right) \wedge \phi\left(y\right) \implies x = y\right)$.

הגדרה 2.6 (כתיב יוטא)**.** מסמל את האובייקט היחיד שמקיים את הפרידיקט, יהי ϕ פרידיקט עבורו $\exists!x.\phi\left(x\right)$ אזי נגדיר את $a = \iota x.\phi\left(x\right)$ להיות איבר עבורו $\phi\left(a\right)$ נכון.

2.2 תחום הכימות

כפי שהוסבר קודם, קיימת בעיה בכתיבה טענה כללית בתחשיב היחסים, לא ברור מהיכן מגיעים המשתנים בביטוי, לכן נגדיר את תחום הכימות להיות התחום ממנו המשתנים מגיעים. כמו כן כאשר ברור מהו התחום לא נציין אותו (כמו בטענה $\exists x.x = 1$ בה ברור כי אנו עובדים מעל מערכת מספרית כלשהי אשר הובהרה לפני).

הגדרה 2.7 (תחום הכימות/עולם הדיון)**.** קבוצת האובייקטים שמהווים את המקור להצבות של משתנים.

הגדרה 2.8 (אינטרפרטציה של פרידיקט)**.** יהי D תחום כימות אזי טענה על אברי D.

הגדרה 2.9 (נכונות בתחשיב היחסים)**.** תהא טענה $P\left(x\right)$, באינטרפרטציה $\exists x.P\left(x\right)$ בתחום D, נאמר כי P נכונה בתחום D אם קיים a כלשהו ב־D עבורו $P\left(a\right)$ מתקיים. תהא טענה $Q\left(x\right)$, באינטרפרטציה $\forall x.Q\left(x\right)$ בתחום D, נאמר כי Q נכונה בתחום D אם לכל a ב־D מתקיים $Q\left(a\right)$. נסמן במקרים אלה $D \vDash P\left(x\right)$ וכן $D \vDash Q\left(x\right)$.

דוגמה 2.3 (אינטרפרטציה ונכונות)**.** נגדיר טענה $P\left(x\right)$ עם אינטרפרטציה $\exists x.x=1$ בתחום המספרים הטבעיים (כלומר $0,1,2\ldots$), כמו כן נשים לב כי הטענה כמובן נכונה (היא מתקיימת עבור $x=1$ אשר נמצא בתחום הכימות).

הגדרה 2.10 (טענות שקולות)**.** נאמר כי α,β שקולות ונסמן $\alpha\equiv\beta$ אם לכל תחום כימות D ואינטרפרטציה של α,β מתקיים $D\vDash\alpha\iff\beta$.

3 הוכחות

בתחשיב הפסוקים הסברנו כיצד טענות מתקשרות אחת אל השנייה בעזרת קשרים לוגיים, בתחשיב היחסים הסברנו כיצד טענות לגבי אובייקטים מוגדרות, כעת כאשר יש בידינו טענות נרצה להוכיח או להפריך אותן.

3.0.1 הוכחת קיים

הערה 3.1 (הוכחת טענת קיים). כדי להוכיח טענה מהצורה $\exists x.P\left(x\right)$ נביא דוגמה ספציפית לאיבר a מתחום הכימות אשר מקיים את $P\left(x\right)$ (כלומר $P\left(a\right)$ מתקיים). בשימוש בטענת קיים כנתונה נשים לב כי כמת קיים מתאר לנו כי קיים איבר a המקיים $P\left(a\right)$ אך אנו לא יודעים מיהו אותו a, לכן נשתמש בו שרירותית בעזרת ההצהרה "יהי a המקיים $P\left(a\right)$" ונמשיך משם.

3.0.2 הוכחת לכל

הערה 3.2 (הוכחת טענת לכל). כדי להוכיח טענה מהצורה $\forall x.P\left(x\right)$ נראה כי עבור a שרירותי (חשוב שהוא לא ספציפי ולא נבחר על פי חוק מסויים!) מתחום הכימות מתקיים $P\left(x\right)$ (כלומר $P\left(a\right)$ מתקיים). רק כאשר עולם הדיון סופי וקטן מספיק ניתן לעבור איבר איבר בו ולהראות שמתקיים $P\left(x\right)$ עבור כל איבר יזנית, אך זה לא מומלץ אלא אם כן תחום הכימות הוא בעל איברים בודדים. בשימוש בטענת לכל כנתונה נשים לב כי כמת לכל מתאר לנו כי כל איבר a מקיים $P\left(a\right)$ ולכן ניתן לבחור כל a בתחום הכימות ולהמשיך משם.

3.1 הוכחת שקילות

טענה 3.1. לכל פרידיקטים ϕ,ψ מתקיים

1. $\neg\left(\exists x.\phi\left(x\right)\right)\equiv\forall x.\neg\phi\left(x\right)$.
2. $\neg\left(\forall x.\phi\left(x\right)\right)\equiv\exists x.\neg\phi\left(x\right)$.
3. $\forall x.\forall y.\phi\left(x,y\right)\equiv\forall y.\forall x.\phi\left(x,y\right)$.
4. $\exists x.\exists y.\phi\left(x,y\right)\equiv\exists y.\exists x.\phi\left(x,y\right)$.
5. $\forall x.\left(\phi\left(x\right)\wedge\psi\left(x\right)\right)\equiv\left(\forall x.\phi\left(x\right)\right)\wedge\left(\forall y.\psi\left(y\right)\right)$.
6. $\exists x.\left(\phi\left(x\right)\vee\psi\left(x\right)\right)\equiv\left(\exists x.\phi\left(x\right)\right)\vee\left(\exists y.\psi\left(y\right)\right)$.
7. $\exists x.\forall y.\phi\left(x,y\right)\not\equiv\forall y.\exists x.\phi\left(x,y\right)$.

הוכחה. נוכיח את טענות $6,7$ וכל השאר ישארו כתרגיל לקורא,

6. הטענה $\exists x.\left(\phi\left(x\right)\vee\psi\left(x\right)\right)\equiv\left(\exists x.\phi\left(x\right)\right)\vee\left(\exists y.\psi\left(y\right)\right)$, יהי D תחום כימות כלשהו ותהא אינטרפרטציה כלשהי עבור ϕ,ψ,

- נניח כי אגף ימין נכון, כלומר נניח כי $\left(\exists x.\phi\left(x\right)\right)\vee\left(\exists y.\psi\left(y\right)\right)$ מהגדרת "או" אנו יודעים כי לפחות אחד מהביטויים נכונים,
  - ⋆ אם הביטוי $\exists x.\phi\left(x\right)$ מתקיים, אזי קיים a בתחום הכימות D עבורו $\phi\left(a\right)$ נכון ובפרט נשים לב כי הוא גם מקיים $\phi\left(a\right)\vee\psi\left(a\right)$ מהגדרת "או" ולכן $\exists x.\left(\phi\left(x\right)\vee\psi\left(x\right)\right)$ (כי בפרט a מקיים זאת).
  - ⋆ אם הביטוי $\exists x.\psi\left(x\right)$ מתקיים, אזי קיים a בתחום הכימות D עבורו $\psi\left(a\right)$ נכון ובפרט נשים לב כי הוא גם מקיים $\phi\left(a\right)\vee\psi\left(a\right)$ מהגדרת "או" ולכן $\exists x.\left(\phi\left(x\right)\vee\psi\left(x\right)\right)$ (כי בפרט a מקיים זאת).
- נניח כי אגף שמאל נכון, כלומר נניח כי $\exists x.\left(\phi\left(x\right)\vee\psi\left(x\right)\right)$ נקבע את a עבורו $\phi\left(a\right)\vee\psi\left(a\right)$ אנו יודעים כי יש a כזה מטענת קיים, כעת מהגדרת "או" לפחות אחד מהביטויים נכונים,
  - ⋆ אם הביטוי $\phi\left(a\right)$ מתקיים, אזי גם הביטוי $\exists x.\phi\left(x\right)$ מתקיים (בפרט a מקיים זאת) ולכן מהגדרת "או" גם $\left(\exists x.\phi\left(x\right)\right)\vee\left(\exists y.\psi\left(y\right)\right)$ מתקיים (על ידי אותו a).
  - ⋆ אם הביטוי $\psi\left(a\right)$ מתקיים, אזי גם הביטוי $\exists x.\psi\left(x\right)$ מתקיים (בפרט a מקיים זאת) ולכן מהגדרת "או" גם $\left(\exists x.\phi\left(x\right)\right)\vee\left(\exists y.\psi\left(y\right)\right)$ מתקיים (על ידי אותו a).

אזי קיבלנו כי הנחה שאחד הצדדים מתקיים גורר את השני ובפרט השמת ערכי אמת גוררת סמנטית את הצד השני, כלומר הטענות שקולות.

7. הטענה $\exists x.\forall y.\phi\left(x,y\right)\not\equiv\forall y.\exists x.\phi\left(x,y\right)$, נשים לב כי בתחום הכימות המספרים הטבעיים (כלומר $0,1,2\ldots$) ועם האינטרפריטציה $\phi\left(x,y\right)=\text{"}y<x\text{"}$ נקבל כי האגף הימני נכון אך השמאלי לא, מה שאומר שהטענות אינן שקולות כנדרש (מכיוון שמצאנו אינטרפרטציה ותחום כימות עליו הטענות אינן שקולות)

- הוכחת אגף ימין, צריך להוכיח $\forall y.\exists x.\phi\left(x,y\right)$, יהי y מספר טבעי, צריך להוכיח $\exists x.\phi\left(x,y\right)$, נגדיר $x=y+1$, נותר להוכיח $\phi\left(x,y\right)$, נשים לב כי $\phi\left(x,y\right)=\phi\left(y+1,y\right)=\text{"}y<y+1\text{"}$ וזה נכון.
- הפרכת אגף שמאל, צריך להפריך $\exists x.\forall y.\phi\left(x,y\right)$, נראה כי לא קיים x המקיים זאת, יהי x מספר טבעי, נשים לב כי עבור $y=x$ מתקיים $\phi\left(x,y\right)=\phi\left(x,x\right)=\text{"}x<x\text{"}$ כלומר הביטוי לא נכון, אזי לכל x הטענה לא אפשרית ולכן לא קיים x עבורו הטענה נכונה.

■

חלק II

תורת הקבוצות

בתורת הקבוצות האובייקט המרכזי הוא (באופן מפתיע) קבוצות, למרות היותם האובייקט המרכזי בתחום בקורס זה לא ינתנו הגדרות פורמליות לאובייקט זה, זאת מכיוון שהמתמטיקה כמו כל ענף מבוסס על פני הגדרות ואקסיומות אשר אנו מסכימים שהן נכונות ומשם מתקדמים, לכן כאן נשתמש בקבוצה באופן נאיבי ואינטואיטיבי. (אך זה לא תירוץ לנפנופי ידיים! הכל עדיין יהיה פורמלי ומדוייק)

1 קבוצות

הגדרה 1.1 (קבוצה)**.** אוסף של איברים ללא חשיבות לסדר וללא חזרות, היא מסומנת בעזרת סוגריים מסולסלים $\{\}$ אשר ביניהן כל האיברים השייכים לקבוצה, או אם לא ניתן לרשום את כל האיברים חוק מסויים ליצירת האיברים.

הגדרה 1.2 (שייך)**.** יהי a איבר בקבוצה A אזי נאמר כי a שייך ל־A ונסמן $a \in A$.

הערה 1.1 (לא שייך). $a \notin A \equiv \neg (a \in A)$.

1.1 סימון קבוצה

הגדרה 1.3 (רשימת איברים)**.** נסמן $\{a_1 \ldots a_n\}$ את הקבוצה המכילה את האיברים $a_1 \ldots a_n$. מתקיים $(a \in \{a_1 \ldots a_n\}) \iff (\exists i.a = a_i)$.

דוגמה 1.1 (רשימות איברים)**.** $\{1 \ldots n\}$ המספרים בין 1 עד n, $\{\{1\},\{2\}\}$ קבוצה המכילה את הקבוצה המכילה את 1 ואת הקבוצה המכילה את 2.

הגדרה 1.4 (עקרון ההפרדה)**.** יהי ϕ פרידיקט אזי $\{x \in A \mid \phi(x)\}$ קבוצה המכילה את כל אברי A המקיימים את ϕ. מתקיים $(a \in \{x \in A \mid \phi(x)\}) \iff ((a \in A) \wedge \phi(a))$.

הגדרה 1.5 (עקרון ההחלפה)**.** תהא f פעולה הפועלת על אברי A אזי $\{f(x) \mid x \in A\}$ קבוצה המכילה את $f(a)$ עבור כל $a \in A$. מתקיים $(a \in \{f(x) \mid x \in A\}) \iff (\exists b \in A.f(b) = a)$.

הגדרה 1.6 (סינגלטון/יחידון)**.** קבוצה A בעלת איבר יחיד, דהיינו $A = \{a\}$.

דוגמה 1.2 (קבוצות ושייכות)**.** נשים לב כי $\{1,0\} = \{0,0,1\} = \{0,0,1,1,1\} = \{0,1\}$ מכיוון שאין משמעות לסדר האיברים ואין חזרות, כמו כן $1 \in \{1\}$, $\{1\} \in \{\{1\},\{2\},1,2\}$, $\{2,2\} \in \{\{2\}\}$, $\{3\} \notin \{1,2,3\}$, $\{x \in \{1,2,3\} \mid x^2 = x\} = \{1\}$, $\{2^x \mid x \in \{0,1\}\} = \{2^0, 2^1\}$, ודאו כי אתם מבינים את כל הדוגמאות ומדוע הן נכונות.

1.1.1 פרדוקס ראסל

משפט 1.1 (פרדוקס ראסל)**.** קיים פרידיקט ϕ עבורו $\{x \mid \phi(x)\}$ איננה קבוצה.

הוכחה. נגדיר את הפרידיקט $\phi(x) = "x \notin x"$, נניח בשלילה כי הקבוצה $A = \{x \mid \phi(x)\}$ קיימת, אם $A \in A$ אזי מעקרון ההפרדה מתקיים $\phi(A)$ כלומר $A \notin A$ סתירה, אם $A \notin A$ אזי מתקיים $\phi(A)$ ומעקרון ההפרדה $A \in A$ סתירה. בפרט הקבוצה A איננה אפשרית, ולכן אנו מגבילים את הדרכים ליצירת קבוצה. ∎

מסקנה 1.1. לא קיימת קבוצת כל הקבוצות.

הוכחה. נניח כי A קבוצת כל הקבוצות אזי $\{x \in A \mid x \notin x\} = \{x \mid x \notin x\}$ היא קבוצה על פי עקרון ההפרדה סתירה לפרדוקס ראסל. ∎

1.1.2 עוצמה סופית

הגדרה 1.7 (עוצמה סופית)**.** תהא A קבוצה בעלת מספר סופי של איברים, אזי $|A|$ מסמל את מספר האיברים בקבוצה.

דוגמה 1.3. מתקיים $|\{1,2,3\}| = 3$, $|\{1,2,1\}| = 2$, ולעומת זאת $|\{0,1,2,3,...\}|$ אינו מוגדר (כרגע לפחות).

1.2 קבוצות מפורסמות

הגדרה 1.8 (מספרים טבעיים)**.** נסמן $\mathbb{N} = \{0,1,2,3,...\}$.

1.2.1 אינדוקציה

משפט 1.2 (אינדוקציה)**.** יהי $P(x)$ פרידיקט אזי
$(P(0) \land (\forall n \in \mathbb{N}.P(n) \Longrightarrow P(n+1))) \Longrightarrow (\forall n \in \mathbb{N}.P(n))$.

הוכחה. יהי $P(x)$ פרידיקט ונניח כי $P(0) \land (\forall n \in \mathbb{N}.P(n) \Longrightarrow P(n+1))$, צ"ל $\forall n \in \mathbb{N}.P(n)$, נסמן $S = \{n \in \mathbb{N} \mid \neg P(n)\}$, נניח בשלילה כי $\exists n \in \mathbb{N}.\neg P(n)$ כלומר $S \neq \emptyset$ אזי קיים $s \in S$ מינימלי (עבור הוכחת קיימות המינימלי ראה עיקרון הסדר הטוב), מהנתון כי $P(0)$ נסיק כי $s \geq 1$ ולכן $s - 1 \in \mathbb{N}$ כמו כן $s - 1 \notin S$ (מהיות s המינימלי אשר ב־S) ולכן $P(s-1)$ מתקיים מהגדרת S, כעת מהנתון כי מתקיים $\forall n \in \mathbb{N}.P(n) \Longrightarrow P(n+1)$ נקבל בפרט עבור $s-1$ כי $P(s)$ מתקיים, סתירה לעובדה כי $s \in S$, ולכן קיבלנו כי $\forall n \in \mathbb{N}.P(n)$ כנדרש. ∎

הערה 1.2. במשפט האינדוקציה, הנחת $P(0)$ ניתנת להחלפה בכל הנחת $P(a)$ עבור $a \in \mathbb{N}$ קבוע, וכך הפרידיקט $P(x)$ תקף עבור כל $x \in \mathbb{N}$ אשר מקיים $a \leq x$.

דוגמה 1.4 (הוכחה באינדוקציה)**.** נרצה להוכיח באינדוקציה את אי־שיוויון ברנולי, עבור $r \in \mathbb{N}$ ועבור $x \in \mathbb{R}$ המקיים $x \geq -1$ מתקיים $(1+x)^r \geq 1 + rx$.

- בסיס האינדוקציה: עבור $r = 0$ יהי $x \in \mathbb{R}$ המקיים $x \geq -1$ נשים לב כי $(1+x)^0 = 1 = 1 + 0 \cdot x$ ובפרט $(1+x)^r \geq 1 + rx$ כנדרש.

- הנחת האינדוקציה: נניח כי עבור $r \in \mathbb{N}$ ולכל $x \in \mathbb{R}$ המקיים $x \geq -1$ מתקיים $(1+x)^r \geq 1+rx$.
- צעד האינדוקציה: כעת עבור $r+1$ יהי $x \in \mathbb{R}$ המקיים $x \geq -1$ נשים לב כי

$$\begin{aligned}(1+x)^{r+1} &= (1+x)^r(1+x) \geq (1+rx)(1+x)\\ &= 1+rx+x+rx^2 \geq 1+rx+x\\ &= 1+(r+1)x\end{aligned}$$

כאשר השתמשנו בהנחה כי $(1+x)^r \geq 1+rx$ במעבר השני וכן בעובדה כי $1+x \geq 0$ ולכן אי בעיה עם החלפות הסימן באי־השיוויון.

הגדרה 1.9 (מספרים חיוביים)**.** נסמן $\mathbb{N}_+ = \{1,2,3,\dots\}$.

הגדרה 1.10 (מספרים זוגיים ואי־זוגיים)**.** נסמן $\mathbb{N}_{\text{even}} = \{0,2,4,6\dots\}$ וכן $\mathbb{N}_{\text{odd}} = \{1,3,5,7\dots\}$.

הגדרה 1.11 (מספרים ראשוניים)**.** נסמן $\mathbb{P} = \{p \in \mathbb{N}_+ \mid p \text{ ראשוני}\}$.

הגדרה 1.12 (מספרים שלמים)**.** נסמן $\mathbb{Z} = \{\dots,-2,-1,0,1,2,\dots\}$.

הגדרה 1.13 (מספרים רציונליים)**.** נסמן $\mathbb{Q} = \left\{\frac{m}{n} \mid m \in \mathbb{Z} \wedge n \in \mathbb{N}_+\right\}$.

הגדרה 1.14 (מספרים ממשיים)**.** נסמן "כל המספרים הממשיים"$=\mathbb{R}$, להגדרה של המספרים הממשיים על פי חתכי דדקינד ראו ... ועל פי סדרות קושי ראו חדו"א2.

הגדרה 1.15 (ערך שלם תחתון)**.** יהי $x \in \mathbb{R}$ אזי $\lfloor x \rfloor = \max(n \in \mathbb{Z} \mid n \leq x)$.

הגדרה 1.16 (ערך שלם עליון)**.** יהי $x \in \mathbb{R}$ אזי $\lceil x \rceil = \min(n \in \mathbb{Z} \mid n \geq x)$.

דוגמה 1.5. מתקיים $\lfloor 1.1 \rfloor = 1$, $\lceil 1.1 \rceil = 2$, $\lfloor 10.0 \rfloor = 10$, $\lceil 0 \rceil = 0$.

הגדרה 1.17 (מספרים ממשיים חיוביים)**.** נסמן $\mathbb{R}_+ = \{x \in \mathbb{R} \mid x > 0\}$.

הגדרה 1.18 (קטע/אינטרוול)**.** יהיו $a,b \in \mathbb{R}$ נגדיר

- $(a,b) = \{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}$.
- $(a,b] = \{x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b\}$.
- $[a,b) = \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x < b\}$.
- $[a,b] = \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$.

הגדרה 1.19 (מספרים מרוכבים)**.** נסמן $\mathbb{C} = \{a+ib \mid a,b \in \mathbb{R}\}$.

הגדרה 1.20 (קבוצה ריקה)**.** נסמן $\emptyset = \{\}$, מתקיים מהגדרתה $\forall x.x \notin \emptyset$.

הערה 1.3. שימו לב כי $|\emptyset| = 0$.

1.3 הכלה ושיוויון

1.3.1 הכלה

הגדרה 1.21 (הכלה)**.** יהיו A,B קבוצות נאמר כי A מוכלת ב־B ונסמן $A\subseteq B$ אם מתקיים $\forall x\left(x\in A\Longrightarrow x\in B\right)$.

הערה 1.4 (לא מוכל). יהיו A,B נסמן $A\nsubseteq B\equiv\neg\left(A\subseteq B\right)$.

הערה 1.5 (מוכל ממש). יהיו A,B נסמן $A\subset B\equiv\left(A\subseteq B\right)\wedge\left(B\nsubseteq A\right)$.

דוגמה 1.6 (הכלה)**.** מתקיים $\mathbb{P}\subseteq\mathbb{N}_{+}\subseteq\mathbb{N}\subseteq\mathbb{Z}\subseteq\mathbb{Q}\subseteq\mathbb{R}\subseteq\mathbb{C}$ כמו כן $\{\{1\}\}\nsubseteq\{1\}$ וכן $\{1\}\subset\{1,2\}$.

משפט 1.3. $\forall A.\emptyset\subseteq A$.

הוכחה. תהא A_0 קבוצה, צריך להוכיח $\emptyset\subseteq A_0$, מהגדרת הכלה צריך להוכיח $\forall x\left(x\in\emptyset\Longrightarrow x\in A_0\right)$, יהי x_0, צריך להוכיח $x_0\in\emptyset\Longrightarrow x_0\in A_0$, מהגדרת קבוצה ריקה מתקיים כי $\forall x.x\notin\emptyset$ בפרט עבור x_0 מתקיים $x_0\notin\emptyset$ כלומר הרישא בטענה שצריך להוכיח תמיד שקרית, ומטבלת האמת של גרירה נקבל כי כל הטענה אמת כנדרש. $\blacksquare$

טענה 1.1 (טרנזיטיביות ההכלה)**.** $\forall A,B,C.\left(A\subseteq B\wedge B\subseteq C\right)\Longrightarrow\left(A\subseteq C\right)$.

הוכחה. יהיו A_0,B_0,C_0 קבוצות, נניח כי $\left(A_0\subseteq B_0\right)\wedge\left(B_0\subseteq C_0\right)$, צריך להוכיח $A_0\subseteq C_0$, מהגדרת הכלה צריך להוכיח $\forall x\left(x\in A_0\Longrightarrow x\in C_0\right)$, יהי x_0, צריך להוכיח $x_0\in A_0\Longrightarrow x_0\in C_0$, נניח כי $x_0\in A_0$, צריך להוכיח $x_0\in C_0$, מהגדרת הכלה נסיק כי $\forall x\left(x\in A_0\Longrightarrow x\in B_0\right)$ ובפרט עבור x_0 מתקיים $x_0\in B_0$ כמו כן $\forall x\left(x\in B_0\Longrightarrow x\in C_0\right)$ ובפרט עבור x_0 נקבל $x_0\in C_0$ כנדרש. $\blacksquare$

1.3.2 שיוויון

הגדרה 1.22 (שיוויון/עקרון האקסטנציונליות)**.** $\left(A=B\right)\equiv\left(\forall x.x\in A\Longleftrightarrow x\in B\right)$.

הערה 1.6 (הכלה דו כיוונית). יהיו A,B קבוצות אזי $\left(A=B\right)\equiv\left(A\subseteq B\right)\wedge\left(B\subseteq A\right)$.

דוגמה 1.7. מתקיים $\mathbb{N}=\{n\in\mathbb{Z}\mid n\geq0\}$, $[-1,1]=\{x\in\mathbb{R}\mid|x|\leq1\}$.

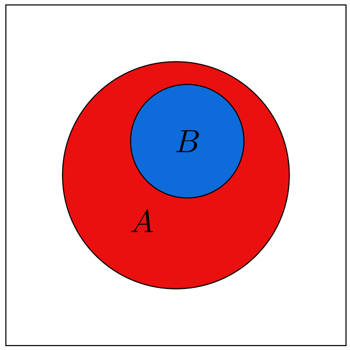
טענה 1.2 (יחידות הקבוצה הריקה)**.** $\forall X\left(\forall y.y\notin X\Longrightarrow X=\emptyset\right)$.

הוכחה. תהא X_0 קבוצה ונניח כי $\forall y.y\notin X_0$, צריך להוכיח $X_0=\emptyset$, מהגדרת שיוויון צריך להוכיח $\left(\emptyset\subseteq X_0\right)\wedge\left(X_0\subseteq\emptyset\right)$, נשים לב כי הוכחנו עבור כל קבוצה שמתקיים $\emptyset\subseteq X_0$ ולכן מהגדרת "וגם" נותר להוכיח $X_0\subseteq\emptyset$, מהגדרת הכלה צריך להוכיח $\forall x\left(x\in X_0\Longrightarrow x\in\emptyset\right)$, יהי x_0 נשים לב כי $x_0\notin X_0$ מתכונת X_0 בפרט הרישא תמיד טענה שקרית לכן הגרירה טענת אמת כנדרש. $\blacksquare$

2 פעולות על קבוצות

הערה 2.1 (דיאגרמת וון). דיאגרמת וון זוהי דיאגרמה אשר מטרתה היא לבטא קשרים בין קבוצות. נשרטט קבוצה בתור עיגול, איבר בקבוצה כנקודה, והחלק עליו מדובר בצבע.

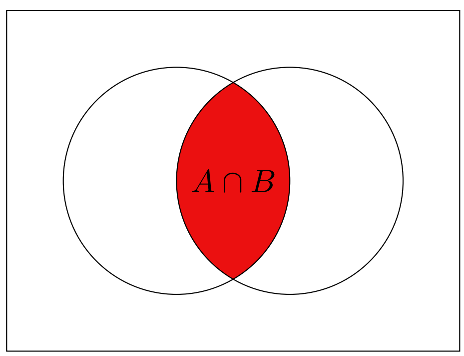
דוגמה 2.1 (דיאגרמת וון של הכלה)**.** בכדי לייצג קבוצות $B \subseteq A$ נשרטט



2.1 חיתוך

הגדרה 2.1 (חיתוך)**.** תהיינה A, B קבוצות אזי $A \cap B = \{x \mid x \in A \wedge x \in B\}$.

הערה 2.2 (דיאגרמת וון של חיתוך). בכדי לייצג את הפעולה $A \cap B$ נשרטט, שימו לב כי החלק האדום הוא החלק המדובר,



דוגמה 2.2. מתקיים $\{3\} = \{3,4,5,6\} \cap \{1,2,3\}$, $\emptyset = \{1\} \cap \{\{1\}\}$, $\{3,4\} = \{3,4,5\} \cap \{3,4\}$.

טענה 2.1 (אסוציאטיביות חיתוך)**.** תהיינה A, B, C קבוצות אזי $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$.

הוכחה. תהיינה A, B, C קבוצות, נוכיח בעזרת הכלה דו כיוונית

- צ"ל: $(A \cap B) \cap C \subseteq A \cap (B \cap C)$, יהי $x \in (A \cap B) \cap C$ נשתמש בהגדרת חיתוך ועיקרון ההפרדה

ונקבל

$$\begin{aligned}x\in(A\cap B)\cap C\equiv&(x\in A\cap B)\wedge(x\in C)\equiv((x\in A)\wedge(x\in B))\wedge(x\in C)\\ \equiv&(x\in A)\wedge((x\in B)\wedge(x\in C))\equiv(x\in A)\wedge(x\in B\cap C)\\ \equiv&x\in A\cap(B\cap C)\end{aligned}$$

באשר השתמשנו באסוציאטיביות הקשר הלוגי "וגם".

- צ"ל: $A\cap(B\cap C)\supseteq(A\cap B)\cap C$ יהי $x\in A\cap(B\cap C)$ נשתמש בהגדרת חיתוך ועיקרון ההפרדה ונקבל

$$\begin{aligned}x\in A\cap(B\cap C)\equiv&(x\in A)\wedge(x\in B\cap C)\equiv(x\in A)\wedge((x\in B)\wedge(x\in C))\\ \equiv&((x\in A)\wedge(x\in B))\wedge(x\in C)\equiv(x\in A\cap B)\wedge(x\in C)\\ \equiv&x\in(A\cap B)\cap C\end{aligned}$$

באשר השתמשנו באסוציאטיביות הקשר הלוגי "וגם".

■

הערה 2.3 (סימטריות והנחות בהוכחה). שימו לב כי בהוכחה הטענה מלעיל ההוכחות כמעט זהות, במצב זה אנו מרשים לעצמנו להשתמש במשפטים כמו "מטעמי סימטריה..." ובקיצור "בה"כ" (בלי הגבלת הכלליות) אשר מאפשרות להניח כי חלקים מההוכחה ניתנים לדילוג עקב דימיון ברור או טריוואליות. שימו לב כי שימוש במשפטים כאלו יגיעו עם הזמן ועם בשלות מתמטית מתאימה, ובסיכום זה ישתמשו על מנת להראות כיצד מוכיחים טענות אלו בחיים האמיתיים.

טענה 2.2 (חילופיות חיתוך). תהיינה A,B קבוצות אזי $A\cap B=B\cap A$.

הוכחה. יהי $x\in A\cap B$ מהגדרת חיתוך ועיקרון ההפרדה מתקיים $(x\in A)\wedge(x\in B)$ כעת מחילופיות הקשר הלוגי "וגם" מתקיים $(x\in B)\wedge(x\in A)$ ולכן $x\in B\cap A$ מהגדרת חיתוך ועיקרון ההפרדה כלומר $A\cap B\subseteq B\cap A$, כעת משיקולי סימטריה בין הקבוצות A,B (ניתן להחליף ביניהן סה"כ על ידי החלפת סימוני שמות הקבוצות) נקבל גם כי $B\cap A\subseteq A\cap B$ ולכן $A\cap B=B\cap A$. ■

טענה 2.3. תהא A קבוצה אזי $A\cap\emptyset=\emptyset$ וכן $A\cap A=A$.

הוכחה. תהא A קבוצה, נוכיח את שתי הטענות בנפרד ■

- צ"ל: $A\cap\emptyset=\emptyset$, נשים לב כי $B\subseteq\emptyset$ עבור כל קבוצה B ובפרט יתקיים $A\cap\emptyset\subseteq\emptyset$, נניח בשלילה כי $A\cap\emptyset\neq\emptyset$ אזי יהי $x\in A\cap\emptyset$ (מהיות הקבוצה הריקה היחידה המקיימת $\forall y.y\notin\emptyset$ נקבל כי לכל קבוצה אחרת מתקיים $\exists y.y\in B$) אזי מהגדרת חיתוך ועיקרון ההפרדה מתקיים $(x\in A)\wedge(x\in\emptyset)$ אך מתכונת הקבוצה הריקה לא קיים אוביקט עבורו $x\in\emptyset$ סתירה, בפרט $A\cap\emptyset=\emptyset$.

- צ"ל: $A\cap A=A$, יהי $x\in A$ נשים לב כי $(x\in A)\wedge(x\in A)$ ולכן ממהגדרת חיתוך ועיקרון ההפרדה מתקיים $x\in A\cap A$, כעת יהי $y\in A\cap A$ אזי מהגדרת חיתוך ועיקרון ההפרדה מתקיים $(y\in A)\wedge(y\in A)$ ובפרט $y\in A$, כלומר קיבלנו כי $A\subseteq A\cap A$ וכן $A\cap A\subseteq A$ כלומר $A=A\cap A$ כנדרש.

2.1.1 חיתוך מוכלל

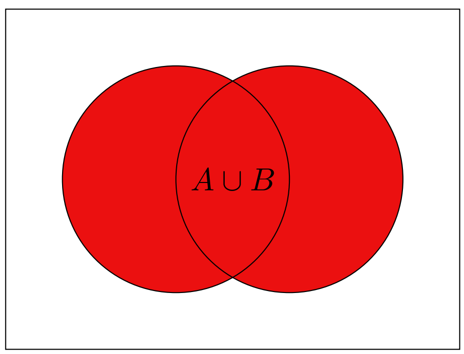
הגדרה 2.2 (חיתוך מוכלל)**.** תהא F קבוצה של קבוצות אזי $\bigcap F=\{x\mid\forall A\in F.x\in A\}$. תהא I קבוצה ותהא $\{A_i\mid i\in I\}$ קבוצה של קבוצות אזי $\bigcap_{i\in I}A_i=\{x\mid\forall i\in I.x\in A_i\}$. כמו כן נהוג לסמן $\bigcap_{i=0}^{\infty}A_i=\bigcap_{i\in\mathbb{N}}A_i$.

דוגמה 2.3. מתקיים $\bigcap_{i=0}^{\infty}\{n\in\mathbb{N}\mid n\geq i\}=\emptyset$, $\bigcap_{\varepsilon\in\mathbb{R}_+}[0,\varepsilon)=\{0\}$, $\bigcap_{n=1}^{\infty}\left(-\frac{1}{n},\frac{1}{n}\right)=\{0\}$.

2.2 איחוד

הגדרה 2.3 (איחוד)**.** תהיינה A,B קבוצות אזי $A\cup B=\{x\mid x\in A\vee x\in B\}$.

הערה 2.4 (דיאגרמת וון של איחוד). בכדי לייצג את הפעולה $A\cup B$ נשרטט, שימו לב כי החלק האדום הוא החלק המדובר,



דוגמה 2.4. מתקיים $\{1,2,3\}\cup\{3,4,5,6\}=\{1,2,3,4,5,6\}$, $\{\{1\}\}\cup\{1\}=\{1,\{1\}\}$, $\mathbb{N}\cup\mathbb{R}=\mathbb{R}$, $\mathbb{N}_{\text{even}}\cup\mathbb{N}_{\text{odd}}=\mathbb{N}$.

טענה 2.4 (אסוציאטיביות איחוד)**.** תהיינה A,B,C קבוצות אזי $(A\cup B)\cup C=A\cup(B\cup C)$.

הוכחה. תהיינה A,B,C קבוצות, נוכיח בעזרת הכלה דו כיוונית,

- יהי $x\in(A\cup B)\cup C$, צריך להוכיח $x\in A\cup(B\cup C)$, נשים לב כי מהגדרת איחוד והגדרת קבוצה מתקיים $x\in A\cup B\vee x\in C$,
  - ⋆ נניח כי $x\in C$, צריך להוכיח $x\in A\vee x\in B\cup C$, מהגדרת איחוד נקבל כי $x\in B\cup C$ ובפרט $x\in A\vee x\in B\cup C$ כלומר $x\in A\cup(B\cup C)$.
  - ⋆ נניח $x\in A\cup B$,
    - אם $x\in A$, אזי $x\in A\cup(B\cup C)$ מהגדרת איחוד והגדרת קבוצה.

- אם $x \in B$, צריך להוכיח $x \in A \vee x \in B \cup C$, מהגדרת איחוד נקבל כי $x \in B \cup C$ ובפרט $x \in A \vee x \in B \cup C$ כלומר $x \in A \cup (B \cup C)$.

- יהי $x \in A \cup (B \cup C)$, צריך להוכיח $x \in (A \cup B) \cup C$, נשים לב כי מהגדרת איחוד והגדרת קבוצה מתקיים $x \in A \vee x \in B \cup C$,
  - ⋆ נניח כי $x \in A$, צריך להוכיח $x \in A \cup B \vee x \in C$, מהגדרת איחוד נקבל כי $x \in A \cup B$ ובפרט $x \in A \cup B \vee x \in C$ כלומר $x \in (A \cup B) \cup C$.
  - ⋆ נניח $x \in B \cup C$,
    - אם $x \in C$, אזי $x \in (A \cup B) \cup C$ מהגדרת איחוד והגדרת קבוצה.
    - אם $x \in B$, צריך להוכיח $x \in A \cup B \vee x \in C$, מהגדרת איחוד נקבל כי $x \in A \cup B$ ובפרט $x \in A \cup B \vee x \in C$ כלומר $x \in (A \cup B) \cup C$.

■

טענה 2.5 (חילופיות איחוד)**.** תהיינה A, B קבוצות אזי $A \cup B = B \cup A$.

הוכחה. תהיינה A, B קבוצות

- יהי $x \in A \cup B$, מתקיים $x \in A \vee x \in B$ אשר שקול לטענה $x \in B \vee x \in A$ כלומר $x \in B \cup A$.
- יהי $x \in B \cup A$, מתקיים $x \in B \vee x \in A$ אשר שקול לטענה $x \in A \vee x \in B$ כלומר $x \in A \cup B$.

■

טענה 2.6. תהא A קבוצה אזי $A \cup \emptyset = A$ וכן $A \cup A = A$.

הוכחה. תהא A קבוצה

- צ"ל $A = A \cup \emptyset$, יהי $x \in A$ אזי $x \in A \cup \emptyset$ מהגדרת איחוד, יהי $y \in A \cup \emptyset$ אזי $y \in A \vee y \in \emptyset$ אך מתכונות קבוצה ריקה מתקיים $\forall z.z \notin \emptyset$ בפרט $y \in A$ כנדרש.
- צ"ל $A = A \cup A$, יהי $x \in A$ אזי $x \in A \cup A$ מהגדרת איחוד, יהי $y \in A \cup A$ אזי $y \in A \vee y \in A$ אך טענה זו שקולה לטענה $y \in A$ כנדרש.

■

טענה 2.7 (חוק הפילוג)**.** תהיינה A, B, C קבוצות אזי

א. $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$.

ב. $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$.

הוכחה. נוכיח את 1 וטענה 2 תישאר כתרגיל לקורא, צ"ל: $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$, נוכיח בעזרת הכלה דו כיוונית

- יהי $x \in A \cap (B \cup C)$ מהגדרת חיתוך מתקיים $(x \in A) \wedge (x \in B \cup C)$ בפרט $x \in B \cup C$ כעת מהגדרת איחוד מתקיים $(x \in B) \vee (x \in C)$, בה"כ מתקיים $x \in B$ (כי המקרה $x \in C$ סימטרי לחלוטין בעזרת שינוי שמות הקבוצות), לכן נניח כי $x \in B$ אזי $(x \in A) \wedge (x \in B)$ כמו כן $((x \in A) \wedge (x \in B)) \vee$

לכל פרידיקט $(\phi(x))$ מהגדרת קשר לוגי "או" בפרט נקבל כי

$$\begin{aligned}((x\in A)\wedge(x\in B))\vee((x\in A)\wedge(x\in C)) &\equiv (x\in A\cap B)\vee(x\in A\cap C)\\ &\equiv x\in(A\cap B)\cup(A\cap C)\end{aligned}$$

כנדרש.

- יהי $x\in(A\cap B)\cup(A\cap C)$ מהגדרת איחוד מתקיים $(x\in A\cap B)\vee(x\in A\cap C)$, בה"כ מתקיים $x\in A\cap B$ (כי המקרה $x\in A\cap C$ סימטרי לחלוטין בעזרת שינוי שמות הקבוצות B,C), לכן נניח כי $x\in A\cap B$ בפרט $x\in B$ אזי נשים לב כי $(x\in B)\vee(\phi(x))$ לכל פרידיקט ϕ מהגדרת קשר לוגי "או" ובפרט נקבל כי $(x\in B)\vee(x\in C)$ כלומר מהגדרת איחוד $x\in B\cup C$ וכעת כי כאמור $x\in A\cap B$ ולכן בפרט $x\in A$ מהגדרת חיתוך נקבל כי $x\in A\cap(B\cup C)$.

■

2.2.1 איחוד מוכלל

הגדרה 2.4 (איחוד מוכלל). תהא F קבוצה של קבוצות אזי $\bigcup F=\{x\mid\exists A\in F.x\in A\}$. תהא I קבוצה ותהא $\{A_i\mid i\in I\}$ קבוצה של קבוצות אזי $\bigcup_{i\in I}A_i=\{x\mid\exists i\in I.x\in A_i\}$. כמו כן נהוג לסמן $\bigcup_{i=0}^{\infty}A_i=\bigcup_{i\in\mathbb{N}}A_i$.

דוגמה 2.5. מתקיים $\bigcup_{i=0}^{\infty}[i,i+1]=\mathbb{N}$, $\bigcup_{i=0}^{\infty}(i,i+1)=\mathbb{R}_+\backslash\mathbb{N}$, יהי $\varepsilon\in\mathbb{R}_+$ אזי $\bigcup_{q\in\mathbb{Q}}(q-\varepsilon,q+\varepsilon)=\mathbb{R}$.

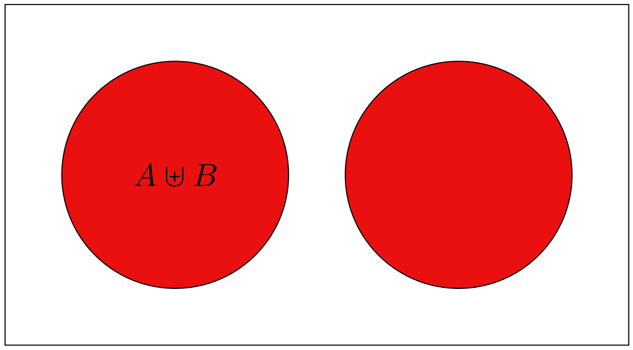
2.2.2 איחוד זר

הגדרה 2.5 (קבוצות זרות). קבוצות A,B נקראות זרות אם מתקיים $A\cap B=\emptyset$. קבוצות A_i באשר $i\in I$ נקראות זרות אם מתקיים $\forall J\subseteq I.\bigcap_{j\in J}A_j=\emptyset$. קבוצות A_i באשר $i\in I$ נקראות זרות בזוגות אם מתקיים $\forall i,j\in I.(i\neq j)\Longrightarrow\left(A_i\cap A_j=\emptyset\right)$.

תרגיל 2.1 (זרות גוררת זרות בזוגות). תהיינה A_i קבוצות באשר $i\in I$ זרות, הוכיחו כי הקבוצות A_i באשר $i\in I$ זרות בזוגות.

הגדרה 2.6 (איחוד זר). תהא I קבוצה ותהא $\{A_i\mid i\in I\}$ קבוצה של קבוצות זרות בזוגות אזי נסמן $\biguplus_{i\in I}A_i=\bigcup_{i\in I}A_i$.

הערה 2.5 (דיאגרמת וון של איחוד זר). בכדי לייצג את הפעולה $A\uplus B$ נשרטט, שימו לב כי החלק האדום הוא החלק המדובר,



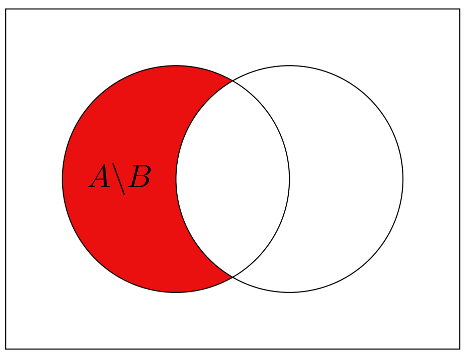
דוגמה 2.6. מתקיים $\biguplus_{z\in\mathbb{Z}}(z,z+1)=\mathbb{R}\backslash\mathbb{Z}$, $\{1\}\uplus\{2\}=\{1,2\}$, $\{\{1\}\}\uplus\{1\}=\{1,\{1\}\}$.

הערה 2.6. יהיו A,B קבוצות סופיות וזרות אזי $|A\uplus B|=|A|+|B|$.

2.3 הפרש

הגדרה 2.7 (הפרש/חיסור)**.** תהיינה A,B קבוצות אזי $A\backslash B=\{x\in A\mid x\notin B\}$.

הערה 2.7 (דיאגרמת וון של הפרש). בכדי לייצג את הפעולה $A\backslash B$ נשרטט, שימו לב כי החלק האדום הוא החלק המדובר,



דוגמה 2.7. מתקיים $\{1,2,3\}\backslash\{3,4,5,6\}=\{1,2\}$, $\{\{1\}\}\backslash\{1\}=\{\{1\}\}$, $\{3,4\}\backslash\{3,4,5\}=\emptyset$, $\mathbb{N}\backslash\mathbb{N}_+=\{0\}$.

טענה 2.8. תהא A קבוצה אזי $A\backslash\emptyset=A$ וכן $A\backslash A=\emptyset$.

הוכחה. נשאר כתרגיל לקורא. ■

טענה 2.9. תהיינה A,B קבוצות אזי התנאים הבאים שקולים (התב"ש)

1. $A\subseteq B$.
2. $A\cap B=A$.
3. $A\backslash B=\emptyset$.
4. $A\cup B=B$.

הוכחה. בשביל להוכיח שקילות של מספר רב של תנאים נבצע "שרשרת הוכחות" כלומר נוכיח כי כל טענה גוררת את עוקבה, תהיינה A, B קבוצות

$1\Longrightarrow 2$. נניח כי $A \subseteq B$ צ"ל: $A \cap B = A$, יהי $x \in A \cap B$ מתקיים $(x \in A) \wedge (x \in B)$ ובפרט $x \in A$, כעת יהי $y \in A$ נשים לב כי $y \in B$ מהנתון כי $A \subseteq B$ והגדרת הכלה בפרט $y \in A \cap B$ מהגדרת חיתוך.

$2\Longrightarrow 3$. נניח כי $A \cap B = A$ צ"ל: $A \backslash B = \emptyset$, נניח בשלילה כי $A \backslash B \neq \emptyset$ אזי $\exists x.x \in A \backslash B$ נסמנו x_0 בפרט $x_0 \in A \backslash B$ כלומר $(x_0 \in A) \wedge (x_0 \notin B)$ אך אם $x_0 \in A$ אזי מהנתון והגדרת חיתוך יתקיים $(x_0 \in A) \wedge (x_0 \in B)$ בפרט $x_0 \in B$ סתירה, בפרט $A \backslash B = \emptyset$ כנדרש.

$3\Longrightarrow 4$. נניח כי $A \backslash B = \emptyset$ צ"ל: $A \cup B = B$, יהי $x \in B$ נשים לב כי $(x \in A) \vee (x \in B)$ ובפרט $x \in A \cup B$ מהגדרת איחוד אזי $B \subseteq A \cup B$, כעת יהי $y \in A \cup B$ מתקיים $(y \in A) \vee (y \in B)$ מהגדרת איחוד,

- ⋆ נניח כי $y \in B$ אזי סיימנו.
- ⋆ נניח כי $y \in A$, נניח בשלילה כי $y \notin B$ אזי $y \in A \backslash B$ סתירה להיות $A \backslash B = \emptyset$ ותכונת הקבוצה הריקה, בפרט $y \in B$.

בפרט קיבלנו כי $y \in B$ כלומר $A \cup B \subseteq B$. ובסה"כ קיבלנו כי $A \cup B = B$ מהגדרת שיוויון כהכלה דו כיוונית.

$4\Longrightarrow 1$. נניח כי $A \cup B = B$ צ"ל: $A \subseteq B$, יהי $x \in A$ מתקיים $(x \in A) \vee (x \in B)$ מהגדרת "או" ולכן $x \in A \cup B$ בפרט מהנתון והגדרת שיוויון קבוצות $x \in B$ כנדרש.

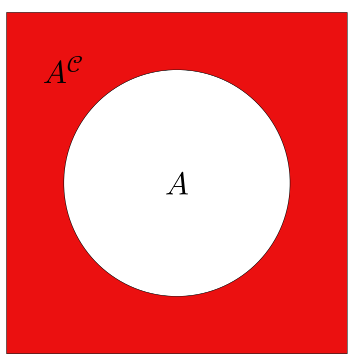
■

הערה 2.8. יהיו $A \subseteq B$ קבוצות סופיות אזי $|A \backslash B| = |A| - |B|$.

2.3.1 משלים

הגדרה 2.8 (משלים). תהיינה A, U קבוצות המקיימות $A \subseteq U$ אזי $A^C = U \backslash A$.

הערה 2.9 (דיאגרמת וון של משלים). בכדי לייצג את הפעולה A^C נשרטט, שימו לב כי החלק האדום הוא החלק המדובר,



טענה 2.10 (כללי דה מורגן). תהיינה A, B, C קבוצות אזי

1. $(A \cup B)^C = A^C \cap B^C$.
2. $(A \cap B)^C = A^C \cup B^C$.

3. $A\setminus(B\cup C)=(A\setminus B)\cap(A\setminus C)$.
4. $A\setminus(B\cap C)=(A\setminus B)\cup(A\setminus C)$.

הוכחה. טענות $2,4$ ישארו כתרגיל לקורא

1. נניח כי עולם הדיון שלנו הינו U ותהיינה A,B קבוצות, נוכיח בעזרת שקילויות לוגיות, ודאו כי אתם ידועים לנמק כל אחד מהמעברים

$$\begin{aligned}x\in A^C\cap B^C &\iff (x\in A^C)\wedge(x\in B^C)\iff(x\in U\setminus A)\wedge(x\in U\setminus B)\\ &\iff((x\notin A)\wedge(x\in U))\wedge((x\notin B)\wedge(x\in U))\\ &\iff(x\in U)\wedge((x\notin A)\wedge(x\notin B))\\ &\iff(x\in U)\wedge\neg((x\in A)\vee(x\in B))\\ &\iff(x\in U)\wedge\neg(x\in A\cup B)\\ &\iff(x\in U)\wedge(x\notin A\cup B)\iff(x\in U\setminus A\cup B)\\ &\iff x\in(A\cup B)^C\end{aligned}$$

3. תהיינה A,B,C קבוצות אזי

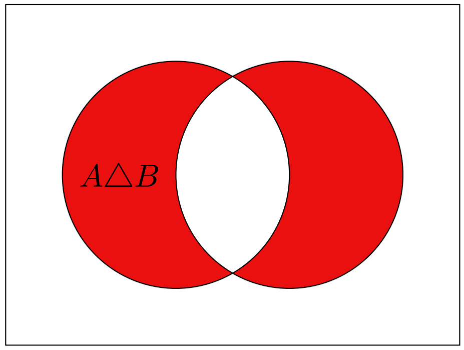
$$\begin{aligned}x\in A\setminus(B\cup C)&\iff((x\in A)\wedge(x\notin B\cup C))\iff((x\in A)\wedge\neg(x\in B\cup C))\\ &\iff(x\in A)\wedge(\neg((x\in B)\vee(x\in C)))\\ &\iff(x\in A)\wedge((x\notin B)\wedge(x\notin C))\\ &\iff((x\in A)\wedge(x\notin B))\wedge((x\in A)\wedge(x\notin C))\\ &\iff(x\in A\setminus B)\wedge(x\in A\setminus C)\\ &\iff x\in(A\setminus B)\cap(A\setminus C)\end{aligned}$$

■

2.4 הפרש סימטרי

הגדרה 2.9 (הפרש סימטרי)**.** תהיינה A,B קבוצות אזי $A\triangle B=(A\setminus B)\cup(B\setminus A)$.

הערה 2.10 (דיאגרמת וון של הפרש סימטרי). בכדי לייצג את הפעולה $A\triangle B$ נשרטט, שימו לב כי החלק האדום הוא החלק המדובר,



דוגמה 2.8. מתקיים $\{1,2,5,6\}=\{3,4,5,6\}\triangle\{1,2,3\}$, $\{\{1\},1\}=\{1\}\triangle\{\{1\}\}$, $\{3,4\}\triangle\{3,4,5\}=\{5\}$.

טענה 2.11 (אסוציאטיביות הפרש סימטרי)**.** תהיינה A,B,C קבוצות אזי $(A\triangle B)\triangle C=A\triangle(B\triangle C)$.

הוכחה. נשאר כתרגיל לקורא. ■

טענה 2.12 (חילופיות הפרש סימטרי)**.** תהיינה A,B קבוצות אזי $A\triangle B=B\triangle A$.

הוכחה. נשאר כתרגיל לקורא. ■

טענה 2.13. תהא A קבוצה אזי $A\triangle\emptyset=A$ וכן $A\triangle A=\emptyset$.

הוכחה. נשאר כתרגיל לקורא. ■

2.5 קבוצת החזקה

הגדרה 2.10 (קבוצת החזקה)**.** תהא A קבוצה אזי $P(A)=\{B\mid B\subseteq A\}$.

דוגמה 2.9. מתקיים $P(\emptyset)=\{\emptyset\}$, $P(\{1,2\})=\{\emptyset,\{1\},\{2\},\{1,2\}\}$.

טענה 2.14. תהיינה A,B קבוצות אזי $(A\subseteq B)\Longleftrightarrow(P(A)\subseteq P(B))$.

הוכחה. נשאר כתרגיל לקורא. ■

משפט 2.1. תהא A קבוצה סופית אזי $|P(A)|=2^{|A|}$.

הוכחה. תהא A קבוצה סופית אזי נסמן $|A|=n\in\mathbb{N}$ ולכן מתקיים $A=\{a_1\dots a_n\}$ נשים לב כי כל תת קבוצה של A ניתנת לתיאור בצורה הבאה "כל איבר ב־A יספר לנו האם הוא נמצא בתת קבוצה או לא", לדוגמה הקבוצה $\emptyset$ מתארת את המקרה בו אף איבר של A נכנס לקבוצה, לעומת זאת $\{a_2,a_7\}$ מתארת את המקרה בו a_2,a_7 נכנסו לקבוצה ושאר האיברים לא (ודאו כי אתם מבינים מדוע תהליך זה מחזיר את כל תתי הקבוצות של A), כעת נשים לב כי בכל תת קבוצה כזאת לכל איבר יש שתי אפשרויות, לבחור להיכנס או לא, ולכן כמות תתי הקבוצות הינן $2^n=\underbrace{2\cdot2\cdot\ldots\cdot2}_{n\text{ איברים}}$ בפרט נקבל כי $|P(A)|=2^{|A|}$. (עבור הוכחה פורמלית ומלאה ראו ...) ■

3 יחסים

3.1 זוג סדור

הגדרה 3.1 (זוג סדור)**.** יהיו x,y נגדיר $\langle x,y\rangle = \{\{x\},\{x,y\}\}$.

טענה 3.1. יהיו a,b,c,d אזי $\langle a,b\rangle = \langle c,d\rangle \iff (a=c)\wedge(b=d)$.

הוכחה. יהיו a,b,c,d כיוון הגרירה $\Longleftarrow$ נשאר כתרגיל לקורא, כעת נניח כי $\langle a,b\rangle = \langle c,d\rangle$ אזי מהגדרת זוג סדור מתקיים $\{\{a\},\{a,b\}\} = \{\{c\},\{c,d\}\}$,

- נניח כי $\{a\}=\{c\}$, אזי $a=c$ וכן $\{a,b\}=\{c,d\}$ ומהיות $a=c$ נקבל כי $b=d$.
- נניח כי $\{a\}=\{c,d\}$, אזי $a=c=d$ וכן $\{a,b\}=\{c\}$ ולכן $a=b=c$ כלומר $a=c$ וכן $b=d$.

■

הערה 3.1 (הגדרת הזוג הסדור). מה שמעניין אותנו בהגדרת הזוג הסדור היא התכונה הנובעת מטענה 3.1 בלבד, כל דרך נוספת להגדרת זוג סדור אשר מקיימת את טענה 3.1 מתקבלת באופן שקול.

3.1.1 מכפלה קרטזית

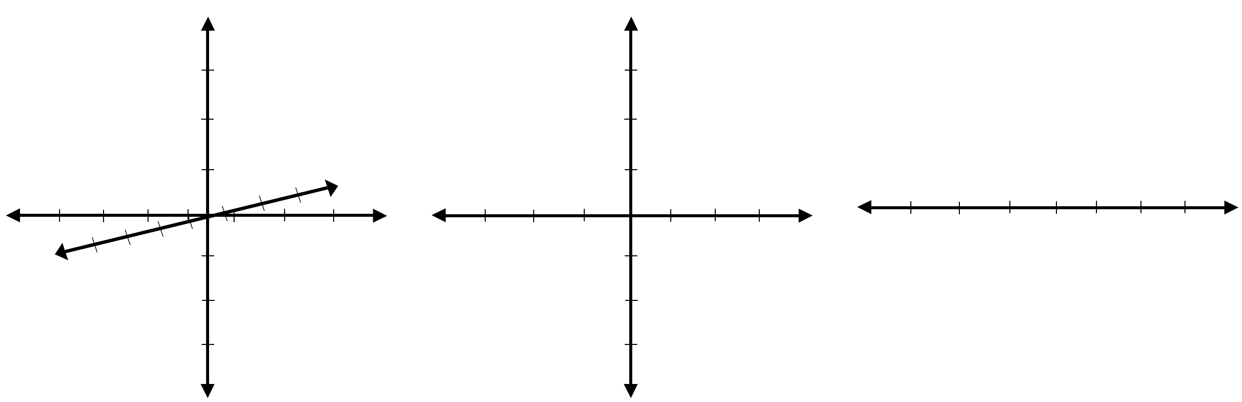
הגדרה 3.2 (מכפלה קרטזית)**.** תהיינה A,B קבוצות אזי $A\times B = \{\langle a,b\rangle \mid a\in A\wedge b\in B\}$. ונגדיר רקורסיבית $A^1 = A$ וכן $A^{n+1} = A^n\times A$ לכל $n\in\mathbb{N}_+$.

הערה 3.2. נשתמש בקונבנציה $\langle a_1,\ldots,a_n\rangle = \langle\langle a_1,\ldots,a_{n-1}\rangle,a_n\rangle$ עבור nיה סדורה.

דוגמה 3.1. מתקיים $\{1,2\}\times\{3,4\} = \{\langle 1,3\rangle,\langle 1,4\rangle,\langle 2,3\rangle,\langle 2,4\rangle\}$, $\{1\}^3 = \{\langle 1,1,1\rangle\}$, $\{1,2\}\times\{3,4\}\times\{5,6\} = \{\langle 1,3,5\rangle,\langle 1,4,5\rangle,\langle 2,3,5\rangle,\langle 2,4,5\rangle,\langle 1,3,6\rangle,\langle 1,4,6\rangle,\langle 2,3,6\rangle,\langle 2,4,6\rangle\}$.

הגדרה 3.3 (המישור הממשי)**.** עבור $n\in\mathbb{N}$ המישור הממשי ה־n מימדי הינו $\mathbb{R}^n$. הישר הממשי (ציר המספרים) זהו $\mathbb{R}$, המישור הממשי (ציר xy) הינו $\mathbb{R}^2$, והמרחב בו אנו חיים (ציר xyz) הינו $\mathbb{R}^3$.

הערה 3.3 (המישור הממשי). נשים לב לייצוג הגיאומטרי של הציר הממשי, אותו המציא רנה דקראט,



טענה 3.2. תהיינה A,B קבוצות אזי $A\times B = \biguplus_{b\in B} A\times\{b\}$.

הוכחה. תחילה נצדיק את השימוש באיחוד זר, יהיו $b_1, b_2 \in B$ שונים נניח בשלילה כי $x \in (A \times \{b_2\}) \cap (A \times \{b_1\})$ אזי $(x \in A \times \{b_1\}) \wedge (x \in A \times \{b_2\})$ ובפרט מהגדרת מכפלה קרטזית נקבל כי קיים $a_1 \in A$ עבורו $x = \langle a_1, b_1 \rangle$ וכן קיים $a_2 \in A$ עבורו $x = \langle a_2, b_2 \rangle$ אזי $\langle a_1, b_1 \rangle = \langle a_2, b_2 \rangle$ ומתכונת זוג סדור נקבל $b_1 = b_2$ סתירה בפרט מיחידות הקבוצה עם תכונת הקבוצה הריקה נקבל כי $(A \times \{b_2\}) \cap (A \times \{b_1\}) = \emptyset$ כנדרש. כעת נוכיח בעזרת הכלה דו כיוונית את הטענה,

- יהי $x \in A \times B$, אזי קיימים $a' \in A$ וכן $b' \in B$ עבורם $x = \langle a', b' \rangle$, אזי נשים לב כי מתקיים $x \in A \times \{b'\}$ מהגדרת מכפלה קרטזית ולכן מהגדרת איחוד מוכלל נקבל כי $x \in \biguplus_{b \in B} A \times \{b\}$ כי טענה זו מתקיימת עבור $b = b'$.
- יהי $x \in \biguplus_{b \in B} A \times \{b\}$, אזי קיים $b' \in B$ עבורו $x \in A \times \{b'\}$ ומהגדרת מכפלה קרטזית קיים $a' \in A$ עבורו $x = \langle a', b' \rangle$, כעת נשים לב כי גם בהכרח $a' \in A$ וכן $b' \in B$ ולכן מהגדרת מכפלה קרטזית מתקיים $x \in A \times B$ עבור האיברים a', b' בקבוצות בהתאמה.

■

מסקנה 3.1. תהיינה A, B קבוצות סופיות אזי $|A \times B| = |A| \cdot |B|$.

הוכחה. תהיינה A, B קבוצות סופיות אזי מהטענה הקודמת וכן עוצמה סופית עבור איחוד זר נקבל כי

$$|A \times B| = \left| \biguplus_{b \in B} A \times \{b\} \right| = \sum_{b \in B} |A \times \{b\}| = \sum_{b \in B} |A| = |A| \cdot |B|$$

כאשר השתמשנו בעובדה כי $|A| = |A \times \{b\}|$ וזאת כי קיימת התאמה בין אברי A לאברי $A \times \{b\}$ בצורה הבאה $a \mapsto \langle a, b \rangle$ לכל $a \in A$. ■

טענה 3.3. תהיינה A, B, C קבוצות אזי

1. $A \times (B \cap C) = (A \times B) \cap (A \times C)$.
2. $A \times (B \cup C) = (A \times B) \cup (A \times C)$.

הוכחה. טענה 2 תישאר כתרגיל לקורא, נוכיח את טענה 1 עם הכלה דו כיוונית

- יהי $x \in A \times (B \cap C)$ אזי קיים $a' \in A$ וכן $d' \in B \cap C$ המקיימים $x = \langle a', d' \rangle$, כמו כן מתקיים $(d' \in B) \wedge (d' \in C)$ ולכן $\langle a', d' \rangle \in A \times B$ וכן $\langle a', d' \rangle \in A \times C$ מהגדרת מכפלה קרטזית ולכן מהגדרת חיתוך מתקיים $\langle a', d' \rangle \in (A \times C) \cap (A \times B)$ כלומר $x \in (A \times C) \cap (A \times B)$.
- יהי $x \in (A \times B) \cap (A \times C)$, אזי $(x \in A \times B) \wedge (x \in A \times C)$ אזי קיימים $a_1, a_2 \in A$, $b' \in B$ וכן $c' \in C$ עבורם $x = \langle a_1, b' \rangle$ וכן $x = \langle a_2, c' \rangle$, מתכונת זוג סדור נקבל כי $a_1 = a_2$ וכן $c' = b'$ בפרט $b' \in C$ ולכן $b' \in B \cap C$ כמו כן כאמור $a_1 \in A$ ולכן מהגדרת מכפלה קרטזית מתקיים $\langle a_1, b' \rangle \in A \times (B \cap C)$ כלומר $x \in A \times (B \cap C)$.

■

טענה 3.4. תהיינה A, B קבוצות זרות אזי לכל קבוצה C מתקיים $A \times C, B \times C$ זרות.

הוכחה. תהיינה A,B קבוצות זרות ותהא C קבוצה, צ"ל: $(A\times C)\cap(B\times C)=\emptyset$, נניח בשלילה כי $x\in(A\times C)\cap(B\times C)$ אזי מהגדרת חיתוך $(x\in A\times C)\wedge(x\in B\times C)$ בפרט קיימים $a'\in A$, $b'\in B$ וכן $c_1,c_2\in C$ עבורם $x=\langle a',c_1\rangle$ וכן $x=\langle b',c_2\rangle$, מתכונת הזוג הסדור מתקיים $b'=a'$ סתירה להיות A,B זרות (כי $a'\in A$ אך $a'=b'\in B$). ■

3.2 יחס

עד כה הגדרנו קבוצות וזוגות סדורים, אובייקטים אשר נועדו לתאר מקבץ אובייקטים נוספים, אך לא קיימת לנו דרך להשוואת או להתייחס להבדל בין אובייקט אחד למשנהו, לדוגמה אנו לא יודעים כיצד לבטא את הטענה $1<2$ או f היא פונקציה אשר מקבלת $x\in\mathbb{R}$ ופולטת $x\in\mathbb{R}$ על פי הכלל $f\left(x\right)=x^2$. (ובפרט מהי הגדרת פונקציה)

הגדרה 3.4 (יחס)**.** תהיינה A,B קבוצות אזי R יחס מעל A,B אם מתקיים $R\subseteq A\times B$.

הערה 3.4. אם R יחס מעל A,A נאמר כי R יחס מעל A.

הגדרה 3.5. יהי R יחס מעל A,B ויהיו $\langle a,b\rangle\in A\times B$ אם מתקיים $\langle a,b\rangle\in R$ נסמן aRb, ונאמר כי a מתייחס R אל b.

דוגמה 3.2. $\{\langle 1,3\rangle,\langle 2,4\rangle\}$ יחס מעל $\{1,2\},\{3,4\}$ אך גם יחס מעל $\mathbb{R},\mathbb{R}$ וכן מעל $\mathbb{Q},\mathbb{C}$.

הגדרה 3.6 (אי שיוויונות טבעיים)**.** נגדיר את היחס $<_{\mathbb{N}}$ מעל $\mathbb{N}$ כך $<_{\mathbb{N}}=\{\langle n,m\rangle\in\mathbb{N}^2\mid\exists k\in\mathbb{N}_+.n+k=m\}$ ונגדיר את היחס $\leq_{\mathbb{N}}$ מעל $\mathbb{N}$ כך $\leq_{\mathbb{N}}=\{\langle n,m\rangle\in\mathbb{N}^2\mid\exists k\in\mathbb{N}.n+k=m\}$, באותה מידה נגדיר עבור $\mathbb{Z},\mathbb{Q},\mathbb{R}$.

הגדרה 3.7 (יחס הזהות)**.** תהא A קבוצה אזי $\mathrm{Id}_A=\{\langle a,a\rangle\mid a\in A\}$.

טענה 3.5. מתקיים $\leq_{\mathbb{N}}=<_{\mathbb{N}}\cup\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}$. (שימו לב כי זהו שיוויון בין קבוצות)

הוכחה. נוכיח בעזרת הכלה דו כיוונית

- יהי $\langle n,m\rangle\in\leq_{\mathbb{N}}$, אם $n=m$ אזי $\langle n,m\rangle\in\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}$ ולכן $\langle n,m\rangle\in<_{\mathbb{N}}\cup\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}$, אחרת אם $n\neq m$ מתקיים $\exists k\in\mathbb{N}.n+k=m$ מהגדרת $\leq_{\mathbb{N}}$ אך בהכרח $k\neq 0$ כי אחרת $n=m$ ולכן $\exists k\in\mathbb{N}_+.n+k=m$ בפרט מעיקרון ההפרדה $\langle n,m\rangle\in<_{\mathbb{N}}$ ולכן $\langle n,m\rangle\in<_{\mathbb{N}}\cup\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}$.
- יהי $\langle n,m\rangle\in<_{\mathbb{N}}\cup\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}$
  - ⋆ אם $\langle n,m\rangle\in<_{\mathbb{N}}$ אזי $\exists k\in\mathbb{N}_+.n+k=m$ נסמנו k_0, נשים לב כי $k_0\in\mathbb{N}$ ובפרט גם יתקיים $\exists k\in\mathbb{N}.n+k=m$ ולכן $\langle n,m\rangle\in\leq_{\mathbb{N}}$.
  - ⋆ אם $\langle n,m\rangle\in\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}$ אזי $n=m$ ולכן $n+0=m$ כלומר מתקיים $\exists k\in\mathbb{N}.n+k=m$ ולכן $\langle n,m\rangle\in\leq_{\mathbb{N}}$.

■

3.2.1 תחום ותמונה

הגדרה 3.8 (מקור/תחום של יחס)**.** יהי R יחס מעל A,B אזי $\mathrm{Dom}\left(R\right)=\left\{a\in A\mid\exists b\in B.aRb\right\}$, כלומר $\mathrm{Dom}\left(R\right)$ קבוצת כל האיברים ב־A אשר מתייחסים לאיבר כלשהו דרך R.

דוגמה 3.3. $\mathrm{Dom}\left(\left\{\left\langle 1,3\right\rangle,\left\langle 2,4\right\rangle\right\}\right)=\left\{1,2\right\}$, $\mathrm{Dom}\left(\left\{\left\langle X,x\right\rangle\in P\left(\mathbb{N}\right)\times\mathbb{N}\mid x\in X\right\}\right)=P\left(\mathbb{N}\right)\setminus\left\{\emptyset\right\}$.

הגדרה 3.9 (תמונה של יחס)**.** יהי R יחס מעל A,B אזי $\mathrm{Im}\left(R\right)=\left\{b\in B\mid\exists a\in A.aRb\right\}$, כלומר $\mathrm{Im}\left(R\right)$ קבוצת כל האיברים ב־B אשר מתייחסים אליהם דרך R.

דוגמה 3.4. מתקיים $\mathrm{Im}\left(\left\{\left\langle 1,3\right\rangle,\left\langle 2,4\right\rangle\right\}\right)=\left\{3,4\right\}$, $\mathrm{Im}\left(\left\{\left\langle x,\lceil x\rceil\right\rangle\mid x\in\mathbb{R}\right\}\right)=\mathbb{Z}$.

3.2.2 יחס הופכי

הגדרה 3.10 (יחס הופכי)**.** יהי R יחס מעל A,B נגדיר יחס R^{-1} על B,A כך $R^{-1}=\left\{\left\langle b,a\right\rangle\mid aRb\right\}$.

דוגמה 3.5. נגדיר $R=\left\{\left\langle 1,3\right\rangle,\left\langle 2,4\right\rangle\right\}$ מעל $\mathbb{N}$ אזי $R^{-1}=\left\{\left\langle 3,1\right\rangle,\left\langle 4,2\right\rangle\right\}$ מוגדר על $\mathbb{N}$.

טענה 3.6. יהי R יחס מעל A,B ויהי $\left\langle a,b\right\rangle\in A\times B$ אזי $\left(bR^{-1}a\right)\iff\left(aRb\right)$.

הוכחה. נשאר כתרגיל לקורא. ■

מסקנה 3.2. יהי R יחס מעל A,B אזי $\mathrm{Dom}\left(R\right)=\mathrm{Im}\left(R^{-1}\right)$.

הוכחה. ההכלה $\supseteq$ תישאר כתרגיל לקורא. ובכיוון הנגדי, יהי $a'\in\mathrm{Dom}\left(R\right)$ אזי $\exists b\in B.a'Rb$ נסמנו b' כלומר $a'Rb'$ מהגדרת R^{-1} מתקיים $b'Ra'$ ולכן $\exists a\in A.b'R^{-1}a$ אזי $a\in\mathrm{Im}\left(R^{-1}\right)$. ■

טענה 3.7. יהי R יחס מעל A,B אזי $R=\left(R^{-1}\right)^{-1}$.

הוכחה. נוכיח בעזרת שרשרת השקילויות הבאה

$$\left\langle a,b\right\rangle\in R\iff aRb\iff bR^{-1}a\iff a\left(R^{-1}\right)^{-1}b\iff\left\langle a,b\right\rangle\in\left(R^{-1}\right)^{-1}$$

ולכן $\left\langle a,b\right\rangle\in\left(R^{-1}\right)^{-1}\iff\left\langle a,b\right\rangle\in R$ אשר זהו תנאי שקול לשיוויון קבוצות בפרט $R=\left(R^{-1}\right)^{-1}$. ■

3.2.3 הרכבה

הגדרה 3.11 (הרכבת יחסים)**.** יהי R יחס מעל A,B ויהי S יחס מעל B,C נגדיר יחס $S\circ R$ מעל A,C כך $S\circ R=\left\{\left\langle a,c\right\rangle\in A\times C\mid\exists b\in B.\left(aRb\right)\wedge\left(bSc\right)\right\}$.

דוגמה 3.6. מתקיים

- $\left\{\left\langle 1,3\right\rangle,\left\langle 2,4\right\rangle\right\}\circ\left\{\left\langle 4,1\right\rangle,\left\langle 3,2\right\rangle\right\}=\left\{\left\langle 4,3\right\rangle,\left\langle 3,4\right\rangle\right\}$.
- $\left\{\left\langle\left\{n\right\},n+1\right\rangle\mid n\in\mathbb{N}\right\}\circ\left\{\left\langle n,\left\{n\right\}\right\rangle\mid n\in\mathbb{N}\right\}=\left\{\left\langle n,n+1\right\rangle\mid n\in\mathbb{N}\right\}$.
- $\{\langle a,x\rangle,\langle b,y\rangle,\langle c,y\rangle,\langle d,z\rangle\}\circ\{\langle 1,a\rangle,\langle 1,b\rangle,\langle 2,a\rangle,\langle 3,a\rangle,\langle 3,c\rangle\}=\{\langle 1,x\rangle,\langle 1,y\rangle,\langle 2,x\rangle,\langle 3,x\rangle,\langle 3,y\rangle\}$.

טענה 3.8 (אסוציאטיביות הרכבה)**.** יהי R יחס מעל A, B יהי S יחס מעל B, C ויהי T יחס מעל C, D אזי $T \circ (S \circ R) = (T \circ S) \circ R$.

הוכחה. ... ∎

הערה 3.5. מכאן ואילך אם קיימת פעולת הרכבה בין שני יחסים ניתן להניח כי התחום והתמונה שלהם מזדהים לפי ההגדרה.

טענה 3.9. יהיו R, S יחסים אזי $(R \circ S)^{-1} = S^{-1} \circ R^{-1}$.

הוכחה. ... ∎

טענה 3.10. יהי R יחס מעל A, B אזי מתקיים $R = R \circ \text{Id}_A = \text{Id}_B \circ R$.

הוכחה. ... ∎

4 יחסי שקילות

4.0.1 יחס רפלקסיבי

הגדרה 4.1 (יחס רפלקסיבי)**.** יחס R מעל A המקיים $\forall a \in A.aRa$.

דוגמה 4.1. היחס $\{\langle 1,2\rangle, \langle 1,1\rangle, \langle 2,2\rangle\}$ מעל $\{1,2\}$ הינו יחס רפלקסיבי, לעומת זאת אותו היחס מעל $\mathbb{N}$ אינו יחס רפלקסיבי.

טענה 4.1. יהי R יחס מעל A אזי R רפלקסיבי אס"ם $\text{Id}_A \subseteq R$.

4.0.2 יחס סימטרי

הגדרה 4.2 (יחס סימטרי)**.** יחס R מעל A המקיים $\forall a, b \in A.aRb \Longrightarrow bRa$.

דוגמה 4.2. היחס $\{\langle 1,2\rangle, \langle 2,1\rangle, \langle 3,3\rangle\}$ מעל $\{1,2,3\}$ הינו יחס סימטרי, לעומת זאת $\{\langle 1,2\rangle, \langle 1,1\rangle\}$ יחס לא סימטרי מעל $\{1,2\}$ כי $\langle 2,1\rangle$ לא ביחס.

טענה 4.2. יהי R יחס מעל A אזי R סימטרי אס"ם $R^{-1} = R$.

4.0.3 יחס טרנזיטיבי

הגדרה 4.3 (יחס טרנזיטיבי)**.** יחס R מעל A המקיים $\forall a, b, c \in A. (aRb \wedge bRc) \Longrightarrow aRc$.

דוגמה 4.3. היחס $\{\langle 1,2\rangle, \langle 2,1\rangle, \langle 1,1\rangle\}$ מעל $\{1,2\}$ הינו יחס טרנזיטיבי, לעומת זאת $\{\langle 1,2\rangle, \langle 2,3\rangle\}$ יחס לא טרנזיטיבי מעל $\{1,2,3\}$ כי $\langle 1,3\rangle$ אינו ביחס.

טענה 4.3. יהי R יחס מעל A אזי R סימטרי אס"ם $R \circ R \subseteq R$.

הגדרה 4.4 (יחס שקילות)**.** יחס R מעל A רפלקסיבי, סימטרי וטרנזיטיבי.

דוגמה 4.4. תהא A קבוצה אזי $A \times A$ יחס שקילות, Id_A יחס שקילות, $\emptyset$ יחס שקילות, כמו כן $\{\langle 1,1\rangle, \langle 2,3\rangle, \langle 3,2\rangle\}$ יחס שקילות מעל $\{1,2,3\}$.

4.1 מחלקת שקילות

הגדרה 4.5 (מחלקת שקילות)**.** יהי R יחס שקילות מעל A ויהי $a \in A$ אזי $[a]_R = \{b \in A \mid aRb\}$.

דוגמה 4.5. מתקיים $[n]_{\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}} = \{n\}$, $[n]_{\mathbb{N}^2} = \mathbb{N}$.

הגדרה 4.6 (מדולו/קבוצת המנה)**.** יהי R יחס שקילות מעל A אזי $A/R = \left\{[a]_R \mid a \in A\right\}$.

דוגמה 4.6. מתקיים $\mathbb{N}/\mathrm{Id}_{\mathbb{N}} = \{\{n\} \mid n \in \mathbb{N}\}$, $\mathbb{N}/\mathbb{N}^2 = \{\mathbb{N}\}$.

טענה 4.4. יהי R יחס שקילות מעל A ויהיו $a, b \in A$ אזי

- $(aRb) \iff \left([a]_R = [b]_R\right)$.
- $(\neg aRb) \iff \left([a]_R \cap [b]_R = \emptyset\right)$.

הגדרה 4.7 (מערכת נציגים)**.** יהי R יחס שקילות מעל A אזי $B \subseteq A$ נקראת מערכת נציגים של R אם היא מקיימת

- יחידות איבר מכל מחלקת שקילות: $\forall a, b \in B. (a \neq b \Longrightarrow \neg aRb)$.
- קיום איבר מכל מחלקת שקילות: $\forall a \in A. \exists b \in B. aRb$.

דוגמה 4.7. נגדיר את היחס $S = \{\langle 1,4\rangle, \langle 2,3\rangle, \langle 3,5\rangle, \langle 2,5\rangle\}$ מעל $A = \{1,2,3,4,5,6\}$ ונגדיר את יחס השקילות $R = \mathrm{Id}_A \cup S \cup S^{-1}$ נשים לב כי מתקיים

$$\begin{array}{lll} [1]_R = \{1,4\} & [2]_R = \{2,3,5\} & [3]_R = \{2,3,5\} \\ [4]_R = \{1,4\} & [5]_R = \{2,3,5\} & [6]_R = \{6\} \end{array}$$

ולכן נקבל כי $A/R = \{\{1,4\}, \{2,3,5\}, \{6\}\}$ אזי $\{1,2,6\}$ מערכת נציגים, באותה מידה גם $\{4,5,6\}$ מערכת נציגים.

4.2 חלוקה

הגדרה 4.8 (חלוקה)**.** תהא A קבוצה אזי $\Pi \subseteq P(A) \setminus \{\emptyset\}$ המקיימת

- $\forall X, Y \in \Pi. (X \neq Y) \Longrightarrow (X \cap Y = \emptyset)$.
- $\biguplus_{X \in \Pi} X = A$.

דוגמה 4.8. מתקיים כי $\{\mathbb{N}_{\text{even}}, \mathbb{N}_{\text{odd}}\}$ חלוקה של $\mathbb{N}$, באותה מידה גם $\{\{0\}, \mathbb{N}_+\}$ חלוקה של $\mathbb{N}$, כמו כן $\{(n, n+1) \mid n \in \mathbb{Z}\} \uplus \{\mathbb{Z}\}$ חלוקה של $\mathbb{R}$.

טענה 4.5. יהיו Π_1, Π_2 חלוקות של A המקיימות $\Pi_1 \subseteq \Pi_2$ אזי $\Pi_1 = \Pi_2$.

הוכחה. ... ∎

4.2.1 יחס מושרה וחלוקה מושרית

טענה 4.6 (יחס וחלוקה מושרים)**.** תהא A קבוצה

- תהא Π חלוקה של A אזי $R_\Pi = \biguplus_{X\in\Pi} X^2$ יחס מעל A. נקרא ל־R_Π היחס המושרה מעל A מהחלוקה Π.
- יהי R יחס מעל A אזי A/R חלוקה. נקרא ל־A/R החלוקה המושרת של A מהיחס R.

הוכחה. ... ■

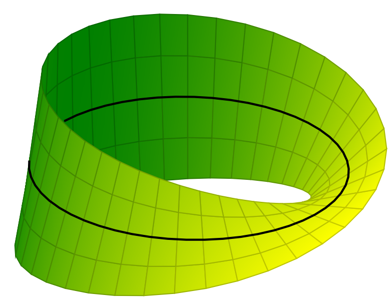
משפט 4.1. תהא A קבוצה יהי S יחס מעל A ותהא Π חלוקה של A אזי $R_{A/S} = S$ וכן $A/R_\Pi = \Pi$.

הוכחה. ... ■

דוגמה 4.9. תהא A קבוצה אזי $R/A^2 = \{A\}$ חלוקה, $R/\mathrm{Id}_R = \{\{a\} \mid a \in A\}$ חלוקה.

דוגמה 4.10. נגדיר חלוקה $\Pi = \{[n, n+1) \mid n \in \mathbb{Z}\}$ של $\mathbb{R}$ אזי $R_\Pi = \{\langle x, y\rangle \in \mathbb{R}^2 \mid \lfloor x\rfloor = \lfloor y\rfloor\}$.

דוגמה 4.11 (טבעת מוביוס)**.** נסתכל על המרחב $A = [0,1]^2$ ונגדיר יחס עליו $R = \mathrm{Id}_A \cup \{\langle\langle 0, x\rangle, \langle 1, 1-x\rangle\rangle \mid x \in [0,1]\}$ (ודאו כי זהו יחס שקילות!) כעת נסתכל על A/R נשים לב כי בקבוצה זו הנקודות מהצורה $\langle 0, x\rangle, \langle 1, 1-x\rangle$ עבור $x \in [0,1]$ מודבקות, ולכן נקבל את הצורה הבאה



5 פונקציות

5.0.1 יחס חד־ערכי

הגדרה 5.1 (יחס חד־ערכי/פונקציה חלקית)**.** יחס R מעל A, B המקיים $\forall a \in A. \forall b_1, b_2 \in B. (aRb_1 \wedge aRb_2) \Longrightarrow (b_1 = b_2)$.

5.0.2 יחס מלא

הגדרה 5.2 (יחס מלא)**.** יחס R מעל A,B המקיים $\forall a\in A.\exists b\in B.aRb$.

הגדרה 5.3 (פונקציה)**.** יחס f מעל A,B יקרא פונקציה אם הינו חד־ערכי ומלא.

- נסמן $A\to B=A^B={}^BA=\{f\subseteq A\times B\mid f \text{ פונקציה}\}$.
- תהא $f\in A\to B$ נסמן $f:A\to B$.
- תהא $f:A\to B$ ויהיו $a,b\in A\times B$ המקיימים afb נסמן $f\left(a\right)=b$.

הערה 5.1. שימו לב כי הסימון $f\left(a\right)=b$ אפשרי עבור פונקציות לעומת יחסים מהיות פונקציה חד־ערכית.

דוגמה 5.1. נגדיר פונקציה $f\in\{a,b,c\}^{\{1,2,3\}}$ כך $f=\{\langle 1,a\rangle,\langle 2,a\rangle,\langle 3,b\rangle\}$, נגדיר פונקציה $F:(\mathbb{R}\to\mathbb{R})\to\mathbb{R}$ כך $F=\left\{\langle g,x\rangle\in{}^{\mathbb{R}}\mathbb{R}\times\mathbb{R}\mid g\left(2\right)=x\right\}$.

הערה 5.2. יהיו A,B קבוצות סופיות אזי $\left|A^B\right|=\left|A\right|^{\left|B\right|}$.

5.0.3 טווח

הגדרה 5.4 (טווח)**.** תהא $f\in B^A$ אזי $\mathrm{Range}\left(R\right)=B$.

הערה 5.3. שימו לב כי $\mathrm{Im}\left(f\right)\subseteq\mathrm{Range}\left(f\right)$ אך לא תמיד מתקיים $\mathrm{Im}\left(f\right)=\mathrm{Range}\left(f\right)$, נגדיר $f\in\{a,b,c\}^{\{1,2,3\}}$ כך $f=\{\langle 1,a\rangle,\langle 2,a\rangle,\langle 3,b\rangle\}$ נשים לב כי $\mathrm{Range}\left(f\right)=\{a,b,c\}$ אך $\mathrm{Im}\left(f\right)=\{a,b\}$.

5.1 כתיב למבדא

מטרת כתיב λ היא לתת לנו יכולת ודרך לכתיבת פונקציות עם פירוט לגבי תחומה, במקום לכתוב $f:A\to B$ המקיימת $f\left(x\right)=\ldots$ נוכל להצהיר כי f מקבלת קלט x מהקבוצה A ומחזירה פלט $f\left(x\right)$. כתיב זה שימושי בעיקר כעקרון פורמלי וכן כאשר יש אי ודאות ברורה בתחום הפונקציה (נגיד תחום $f\left(n\right)=n^2$ עלול להיות $\mathbb{N}$ או $\mathbb{N}_+$ או $\mathbb{Z}$ ועוד).

הגדרה 5.5 (כתיב λ)**.** תהא $f:A\to B$ נגדיר $f=\lambda x\in A.f\left(x\right)$. נראה דוגמה על מנת להבין את מבנה הכתיב, נסתכל על $f=\lambda x\in\mathbb{R}.x^2$ נרחיב על כל חלק בביטוי

$$\underbrace{f}_{\text{שם הפונקציה}}=\lambda\underbrace{x\in\mathbb{R}}_{\text{הצהרה כי קלט הפונקציה הוא } x \text{ ממשי}}.\underbrace{x^2}_{\text{פלט הפונקציה}}$$

וכעת ניתן לכתוב $f\left(3\right)=3^2=9$.

דוגמה 5.2 (כתיב λ)**.** מתקיים

- תהא A קבוצה אזי $\mathrm{Id}_A=\lambda a\in A.a$. (בפרט Id_A פונקציה)
- $f=\lambda\langle x,y\rangle\in\mathbb{R}^2.x+y$, פונקציית החיבור הממשית.
- $f=\lambda n\in\mathbb{N}.\{x\in\mathbb{N}\mid x\leq n\}$, פונקציה $f:\mathbb{N}\to P\left(\mathbb{N}\right)$.

- $F=\lambda f\in\mathbb{N}^{\mathbb{N}}.\lambda n\in\mathbb{N}.f\left(n\right)+1$, פונקציה $F:\mathbb{N}^{\mathbb{N}}\to\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$, שימו לב כי לדוגמה

$$\begin{aligned}F\left(\lambda x\in\mathbb{N}.x^{2}\right)\left(3\right) & =\left(\lambda n\in\mathbb{N}.\left(\lambda x\in\mathbb{N}.x^{2}\right)\left(n\right)+1\right)\left(3\right)\\ & =\left(\lambda n\in\mathbb{N}.n^{2}+1\right)\left(3\right)=3^{2}+1=10\end{aligned}$$

הערה 5.4. נסמן $f\left(a_{1}\ldots a_{n}\right)=f\left(\left\langle a_{1}\ldots a_{n}\right\rangle \right)$.

הגדרה 5.6 (פונקציית curry). תהיינה A,B,C קבוצות נגדיר $\text{curry}_{A,B,C}:C^{A\times B}\to\left(C^{B}\right)^{A}$ כך $\text{curry}_{A,B,C}=\lambda f\in C^{A\times B}.\lambda a\in A.\lambda b\in B.f\left(a,b\right)$.

דוגמה 5.3 (פונקציית curry). נסתכל על

$$\begin{aligned}\text{curry}_{\mathbb{R},\mathbb{N},\mathbb{R}}\left(\lambda\left\langle x,n\right\rangle \in\mathbb{R}\times\mathbb{N}.x^{n}\right)\left(\pi\right)\left(3\right) & =\left(\lambda a\in A.\lambda b\in B.\left(\lambda\left\langle x,n\right\rangle \in\mathbb{R}\times\mathbb{N}.x^{n}\right)\left(a,b\right)\right)\left(\pi\right)\left(3\right)\\ & =\left(\lambda b\in B.\left(\lambda\left\langle x,n\right\rangle \in\mathbb{R}\times\mathbb{N}.x^{n}\right)\left(\pi,b\right)\right)\left(3\right)\\ & =\left(\lambda\left\langle x,n\right\rangle \in\mathbb{R}\times\mathbb{N}.x^{n}\right)\left(\pi,3\right)\\ & =\pi^{3}\end{aligned}$$

5.1.1 חלוקה למקרים

נרצה להגדיר פונקציה אשר מקיימת חוקים שונים על פי הקלט, לדוגמה פונקצייה הערך המוחלט, עד כה אין בידינו דרך לכתיבתה ללא איחוד פונקציות.

הגדרה 5.7 (חלוקה למקרים). יהיו $g_{1}:A_{1}\to B$ וכן $g_{2}:A_{2}\to B$ באשר $A_{1}\uplus A_{2}=A$ אזי נגדיר $f:A\to B$ כך $f=g_{1}\uplus g_{2}$, ובכתיב למבדא נסמנה

$$f=\lambda a\in A.\begin{cases}g_{1}\left(a\right) & a\in A_{1}\\ g_{2}\left(a\right) & a\in A_{2}\end{cases}$$

הערה 5.5. כאשר ברור מהם התנאים עבור החלוקה למקרים נרשה לעצמינו לקרוא לתנאי האחרון else, כמו כן במקום לכתוב בתנאי $a\in A_{1}$ נרשה לעצמינו לכתוב פרידיקט, **בתנאי שכל החלוקות למקרים מכסות את תחום הפונקציה!**, לדוגמה הפונקציה $f:\left\{0,1\right\}\to\left\{0,1\right\}$ המוגדרת

$$f=\lambda x\in\left\{0,1\right\}.\begin{cases}0 & x\in\left\{0\right\}\\ 1 & x\in\left\{1\right\}\end{cases}$$

ניתן לכתיבתה גם כך

$$f=\lambda x\in\{0,1\}\,.\begin{cases}0 & x=0\\ 1 & \text{else}\end{cases}$$

5.2 שיוויון

הגדרה 5.8 (שיוויון פונקציות)**.** יהיו f,g פונקציות נאמר כי $f=g$ אם"ם מתקיים $(\text{Dom}\,(f)=\text{Dom}\,(g))\wedge(\forall x\in\text{Dom}\,(f)\,.f\,(x)=g\,(x))$.

5.3 מקור תמונה וצמצום

5.3.1 תמונה איבר איבר

הגדרה 5.9 (תמונה איבר איבר)**.** תהא $f:A\to B$ ותהא $X\subseteq A$ אזי $f\,[X]=\{f\,(a)\mid a\in X\}$.

5.3.2 מקור איבר איבר

הגדרה 5.10 (קבוצת המקורות)**.** תהא $f:A\to B$ ותהא $Y\subseteq B$ אזי $f^{-1}\,[Y]=\{a\in A\mid f\,(a)\in Y\}$.

טענה 5.1. תהא $f:A\to B$ אזי $A=\biguplus_{b\in B}f^{-1}\,[\{b\}]$.

הוכחה. ... ■

דוגמה 5.4. ...

5.3.3 צמצום

הגדרה 5.11 (צמצום)**.** תהא $f:A\to B$ ותהא $X\subseteq A$ אזי $f_{\restriction_X}=\lambda x\in X.f\,(x)$.

טענה 5.2. תהא $f:A\to B$ ותהא $X\subseteq A$ אזי $f_{\restriction_X}=f\cap(X\times B)$.

הוכחה. ... ■

5.4 הרכבה

משפט 5.1 (הרכבת פונקציות היא פונקציה)**.** תהא $f:A\to B$ ותהא $g:B\to C$ אזי $g\circ f:A\to C$.

הוכחה. ... ■

משפט 5.2 (משמעות ההרכבה)**.** תהא $f:A\to B$ תהא $g:B\to C$ ויהי $x\in A$ אזי $(g\circ f)\,(x)=g\,(f\,(x))$.
כלומר פעולת ההרכבה מדמה הפעלת סדרת פונקציות אחת אחרי השנייה מהפנימית אל החיצונית.

הוכחה. ... ■

דוגמה 5.5. נגדיר $f = \lambda x \in \mathbb{R}.x^2$ וכן $g = \lambda x \in \mathbb{R}.2^x$ אזי

$$(g \circ f)(x) = g(f(x)) = g\left(x^2\right) = 2^{x^2}$$

ולכן $g \circ f = \lambda x \in \mathbb{R}.2^{x^2}$.

טענה 5.3. תהא f פונקציה אזי $f \circ f^{-1} = \mathrm{Id}_{\mathrm{Im}(f)}$.

הוכחה. ... ■

5.5 זיווג

5.5.1 יחס חד־חד־ערכי

הגדרה 5.12 (יחס חד־חד־ערכי (חח"ע))**.** יחס R מעל A, B המקיים
$\forall a_1, a_2 \in A.\forall b \in B.\left(a_1 R b \wedge a_2 R b\right) \Longrightarrow \left(a_1 = a_2\right)$.

טענה 5.4. תהא f חח"ע אזי $f^{-1} \circ f = \mathrm{Id}_{\mathrm{Dom}(f)}$.

הגדרה 5.13 (פונקציה n־ערכית)**.** פונקציה $f : A \to B$ המקיימת $\forall b \in B.\left|f^{-1}\left[\{b\}\right]\right| = n$.

טענה 5.5 (הרכבת פונקציות חח"ע)**.** יהיו f, g חח"ע אזי $g \circ f$ חח"ע.

הוכחה. ... ■

5.5.2 יחס על

הגדרה 5.14 (יחס על)**.** יחס R מעל A, B המקיים $\forall b \in B.\exists a \in A.aRb$.

טענה 5.6 (הרכבת פונקציות על)**.** יהיו f, g על אזי $g \circ f$ על.

הוכחה. ... ■

5.5.3 פונקציה הפיכה

משפט 5.3. תהא $f : A \to B$ אזי
1. (f חח"ע)$\Longleftrightarrow$(f^{-1} חד־ערכית).
2. (f על)$\Longleftrightarrow$(f^{-1} מלאה).

הוכחה. ... ■

מסקנה 5.1. תהא $f : A \to B$ אזי (f חח"ע ועל)$\Longleftrightarrow \left(f^{-1} : B \to A\right)$.

הוכחה. ... ■

הגדרה 5.15 (פונקציה הפיכה/זיווג)**.** פונקציה $f : A \to B$ עבורה קיימת $g : B \to A$ המקיימת $(g \circ f = \mathrm{Id}_A) \wedge (f \circ g = \mathrm{Id}_B)$. במקרה זה נקרא לפונקציה g ההופכית של f.

משפט 5.4. תהא $f : A \to B$ אזי

1. (f חח"ע)$\Longleftrightarrow$(קיימת $g : B \to A$ המקיימת $g \circ f = \mathrm{Id}_A$). (ונאמר כי f הפיכה משמאל)
2. (f על)$\Longleftrightarrow$(קיימת $g : B \to A$ המקיימת $f \circ g = \mathrm{Id}_B$). (ונאמר כי f הפיכה מימין)

הוכחה. ... ■

מסקנה 5.2. תהא $f : A \to B$ אזי (f חח"ע ועל)$\Longleftrightarrow$(f הפיכה).

משפט 5.5 (יחידות ההופכית)**.** תהא $f : A \to B$ הפיכה אזי $f^{-1} : B \to A$ ההופכית של f.

הוכחה. ... ■

6 עוצמות

בחיים האמיתיים כאשר מנסים למדוד גודל של קבוצה נוכל לדוגמה לספור איבר איבר את האיברים בקבוצה, דבר אשר אפשרי עבור קבוצות סופיות $\{a_1 \dots a_n\}$ (כמובן שמספר האיברים בקבוצה זו הוא n), בתחילת הקורס הגדרנו את העוצמה הסופית של קבוצה סופית להיות מספר האיברים בה, אך עבור קבוצות אינסופיות נתקלנו בבעיה, כיצד נדע האם שתי קבוצות אינסופיות בעלות מספר שווה של איברים? מה הדבר אומר עבור קבוצה אינסופית בכלל? לכן מתמטיקאים מצאו הגדרה נוספת לסימון הגודל, עוצמה $|A|$, כדי לבדוק האם שתי קבוצות באותו הגודל במקום לחשב את מספר האיברים בכל אחת נרצה לתאם לכל איבר מהקבוצה הראשונה איבר מתאים מהקבוצה השנייה בצורה יחידנית (כלומר פונקציה הופכית!), נראה זאת בהגדרות הבאות ונשתכנע כי הדבר מסתכרן עם האינטואיציה שלנו על עוצמות סופיות. שימו לב, לא תינתן בחלק זה הגדרה פורמלית עבור עוצמה.

הערה 6.1 (שימוש באקסיומת הבחירה). מכאן ועד סוף החלק נשתמש באקסיומת הבחירה, כל משפט/טענה/מסקנה וכדומה אשר משתמשת באקסיומת הבחירה יכתב על ידה כך (אקסיומת בחירה).

הגדרה 6.1 (יחסי עוצמות)**.** יהיו A, B קבוצות אזי

- עוצמות שוות: נסמן $|A| = |B|$ ונאמר כי העוצמה של A ושל B שווה אם קיימת $f : A \to B$ הפיכה.
- עוצמה קטנה שווה: נסמן $|A| \le |B|$ ונאמר כי העוצמה של A קטנה שווה מהעוצמה של B אם קיימת $f : A \to B$ חח"ע.

הערה 6.2. ההגדרות עבור $\neq, \ge, <, >$ נובעות ישירות כמו עבור מספרים.

דוגמה 6.1. נראה את הקשרים בין קבוצות מוכרות לנו

- נשים לב כי $|\mathbb{N}| = |\mathbb{N}_{\text{even}}|$ משום שהפונקציה $f : \mathbb{N} \to \mathbb{N}_{\text{even}}$ המוגדרת $f = \lambda n \in \mathbb{N}.2n$ הינה הפיכה, באותה מידה גם $|\mathbb{N}_{\text{odd}}| = |\mathbb{N}_{\text{even}}|$. (מצאו את הפונקציה ההפיכה המתאימה)

- תהא A קבוצה מתקיים $|A| \le |P(A)|$, נשים לב כי הפונקציה $f : A \to P(A)$ המוגדרת $f = \lambda a \in A.\{a\}$ הינה חח"ע.
- נשים לב כי $\left|\{0,1\}^{\mathbb{N}}\right| \le |\mathbb{N}|$, נגדיר $f : \mathbb{N} \to (\mathbb{N} \to \{0,1\})$ חח"ע כך

$$f = \lambda n \in \mathbb{N}.\lambda m \in \mathbb{N}.\begin{cases} 1 & n = m \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

טענה 6.1. עוצמה מקיימת את כל התכונות אשר היינו מצפים מ"שיוויון גדלים",

1. רפלקסיביות: תהא A קבוצה אזי $|A| = |A|$.
2. סימטריות: תהיינה A, B קבוצות המקיימות $|A| = |B|$ אזי $|B| = |A|$.
3. טרנזיטיביות: תהיינה A, B, C קבוצות המקיימות $|A| = |B|$ וכן $|B| = |C|$ אזי $|A| = |C|$.
4. תהיינה $A \subseteq B$ קבוצות אזי $|A| \le |B|$.
5. טרנזיטיביות: תהיינה A, B, C קבוצות המקיימות $|A| \le |B|$ וכן $|B| \le |C|$ אזי $|A| \le |C|$.
6. תהיינה A, B קבוצות המקיימות $|A| = |B|$ אזי $|A| \le |B|$.
7. תהיינה A, B, C קבוצות המקיימות $|A| < |B|$ וכן $|B| = |C|$ אזי $|A| < |C|$.

הוכחה. ... ■

הערה 6.3 (עוצמה כיחס שקילות). ודאי שמתם לב כי תכונות $1, 2, 3$ מהטענה מלעיל שקולה להגדרת יחס שקילות, אז מדוע עוצמה איננה יחס שקילות? מכיוון שעוצמה מוגדרת על פני "קבוצת כל הקבוצות" אשר איננה מוגדרת ולכן איננה יחס על קבוצה בפרט גם לא יחס שקילות.

משפט 6.1. תהיינה A, B קבוצות אזי $(|A| \le |B|) \Longleftrightarrow$(קיימת $f : B \to A$ על). (אקסיומת בחירה)

הוכחה. ... ■

דוגמה 6.2. מתקיים $|\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}| \le |\mathbb{Q}|$, נגדיר $f : \mathbb{Z}^2 \to \mathbb{Q}$ כך

$$f = \lambda \langle n, m\rangle \in \mathbb{Z}.\begin{cases} \frac{n}{m} & m \neq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

כמובן על פי הגדרת $\mathbb{Q}$ נקבל כי f על ובפרט על פי משפט מלעיל הטענה מתקיימת.

6.1 קנטור שרדר ברנשטיין

נשים לב לשקילות הקיימת עבור קבוצות סופיות (ומספרים), אם $(n \le m) \land (m \le n)$ אזי $n = m$, אך האם הדבר עדיין תקף עבור קבוצות אינסופיות? האם הוא תקף עבור עוצמה? המשפט הבא מראה זאת,

משפט 6.2 (קנטור שרדר ברנשטיין (קש"ב)). תהיינה A, B קבוצות המקיימות $|A| \le |B|$ וכן $|B| \le |A|$ אזי $|A| = |B|$.

הוכחה. ... ■

דוגמה 6.3 (שימוש במשפט קש"ב). נראה כי $|\mathbb{N}| = |\mathbb{N}\times\mathbb{N}|$,

- נגדיר $f:\mathbb{N}\to\mathbb{N}\times\mathbb{N}$ כך $f=\lambda n\in\mathbb{N}.\left\langle n,0\right\rangle$ כמובן כי f חח"ע ולכן $|\mathbb{N}|\leq|\mathbb{N}\times\mathbb{N}|$.
- נגדיר $g:\mathbb{N}\times\mathbb{N}\to\mathbb{N}$ כך $g=\lambda\left\langle n,m\right\rangle\in\mathbb{N}\times\mathbb{N}.2^{n}3^{m}$, מתקיים כי g חח"ע ולכן $|\mathbb{N}\times\mathbb{N}|\leq|\mathbb{N}|$.

  (עבור הוכחה לחח"ע של g קראו עוד על המשפט היסודי של האריתמטיקה בפרק השונות)

מסקנה 6.1. תהיינה A,B,C קבוצות עבורן $(|A|\leq|B|<|C|)\vee(|A|<|B|\leq|C|)$ אזי $|A|<|C|$.

הוכחה. ... ■

6.2 אי תלות בבחירת נציגים

טענה 6.2. תהיינה A_1,A_2,B_1,B_2 קבוצות כך שמתקיים $|A_1|=|A_2|\wedge|B_1|=|B_2|$ אזי

1. $|A_1\times B_1|=|A_2\times B_2|$.
2. $|P(A_1)|=|P(A_2)|$.
3. $\left|A_1^{B_1}\right|=\left|A_2^{B_2}\right|$.
4. $|A_1\uplus B_1|=|A_2\uplus B_2|$.

הוכחה. ... ■

דוגמה 6.4. נשים לב כי מתקיים

- $|\mathbb{Z}\times\mathbb{Z}|=|\mathbb{N}\times\mathbb{N}|$, נשים לב כי $|\mathbb{Z}|=|\mathbb{N}|$ מכיוון והפונקציה $f:\mathbb{Z}\to\mathbb{N}$ המוגדרת

$$f=\lambda n\in\mathbb{Z}.\begin{cases}2n & n\geq0\\ 2|n|-1 & \text{else}\end{cases}$$

  הינה הפיכה (ודאו זאת) ולכן על פי משפט קודם מתקיים הדרוש.
- $|P(\mathbb{N})|=|P(\mathbb{N}_{\text{even}})|$, כפי שכבר הודגם מתקיים $|\mathbb{N}_{\text{even}}|=|\mathbb{N}|$ ולכן מתקיים הדרוש.
- $|\mathbb{Q}|\leq|\mathbb{N}\times\mathbb{N}|$, מתקיים $|\mathbb{Q}|\leq|\mathbb{Z}\times\mathbb{Z}|$ וכן $|\mathbb{Z}\times\mathbb{Z}|=|\mathbb{N}\times\mathbb{N}|$ ולכן הדרוש נובע.

טענה 6.3. תהיינה A_1,A_2,B קבוצות עבורן $|A_1|\leq|A_2|$ אזי

1. $|A_1\times B|\leq|A_2\times B|$.
2. $|P(A_1)|\leq|P(A_2)|$.
3. $\left|A_1^{B}\right|\leq\left|A_2^{B}\right|$.
4. $\left|B^{A_1}\right|\leq\left|B^{A_2}\right|$.

הוכחה. ... ■

6.3 עוצמות סופיות

הגדרה 6.2. נסמן $\emptyset = [0]$ וכן $[n] = \{m \in \mathbb{N} \mid m < n\}$.

הגדרה 6.3 (קבוצה סופית)**.** קבוצה A הינה קבוצה סופית אם $\exists n \in \mathbb{N}. |A| = |[n]|$.

הערה 6.4. באותה מידה קבוצה אינסופית הינה קבוצה אשר אינה סופית.

טענה 6.4. תהא A קבוצה סופית המקיימת $|A| = |[n]|$ עבור $n \in \mathbb{N}$ אזי

1. יהי $b \notin A$ אזי $|A \uplus \{b\}| = |[n+1]|$.
2. יהי $a \in A$ אזי $|A \backslash \{a\}| = |[n-1]|$.

הוכחה. ... ■

טענה 6.5. מתקיים

1. יהיו $n, m \in \mathbb{N}$ אזי $(m < n) \Longrightarrow (|[m]| < |[n]|)$.
2. תהא X קבוצה סופית ותהא $Y \subseteq X$ אזי Y קבוצה סופית.
3. תהא X קבוצה סופית ותהא $Y \subsetneq X$ אזי $|Y| < |X|$.

הוכחה. ... ■

מסקנה 6.2. מתקיים

1. תהא A קבוצה סופית אזי $\exists! n \in \mathbb{N}. |A| = |[n]|$.
2. תהא $X \subsetneq [n]$ אזי $|X| < |[n]|$.
3. תהיינה X, Y קבוצות סופיות באשר $|X| = |Y|$ ותהא $f : X \to Y$ אזי (f חח"ע)$\Longleftrightarrow$(f על).

הגדרה 6.4. יהי $n \in \mathbb{N}$ נסמן $n = |[n]|$, תהא A קבוצה סופית המקיימת $|A| = |[n]|$ נסמן $|A| = n$.

מסקנה 6.3. תהיינה A, B קבוצות סופיות באשר $|A| = n$ וכן $|B| = m$

1. $n \leq_{\mathbb{N}} m \Longleftrightarrow |A| \leq |B|$.
2. $n =_{\mathbb{N}} m \Longleftrightarrow |A| = |B|$.
3. $n <_{\mathbb{N}} m \Longleftrightarrow |A| < |B|$.

הוכחה. ... ■

הערה 6.5. בעקבות שתי המסקנות וההגדרה הקודמת נוכל לסמן $|A| < m$ וכן $|A| \leq m$ וכדומה בדיוק כמו האי־שיוונים הרגילים עבור $\mathbb{N}$.

6.4 קבוצות בנות מנייה

הגדרה 6.5 (קבוצה בת מנייה)**.** קבוצה A המקיימת $|A| = |\mathbb{N}|$, נסמן $|A| = \aleph_0$.

דוגמה 6.5. הקבוצות $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{N}^2$ וכדומה הן בנות מנייה, נסמן לדוגמה $|\mathbb{Q}| = \aleph_0$.

משפט 6.3. מתקיים

1. תהא A סופית אזי $|A| < \aleph_0$.
2. תהא A אינסופית אזי $\aleph_0 \le |A|$. (אקסיומת בחירה)
3. תהא A קבוצה אזי (A אינסופית)$\Longleftrightarrow (\exists B \subsetneq A. |A| = |B|)$. (אקסיומת בחירה)

הוכחה. ... ■

מסקנה 6.4. $\aleph_0$ הינה העוצמה האינסופית המינימלית. (אקסיומת בחירה)

הוכחה. ... ■

משפט 6.4 (איחוד לכל היותר בן־מנייה של קבוצות לכל היותר בנות מנייה הוא לכל היותר בן מנייה). תהא A המקיימת $|A| \le \aleph_0$ וכן $\forall X \in A. |X| \le \aleph_0$ אזי $|\bigcup A| \le \aleph_0$.

הוכחה. ... ■

דוגמה 6.6. יהי $n \in \mathbb{N}_+$ נראה כי $|\mathbb{N}^n| = \aleph_0$, נוכיח באינדוקציה על n, עבור $n = 1$ ברור, נניח נכונות עבור $n-1$ נשים לב כי

- נגדיר פונקציה $f : \mathbb{N} \to \mathbb{N}^n$ כך $f = \lambda m \in \mathbb{N}. \langle m, 0, \ldots, 0 \rangle$ נשים לב כי זוהי פונקציה חח"ע ולכן $|\mathbb{N}| \le |\mathbb{N}^n|$, כלומר $\aleph_0 \le |\mathbb{N}^n|$.
- נגדיר $I = \mathbb{N}$ וכן $A_i = \{i\} \times \mathbb{N}^{n-1}$ לכל $i \in I$ נשים לב כי $|I| \le \aleph_0$ וכן $|A_i| = \left|\mathbb{N}^{n-1}\right| = \aleph_0$ בפרט $|A_i| \le \aleph_0$ אזי ממשפט איחוד בן מנייה של קבוצות בנות מנייה מתקיים

$$|\mathbb{N}^n| = \left| \bigcup_{i \in \mathbb{N}} \left(\{i\} \times \mathbb{N}^{n-1} \right) \right| = \left| \bigcup_{i \in I} A_i \right| \le \aleph_0$$

ודאו כי אתם מבינים את המעברים והוכיחו במידת הצורך את המעבר השמאלי.

אזי קיבלנו כי $(|\mathbb{N}^n| \le \aleph_0) \wedge (\aleph_0 \le |\mathbb{N}^n|)$ וממשפט קש"ב נקבל כי $|\mathbb{N}^n| = \aleph_0$ כנדרש.

חלק III

שונות

1 אקסיומות ZFC

במערכת האקסיומתית הסטנדרטית בקורס (וכלל במתמטיקה) יש 7 אקסיומות, שש מהן אקסיומות ZF והנוספת היא C (אקסיומת הבחירה).

1.1 אקסיומות ZF

הגדרה 1.1 (אקסיומת ההיקפיות).

$$\forall x\forall y\left(\left(\forall z\left(z\in x\iff z\in y\right)\right)\implies x=y\right)$$

הגדרה 1.2 (אקסיומת היסוד).

$$\forall x\left(\left(\exists a.a\in x\right)\implies\exists y\left(y\in x\wedge\neg\exists z\left(z\in x\wedge z\in y\right)\right)\right)$$

הגדרה 1.3 (אקסיומת האיחוד).

$$\forall x\exists y\left(\forall z\left(\left(z\in y\right)\iff\exists a\left(z\in a\wedge a\in x\right)\right)\right)$$

הגדרה 1.4 (אקסיומת האינסוף).

$$\exists x\left(\left(\exists a\left(a\in x\wedge\neg\exists b\left(b\in a\right)\right)\right)\wedge\left(\forall y\in x\left(\left(y\cup\left\{y\right\}\right)\in x\right)\right)\right)$$

הגדרה 1.5 (אקסימות קבוצת החזקה).

$$\forall x\exists y\forall z\left(\left(z\in y\right)\iff\forall w\left(\left(w\in z\right)\implies\left(w\in x\right)\right)\right)$$

הגדרה 1.6 (אקסיומת ההחלפה). יהי φ פרידיקט אזי

$$\forall x\left(\left(\forall y\left(y\in x\right)\implies\left(\exists!z\left(\varphi\left(y,z\right)\right)\right)\right)\implies\left(\exists w\forall v\left(v\in w\iff\left(\exists u\left(u\in x\right)\implies\varphi\left(u,v\right)\right)\right)\right)\right)$$

1.2 אקסיומות C

הגדרה 1.7 (אקסיומת הבחירה). ...

1.3 אקסיומות שקולות

הגדרה 1.8 (אקסיומת ההפרדה)**.** ...

הגדרה 1.9 (אקסיומת הזוג הלא סדור)**.**

$$\forall x \forall y \left(\exists a \forall z \left(\left(z \in a\right) \Longrightarrow \left(z = x \lor z = y\right)\right)\right)$$

הגדרה 1.10 (אקסיומת הקבוצה הריקה)**.**

$$\exists x \left(\neg \exists a \left(a \in x\right)\right)$$

טענה 1.1.

2 הגדרת המספרים

2.1 הגדרת הטבעיים

2.1.1 מערכת פאנו

הגדרה 2.1 (מערכת פאנו)**.** תהא ω קבוצה ותהא $S : \omega \to \omega$ המקיימות

- קיים איבר $a \in \omega$ עבורו מתקיים $\forall x \in \omega . S\left(x\right) \neq a$.
- חד־חד־ערכיות: $\forall x, y \in \omega . \left(S\left(x\right) = S\left(y\right)\right) \Longrightarrow \left(x = y\right)$.
- תהא $K \subseteq \omega$ המקיימת $a \in K$ וכן $\forall x \in \omega . \left(x \in K\right) \Longrightarrow \left(S\left(x\right) \in K\right)$ אזי $K = \omega$.

הערה 2.1. תהא ω, S מערכת פאנו אזי S נקראת פעולת העוקב, ונסמן בעזרת 0 את a מההגדרה הקודמת.

הגדרה 2.2 (חיבור)**.** תהא ω, S מערכת פאנו נגדיר

- איבר נטרלי: $\forall x \in \omega . x + 0 = x$.
- יהיו $x, y \in \omega$ אזי $x + S\left(y\right) = S\left(x + y\right)$.

הגדרה 2.3 (כפל)**.** תהא ω, S מערכת פאנו נגדיר

- איבר מאפס: $\forall x \in \omega . x \cdot 0 = 0$.
- יהיו $x, y \in \omega$ אזי $x \cdot S\left(y\right) = x + \left(x \cdot y\right)$.

הגדרה 2.4 (המספרים הטבעיים)**.** נגדיר $0 = \emptyset$ וכן $S\left(a\right) = a \cup \left\{a\right\}$, נסמן $S\left(0\right) = 1$, $S\left(1\right) = 2$, $S\left(2\right) = 3$ והלאה. נסמן $\mathbb{N} = \left\{0, 1, 2 \ldots\right\}$.

טענה 2.1. $\mathbb{N}, S$ היא מערכת פאנו.

הוכחה. נוכיח את שלושת הגדרות מערכת פאנו

- נניח בשלילה כי $S(a)=0$ אזי $a\cup\{a\}=\emptyset$ בפרט נקבל סתירה כי $|a\cup\{a\}|\geq 1$.
- יהיו $x,y\in\mathbb{N}$ המקיימים $S(x)=S(y)$ אזי $x\cup\{x\}=y\cup\{y\}$, נניח בשלילה כי $x\neq y$ אזי בה"כ קיים $z\in x$ המקיים $z\notin y$ ולכן $z\in x\cup\{x\}$ כלומר $z\in y\cup\{y\}$, אם $z\in y$ סתירה, אחרת אם $z\in\{y\}$ אזי $z=y$ בפרט $y\in x$, כמו כן $x\in x\cup\{x\}$ ולכן $x\in y\cup\{y\}$, אם $x\in\{y\}$ אזי $x=y$ סתירה, אחרת אם $x\in y$ נקבל כי $(y\in x)\wedge(x\in y)$ סתירה לאקסיומת היסוד ב־ZFC.
- תהא $K\subseteq\mathbb{N}$ המקיימת $0\in K$ וכן $\forall x\in\mathbb{N}.\,(x\in K)\implies(S(x)\in K)$, נניח בשלילה כי $K\neq\mathbb{N}$ אזי קיים $n\in\mathbb{N}$ מינימלי המקיים $n\notin K$, מההנחה מתקיים $n\neq 0$ בפרט קיים $a\in\mathbb{N}$ עבורו $S(a)=n$ אזי מהעובדה כי n מינימלי המקיים $n\notin K$ מתקיים $a\in K$ ולכן מהגדרת K יתקיים $n=S(a)\in K$ סתירה, בפרט $K=\mathbb{N}$.

■

2.1.2 הגדרת השלמים

הגדרה 2.5 (מספרים שלמים)**.** ...

2.1.3 הגדרת הרציונליים

הגדרה 2.6 (מספרים רציונליים)**.** ...

2.2 הגדרת הממשיים

2.2.1 חתכי דדקינד

הגדרה 2.7 (חתך דדקינד)**.** ...

3 מספרים אלגבריים

הגדרה 3.1 (פולינום בעל מקדמים שלמים)**.** יהיו $a_0\dots a_n\in\mathbb{Z}$ אזי $f(x)=\sum_{i=0}^{n}a_ix^i$, כמו כן נסמן את מעלתו של f להיות $\deg(f)=n$. כמו כן נסמן את קבוצת כל הפולינומים בעלי מקדמים שלמים בעזרת $\mathbb{Z}[x]$, ונסמן את כל הפולינומים בעלי דרגה מסויימת $\mathbb{Z}_{\leq n}[x]=\{f\in\mathbb{Z}[x]\mid\deg(f)=n\}$.

הערה 3.1 (מעלה של פולינום). נשים לב כי מעלה של פולינום קבוע (כלומר $f(x)=a$) הינה 0, לעומת זאת נגדיר $\deg(0)=-\infty$.

למה 3.1. $\forall n\in\mathbb{N}.\,\left|\mathbb{Z}_{\leq n}[x]\right|=\aleph_0$.

הוכחה. עבור $n\in\mathbb{N}$ נגדיר פונקציה $F:\mathbb{Z}^n\to\mathbb{Z}_{\leq n}[x]$ כך

$$F=\lambda\left\langle a_0\dots a_{n-1}\right\rangle\in\mathbb{Z}^n.\sum_{i=0}^{n-1}a_ix^i$$

נראה תחילה כי הפונקציה הינה הפיכה באינדוקציה, המקרה $n=1$ נשאר לקורא, נניח עבור $n-1$ כעת יהי $n\in\mathbb{N}$

- על, יהי $f\in\mathbb{Z}_{\le n}[x]$ אזי קיימים $a_0\ldots a_n\in\mathbb{Z}$ עבורם $f(x)=\sum_{i=0}^{n}a_ix^i$, נשים לב כי

$$F(\langle a_0\ldots a_n\rangle)=\sum_{i=0}^{n-1}a_ix^i=f$$

בפרט F על.

- חח"ע, יהיו $\langle a_0\ldots a_{n-1}\rangle,\langle b_0\ldots b_{n-1}\rangle\in\mathbb{Z}^n$ נניח כי

$$\sum_{i=0}^{n-1}a_ix^i=F(\langle a_0\ldots a_{n-1}\rangle)=F(\langle b_0\ldots b_{n-1}\rangle)=\sum_{i=0}^{n-1}b_ix^i$$

נשים לב כי מהגדרת שיוויון פונקציות מתקיים

$$a_0=\left(\sum_{i=0}^{n-1}a_ix^i\right)(0)=\left(\sum_{i=0}^{n-1}b_ix^i\right)(0)=b_0$$

ולכן יתקיים

$$\begin{aligned}\sum_{i=0}^{n-2}b_{i+1}x^i=\sum_{i=1}^{n-1}b_ix^{i-1}=\frac{\sum_{i=1}^{n-1}b_ix^i}{x}=\frac{\left(\sum_{i=0}^{n-1}b_ix^i\right)-b_0}{x}\\=\frac{\left(\sum_{i=0}^{n-1}a_ix^i\right)-a_0}{x}=\sum_{i=0}^{n-2}a_{i+1}x^i\end{aligned}$$

כעת מהנחת האינדוקציה נקבל כי $\langle a_1\ldots a_{n-1}\rangle=\langle b_1\ldots b_{n-1}\rangle$ מתכונת חח"ע ולכן $\langle a_0\ldots a_{n-1}\rangle=\langle b_0\ldots b_{n-1}\rangle$ כנדרש.

■

טענה 3.1. $|\mathbb{Z}[x]|=\aleph_0$.

הוכחה. נשים לב כי $\left|\mathbb{Z}_{\le n}[x]\right|=\aleph_0$ $.\forall n\in\mathbb{N}$ ולכן ממשפט איחוד בן מנייה של קבוצות בנות מנייה נקבל כי

$$|\mathbb{Z}[x]|=\left|\bigcup_{n\in\mathbb{N}}\mathbb{Z}_{\le n}[x]\right|\le\aleph_0$$

כמו כן $\mathbb{Z}\subseteq\mathbb{Z}[x]$ ולכן $|\mathbb{Z}[x]|\geq|\mathbb{Z}|=\aleph_0$ אזי מקש"ב מתקיים $|\mathbb{Z}[x]|=\aleph_0$. ■

הגדרה 3.2 (מספר אלגברי)**.** $a\in\mathbb{R}$ יקרא אלגברי אם $\exists f\in\mathbb{Z}[x].f(a)=0$. נסמן את קבוצת האלגבריים בתור $\mathbb{A}$.

הערה 3.2. נשים לב כי $\mathbb{R} \subseteq \mathbb{A} \subseteq \mathbb{Q}$ (ודאו מדוע).

משפט 3.1 (המשפט היסודי של האלגברה)**.** יהי $f \in \mathbb{Z}[x]$ באשר $\deg(f) = n$ אזי $|\{x \in \mathbb{R} \mid f(x) = 0\}| \leq n$.

הוכחה. ... ■

מסקנה 3.1. $|\mathbb{A}| = \aleph_0$.

הוכחה. נשים לב כי $|\mathbb{Z}[x]| = \aleph_0$ וכן $|\{x \in \mathbb{R} \mid f(x) = 0\}| \leq \aleph_0$. $\forall f \in \mathbb{Z}[x]$ אזי נקבל כי

$$|\mathbb{A}| = \left|\bigcup_{f \in \mathbb{Z}[x]} \{x \in \mathbb{R} \mid f(x) = 0\}\right| \leq \aleph_0$$

כמו כן $\mathbb{Q} \subseteq \mathbb{A}$ ולכן $|\mathbb{A}| \leq |\mathbb{Q}| = \aleph_0$ אזי מקש"ב מתקיים $|\mathbb{A}| = \aleph_0$. ■

4 מספרים קונגואנטים

הגדרה 4.1 (מחלק)**.** יהיו $m, n \in \mathbb{Z}$ נאמר כי m מחלק את n ונסמן $m|n$ אם מתקיים $\exists k \in \mathbb{Z}.m \cdot k = n$.

הגדרה 4.2 (מספרים קונגואנטים)**.** יהי $n \in \mathbb{Z}$ נאמר כי $m, k \in \mathbb{Z}$ קואונגרואנטים מודולו n ונסמן $m \equiv k \mod n$ אם מתקיים $n|m-k$.

הגדרה 4.3. יהי $n \in \mathbb{Z}$ נסמן $n\mathbb{Z} = \left\{\langle m, k\rangle \in \mathbb{Z}^2 \mid m \equiv k \mod n\right\}$.

טענה 4.1. יהי $n \in \mathbb{Z}$ אזי $n\mathbb{Z}$ יחס שקילות מעל $\mathbb{Z}$.

הוכחה. ... ■

הגדרה 4.4. יהי $n \in \mathbb{Z}$ נסמן $\mathbb{Z}_n = \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$.

4.1 חלוקה עם שארית

משפט 4.1 (חלוקה עם שארית)**.** יהי $n \in \mathbb{Z}$ ויהי $k \in \mathbb{Z}\backslash\{0\}$ אזי קיימים ויחידים $r, q \in \mathbb{Z}$ כך שמתקיים $0 \leq r \leq k$ עבורם $n = qk + r$. נקרא במצב כזה ל־r שארית החלוקה של n ב־k ונסמן $r = n\%k$.

הוכחה. ... ■

טענה 4.2. יהיו $z, w \in \mathbb{Z}$ ויהי $n \in \mathbb{Z}\backslash\{0\}$ אזי $z(n\mathbb{Z})w \iff (z\%n = w\%n)$. (כאשר $z(n\mathbb{Z})w$ אומר כי z, w עומדים ביחס $n\mathbb{Z}$)

הוכחה. ... ■

5 פירוק לראשוניים

משפט 5.1 (המשפט היסודי של האריתמטיקה)**.** יהי $n \in \mathbb{N}_+ \backslash \{1\}$ אזי קיימים ויחידים $p_1 \ldots p_m \in \mathbb{P}$ וכן $k_1 \ldots k_m \in \mathbb{N}_+$ עבורם $n = \prod_{i=1}^m p_i^{k_i}$.

הוכחה. ... ■

מסקנה 5.1. יהי $n \in \mathbb{N}_+ \backslash \{1\}$ אזי $\exists p \in \mathbb{P}.p|n$.

הוכחה. יהי $n \in \mathbb{N}_+ \backslash \{1\}$ מהמשפט היסודי של האריתמטיקה מתקיים $n = \prod_{i=1}^m p_i^{k_i}$ עבור $p_1 \ldots p_m \in \mathbb{P}$ וכן $k_1 \ldots k_m \in \mathbb{N}_+$, נשים לב כי $m \geq 1$ וכן $k_1 \geq 1$ ולכן $n = p_1 \cdot \left(p_1^{k_1 - 1} \cdot \prod_{i=2}^m p_i^{k_i}\right)$ כלומר $p_1|n$ כמו כן כנאמר $p_1 \in \mathbb{P}$ ובפרט קיבלנו את הנדרש. ■

משפט 5.2 (קיום אינסוף ראשוניים)**.** קיימים אינסוף ראשוניים.

הוכחה. נניח בשלילה כי קיים מספר סופי של ראשוניים, נקרא למספר זה $n \in \mathbb{N}$, כלומר $\mathbb{P} = \{p_1 \ldots p_n\}$, נגדיר $q = 1 + \prod_{i=1}^n p_i$ נשים לב כי $q > p_i$ ולכן $q \neq p_i$ עבור כל $i \in \{1 \ldots n\}$ בפרט $q \notin \mathbb{P}$, מהמסקנה הקודמת נובע כי קיים $p_j \in \mathbb{P}$ עבורו $p_j|q$ כלומר $p_j|\left(1 + \prod_{i=1}^n p_i\right)$, מתכונות המחלק נקבל כי מתקיים $(p_j|1) \wedge \left(p_j \mid \prod_{i=1}^n p_i\right)$ אך אם $p_j|1$ אזי $p_j \cdot n = 1$ עבור $n \in \mathbb{N}$ וזה אפשרי אם"ם $p_j = 1$ סתירה לעובדה כי $p_j \in \mathbb{P}$, בפרט קיימים אינסוף ראשוניים. ■