

מוליכות חום

ספרות:

סירס-זימנסקי – תורת החום, קול וגלים פרק 3.

מילות מפתח:

חום, טמפרטורה, מוליכות חום, חוק הקירור של ניוטון.

ציוד: פלטת חימום, מעמד פלסטי לדיסקית פליז, לוח שעם, דיסקת פליז גדולה עגולה, דיסקית פליז קטנה עגולה, כוס קלקר, מדי טמפרטורה, מלקחים, כפפות, משקל מכני, משורה, מחשב ותוכנת איסוף נתונים.

1. מטרת הניסוי

- להכיר מושגים הקשורים במוליכות חום.
- למצוא את מוליכות החום של שעם.
- לוודא את חוק הקירור של ניוטון.
- לחשב מקדם החום הסגולי של פליז

2. תיאוריה

חום וטמפרטורה

חום הינו אחת מצורות האנרגיה. אנרגיית חום קיימת במערכת רבת חלקיקים, ומבטאת את סך כל האנרגיה הקשורה בתנועת החלקיקים (אנרגיה קינטית ופוטנציאלית). לדוגמא: אנרגיית חום במוצק פירושה תנודות של אטומי המוצק סביב מצב שווי המשקל. חום אינו טמפרטורה, טמפרטורה היא פרמטר המאפיין את המערכת כך שאם נצמיד שתי מערכות בטמפרטורות שונות יזרום חום מהטמפרטורה הגבוהה לנמוכה עד להשתוות הטמפרטורות. הטמפרטורה נמדדת במעלות צלסיוס $^{\circ}\text{C}$, חום נמדד ביחידות של אנרגיה (ביחידות MKS – Joule , ביחידות cgs - erg). ישנה יחידת אנרגיה נוספת המשמשת למדידת חום: קלוריה - calorie . קלוריה מוגדרת ככמות החום הדרושה להעלות את הטמפרטורה של גרם מים במעלת צלסיוס אחת.

$$\text{הקשר בין היחידות נתון ע"י } 1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J} = 4.18 \times 10^7 \text{ erg}$$

חום סגולי - לכל חומר ניתן להגדיר את החום הסגולי ככמות החום הדרושה להעלות גרם אחד של חומר במעלת צלסיוס אחת. החום הסגולי מסומן בדרך כלל ע"י c , ע"י ההגדרה החום הסגולי של מים הוא $c_w=1 \text{ cal/(g}\cdot^{\circ}\text{C)}$. כמות החום Q הדרושה להעלות מסה M של חומר מטמפרטורה T_1 ל- T_2 נתונה ע"י:

$$(1) \quad Q = Mc(T_2 - T_1)$$

מעבר של חום ממקום למקום נעשה בשלש דרכים: הולכה, הסעה וקרינה. הולכת חום מתרחשת כאשר החומר נשאר במקומו ואילו החום עובר ממקום למקום, לדוגמא: מוט מתכתי המחומם בקצהו, החום יזרום דרך המוט ויגיע גם לקצה המרוחק. הולכת חום מתרחשת ע"י כך שנוצרות התנגשויות בין האטומים המהירים (באזור החם) לאטומים האיטיים (באזור הקר). התנגשויות אלו מתרחשות בעיקר ע"י האלקטרונים ולכן חומרים מתכתיים הם מוליכי חום טובים. הסעת חום מתרחשת כאשר החומר החם נוסע ממקום למקום (נפוץ בנוזלים וגזים), לדוגמא בחימום החדר ע"י מזגן, אוויר חם מוסע לתוך החדר וע"י כך מתחמם החדר. מעבר חום ע"י קרינה מתרחש לדוגמא בקרני השמש המחממות את כדור הארץ ללא הולכה והסעה אלא ע"י קרינה (דוגמא נוספת: מיקרוגל).

מוליכות חום – מוליכות חום היא תכונה של חומר המאפיינת את מעבר החום דרך החומר ע"י הולכה. לדוגמא: ניקח לוחית בעלת שטח חתך A ועובי d , נחזיק צד אחד בטמפרטורה T_1 וצד שני בטמפרטורה T_2 . החום זורם מהצד החם לצד הקר. קצב מעבר החום H (כמות החום ליחידת זמן $H = \frac{dQ}{dt}$) פרופורציוני לשטח החתך ולהפרש הטמפרטורות בין צידי הלוחית, ונמצא ביחס הפוך לעובי הלוחית:

$$(2) \quad H = \frac{K \cdot A}{d}(T_2 - T_1)$$

מקדם הפרופורציה K נקרא מוליכות החום של החומר. גוף האדם אינו רגיש לטמפרטורה כי אם לקצב מעבר החום. אנו נרגיש כי חפץ כלשהו חם אם קצב מעבר החום מהחפץ לגופנו יהיה מהיר ולהפך. התחושה כי החפץ חם מושפעת אם כן לא רק מטמפרטורת החפץ כי אם גם ממוליכות החום של החפץ. לדוגמא: אם נכניס למקרר מתכת ועץ ולאחר מכן ניגע בשניהם, המתכת תורגש קרה יותר מהעץ למרות ששניהם באותה טמפרטורה.

חוק הקירור של ניוטון – חוק זה הינו חוק אמפירי (נסיוני), חוק הקירור קובע כי גוף הנמצא בטמפרטורה הגבוהה מטמפרטורת הסביבה מאבד חום בקצב הפרופורציוני

להפרש הטמפרטורות בין הגוף לסביבתו. אם נסמן את טמפרטורת הגוף T ואת טמפרטורת הסביבה T_e אז קצב איבוד החום H נתון ע"י:

$$(3) \quad H = -a(T - T_e)$$

מקדם הפרופורציה a תלוי בגיאומטריה של הגוף, ותיתכן תלות חלשה גם בטמפרטורה.

אם נשתמש במשוואה (1) ונבטא את קצב איבוד החום באמצעות קצב שינוי הטמפרטורה נוכל לרשום

$$(4) \quad \frac{dT}{dt} = -\frac{a}{M \cdot c}(T - T_e)$$

כאשר טמפרטורת הסביבה (T_e) נשארת קבועה מתקיים נגדיר:

$\Delta T = T - T_e$ ונקבל שפתרונה של משוואה (4) הוא:

$$(5) \quad \Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{\left(\frac{-a}{M \cdot c}\right) \cdot t}$$

כאשר ΔT_0 הוא הפרש הטמפרטורות ההתחלתי בין הגוף החם לסביבתו.

❖ הסרטון שממחיש את התופעה:

<https://www.youtube.com/watch?v=t61SXb17tnM>

עבודת הכנה

1. נתונה לוחית אסבסט שעובייה 2 מ"מ ושטחה 80 סמ"ר. בצידה האחד של

הלוחית יש מקור חום בטמפרטורה קבועה $T_2=95^{\circ}\text{C}$, וצידה השני נמצא במגע

עם גוף פליז שמסתו 600 גרם בטמפרטורה $T_1=25^{\circ}\text{C}$. מוליכות החום של לוחית

האסבסט $K = 0.00022 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{deg}}$ והחום הסגולי של הפליז $c = 0.092 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$.

מצא את קצב עליית הטמפרטורה של גוף הפליז בתחילת המדידה בהנחה שאינו מאבד חום לסביבה (זה קורה במציאות רק כאשר הטמפרטורה שלו שווה לטמפרטורת הסביבה).

רמז: משוואה 6 המופיעה בהמשך התדריך.

2. בהמשך לשאלה הקודמת מה תהיה הטמפרטורה הסופית של הפליז (בהנחה שהוא לא מאבד חום לסביבה) כעבור זמן גדול מאוד

3. בניסוי למדידת מוליכות חום של חומר כלשהו, התקבלה התאמה לינארית לגרף

$$\text{של } \frac{\Delta T}{\Delta t} \text{ כפונקציה של הטמפרטורה } T.$$

$$\text{המשוואה שהתקבלה היא: } \frac{\Delta T}{\Delta t} = -0.00142 \cdot T + 0.063 \text{ . בעזרת נוסחה}$$

(7) מצא את מוליכות החום K ואת מקדם הקירור a של החומר, אם ידוע:

$$A = 40 \text{ cm}^2, d = 0.6 \text{ cm}, m = 200 \text{ g}, c = 0.28 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}, T_w = 95^\circ, T_e = 22^\circ$$

4. מצא כמה זמן ידרש לגוף להתקרר מטמפרטורה של 100°C לטמפרטורה של

60°C כאשר טמפרטורת הסביבה היא 20°C ? (משוואה 5)

השתמש בנתונים הבאים: מסה 100 g , חום סגולי $0.2 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$, ומקדם צורה

$$. a = 1 \frac{\text{cal}}{\text{sec} \cdot \text{deg}}$$

5. גוש ברזל חם בעל מסה של 50 g הונח ב 150 ml מים הנמצאים בטמפרטורה

של 22°C , לאחר זמן מה הברזל והמים הגיעו לשיוון בטמפרטורה וטמפרטורת

המים הגיע לשיא של 24°C .

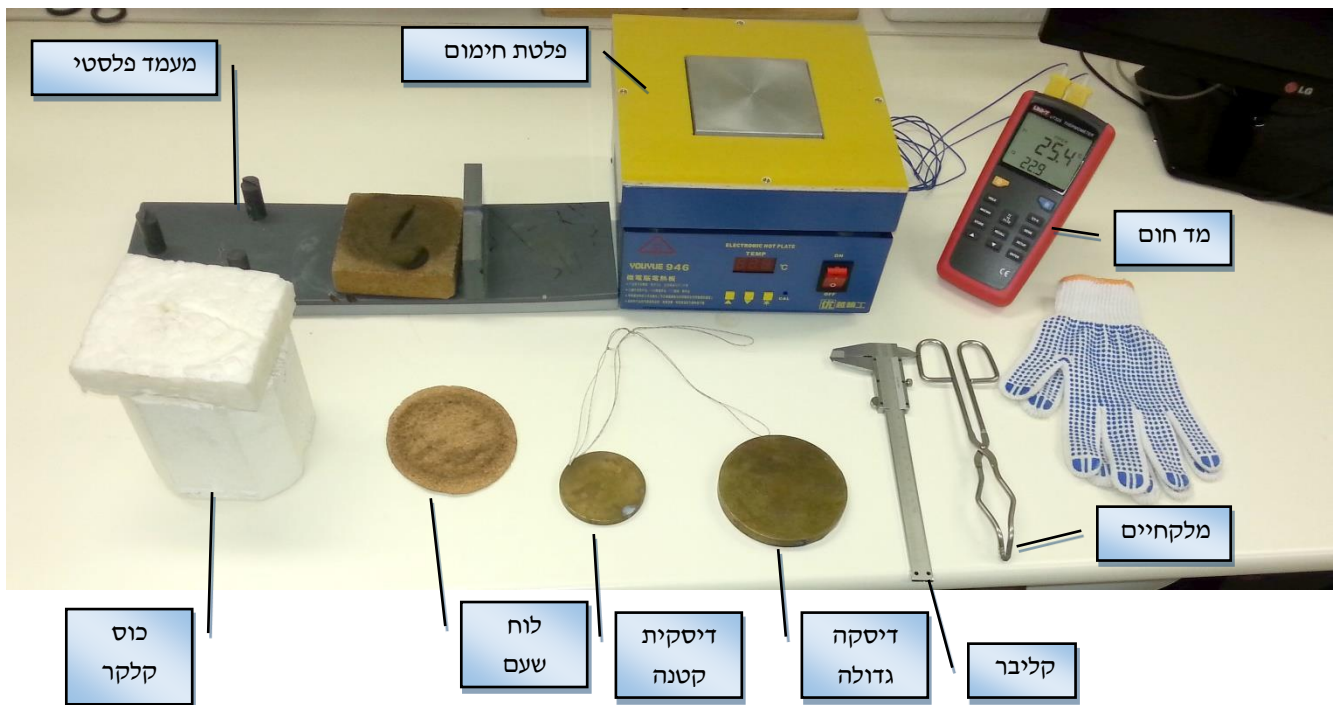
חשב מהי הטמפרטורה ההתחלתית של הברזל לפני שהונח במים בהנחה שקיבול

$$\text{החום הסגולי של ברזל הוא } c = 0.109 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}} \text{ ?}$$

3. מהלך הניסוי

ניסוי זה מורכב משלושה חלקים :
בחלק הראשון נמדוד את מוליכות החום של שעם.
בחלק השני נמצא את מקדם איבוד החום של דיסקית פליז.
בחלק השלישי נמצא את מקדם החום הסגולי של הפליז.

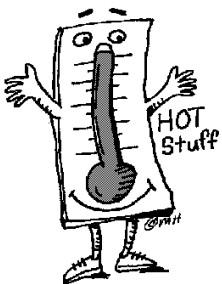
המערכת והציוד של הניסוי מתוארים באיור 1 :



איור 1 : המערכת והציוד עבור הניסוי מוליכות חום

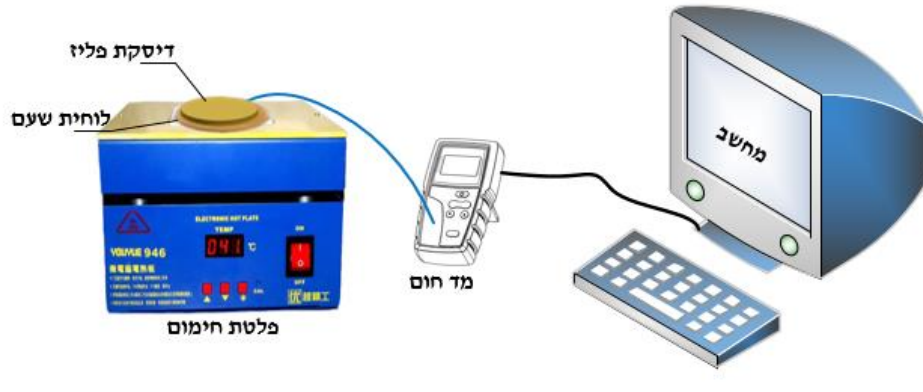
שימו לב! במהלך הניסוי תדרש לעבוד עם פלטת חימום חמה. אין לגעת ישירות בפלטה או בכל חפץ שחומם על ידה ללא כפפות או

שימו לב! פלטת חימום מסוגלת להעלות את הטמפרטורה בלבד והדרך היחידה לקררה היא ע"י המתנה מרובה. אל תעלו טמפרטורה



3.1 מדידת מוליכות חום של שעם

בניסוי זה נמדוד את מוליכות החום של לוחית שעם. נחזיק צד אחד של הלוחית בטמפרטורה קבועה באמצעות פלטת חימום, ונמדוד את קצב עליית הטמפרטורה של דסקית פליז הנמצאת על גבי לוחית השעם. המערכת מתוארת באיור 2.



איור 2: החום זורם מפלטת חימום דרך השעם אל הפליז.

השימוש בפלטת חימום מתכתית וכן בדסקית פליז נועדו להבטיח פיזור אחיד של זרימת החום על פני שטח המגע כולו. את קצב מעבר החום מפלטת חימום לפליז דרך השעם ניתן לבטא באמצעות משוואה (2), מצד שני הפליז מאבד חום לסביבה עפ"י חוק הקירור של ניוטון – משוואה (3).

נשתמש בסימונים הבאים: טמפרטורת הפלטה – T_{pl} , טמפרטורת הסביבה – T_e , טמפרטורת הפליז – T , מוליכות החום של השעם – K , עובי השעם – d , שטח המגע – A , מסת הפליז – M , חום סגולי של פליז – c , מקדם איבוד החום של הפליז – a . קצב שינוי הטמפרטורה של הפליז נתון ע"י

$$(6) \quad \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{K \cdot A}{d \cdot M \cdot c} (T_{pl} - T) - \frac{a}{M \cdot c} (T - T_e)$$

בניסוי נמדוד באמצעות המחשב את $T(t)$, נחשב את יחס הפרשים: $\frac{\Delta T}{\Delta t}$, ומתוך

משוואה (6) נחשב את מוליכות החום של שעם.

3.1.1 הנחיות ביצוע

- תמדדו את מסת דיסקת הפליז הגדולה, את עובי לוחית השעם, את שטח המגע (פני דסקית הפליז) ואת טמפרטורת הסביבה.
- הפעילו את פלטת החימום וכוונו טמפרטורת הפלטה ל- $80^\circ C$ באמצעות הליצה על חץ מעלה.

- שימו לב: לא לחמם את הפלטה מעבר לנדרש כי לוקח זמן רב לקרר אותה.
- המתנו עד שהטמ' של הפלטה מתייצבת על- $80^{\circ}C$.
- פיתחו את תוכנת UNI-T (**UNI-T**) במחשב. ממשק המשתמש מופיע באיור 3.

הפעלת/כיבוי הקלטה

טמ'פ נוכחי

קצב הדגימה


חלון ה-Data

ציר טמ'פ

אזור גרפי

ציר דגימה $5 \frac{samples}{sec}$

איור 3: ממשק המשתמש של תוכנת UNI-T המקשרת בין המחשב למד טמ'פ.

- כווננו את Sample Interval ל-60sec.
- הניחו את לוחית השעם על הפלטה החמה ומעליה הניחו את דיסקת הפליו.
- הצמידו את המדחום הדיגיטלי לדיסקת הפליו וליחצו בתוכנה על Usb connection לתחילת ההקלטה.
- עקבו אחר הטמפרטורה של דיסקת הפליו.
- לאחר 15 דקות נוספות ליחצו על Usb disconnect לסיום ההקלטה.
- תשמרו את תוצאותיכם באמצעות הלחיצה על צלמית השמירה  באזור ה-Data. באפשרותכם לשמור את המידע עם סיומת (excel)xls או txt.
- העתיקו את קבצי התוצאות ל-Disk on Key.

• מתוך התוצאות חישובו את קצב שינוי הטמפרטורה, כלומר שינוי הטמפרטורה

$$\left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_n = \frac{T_{n+1} - T_{n-1}}{t_{n+1} - t_{n-1}}$$

בין מדידה למדידה חלקי הזמן בין מדידה למדידה

$$T \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

שרטטו בגרף את קצב שינוי הטמפרטורה כפונקציה של הטמפרטורה

והתאימו לתוצאות פונקציה לינארית.

• את משוואה (6), המתארת את התהליך, ניתן לרשום גם בצורה הבאה:

$$(7) \quad \frac{\Delta T}{\Delta t} = \underbrace{\left(-\frac{K \cdot A}{d \cdot M \cdot c} - \frac{a}{M \cdot c} \right)}_A \cdot T + \underbrace{\frac{K \cdot A}{d \cdot M \cdot c} \cdot T_{pl} + \frac{a}{M \cdot c} \cdot T_e}_B$$

ניתן לראות שמדובר במשוואת קו ישר כאשר הביטוי המסומן ב-A הוא שיפוע

הגרף והביטוי המסומן ב-B הוא נקודת החיתוך עם הציר האנכי.

מתוך השוואת השיפוע שהתקבל בגרף ל-A ונקודת החיתוך בגרף ל-B

מתקבלות שתי משוואות בשני נעלמים (K, a) , מתוך שתי המשוואות מצאו את

מוליכות החום של השעם K ואת מקדם הקירור a (החום הסגולי של הפליז

$$\text{הוא } (c = 0.092 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}).$$


• השוו עם הערך המופיע בספרות: מוליכות החום של שעם

$$K = 0.00012 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{deg}}$$

3.2 חוק הקירור של ניוטון

3.2.1 הנחיות ביצוע:

- תמדדו את משקלה של דיסקית הפליז הקטנה שבה תשתמשו בניסוי
- בעזרת מלקחיים הניחו את הדיסקית מעל הפלטה החמה.
- הכניסו את המדחום הדיגיטאלי לחריץ המדידה שעל הדיסקית ותמדדו את הטמפרטורה של הדיסקית.
- ברגע שטמפרטורת הדיסקית תגיע ל- $80^{\circ}C$, הרימו אותה יחד עם חיישן טמפרטורה והניחו על המעמד הייעודי בצורה כזאת שהחום יתפנה באופן חופשי מהדיסקית אל הסביבה.

- מיחקו את התוצאות שקיבלתם בניסוי הקודם ע"י הלחיצה על  בחלון ה-Data.
- כווננו את Sample Interval ל-10sec (דגימת הטמפרטורה מתבצעת כל 10 שניות).
- ליחצו בתוכנה על Usb connection לתחילת ההקלטה.
- לאחר 5 דקות ליחצו על Usb disconnect.
- תשמרו תוצאותכם והעתקו את קבצי התוצאות ל-Disk on Key.
- חישבו את הפרשי הטמפרטורות בין הפליז לסביבה $\Delta T = T - T_e$ כל 10 שניות, שרטטו בגרף את הפרש הטמפרטורה ΔT כפונקציה של הזמן והתאם לתוצאות פונקציה אקספוננציאלית. בעזרת נוסחה (5) מיצאו את מקדם איבוד החום a , האם הוא זהה לתוצאה בניסוי הקודם? רישמו מה לדעתך הסיבה להבדל.

3.3 חישוב מקדם החום הסגולי של פליז

בניסוי זה נניח דיסקת פליז חמה במים הנמצאים בטמפרטורת החדר, חום יעבור מדיסקת הפליז למים עד להשוואת הטמפרטורות ביניהם. כמות החום שהמים קיבלו בתהליך שווה לכמות החום שהפליז מסר (בהזנחת איבודים לסביבה). הקשר בין שינוי הטמפרטורה לשינוי בכמות החום של הפליז נתון בנוסחה (1) וממנה ניתן למצוא את מקדם החום הסגולי (C) של הפליז.

3.3.1 הנחיות ביצוע

- מלאו בעזרת משורה כמות מים ידועה בכוס הפלסטיק ותמדדו את טמפרטורת המים, הניחו את כוס הפלסטיק במיכל קלקר לצורך יצירת בידוד מהסביבה.
- חממו את הדיסקית לטמפרטורה של $90^{\circ}C$.
- תמדדו את הפרמטרים הבאים:

| M_p - מסת דסקת הפליז | $T_{0,p}$ - טמפ' התחלתית של פליז חם | $T_{0,w}$ - טמפ' התחלתית של מים | c_w | M_w - מסת המים |
|------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | | | $1 \frac{cal}{g \cdot deg}$ | |

- הרימו את הדיסקית מהפלטה החמה והניחו אותה בכוס הפלסטיק, כסו את הכוס בקלקר.
- עקבו אחר עלית טמפרטורת המים באמצעות מדחום ורישמו את הטמפרטורה המקסימלית שאליה הם הגיעו.
- **בסיום הניסוי כוונו טמפרטורת הפלטה ל- $80^{\circ}C$ באמצעות הליצה על חץ מטה וכבו את הפלטה.**

עיבוד תוצאות

כמות החום שהמים קיבלו היא (על פי (1) :

$$(8) \quad Q = M_w c_w (T - T_{0,w})$$

כאשר $T_{0,w}$ היא טמפרטורת המים בתחילת התהליך, T טמפרטורת המים

$$\cdot \left(c_w = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}} \right) \text{ המקסימאלית שנמדדה ו } c_w \text{ מקדם החום הסגולי של המים}$$

כמות החום שהפליז איבד היא :

$$(9) \quad Q = M_p c_p (T_{0,p} - T)$$

כאשר $T_{0,p}$ היא הטמפרטורה ההתחלתית של הפליז, שהיא שווה לטמפרטורה של $90^{\circ}C$, ו- T היא הטמפרטורה בסוף התהליך ששווה לטמפרטורת המים המקסימאלית (התחממות המים נעצרה כאשר נוצר שיוויון בטמפרטורות של הפליז והמים).

מתוך השוואת (8) ל-(9) מתקבל :

$$(10) \quad M_p c_p (T_{0,p} - T) = M_w c_w (T - T_{0,w})$$

ולכן

$$(11) \quad c_p = \frac{M_w c_w (T - T_{0,w})}{M_p \cdot (T_{0,p} - T)}$$

• חישבו את מקדם החום הסגולי של הפליז והשוו לערך המקובל

$$\cdot \left(c = 0.092 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}} \right)$$

• חישבו את השגיאה, ממה לדעתכם היא נובעת?