

סמסטר ב' תשס"ב

שם הבודק: _____

תאריך הבדיקה: _____

ציון הדו"ח: I _____

II _____

דו"ח מסכם בניסוי: צמיגות

חלק: _____

שם מדריך הניסוי (שם מלא): אלון יפה

תאריך ביצוע הניסוי: 12.11.15

תאריך הגשת הדו"ח: 25.11.15



הדו"ח מוגש על ידי:

II

305278574
ת.ז.

רשתי
משפחה

איתי
שם פרטי

304848013
ת.ז.

ירדני
משפחה

ליאור
שם פרטי

I

מספר עמדה

תת קבוצה

J
מסי קבוצת המעבדה

הנדסת חשמל
מסלול הלימוד

הערות הבודק לנושאים לקויים בדו"ח:

מטרת הניסוי:

מציאת ערך צמיגות הגליצרין תוך שימוש בביטוי לזמן הנפילה (ראה נוסחה X בהמשך) והשוואתו לערך התיאורטי, וכן התנסות בכלים סטטיסטיים שונים.

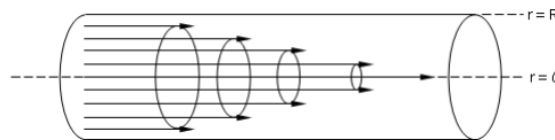
רקע תאורטי

נוזל בלתי דחיס (בעל צפיפות קבועה) ובלתי צמיג מקיים בכל נקודה את חוק ברנולי:

$$0.5\rho v^2 + P = \text{Const} \quad (1)$$

ρ - צפיפות הנוזל, v - מהירות הזרימה של יחידת נפח, P - הלחץ ההידרודינמי.

נוזל זורם המקיים את חוק ברנולי נקרא נוזל אידיאלי. במצב זה מהירויות כל חלקיקי הנוזל בחתך מסוים שוות, כלומר, הנוזל מתקדם כגוף אחד לאורך הצינור. ככל שמהירות הזרימה גדלה, הלחץ המקומי קטן. בזרימת נוזל ריאלי (לא אידיאלי) מופיעים כוחות נוספים שלא מאפשרים את תיאור התנועה בעזרת חוק ברנולי. כוחות אלו הם כוחות חיכוך פנימיים המתנגדים לתנועת הנוזל, הם אופייניים לסוג הנוזל ומהווים את הצמיגות. זרימת נוזל ריאלי בתוך צינור נקראת זרימה למינרית, אשר נעשית בשכבות של צינורות גליליים המחליקות זו על גבי זו בכיוון מקביל לציר הצינור. כוחות החיכוך הפנימיים (כוחות בין שתי שכבות סמוכות בשטח המגע ביניהן) גורמים לכך שמהירות זרימת הנוזל במרכז הצינור גדולה ממהירותו ליד הדופן.



איור 1: פרופיל המהירות של נוזל ריאלי.

כדי לקיים את תנועתו של נוזל ריאלי יש להפעיל כוחות שיתגברו על כוחות החיכוך, המתוארים בעזרת צמיגות הנוזל. נוזל צמיג ובלתי דחיס מכונה נוזל ניוטוני. זרימה למינרית תתקיים כל עוד המהירות הממוצעת $\langle v \rangle$ לא עולה על ערך מסוים, אשר נקרא המהירות הקריטית. במהירויות גבוהות ממנה הזרימה הופכת למערבולתית (נוצרים זרמים אקראיים ומערבולות מקומיות).

תלות צפיפות נוזל בטמפרטורה

צפיפות ρ מוגדרת כמסה ליחידת נפח. רוב החומרים בטבע מתפשטים עם חימוםם תוך כדי עליית האנרגיה הקינטית והלחץ הפנימי של חלקיקי החומר. מספר החלקיקים אינו משתנה, ולכן גידול הנפח גורר ירידה בצפיפות. תלות הצפיפות בטמפרטורה היא בקירוב:

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha T} \quad (2)$$

כאשר α נקראת מקדם ההתפשטות התרמית. α אופייני לנוזל הוא מסדר גודל של $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. ρ_0 היא צפיפות של החומר ב- $T=0^\circ\text{C}$.

תלות הצמיגות בטמפרטורה

את צמיגותו של נוזל ניתן להגדיר כהתנגדות שלו לשינוי צורתו שמקורה בחיכוך שבין חלקיקי הנוזל. העלאת הטמפרטורה של הנוזל גורמת מצד אחד לעליה באנרגיה הקינטית של חלקיקי הנוזל ולכן לעליה במספר ההתנגשויות ביניהם ולעליה בחיכוך, ומצד שני להקטנת צפיפות הנוזל ולכן להקטנת החיכוך. באופן ניסיוני נמצא שהגורם השני משמעותי יותר ולכן הצמיגות יורדת ככל שהטמפרטורה עולה:

$$\eta = A e^{\frac{B}{T}} \quad (3)$$

כאשר A, B נקבעים לפי גרף ניסיוני של $\eta(T)$.

הכוחות הפועלים על כדור בתוך זורם

הכוח המעכב R, הפועל על כדור הנע בתוך זורם צמיג, לא דחיס ולמינרי, נתון לפי חוק סטוקס ע"י:

$$R = 6\pi\eta r v$$

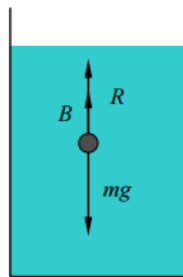
r - רדיוס הכדור, v - מהירות הכדור, η - מקדם הצמיגות של הנוזל.

$$\text{poise} = \frac{\text{dyne} \times \text{sec}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{gr}}{\text{cm} \times \text{sec}}$$

במערכת היחידות c.g.s. נמדדת הצמיגות η ביחידות הנקראות poise, כאשר חוק סטוקס מאפשר מדידה של מקדם צמיגות של זורם. את משוואת התנועה של כדור נופל תחת כוח הכובד בתוך זורם נקבל לפי החוק השני של ניוטון:

$$mg - R - B = ma \quad (4)$$

B הוא כוח העילוי לפי ארכימדס: $B = 4\pi r^3 \rho_l g / 3$ כאשר ρ_l היא צפיפות הזורם.



איור 2: הכוחות הפועלים על כדור בתוך זורם

כוח סטוקס מתחיל לפעול מיד עם תחילת תנועת הכדור בתוך הזורם, והולך וגדל ביחס ישר למהירות. ברגע בו התנועה הופכת לקצובה (התאוצה מתאפסת והכדור מגיע למהירות קבועה - V_f) מקבלים $mg - R - B = 0$. לאחר הצבת הגדלים בנוסחה ניתן לחלץ את V_f (המהירות הסופית אליה מגיע הכדור בזורם) ולמצוא את זמן הנפילה:

$$V_f = \frac{2g(\rho_b - \rho_l)r^2}{9\eta} \xrightarrow{v_f = \frac{L}{t}} t = \frac{9L\eta}{2g(\rho_b - \rho_l)r^2} \quad (5)$$

P_b - צפיפות הכדור, L - מרחק הנפילה, t - זמן הנפילה.

כמו כן, על ידי פתירת המשוואה הדיפרנציאלית מנוסחה (4) עבור מהירות הכדור (כאשר $V_0 = X_0 = 0$), מתקבלים הביטויים הבאים עבור מהירות הכדור והעתקו כפונקציה של הזמן:

$$V(t) = V_f \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \tau = \frac{2\rho_b r^2}{9\eta} \quad (6)$$

כאשר τ -הנו זמן הדעיכה של המערכת, אשר נותן את סדר גודל הזמן, שבו הכדור מגיע למהירות קצובה.

אינטגרציה של משוואה (6) והצבת תנאי התחלה $X_0 = 0$ נותנת את העתק הכדור כפונקציה של הזמן:

$$X(t) = V_f \left[t + \tau \left(e^{-\frac{t}{\tau}} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

הצבת $t = \tau$ במשוואה זו נותנת את מרחק הנפילה האופייני שלאחריו ינוע הכדור במהירות קבועה.

יש לשים לב כי חוק סטוקס נכון רק לגבי זורם בעל ממדים אינסופיים ביחס לממדי הגוף הנע, ומהירויות נמוכות מהמהירות הקריטית. במהירויות העולות על המהירות הקריטית הזרימה טורבולנטית והחוק מאבד את תוקפו.

מהלך הניסוי :

רשימת ציוד:



- מבחנה (המכילה גליצרין) סגורה בשסתום. על המבחנה שנתות.
- קליבר דיגיטלי (רזולוציה 0.001 cm)
- אריומטר (רזולוציה: 0.002 g/cm^3)
- שעון עצר (רזולוציה 0.01 sec)
- מיקרומטר (רזולוציה 0.0001 cm)
- מאזניים דיגיטליות (רזולוציה 0.01 גרם)
- צלחת להכלת הכדורים.
- מערכת כדורים שכוללת 8 גדלים שונים.
- מולטילוג (רזולוציה 0.001°C)



חלק א- מציאת צפיפות כדורי המתכת:

- בחלק זה חושבו המסה, הנפח והרדיוס של כל אחד מהכדורים (8 סטים של כדורים בגדלים שונים).
1. חישוב רדיוס הכדורים: מדידת הרדיוס בוצעה באמצעות מכשיר המיקרומטר. חשוב לצייל את המיקרומטר כאשר הוא סגור! תוך שימוש במגנט ייעודי הוחדר הכדור אל המיקרומטר. את הידיות נהדק סביב הכדור באמצעות ידית שמחוברת למיקרומטר. מתוך כל קבוצת כדורים, נמדדו הרדיוסים 5 כדורים מאותו גודל בכל פעם, ובוצע ממוצע שלהם.
 2. חישוב מסת הכדורים: היות ומסת 2 הכדורים הקטנים ביותר קרובה לגודל רזולוציית המכשיר, ולכן לא ניתנת למדידה עבור כדור בודד, ניקח 5 כדורים ביחד ונשקול. לאחר מכן נחלק ב-5 ונקבל את מסה של כדור יחיד.



חשוב להדגיש כי טרם ביצוע מדידות המסה, יש לוודא כי המשקל מפולס. פילוסו מתבצע באמצעות הפלס הממוקם בקדמת המכשיר ע"י ייצוב רגלי המשקל, ומרכז הבועה שבתוך הפלס. חישוב צפיפות הגליצרין נעשה תוך שימוש באריומטר, כאשר התוצאה מוצגת בסרגל שנתות ע"פ מפלס הנוזל בעת הגעת המכשיר למצב מנוחה. על מנת לחשב את מקדם הצפיפות יש למצוא את הנקודה ממנה מתחיל הכדור לנוע בנוזל במהירות קבועה.



חלק ב – מציאת המהירות הקבועה במבחנה:

יש לקבוע 2 קטעים בעזרת ארבעה סמני גובה. קביעת מיקומי הסמנים תתבצע באופן הבא: הסמן העליון יקבע במרחק של לפחות 10cm מראש המבחנה, עקב התאוצה בתחילת תנועת הכדור. הסמן התחתון יקבע במרחק 10 cm מתחתית המבחנה עקב היות הנוזל לא אחיד שם. המרחקים שבין הסמנים שמתחת לעליון ומעל התחתון צריכים להיות שווים אחד לשני. מרחקים אלו נקבעו להיות 9.874 cm, תוך שימוש בקליבר דיגיטלי. לאחר מכן יש להעביר כל כדור, 5 פעמים, בתוך החור העליון של המבחנה, ולמדוד עבור כל כדור את הזמן שלוקח לו לעבור בין סמן 1 ל-2 ובין סמן 3 ל-4.



עפ"י הכתוב ברקע התאורטי T - מתאר את קצב ההגעה למהירות קבועה והוא פרופורציוני לרדיוס הכדור נוסחה (6). לפיכך, הכדורים הגדולים יגיעו למהירותם הסופית במרחק הרב ביותר, ויכלול את המרחק שיהיה על הכדורים הקטנים לעבור כדי להגיע למהירות קבועה. מהלך מדידת זמן נפילת הכדורים יתבצע באופן הבא:

בכל סט כדורים יוטלו חמישה כדורים לתוך המבחנה. עם הטלתם, ימדד הזמן שלקח לכל כדור לעבור בין הסמן העליון לתחתון, בעזרת שעון העצר. הפעלת הטיימר תתבצע כך: כאשר הכדור עובר את הסמן העליון, להפעלת השעון-יש ללחוץ על הלחצן הירוק. כאשר הכדור עובר את הסמן התחתון, לעצירת השעון-יש ללחוץ על הלחצן האדום. בתום כל בדיקה יש לאפס את השעון-לחיצה על הלחצן השחור.


תכנון עיבוד תוצאות:

מציאת צפיפות כדורי המתכת:


רדיוס הכדור:

נבצע 5 מדידות עבור כל כדור, כאשר מדידת הקוטר של הכדור תתבצע באמצעות מכשיר המיקרומטר. את התוצאה נחלק ב-2 כדי לקבל את רדיוס הכדור. חישוב ממוצע המדידות בעזרת חישוב ממוצע חשבוני. חישוב שגיאת המכשיר יתבצע באמצעות נוסחה 3.4 בחוברת סטטיסטיקה.

חישוב שגיאה סטטיסטית וסטיית התקן יתבצע לפי נוסחה בעמוד 35 במצגת .


שגיאת הרדיוס הסופית מחושבת ע"י שורש סכום ריבועי השגיאות , וחלוקתה ב-2, מכיוון שנמדד קוטר הכדור. 

מסת הכדור:

עבור כדורים 1-6 בוצעו 5 מדידות עבור כל כדור, כשבכל מדידה נמדד כדור אחר מקבוצת הכדורים. עבור 2 הכדורים הקטנים ביותר, מסת הכדורים קרובה מאוד לרזולוציית המכשיר, ולכן נמדדו 5 כדורים בבת אחת, וחושב להם ממוצע חשבוני. 
קיימת שגיאת מכשיר שמחושבת לפי נוסחה 3.4 בחוברת סטטיסטיקה, כאשר הפעם היחידות הן בגרמים.
נחשב גם שגיאה סטטיסטית לפי נוסחה בעמוד 35 במצגת, והשגיאה הכוללת תהיה שורש סכום ריבועי השגיאות.

צפיפות הכדור:

את צפיפות הכדור ρ_b ושגיאיתו, נחשב עפ"י הנוסחה לשגיאה עקיפה (מצגת, שקופית 33) בהתאם לנוסחה הבאה:

$$\rho_b = m/v \quad \Delta \rho_b = \sqrt{(1/v \cdot \Delta m)^2 + (-m/v^2 \cdot \Delta v)^2} \quad \text{$$


כאשר:

M – מסת הכדור


V – נפח הכדור

ρ_b – צפיפות הכדור

Δm – שגיאת המסה

Δv – שגיאת הנפח (חושב עפ"י הנוסחה: $\Delta V = 4\pi r^2 \Delta r$, כאשר Δr הינה שגיאת הרדיוס שחושבה לפי ההסבר מעלה.) 

מציאת צפיפות הגליצרין:

בעזרת האריומטר חישבנו את צפיפות הגליצרין: 1.26 g/cm^3 . רזולוציית האריומטר הינה 0.002 g/cm^3 ולכן שגיאת המכשיר תחושב לפי נוסחה 3.4 בחוברת סטטיסטיקה 

מציאת טמפרטורת הגליצרין:

ידוע כי טמפרטורת החומר משפיעה על הצמיגות. בנספחים תצורף טבלה המתארת תלות זו. השאיפה בניסוי היא שהטמפרטורה תהיה קבועה וערך הצמיגות שנמדד יתאים לטמפרטורה זו. את הטמפרטורה נמדוד בעזרת מכשיר המולטילוג. נבצע מספר רב של מדידות. ניקח את הערך הגבוה ביותר ואת הערך הנמוך ביותר, ונחשב ממוצע. השגיאה תהיה ההפרש של הממוצע עם הערך הגבוה/הנמוך, משוקלל עם שגיאת המכשיר(לפי נוסחה 3.4 בחוברת הסטטיסטיקה), כאשר השקלול הוא שורש של סכום ריבועי השגיאות.

גילינו כי ערך הטמפרטורה הגבוהה הוא 24.564°C , והערך הנמוך 23.856°C . לכן,

הטמפרטורה הממוצעת במהלך המדידה הינה 24.26°C עם שגיאה של 0.30°C .

מציאת המהירות הקבועה במבחנה:

ניקח 2 קטעים בעלי אורך שווה לפי המוסבר במהלך הניסוי. אם הזמן שיקח לכדור לשקוע בכל אחד מהמקטעים יהיה קרוב מאד, נדע שמדובר במהירות קבועה. המרחק בין הסמנים יימדד בעזרת הקליבר, ושגיאת הקליבר תחושב בעזרת נוסחה 3.4 בחוברת הסטטיסטיקה. זמן השקיעה יחושב בעזרת שעון העצר. נתחשב בשגיאת המכשיר שמחושבת לפי הנוסחה

הנל, בזמן תגובה ממוצע של אדם (הזמן שלקח לאדם להפעיל את הסטופר) שהינו 0.3 sec , ושגיאה סטטיסטית של 5 מדידות לכל כדור שתחושב לפי נוסחה בעמוד 35 במצגת.

השגיאה הכוללת תהיה שקלול השגיאות לפי שורש של סכום ריבועי השגיאות.

השאיפה היא כי ערך הזמן הקטן יותר חלקי ערך הזמן הגדול יותר בכל מדידה, יהיה 95% (כלומר שתהיה התאמה מספיק טובה לקביעה כי המהירות קבועה)

חישוב הצמיגות על ידי מדידת זמן שלוקח לכדור ברדיוס r (cm) לשקוע מרחק h (cm):

בעזרת הסמנים נקבע מרחק של 30.48 cm שחושב בעזרת הקליבר. את שגיאת המרחק נחשב בעזרת נוסחה 3.4 בחוברת הסטטיסטיקה שתקבע את שגיאת מכשיר המדידה. נבצע 5 מדידות עבור כל כדור ונמדוד עבור כל כדור את זמן שקיעתו באמצעות שעון העצר. שגיאת המדידה מחושבת באותו אופן שפורט מעלה (בחלק של מציאת המהירות הקבועה).

התאמה לגרף:

$$y = a_2 \cdot \frac{1}{x^2} + a_1 \quad (8)$$

התוצאות נערכו בגרף המציג את זמן הנפילה (t) כתלות ברדיוס הכדור הנופל (r). ולכן המשתנים:

ציר ה- x ושגיאתו הוגדרו כ- $(r \pm \Delta r)$

ציר ה- y ושגיאתו הוגדרו כ- $(t \pm \Delta t)$ (אופן חישוב השגיאות צוין לעיל)

a_1 – המשתנה החופשי (מציין את הזמן ההתחלתי) צריך לקבל ערכים השואפים לאפס, בהיעדר כך ניתן להסביר זאת על ידי שגיאה שיטתית בזמן.

$$a_2 = \frac{9L\eta}{2g(\rho_b - \rho_l)}$$

- מייצג את שיפוע הגרף המתקבל.

בהתאם לכך הוזנו ערכי צפי לפרמטרי הגרף: עבור a_2 ערך מצופה של 0.35 (לפי חישוב קבועים והיעזרות בערך התיאורטי של הצמיגות מהגרף שהתקבל בתדריך העבודה) ועבור a_1 ערך קרוב ל-0 (0.03).

לאחר קבלת הגרף נבדוק את טיב ההתאמה ביחס לנתונים עפ"י מדד ה- χ^2 (חי בריבוע) מנוסחה 5.21 בחוברת הסטטיסטיקה. מהפרמטר a_2 שיתקבל, ולפי נוסחה (5) נחלץ את

ערך הצמיגות המחושבת η כאשר:

$$\eta = \frac{2g(\rho_b - \rho_l)a_2}{9L} \quad (9)$$

השגיאה של ערך הצמיגות המחושב תימצא לפי הנוסחה לשגיאה עקיפה (מצגת סטטיסטיקה שקופית 33).

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{2(\rho_b - \rho_l)a_2}{9L}\Delta g\right)^2 + \left(\frac{2ga_2}{9L}\Delta\rho_b\right)^2 + \left(\frac{2ga_2}{9L}\Delta\rho_l\right)^2 + \left(\frac{2g(\rho_b - \rho_l)}{9L}\Delta a_2\right)^2 + \left(\frac{2(\rho_b - \rho_l)a_2}{9}\ln|L|\Delta L\right)^2} \quad (10)$$

לאחר קבלת ערך מחושב לצמיגות הגליצין ושגיאתו, נשווה ערכים אלה לערך תיאורטי ונבדוק את מדד טיב ההתאמה.

תוצאות הניסוי:

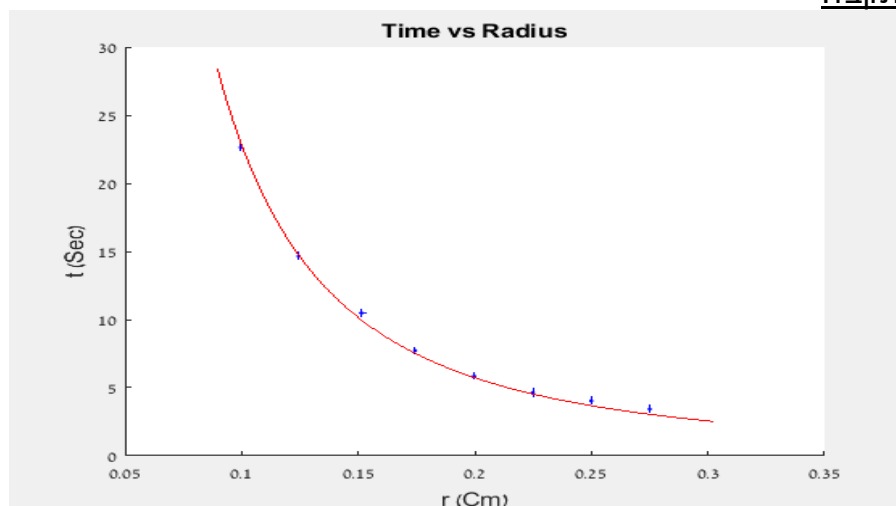
למציאת טווח הנפילה במהירות קבועה נבחר בין הסמן העליון לתחתון מרחק של 0.00029 ± 9.87400 ס"מ. בוצעו 5 מדידות זמנים בטווח מרחקים זה. התוצאות שהתקבלו:

כדור	מקטע	ממוצע זמנים	חישוב יחס הזמנים [%]
1	1	1.254	94.28571
	2	1.33	
2	1	1.204	88.79056
	2	1.356	
3	1	1.814	95.14884
	2	1.726	
4	1	1.92	94.48819
	2	2.032	
5	1	2.508	90.93546
	2	2.758	
6	1	3.116	95.99507
	2	3.246	
7	1	4.976	96.42283
	2	4.798	
8	1	7.474	98.44795
	2	7.358	

איור 3 – טבלה המתארת את היחס בין ממוצע זמני הנפילה ב-2 מקטעים בעלי אורכים שווים של 9.9 ס"מ

לאחר מכן הוגדר טווח הנפילה הכולל לכדורים להיות: 0.00029 ± 30.480000 ס"מ.

הגרף המתקבל:



איור 4-התאמה לגרף – זמן נפילת הכדורים כפונקציה של רדיוס הכדור.

ציפינו לקבל גרף בעל דעיכה בהתאם לנוסחה (8), ואכן קיבלנו גרף כזה.
הפרמטרים שהתקבלו:

$$a(1)=0.03\pm0.19 \text{ sec}$$

$$a(2)=0.2280\pm0.0040 \text{ s}\cdot\text{cm}^2$$

לפי נוסחאות (8), (9) ו-(10) חושב ערך צמיגות הגליצרין ושגיאתו:

$$\eta=10.57\pm0.42 \text{ poise}$$

(נציין כי g נלקח מהרקע התאורטי)

השגיאה היחסית הינה:

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = 3.9\%$$

נמצא כי השגיאה קטנה מ- 4 דבר המצביע על דיוק מספק במדידות.

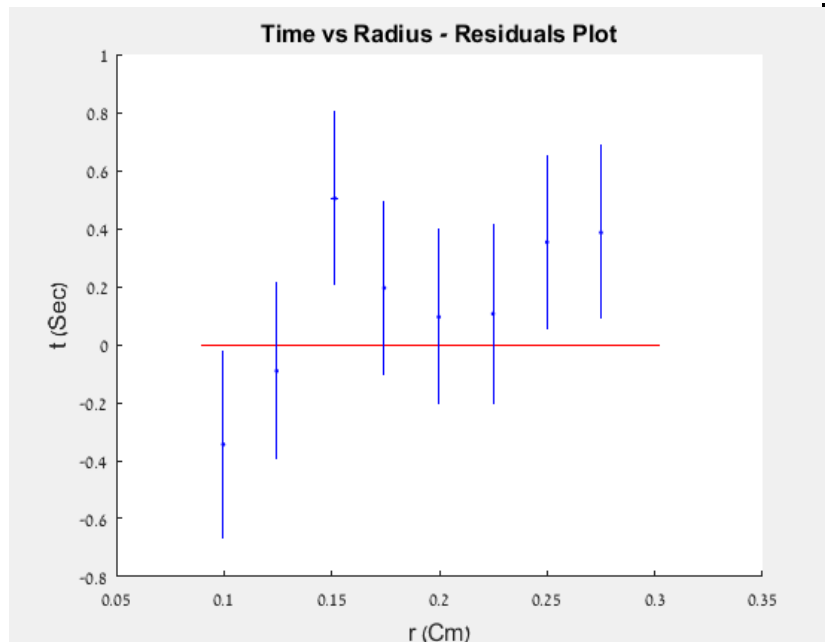
ערך ה- η התיאורטי לפי הגרף בתדריך העבודה (נספח 2) שווה ל- 10.25 ± 0.29 , כאשר השגיאה חושבה לפי שגיאת מכשיר (נוסחה 3.4 בחוברת סטטיסטיקה) כשהרזולוציה של הגרף באיזור הנמדד הינו 1 poise.

מדד חי בריבוע חושב להיות: 1.1 - ערך זה קרוב ל-1, דבר המעיד על התאמה טובה.

תוצאת טיב ההתאמה (חושבה עפ"י הנוסחה למדד טיב התאמה, שקף 49 שבמצגת הסטטיסטיקה) שווה ל-0.63 - הערך המתקבל מראה על התאמה יחסית טובה בין הערך המתקבל לתוצאה התיאורטית של צמיגות הגליצרין.

p-value חושב להיות 0.35, דבר המעיד על סיכוי טוב לקבל את תצפיות המדגם.

גרף שארים:



איור 5- גרף שארים – הגודל המתקבל מחיסור ערכי ההתאמה שהתקבלו מערכי המדידות

נראה כי פיזור הצלבים הוא בצורה אחידה יחסית סביב הקו, אין בעיה מגמתית ולכן ההתאמה שקיבלנו היא סבירה.

דיון ומסקנות:

בחלק הראשון של הניסוי מדדנו את זמני הנפילות של כדורים בגדלים שונים. עבור מרחק L בתוך המבחנה. רצינו לציין שחישוב השגיאות בניסוי זה היה מאתגר יותר מהניסוי הקודם שערכנו, אך לדעתנו התוצאות מראות שהצלחנו להתמודד עם החישובים. ההתאמה שביצענו הייתה טובה במיוחד וערכי הפרמטרים שהתקבלו תאמו את הערכים שציפינו. מקדם הצמיגות מהתאמה זו היה קרוב במיוחד לערך התאורטי שחושב וערך מדד טיב ההתאמה נחשב טוב. (וכן X^2 בריבוע זה - p-value).

למרות התוצאות הטובות, חשבנו על מספר רעיונות להשגת דיוק טוב יותר והקטנת השגיאות.

בחלק מהמדידות המתזמן עמד במרחק שונה ממבחנת הגליצין. נדגיש כי לשם תזמון מעבר הכדור בסמן התחתון, על המתזמן היה להתכופף בכל פעם. עובדות אלו הובילו לשינוי בזווית הראיה שהקשתה על המודד לתזמן במדויק את מעבר הכדור בסמנים. צורתה הגלילית של המבחנה יצרה עיוות שהקשה על ההבחנה ברגע בו עבר הכדור. עוביים של הסמנים הקשה אף הוא להבחין ברגע המדויק בו הכדור עובר כל סמן. במספר קטן של ההטלות המתזמן הפעיל את השעון מאוחר מידי (עייפות שגררה חוסר במיקוד).

בנוסף, בעת השימוש במכשיר המיקרומטר, חלק מהכדורים לא הונחו בדיוק במרכז מכשיר המדידה. עבודה עם המגנט הייעודי להחזקת הכדורים יכלה לסייע במרכז הכדור ולהביא למדידות מדויקות יותר.

יתר על כן, הטלת הכדור לתוך המבחנה בוצעה בכל מדידה במרחקים מעט שונים ביחס למרכז המבחנה, מה שחשף את הכדור לחיכוך גדול יותר משכבות הנוזל וכתוצאה מכך השפיע על מהירותו. ניתן לפתור זאת ע"י ביצוע הטלה ידנית למרכז ללא שימוש בידית המובנית.

לסיכום, ניתן לומר שהצלחנו בחלק זה של הניסוי למדוד את ערכו של מקדם הצמיגות עבור גליצין בדיוק טוב. בנוסף ההתאמות שבוצעו מראות כי המדידות מציינות לנוסחה התיאורטית, ואפשר לומר שהניסוי מאמת אותה.

בסוף הניסוי ראינו את השפעת הטמפרטורה על צפיפות הגליצין כאשר שחררנו כדורים למבחנה שיצאה מהמקפיא. לכדורים לקח זמן ממושך ליפול. בהשוואה לכדורים שהפלנו לגליצין בטמפ' של 24 מעלות צלזיוס בקירוב, לכדורים בגליצין לקח הרבה יותר זמן לשקוע. למרות שבחלק זה של הניסוי לא נערכו מדידות אנו יכולים להסיק מכך שבטמפ' נמוכות צמיגות הגליצין גבוהה מאשר בטמפ' גבוהות וזאת בהתאם למודל התיאורטי. לסיים, אפשר לומר שהניסוי היה מוצלח, השגנו את מטרת הניסוי ולפי התוצאות הצלחנו לאמת את המודלים התיאורטיים הנוגעים לתנועה בנוזל צמיג ותלות הצמיגות בטמפ'.

שאלת מדריך

משוואת החום/הדיפוזיה- היא משוואה דיפרנציאלית חלקית, המתארת את האופן שבו זורם חום בגוף מרחבי לאורך זמן. המשוואה הוצגה לראשונה על ידי ז'אן-בטיסט ז'וזף פורייה בתחילת המאה ה-19. המשוואה נקראת גם משוואת הדיפוזיה שכן היא מתארת באופן כללי פעפוע של חומר בזמן ובמרחב.

צורתה המלאה של המשוואה נכתבת כך:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (k(u, \vec{r}) \nabla u(\vec{r}, t))$$

כאשר:

u - פילוג החומר (או הטמפרטורה) במרחב ובזמן.

t - הזמן.

k - מקדם הדיפוזיה התרמית של החומר.

\vec{r} - וקטור המתאר מקום במרחב.

בדרך כלל מתייחסים למקדם הדיפוזיה כאל קבוע, ואז אפשר לכתוב

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \nabla^2 u(\vec{r}, t),$$

וזוהו הקשר בין הצמיגות (u) למקדם הדיפוזיה (k).

נספחים:

מידת משקל הכדורים בגרמים									
כדור	מידה 1	מידה 2	מידה 3	מידה 4	מידה 5	ממוצע	שגיאת מכשיר	שגיאה סטטיסטית	שגיאה סופית
1	0.68	0.69	0.67	0.68	0.68	0.68	0.002886751	0.003162278	0.004281744
2	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.002886751	0	0.002886751
3	0.37	0.38	0.37	0.37	0.36	0.37	0.002886751	0.003162278	0.004281744
4	0.25	0.24	0.24	0.25	0.26	0.25	0.002886751	0.003741657	0.004725816
5	0.2	0.19	0.2	0.2	0.2	0.198	0.002886751	0.002	0.003511885
6	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.132	0.002886751	0.002	0.003511885
7	0.05	0.072	0.072	0.072	0.07	0.1888	0.002886751	0.122870013	0.122903919
8	0.018	0.022	0.022	0.022	0.02	0.0204	0.002886751	0.000748331	0.002982169

מידת קוטר הכדורים בסנטימטרים									
כדור	מידה 1	מידה 2	מידה 3	מידה 4	מידה 5	רדיוס	שגיאת מכשיר בס"מ	שגיאה סטטיסטית	שגיאה
1	0.55	0.5504	0.5495	0.5496	0.5504	0.27502	2.88675E-05	0.000201494	0.000101776
2	0.5	0.5002	0.5001	0.5001	0.4993	0.24992	2.88675E-05	0.000183303	9.27811E-05
3	0.45	0.4492	0.4496	0.4493	0.4507	0.22491	2.88675E-05	0.000292233	0.000146828
4	0.399	0.3995	0.3996	0.3996	0.3993	0.19972	2.88675E-05	8.12404E-05	4.31084E-05
5	0.348	0.349	0.3489	0.3492	0.3487	0.1744	2.88675E-05	0.000170294	8.63616E-05
6	0.317	0.2993	0.2994	0.2992	0.2992	0.15139	2.88675E-05	0.003505196	0.001752658
7	0.249	0.2491	0.2482	0.2491	0.2495	0.12446	2.88675E-05	0.00022	0.000110943
8	0.2	0.1991	0.1992	0.1993	0.1995	0.09966	2.88675E-05	8E-05	4.25245E-05

נפח כדור	שגיאת נפח	צפיפות כדור	שגיאת צפיפות
0.087132754	8.86801E-06	7.80418346	0.049146885
0.065387035	6.06668E-06	7.799711341	0.044154611
0.047655706	6.99717E-06	7.764023086	0.089854693
0.033369775	1.43852E-06	7.43187505	0.141620004
0.022219181	1.91888E-06	8.911219457	0.158058309
0.014533833	2.54728E-05	9.082256331	0.242158868
0.00807566	8.95937E-07	8.22223869	0.627671898
0.00414621	1.76316E-07	4.920156416	0.719251946

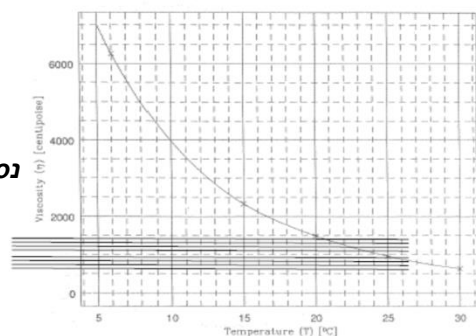
ממוצע טמפ'	הפרש בין הממוצע לערך הגבוה	שגיאת מכשיר	שקלול שגיאה
24.26	0.304	0.0002887	0.304000137

שלב 2 - מידת זמן שקיעת כדור בשני מקטעים שונים בעלי אורך זהה בשניות									
כדור	מידה 1	מידה 2	מידה 3	מידה 4	מידה 5	ממוצע זמנים	שגיאת מכשיר	שגיאה סטטיסטית	זמן תגובה
1	1.35	1.37	1.21	1.29	1.05	1.254	0.00288675	0.058103356	0.3
2	1.45	1.47	1.32	1.26	1.15	1.33	0.00288675	0.059749477	0.3
3	1.14	1.11	1.3	1.29	1.18	1.204	0.00288675	0.038807216	0.3
4	1.38	1.48	1.36	1.39	1.17	1.356	0.00288675	0.050852729	0.3
5	2.04	1.62	1.54	1.96	1.91	1.814	0.00288675	0.098569772	0.3
6	2.01	1.36	1.39	1.8	2.07	1.726	0.00288675	0.150219839	0.3
7	1.9	1.9	1.85	1.88	2.07	1.92	0.00288675	0.038600518	0.3
8	2.02	2.05	2.06	2.04	1.99	2.032	0.00288675	0.012409674	0.3
9	2.37	2.35	2.55	2.72	2.55	2.508	0.00288675	0.068	0.3
10	2.82	2.67	3.02	2.67	2.61	2.758	0.00288675	0.074121522	0.3
11	3.43	3.17	3.17	3.01	3.34	3.116	0.00288675	0.141265707	0.3
12	3.52	2.69	3.32	3.18	3.52	3.246	0.00288675	0.153153518	0.3
13	4.66	4.86	4.87	5.64	4.85	4.976	0.00288675	0.170487536	0.3
14	4.8	4.73	4.79	4.84	4.83	4.798	0.00288675	0.01933908	0.3
15	7.5	7.46	7.53	7.45	7.43	7.474	0.00288675	0.01805547	0.3
16	7.37	7.27	7.35	7.51	7.29	7.358	0.00288675	0.042237424	0.3

שלב 3 - מידת זמן שקיעת הכדור במקטע גדול כשמהירות קבועה בשניות									
כדור	מידה 1	מידה 2	מידה 3	מידה 4	מידה 5	ממוצע זמנים	שגיאת מכשיר	שגיאה סטטיסטית	זמן תגובה
1	3.45	3.48	3.39	3.41	3.44	3.43	0.00288675	0.017511901	0.3
2	3.93	4.1	3.97	4.03	4.03	4.0325	0.00288675	0.023769729	0.3
3	4.76	4.56	4.48	4.92	4.61	4.6425	0.00288675	0.086129747	0.3
4	5.94	5.78	5.86	5.85	5.87	5.84	0.00288675	0.018257419	0.3
5	7.84	7.72	7.81	7.7	7.65	7.72	0.00288675	0.029888682	0.3
6	10.5	10.5	10.39	10.56	10.47	10.48	0.00288675	0.031622777	0.3
7	14.7	14.65	14.71	14.79	14.47	14.655	0.00288675	0.060827625	0.3
8	22.5	23.02	22.63	22.46	22.44	22.6375	0.00288675	0.12024281	0.3

נספח 1 – מדידות וחישובים לאורך הניסוי

Viscosity of Glycerin ($C_3H_8O_3$)



נספח 2 – גרף של צמיגות הגליצרין כפונקציה של הטמפ' שלו