

שגיאות מדידה ונושאים נוספים למעבדת חקר

עריכה: אלברט אולייר

מבוסס על מסמכים שונים באתר מורי פיזיקה ומקורות נוספים
גירסא: 07/2019

נושא I: דגשים בנושא שגיאות מדידה

מדידתו של גודל פיסיקלי לעולם איננה מדויקת לחלוטין. מגבלות הנעוצות במכשירים, בתהליך המדידה ובמודד עצמו גורמות לאי-דיוקים שונים בתוצאת המדידה. הבנת אי-הדיוקים בעת ביצוע מדידות, הגורמים להם והאופנים בהם ניתן להקטין אותם הנם חלק חשוב מאד בתהליך החקר הפיזיקלי.

נהוג להשתמש במושג "שגיאת מדידה" בשני הקשרים:

1. בהקשר של אי הוודאות בעת ביצוע מדידה מסוימת
2. בהקשר של השוני בין התוצאה שהתקבלה בניסוי לבין הערך התאורטי, הצפוי או המקובל בקהילה המדעית.

נהוג למיין את שגיאות המדידה לפי:

- שגיאות שיטתיות מול שגיאות אקראיות

- שגיאות מוחלטות מול שגיאות יחסיות

נסביר מיון זה להלן:

1. שגיאה שיטתית לעומת שגיאה אקראית

במיון זה מפרידים את סוגי השגיאות בהתאם לסוגי מקורות השגיאה:

שגיאה שיטתית: זוהי שגיאה קבועה, הנובעת מגורמי אי-וודאות קבועים במערכת המדידה, ובהתאם לכך היא חוזרת ונשנית באותה מגמה עצמה. שגיאה שיטתית גורמת לתוספת (או להפחתה) קבועה לתוצאות המדידות. אפשר לתקן שגיאה שיטתית אם יודעים את מקור השגיאה.

דוגמאות לגורמים לשגיאות שיטתיות במדידה:

- א. מדידת זרם באמפרמטר שקריאתו לא מאופסת כראוי.
- ב. שקילה של גוף תוך שימוש במשקולת מזויפת או במאזניים שאינם מכוילים.

שגיאה אקראית: זוהי שגיאה הנובעת מגורמים הפועלים במגמות שונות ומשתנות (כגון שינויים אקראיים בתנאי המדידה), ובהתאם לכך – אם נחזור על מדידה מסוימת פעמים אחדות, תהיינה תוצאותיה שונות במקצת זו מזו, כאשר השינוי איננו בעל מגמה קבועה. בהעדר שגיאות שיטתיות נוכל להניח, כי שגיאות המדידה בשני הכיוונים דומות, ומשום כך משקף ה"ממוצע" של התוצאות את התוצאה ה"אמיתית" באופן הטוב ביותר. לכן אם עורכים מספר רב של מדידות של אותו גודל - הערך הממוצע עשוי להיות קרוב לערך ה"אמיתי", כיוון שהשגיאות תקזזנה זו את זו. זוהי הסיבה לכך שבניסויים מחשבים את השיפוע של קו המגמה (המבוסס על הרבה מדידות) ולא מחשבים שיפוע לפי שתי נקודות בטבלת המדידות.

ניתן להבין את ההבדל בין שגיאה שיטתית לשגיאה אקראית ע"י הקבלה בין תהליך המדידה לתהליך קליעה למטרה:



במטרה הימנית סימני הפגיעה קרובים מאוד זה לזה, אך כולם רחוקים ממרכז המטרה. ניכר שבכל היריות למטרה היה גורם שיטתי כלשהו אשר גרם לסטייה ימנית ולמעלה של החצים. באנלוגיה לתהליך המדידה, זוהי **שגיאה שיטתית**: ישנו גורם קבוע אשר שוב ושוב מטה את תוצאות המדידה באותה החוקיות וגורם לסטייה באותו הכיוון מהערך האמיתי. לעומת זאת, במטרה השמאלית, על סמך סימני הפגיעה ניתן לראות, שבכל ניסיון ירי ישנה סטייה לכיוון אחר באופן מקרי. באנלוגיה לתהליך המדידה – זוהי **שגיאה אקראית**. אם הגורם האקראי הוא משמעותי, המרחק בין כל אחת מנקודות הפגיעה לבין המרכז יכול להיות גדול, אך בהעדר שגיאה שיטתית, כל הפגיעות תהיינה מסביב למרכז המטרה. הערה: במטרה הימנית קיימת גם שגיאה אקראית בנוסף לשגיאה השיטתית (התוצאות מפוזרות באופן אקראי סביב הממוצע).

דוגמאות לשגיאות אקראיות במדידה:

א. שגיאה אקראית במדידת אורך בסרגל: אם נשתמש בסרגל למדידת אורך של מוט, יתכן שבמדידות שונות נקבל באופן אקראי ערכים קצת שונים - תלוי כיצד העמדנו את הסרגל, מאיזה מרחק אנחנו קוראים את השנתות (בהנחה שאנחנו מנסים תמיד לעמוד ישר "מעל" הסרגל כדי לא לגרום גם לשגיאה שיטתית), וכיו"ב. אם נמדוד את אורך המוט באמצעות אותו סרגל מספר פעמים ונחשב ממוצע של המדידות, סביר שהממוצע יהיה קרוב יותר לאורך ה"אמיתי" מאשר מדידה בודדת.

הערה: ראו בהמשך לגבי השגיאה המוחלטת והשגיאה היחסית במדידה בסרגל.

ב. בניסוי חוק סנל מודדים את זווית השבירה פעמיים (פעם אחת מכל צד של האנג) ועושים ממוצע – הממוצע אמור להקטין את השגיאה האקראית בקריאת ערך הזווית במד הזווית. אולם בנוסף לכך, במקרה זה הממוצע יכול לסייע גם בקיזוז שגיאה שיטתית אם יש כזאת עקב הנחה לא מדויקת של דיסקת הפרספקס על גבי מד הזווית (שגיאה קבועה הנוספת למדידה בצד אחד של האנג תתקזז עם הפחתה של אותה שגיאה קבועה במדידה מהצד השני של האנג). ג. במדידת זמן מחזור של מטוטלת באמצעות שעון עצר – זמן התגובה של המודד (כלומר הזמן העובר מרגע שהתלמיד הבחין בכך שהסתיים מחזור תנודה ועד שהוא לחץ על שעון העצר) גורם לשגיאה אקראית. ביצוע מספר מדידות ומיצוען מקטין שגיאה אקראית זו. (אגב, במדידה זו עלולה להיות גם שגיאה שיטתית, אם המודד אינו נערך בזמן לחיצה על הסטופר, ובאופן קבוע הוא מאחר בלחיצה).

ד. בניסוי התנגשות דו-ממדית חוזרים על כל התנגשות 5 פעמים (משחררים את הכדור 5 פעמים מאותו הגובה כך שיתנגש בכדור המטרה באותה הזווית 5 פעמים) ומתקבל מקבץ של נקודות

פגיעה על הקרקע. מתוך המקבץ אנחנו בוחרים את "אמצע המקבץ" בתור הנקודה המייצגת בצורה הטובה ביותר את "ממוצע הפגיעות" ואנחנו משתמשים בנקודת אמצע המקבץ (שאינה חייב לחפוף עם אף אחת מהנקודות שבהן בפועל הכדור נפל).

ה. בניסוי חוק הוק מוצאים את קבוע הקפיץ מתוך מספר מדידות של התארכות הקפיץ כתלות במשקל המונח עליו. בכל מדידה יש שגיאה אקראית בקריאת מידת ההתארכות. אנו מקטינים שגיאה זו בכך שאת קבוע הקפיץ אנו מוצאים מתוך שיפוע קו המגמה ולא מתוך מדידה בודדת. קו המגמה מהווה הישר הטוב ביותר העובר דרך המדידות, ובתור שכזה שיפועו מייצג את קבוע הקפיץ בצורה מדויקת יותר מאשר חישוב קבוע הקפיץ על סמך מדידה בודדת כלשהי.

נדגיש: במדידה בה מאמתים קשר ליניארי כלשהו, נקודות המדידה לא תהיינה בדיוק על קו ישר אחד בגלל השגיאות האקראיות. במקרה זה, קו המגמה, שהוא הישר ה"טוב ביותר" העובר קרוב ככל האפשר לנקודות המדידה, מצמצם את השפעת השגיאות האקראיות של כל מדידה, ומאפשר לנו למצוא את הגודל הפיזיקלי המבוקש בצורה מדויקת יותר. לכן בחישוב שיפוע יש להשתמש **בנקודות מקו המגמה ולא בנקודות בודדות שהתקבלו במדידה.**

לסיכום, כדאי לשים לב לכך, שבדרך כלל יכולים להופיע שני סוגי השגיאות (שיטתית ואקראית) בסדרת מדידות. את השפעתה של שגיאה אקראית על דיוק המדידה אפשר להקטין, כאמור, על-ידי חזרה על המדידה מספר פעמים ועשיית ממוצע (או קו מגמה). את השפעתה של שגיאה שיטתית ניתן להקטין אם ידוע הגורם שלה ואפשר לקזז אותו בצורה כלשהי.

2. שגיאה מוחלטת לעומת שגיאה יחסית

שגיאה מוחלטת: זוהי השגיאה המרבית שיכולה להיעשות כאשר מודדים גודל מסוים. השגיאה יכולה להיגרם מדיוק מדידה מוגבל של מכשיר המדידה (למשל, בגלל המרחק בין שנתות קרובות בסרגל), ו/או מאי-דיוקים במדידה הקשורים לאדם המבצע את המדידה (כגון זמן תגובה בהפעלת סטופר). למשל, במדידה באמצעות סרגל המחולק למילימטרים המדידה תהיה מדויקת עד כדי $0.5 (+/-)$ מ"מ, ולכן אומרים ששגיאת המדידה (כלומר אי-הוודאות) המוחלטת היא 0.5 מ"מ. במדידה בסטופר השגיאה המוחלטת הנובעת מזמן התגובה של המודד היא בסדר גודל של מספר עשיריות שניה (ראה פרוט בהמשך בנוגע לשגיאות בסטופר). במדידה בוולטמטר המציג תוצאות בוולטים עם ספרה אחת אחרי הנקודה העשרונית, המדידה תהיה מדויקת עד כדי $0.05 (+/-)$ וולט, ולכן אומרים ששגיאת המדידה המוחלטת היא 0.05 וולט. **כדאי לדעת:** במכשירי מדידה מורכבים יותר (כמו וולטמטר או אמפרמטר) יצרן המכשיר מציין לרוב את דיוק המכשיר, ודיוק זה יכול להיות שונה מאשר הספרה העשרונית האחרונה המוצגת. דיוק המדידה יכול גם להיות שונה בתחומי מדידה שונים (מסיבות הקשורות במבנה הפנימי של המכשיר). שימו לב: לשגיאה מוחלטת יש יחידות, והן יחידות המדידה של הגודל הנמדד.

שגיאה יחסית: זהו החלק שהשגיאה המוחלטת מהווה מהגודל הנמדד. לדוגמה: אם השגיאה המוחלטת בסרגל היא 0.5 מ"מ. ואנו מודדים חוט שאורכו 5 ס"מ, אז השגיאה היחסית (כלומר אי-הוודאות היחסית) היא 0.5 מ"מ חלקי 5 מ"מ, שזה 1%. במקרה אחר, אם אנו מודדים באמצעות אותו

סרגל חוט שאורכו 20 ס"מ אז השגיאה היחסית היא 0.25%. חשוב לדעת: השגיאה היחסית קטנה ככל שהגודל הנמדד גדול יותר (בהנחה שהמדידות נעשות באמצעות אותו מכשיר מדידה). מכאן עולה המסקנה:

להקטנת שגיאה יחסית יש למדוד ערכים גדולים ביחס לשגיאת המדידה המוחלטת.
שימו לב: לשגיאה יחסית אין יחידות, והיא מבוטאת בדרך כלל באחוזים.

דוגמאות:

א. חישוב שגיאות במדידת זמן ע"י שעון עצר (סטופר)



כאשר מודדים זמן באמצעות סטופר יש שני מקורות לאי-וודאות:

1. כושר ההפרדה (משך הזמן המינימלי הנמדד) של הסטופר, שהוא, לרוב, בסטופרים דיגיטליים 0.01 שניה.
2. זמן התגובה של המודד, שהוא בממוצע כ- 0.5 שניה.

השגיאה המוחלטת במדידת זמן בסטופר נובעת, אם-כך, בעיקר בשל זמן התגובה (כי כושר ההפרדה של מכשיר המדידה קטן בהרבה מזמן התגובה ועל כן זניח), וניתן להעריכה בכ- 0.5 שניה.

השגיאה היחסית היא היחס בין השגיאה המוחלטת לגודל הזמן הנמדד, כך שאם, לדוגמה, נמדד פרק זמן של $t = 11.52 \text{ sec}$, והשגיאה המוחלטת היא $\Delta t = 0.5 \text{ sec}$, אז השגיאה היחסית היא:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t} \cdot 100\% = \frac{0.5}{11.52} \cdot 100\% = 4.34\%$$

ב. כאשר מודדים זמן מחזור בתופעות מחזוריות בזמן (למשל תנודות מטוטלת), ניתן להקטין את השגיאה היחסית ע"י מדידת הזמן של הרבה מחזורים ברצף, וחלוקת התוצאה במספר המחזורים.

נסמן את השגיאה המוחלטת במדידת הזמן ב- Δt ואת זמן המחזור של המטוטלת ב- T .

השגיאה היחסית במדידה של זמן מחזור בודד היא: $\frac{\Delta t}{T}$

השגיאה היחסית במדידה של 10 זמני מחזור היא: $\frac{\Delta t}{10 \cdot T}$

עדיף, אם כך, למדוד את הזמן שהמטוטלת משלימה 10 מחזורים ולחלק את התוצאה ב- 10.

ג. כאשר מודדים אורך מחזור בתופעות מחזוריות במקום (למשל מדידת אורך גל מתוך תצלום של גל מחזורי), ניתן להקטין את השגיאה היחסית ע"י מדידת אורך של הרבה מחזורים, וחלוקת התוצאה במספר המחזורים.

למשל, משתמשים בסרגל שהשגיאה המוחלטת במדידה בו היא $\Delta x = 1mm$. אם אורך הגל הנמדד הוא $\lambda = 50mm$, אז השגיאה היחסית במדידה היא:

$$\frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{1mm}{50mm} = 0.02 = 2\%$$

נוכל לשפר את השגיאה היחסית אם נמדוד את האורך של 10 מחזורים רצופים באמצעות אותו סרגל ונחלק את האורך שקיבלנו ב-10. במקרה זה השגיאה היחסית תקטן פי 10.

ד. אם רוצים למדוד עובי של דף נייר, נמדוד עובי של מספר ניירות זהים ונחלק את התוצאה במספר דפי הנייר.

הערכת שגיאת המדידה היחסית בתוצאת ניסוי (כלומר הסטייה היחסית בין תוצאת ניסוי לבין ערך צפוי)

כחלק מתהליך הסקת המסקנות של ניסוי אנו נדרשים לעיתים להשוות את ערכו של פרמטר פיזיקלי שהתקבל בניסוי לבין הערך הצפוי של אותו פרמטר (כפי שידוע מהתאוריה או ממקור אחר). במקרה זה מחשבים את ההפרש בין התוצאה שהתקבלה בניסוי לבין הערך הצפוי ("הערך הידוע") של הפרמטר הנמדד, ומחלקים הפרש זה בערך הצפוי על מנת לקבל את **השגיאה היחסית**. נהוג להציג את הסטייה באחוזים ("אחוז הסטייה" או "אחוז השגיאה"):

$$\varepsilon(\%) = \frac{f(\text{measured}) - f(\text{known})}{f(\text{known})} * 100\%$$

כאשר:

$\varepsilon(\%)$ - שגיאת המדידה באחוזים

$f(\text{measured})$ - הערך של הפרמטר f כפי שהתקבל מהניסוי

$f(\text{known})$ - הערך הצפוי ("הידוע") של אותו הפרמטר f .

דוגמה: בניסוי גליונומטר טנגנטי תלמידים מצאו שהערך של הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ הוא $3.5 \times 10^{-5} T$. הערך "הידוע" של רכיב השדה באזורנו הוא $2.9 \times 10^{-5} T$. מכאן ששגיאת המדידה באחוזים ביחס לגודל הידוע היא:

$$\varepsilon(\%) = \frac{B(\text{measured}) - B(\text{known})}{B(\text{known})} * 100\% = \frac{3.5 \times 10^{-5} - 2.9 \times 10^{-5}}{2.9 \times 10^{-5}} * 100\% = 20.7\%$$

הערה : לעיתים אנו נדרשים להעריך אם תוצאת ניסוי מסוים מאמתת את התאוריה. כפי שאמרנו, לא ניתן להגיע ל"דיוק מושלם" בניסוי פיזיקלי ועל כן פיזיקאים נדרשים לתת תשובה לשאלה גם מבלי שתוצאת המדידה מתלכדת לגמרי עם החישוב התאורטי. התשובה לשאלה תלויה בגודלה של השגיאה היחסית ביחס לאי-הוודאות במדידות שהיו במהלך ביצוע הניסוי וכן בהערכת שגיאת המדידה שליוותה את תהליך קביעת ערך הייחוס לניסוי (הערך "הידוע") על ידי הקהילה המדעית. ישנן תורות שלמות הנעזרות בכלים מתמטיים מתקדמים על מנת לבצע הערכות אלו (כלומר לעזור לפיזיקאי הניסוי להחליט אם הוא הצליח לאמת או להפריך תאוריה כלשהי). כלים מתמטיים אלו הם מחוץ לתכנית הלימודים, ובתיכון אנו מתמקדים בעיקר בהבנת המושגים שדיברנו עליהם לעיל, בחישוב השגיאות היחסיות השונות במדידות פשוטות, בהערכה איכותית של משמעות הגודל של שגיאות אלו, בהבנת הסיבות לשגיאות ובהצעת דרכים לשיפורן.

נושא II: דגשים בשרטוט גרפים

חלק חשוב מעיבוד ממצאי הניסוי הוא ריכוז המדידות בטבלה ושרטוט גרף, שמתוכו נוכל למצוא ערך פיזיקלי אותו אנו מחפשים. את הגרפים במעבדת חקר רצוי לשרטט באמצעות מחשב (בתוכנת אקסל), אולם לעיתים, בשל מגבלות טכניות, נדרש לשרטט גרפים על נייר מילימטרי באופן ידני. להלן דגשים שחשוב להקפיד עליהם בעת שרטוט גרפים:

✓ יש לתכנן את הגרף כך שגודלו יהיה מתאים לגודל העמוד (גודל סביר הוא לפחות חצי עמוד בכל ציר).

✓ יש לשרטט צירים (אם הגרף ידני יש להקפיד על שימוש בסרגל!) ולבחור נכון מי המשתנה בציר האופקי ומי בציר האנכי. בגרף ממוחשב יש להוסיף קווי רשת.

✓ יש לרשום את שמות המשתנים ויחידות מידה לכל ציר. יש להוסיף כותרת תמציתית לכל גרף.

✓ יש לעשות תדריג נכון של הגרף (פילוג אחיד של השנתות בכל ציר).

✓ יש למקם נכון את הנקודות על הגרף.

✓ יש לסמן את ראשית הצירים.

✓ קו מגמה: אם הקשר ליניארי, ומבקשים גרף (כלומר לא רק דיאגרמת פיזור), יש להעביר קו מגמה בצורה נכונה. קו המגמה הליניארי הוא קו ישר שמייצג בצורה הטובה ביותר את נקודות המדידה.

אם השרטוט נעשה באמצעות אקסל, קו המגמה ישורטט על ידי המחשב ולידו משוואת קו המגמה המחושבת גם היא על ידי המחשב.

אם השרטוט נעשה ידנית, חובה להעביר את הקו בסרגל (הכי נוח להשתמש בסרגל שקוף של 30cm). לרוב, נקודות המדידה לא תהיינה על קו המגמה, ויש להעביר את הקו כך שמספר שווה של נקודות יימצא מעל הקו ומתחת לקו. רצוי לשים לב בעת שרטוט הקו, שניתן יהיה לקרוא בצורה ברורה שתי נקודות מתוך הקו.

✓ מציאת שיפוע מקו המגמה (במקרים בהם הגרף ליניארי):

אם השרטוט באמצעות מחשב: רושמים את משוואת קו המגמה שמפיק האקסל, מציינים שזהו קו מגמה ליניארי שבו השיפוע מייצג את מקדם האיבר הליניארי במשוואה, מעתיקים את ערך המקדם מתוך המשוואה ומציינים את היחידות הרלוונטיות (אלא אם כן השיפוע מייצג יחס חסר יחידות).

אם שרטוט ידני:

בוחרים שתי נקודות מהגרף (לא מטבלת המדידות) ומציינים אותן במפורש. אם קו המגמה עובר דרך הראשית, אפשר לבחור ב- $(0,0)$ כאחת הנקודות, אך יש לרשום זאת במפורש בתור אחת הנקודות. הנקודות חייבות להיות על קו המגמה, במרחק סביר זו מזו (לא קטן מדי), ושניתן לקרוא את ערכיהן בצורה מדויקת מהגרף. רושמים ביטוי לשיפוע, מציבים את ערכי הנקודות שבחרתם, מחשבים ורושמים תוצאה סופית עם היחידות הרלוונטיות. (אלא אם כן השיפוע מייצג יחס חסר יחידות).

✓ מציאת נקודת החיתוך של קו המגמה עם הציר האנכי (במקרים בהם הגרף ליניארי):

אם השרטוט באמצעות מחשב: רושמים את משוואת קו המגמה שמפיק האקסל, מציינים שזהו קו מגמה ליניארי שבו נקודת החיתוך מיוצגת על ידי האיבר החופשי במשוואה, מעתיקים את ערך האיבר החופשי ומציינים את היחידות הרלוונטיות.

אם שרטוט ידני: קוראים מתוך הגרף את נקודת החיתוך ורושמים אותה (עם היחידות הרלוונטיות). אם משום מה לא ניתן לבצע קריאה ברורה של נקודת החיתוך מהגרף, אפשר לפתח את משוואת הקו על סמך שתי נקודות קריאות אחרות מתוך הגרף, ואז למצוא את האיבר החופשי של המשוואה (עם יחידות).

נושא III: החלפת משתנים על מנת לקבל קשר ליניארי

מושגים:

קשר ליניארי: ביטוי מהצורה $y=ax+b$ מייצג קשר ליניארי בין המשתנה התלוי y למשתנה הבלתי תלוי x . קשר ליניארי מיוצג באופן גרפי על ידי קו ישר.

יחס ישר: ביטוי מהצורה $y=ax$ מייצג יחס ישר בין המשתנה התלוי y למשתנה הבלתי תלוי x . (במקרה זה אומרים גם ש- y פרופורציוני ל- x). יחס ישר מיוצג באופן גרפי על ידי קו ישר שעובר דרך הראשית. יחס ישר הוא מקרה פרטי של קשר ליניארי.

קשרים ליניאריים הם נוחים בעיבוד נתונים פיזיקלי, כי אפשר להסיק מתוך השיפוע (a בביטוי לעיל) או מתוך נקודת החיתוך עם הציר האנכי (b) מסקנות חשובות לגבי המחקר המתבצע.

אולם הרבה פעמים הקשר הפיזיקלי שחוקרים בניסוי איננו ליניארי. במקרים כאלו נוח לעיתים לעשות החלפת משתנים כדי להפוך קשר שאיננו ליניארי לקשר ליניארי.

דוגמה 1:

משחררים ממנוחה גוף שנופל חופשית מטה ומוודדים את מיקומו האנכי כתלות בזמן. הקשר בין מיקומו האנכי לזמן נתון בביטוי $y=y_0+0.5gt^2$ (בהנחה שהציר שנבחר מכוון מטה וראשיתו בנקודה על הקרקע). קשר זה איננו ליניארי (אלא הוא קשר פרבולי). נוכל להפוך קשר זה לקשר ליניארי אם נבחר משתנה חדש $z=t^2$. היחידות של z הן שניה בריבוע (sec^2) ואם נציב במקום t^2 את z נקבל קשר: $y=y_0+0.5gz$. קשר זה (בין y ל- z) הוא קשר ליניארי, שאותו קל לשרטט בתור קו ישר, ומתוך שיפוע הקו נוכל למצוא את ערכו של g (שיפוע הקו יהיה $0.5g$).

דוגמה 2:

זמן המחזור T של גוף בעל מסה m , המבצע תנועה הרמונית פשוטה כשהוא מחובר ל- n קפיצים זהים

בעל קבוע k כל אחד, המחוברים במקביל, נתון בביטוי: $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{n \cdot k}}$. בין זמן המחזור T ובין מספר

הקפיצים n אין כמובן קשר ליניארי. אולם בין T ובין $\sqrt{\frac{1}{n}}$ קיים קשר ליניארי, כי ניתן לרשום את

הביטוי לזמן המחזור בתור: $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{n}}\right)$, כך שאם נתבונן במשתנה חדש $z = \sqrt{\frac{1}{n}}$, נקבל

קשר ליניארי (יחס ישר) בין T ל- z : $T=az$, כאשר המקדם הליניארי (כלומר השיפוע) הוא $a = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$.

בדומה, קיים קשר ליניארי גם בין T^2 לבין $\frac{1}{n}$, כי אם מעלים את הביטוי המקורי בריבוע, מתקיים:

$T^2 = 4\pi^2 \frac{m}{k} \cdot \left(\frac{1}{n}\right)$. מקדם האיבר הליניארי (כלומר השיפוע) בקשר בין T^2 לבין $\frac{1}{n}$ הוא: $a = 4\pi^2 \frac{m}{k}$.

נושא IV: רישום ספרות משמעותיות

כאשר רושמים עבור אורכו של גוף, למשל, 12.53cm מבלי לציין באופן מפורש מהי השגיאה (כלומר מהי אי-הוודאות במדידה), ניתן להבין שהשגיאה במדידה היא מסדר הגודל של הספרה המשמעותית האחרונה, כלומר, במקרה זה, שגיאה של 0.01cm .

כאשר רושמים עבור אורכו של גוף $12.53 \pm 0.02\text{cm}$, משמעות הדבר היא, שהשגיאה (כלומר אי-הוודאות) היא מסדר גודל של $\pm 0.02\text{cm}$, כלומר שבסבירות גדולה האורך האמיתי הוא בתחום שבין 12.51cm ל- 12.55cm .

לכן יש לשים לב:

- מספר הספרות אחרי הנקודה העשרונית אמור להתאים למידת הדיוק של המדידה. למשל, אין זה נכון לרשום 5 ספרות אחרי הנקודה אם הדיוק הוא ברמה של 2 ספרות אחרי הנקודה בלבד.
- קיים הבדל בין רישום תוצאה של 12.5cm לבין 12.50cm . במקרה הראשון מתכוונים לומר שדיוק המדידה הוא 0.1cm ואילו במקרה השני דיוק המדידה הוא 0.01cm .
- אופן כתיבה נכון של ערך מדוד הוא למשל:

○ 12.5 cm אם הדיוק הוא מסדר גודל של מילימטר

○ $12.5 \pm 0.2\text{ cm}$ אם הדיוק הוא מסדר גודל של $\pm 0.2\text{ cm}$

○ 12.51 cm אם יש ברשותנו מכשיר מדידה המסוגל למדוד בדיוק של 0.1 מילימטר.

- אופן כתיבה לא נכון של ערך מדוד הוא למשל:

○ 12.50 cm אם דיוק המדידה שלנו הוא מסדר גודל של מילימטר אחר.

○ $12.5132 \pm 0.2\text{ cm}$ אם דיוק המדידה הוא מסדר גודל של $\pm 0.2\text{ cm}$.