**תדריך מעבדה: החוק השני של ניוטון**

**יישום החוק למערכת דו-גופית**

**רקע תיאורטי:**

החוק השני של ניוטון קובע שתאוצתו של גוף נקבעת על פי המנה שבין שקול הכוחות הפועלים על הגוף לבין מסתו. הביטוי המתמטי של החוק הוא:



או: 

המערכת שבה נעסוק בניסוי זה היא מערכת דו-גופית, כמתואר סכמטית באיור הבא:

****

הכוחות הפועלים על שני הגופים מתוארים באיור הבא:

****

תיאור וקטורי מלא של המערכת (הכולל גם את וקטור הכח שהגלגלת מפעילה על החוט המקשר בין הגופים) הוא מחוץ למסגרת הלימודים. אנו נסתפק בכך שכאשר הגופים קשורים בחוט מתוח, שאורכו אינו משתנה, גודל התאוצה של שני הגופים זהה, ונחקור בניסוי זה את הקשר בין גודל התאוצה, גודל הכוח המניע את המערכת והמסות המרכיבות את המערכת.

בהנחה שאין חיכוך (לא בין גוף A לבין המשטח ולא בגלגלת שעליה מתוח החוט), שמסת החוט זניחה ושאורך החוט אינו משתנה, ניתן להראות שהקשר בין מסת המערכת הכוללת (M=mA+mB), גודל שקול הכוחות המניע אותה (F=mBg) וגודל תאוצתה (a ) נתון בביטוי:

.

הערות:

1. הכוח השקול "האמיתי" הפועל על המערכת צריך לקחת בחשבון (באופן וקטורי) גם את הכוח המופעל על ידי הגלגלת על החוט, ותנועת המערכת צריכה לקחת בחשבון (גם כן באופן וקטורי) שגוף A נע ימינה וגוף B נע מטה, כך שניתוח מלא של תנועת המערכת בכללותה הוא יותר מורכב וחורג מחומר הלימוד. יחד עם זאת, ניתן לפשט את הניתוח של מערכת דו-גופית זו בכך שנתייחס לתנועת המערכת כאילו שני הגופים נעים יחדיו על ציר עקום "בכיוון השעון", ולאורך ציר זה אנו יכולים להתעלם מהאופי הוקטורי של התנועה ולהסתפק בשינוי גודל מהירות המערכת. הכוח הגורם לשינוי גודל המהירות הוא הכוח המניע את המערכת שהוא במקרה זה: mBg, וכפי שרואים בביטוי לעיל, הקשר בין כוח זה לבין גודל התאוצה הוא מאותה צורה מתמטית של החוק השני של ניוטון. אם כך, למרות שלא מדובר בכוח השקול "האמיתי", נכנה את גודל הכוח המניע mBg גם בשם גודל “הכוח השקול” כי לאורך הציר "בכיוון השעון" זהו אכן גודל הכוח השקול הפועל על מערכת שני הגופים (בהעדר חיכוך), ונסמן אותו בסימון F .
2. אם קיים חיכוך בין גוף A לבין המשטח, ניתן להראות שהקשר המתקבל הוא:

,

 כאשר מייצג את מקדם חיכוך ההחלקה שבין המשטח ובין גוף A.

ניסוי זה מבוצע **בשני שלבים**:

**בחלק א'** נראה את היחס הישר בין גודל הכוח השקול המניע את המערכת לבין גודל תאוצתה כאשר **מסת המערכת קבועה**.

**בחלק ב'** נראה כי קיים יחס הפוך בין המסה של המערכת לבין גודל תאוצתה כאשר **גודל הכוח השקול המניע אותה קבוע**.



**חלק א':**

**מטרת הניסוי בחלק א':** מציאת הקשר בין גודל תאוצתה של מערכת דו-גופית לבין גודל הכוח החיצוני השקול המניע אותה, כאשר מסת המערכת קבועה.

**ציוד**: לוח הרצה (מסילה) עם גלגלת בקצהו, כליבה, סל (או מתלה משקולות), 8 משקולות, עגלה ובה מקום לאחסון המשקולות, ספק, רשם זמן עם סרטי נייר ועיגולים של נייר העתקה.

**מהלך הניסוי:**

בחלק זה של הניסוי נחקור את התלות בין a, גודל תאוצת המערכת (הכוללת עגלה, סל וכל המשקולות) לבין F, גודל שקול הכוחות המניע את המערכת (שכאמור, בניסוי זה הוא הכוח המושך, כוח הכובד הפועל על הסל והמשקולות שבתוכו, mBg), כאשר מסת המערכת (M=mA+mB) נותרת קבועה.

הכוח שמניע את המערכת (F) הוא **המשתנה** **הבלתי תלוי**  והתאוצה של המערכת (a) היא **המשתנה התלוי**.

במהלך חלק זה של הניסוי נעשה 5 הרצות. בכל הרצה נשנה את גודל הכוח המניע (mBg), ונמדוד את גודל התאוצה a, אולם בכל 5 ההרצות המסה הכוללת של המערכתM=mA+mB תישאר קבועה. זאת נעשה על ידי כך שנעביר משקולות מהעגלה לסל. בצורה זו נגדיל את הכוח המושך (mBg) אך לא נשנה את מסת המערכת (M=mA+mB).

את תאוצת המערכת נמדוד באמצעות רשם זמן.

בכל אחת מ-5 ההרצות נשים מספר משקולות שונה בסל ונשחרר את העגלה ממנוחה, כך שרשם הזמן יסמן על סרט נייר המודבק לעגלה את מקום העגלה כפונקציה של הזמן. מתוך סרט הנייר נמדוד ונשרטט גרף של מהירות העגלה כפונקציה של הזמן. מהגרף נמצא את תאוצת המערכת שמתאימה לכוח השקול המניע באותה הרצה (mBg (. נסכם את תוצאות 5 ההרצות בטבלה וממנה נשרטט גרף של תאוצת המערכת כפונקציה של הכוח השקול. בהתאם לחוק השני של ניוטון, שיפוע הגרף אמור להיות ההופכי של מסת המערכת.

**שלבי העבודה:**

1.) מדדו באמצעות מאזניים את מסת העגלה הריקה \_\_\_\_\_\_\_\_, את מסתה של משקולת בודדת \_\_\_\_\_\_\_\_ ואת מסת הסל הריק \_\_\_\_\_\_\_\_. (רשמו את המסות ביחידות של ק"ג).

2.) הרכיבו את המערכת לפי השרטוט המופיע בתיאור המערכת.

הערות:

* הקפידו להדק את לוח ההרצה לשולחן.
* הקפידו שלוח ההרצה יהיה אופקי (באמצעות הפלס).
* אתרו מקורות אפשריים לחיכוך ונסו למזער את השפעתם ככל הניתן.
* יש לדאוג למחסום שיעצור את העגלה בקצה המסלול לפני שתפגע בגלגלת.
* יש למקם משטח רך כלשהו (קרטון, קלקר או גומי) מתחת לנקודת פגיעת הסלסלה ברצפה.

3.) הניחו משקולות אחת בסל, ואת 7 הנותרות בעגלה. הקפידו על אורכי החוט והסרטים של רשם הזמן שהומלצו בתיאור המערכת.

4.) הפעילו את רשם הזמן (חברו אותו לספק המתח במתח המתאים) ושחררו את העגלה.
(הערה: לפני שמשחררים את העגלה, וודאו שהחוט מתוח ושסלסלת המשקולות אינה מתנדנדת באוויר, אלא נמצאת במנוחה.) רשמו על סרט הנייר שקיבלתם את מספר המשקולות שהיו בסל.

5.) החליפו סרט וחיזרו על המדידה עם 2 משקולות בסל ו- 6 בעגלה. אח"כ 3 משקולות בסל ו- 5 בעגלה, וכך הלאה עד שיש ברשותכם 5 סרטי מדידה אשר כל אחד מהם מתאים למספר משקולות אחר בעגלה. (שימו לב שסכום מספר המשקולות בעגלה ובסל נותר זהה בכל ההרצות).

**עיבוד הנתונים:**

**תזכורת: ניתוח תרשים עקבות של רשם-זמן:**

כאשר מחברים רשם זמן לחשמל נגרמת רטיטה של לוחית מתכת בקצב קבוע של 50 תנודות בשנייה, כך שכל 0.02sec רשם הזמן מסמן נקודה. אם מחברים סרט נייר לעגלה, ומעבירים את הסרט דרך רשם הזמן (מתחת לנייר הפחם), רשם הזמן יסמן נקודות על הסרט תוך כדי תנועת העגלה כך שנקבל תרשים עקבות. המרחק בין שתי נקודות עוקבות הוא המרחק שהעגלה עברה במשך 0.02sec.

הפקת נתוני מהירות-זמן מסרט הנייר:

בתום כל הרצה, לאחר שרשם הזמן סימן נקודות על סרט הנייר, מדביקים את סרט הנייר לשולחן. מסמנים ב- 0 את הנקודה הראשונה ממנה רוצים לחקור את התנועה וממספרים 5 נקודות נוספות בסדר עולה.

הערות:

1. לא בוחרים כ- 0 את הנקודה הראשונה שיצר רשם הזמן אלא נקודה מאוחרת וברורה יותר (חשבו מדוע?).
2. מומלץ לרווח את הנקודות שבחרתם (למשל, לבחור "נקודה כן נקודה לא", כך שהזמן בין שתי נקודות שסימנתם יהיה 0.04sec).
3. וודאו שכל הנקודות שאתם בוחרים וממספרים מייצגות נקודות בהן העגלה היתה בתאוצה (ולא במהירות קבועה, אחרי שסל המשקולות פגע בקרקע).

**קביעת הזמנים**: הזמן המתאים לנקודה 0 יסומן כ- t=0. פרק הזמן בין כל שתי נקודות עוקבות הוא כאמור 0.02sec, לכן, הזמן המתאים לנקודה ה- n-ית הוא 0.02\*n (sec). למשל, הזמן המתאים לנקודה השישית שרשם הזמן רשם הוא 0.12sec . שימו לב, שאם לא בחרתם נקודות סמוכות, יש לסמן את הזמן המתאים לכל נקודה שבחרתם לפי מספר הנקודות שרשם הזמן רשם עד לאותה נקודה (גם אם בדרך יש נקודות שאינכם משתמשים בהן לעיבוד התוצאות).

**קביעת המהירות בשיטת "נקודה לפני ונקודה אחרי":** גודל המהירות הרגעית בנקודה מסוימת הוא בקירוב טוב המהירות הממוצעת בין הנקודה שלפני הנקודה המבוקשת וזו שלאחריה.

למשל, גודל המהירות הרגעית שמתאימה לנקודה 6 בתרשים הבא  הוא:

.

 .0 .1 .2 .3 .4 .5 .6 .7



(הערה: אם תנועת הגוף היא בתאוצה קבועה, שיטה זו למציאת מהירות רגעית היא נכונה – ואף יותר מדויקת מבחינת השגיאה היחסית - גם אם משתמשים ב-n נקודת לפני ו-n נקודות אחרי.)

**הצגת המהירות כפונקציה של הזמן וחישוב התאוצה בכל הרצה - עבודה עם גיליון אלקטרוני (Excel).**

1. סמנו ומספרו את 6 הנקודות על סרט הנייר (לפי ההסבר שניתן לעיל), מדדו ורשמו את ערכי ,  ו-בטבלה הבאה. העבירו את הטבלה לגיליון אלקטרוני והוסיפו את העמודה :

 כותרת הטבלה: **חלק א', הרצה מס' \_\_\_ מספר המשקולות בסל:\_\_\_\_\_\_\_**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  | מס' נקודה |
|  |  |  | 0 | 0 |
|  |  |  |  | 1 |
|  |  |  |  | 2 |
|  |  |  |  | 3 |
|  |  |  |  | 4 |
|  |  |  |  | 5 |

1. בנו באמצעות הגיליון האלקטרוני דיאגרמת פיזור של המהירות כפונקציה של הזמן.

הקפידו על כותרת בעלת משמעות לגרף (ציינו בכותרת גם את מספר המשקולות בסל המתאים לאותה הרצה), כותרות לצירים ויחידות.

1. הוסיפו קו מגמה ליניארי, הציגו את משוואת הישר ואת מידת ההתאמה של הנקודות בניסוי לישר זה (R2). שנו במשוואה שקיבלתם את שמות המשתנים: במקום x ,y ל - t ,v. (לדוגמה במקום המשוואה y=4.1x+8 רשמו: v=4.1t+8). במשוואה הליניארית שקיבלתם שיפוע הקו (המקדם של t ) מייצג את תאוצת המערכת באותה הרצה.
2. חזרו על התהליך (סעיפים 1-3) עבור כל 5 הסרטים שהפקתם (סה"כ 5 גרפים).
3. הפיקו על מערכת צירים אחת את 5 הגרפים. סמנו ליד כל קו את מספר המשקולות בסל המתאים לו ואת משוואתו. וודאו שהגרף גדול דיו (לפחות חצי דף A4).

**הצגת התאוצה כפונקציה של הכוח השקול וחישוב מסת המערכת:**

1. רכזו בטבלה הבאה את התוצאות מ- 5 הגרפים שהפקתם:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | kg))mB | מספר המשקולות בסל |
|  |  |  | 1 |
|  |  |  | 2 |
|  |  |  | 3 |
|  |  |  | 4 |
|  |  |  | 5 |

תזכורת: mB מחושב כסכום מסת הסל ומסות כל המשקולות באותה ההרצה. F מחושב ע"י מכפלת mB בתאוצת הכובד g, ו- a נלקח ממשוואות חמשת גרפי v(t).

1. העבירו את הטבלה לגיליון אלקטרוני ובנו בעזרתו דיאגרמת פיזור של התאוצה כפונקציה של הכוח השקול, a(F). הקפידו על כותרת משמעותית לגרף, כותרות לצירים ויחידות.
2. הוסיפו קו מגמה (ליניארי), הציגו את משוואת הישר ואת R2. שנו במשוואה שקיבלתם את שמות המשתנים מ- x ,y ל- F ,a. (לדוגמה במקום y=4.1x+8 רשמו: a=4.1F+8).
3. רשמו את המקדם של F שנתקבל במשוואה: \_\_\_\_\_\_\_\_\_ (הוסיפו את היחידות המתאימות).

**המשך ניתוח התוצאות יעשה בפרק שאלות הסיכום.**

**חלק ב':**

**מטרת הניסוי בחלק ב':**

מציאת הקשר בין גודל תאוצתה של מערכת דו-גופית לבין מסתה, כאשר גודל הכוח השקול המניע אותה קבוע.

**ציוד ותיאור המערכת**: כמו בחלק א'.

**מהלך הניסוי:**

בחלק זה של הניסוי נחקור את התלות בין a , גודל תאוצת המערכת (עגלה, סל וכל המשקולות) לבין מסת המערכת (M=mA+mB), כאשר הפעם גודל הכוח השקול (הוא כוח הכובד הפועל על הסל והמשקולות שבתוכו) נותר קבוע.

גם בחלק זה נעשה 5 הרצות. בכל הרצה נשנה את מספר המשקולות בעגלה, אולם נותיר קבוע את מספר המשקולות בסל. בצורה זו נשנה את מסת המערכת M מבלי לשנות את גודל הכוח השקול (F=mBg).

בדומה לחלק א', בכל הרצה נשחרר את העגלה ממנוחה ורשם הזמן יסמן את מקום העגלה כפונקציה של הזמן. מתוך סרט הנייר של רשם הזמן נבנה גרף של המהירות כפונקציה של הזמן. מהגרף נמצא את תאוצת המערכת שמתאימה למסת המערכת באותה ההרצה. נחזור על התהליך הזה 5 פעמים (בכל פעם מספר המשקולות יהיה שונה, כך שיתאים למסת מערכת אחרת). לבסוף, נוכל לבנות גרף שמתאר את תאוצת המערכת כפונקציה של מסת המערכת.

**שלבי העבודה:**

1. הרכיבו את המערכת כבחלק א'. אם השתמשתם באותו ציוד כבחלק א' אין צורך לבצע מדידה חוזרת של המסות השונות. אם החלפתם ציוד, יש לחזור על מדידת כל המסות ולרשום אותן.
2. הניחו 2 משקולות בסל, ואת 6 הנותרות בעגלה. הקפידו על אורכי החוט והסרטים של רשם הזמן שהומלצו בתיאור המערכת.
3. הפעילו את רשם הזמן (חברו אותו לספק המתח) ושחררו את העגלה. רשמו על הסרט שקיבלתם את מספר המשקולות שהיו בעגלה.
4. החליפו סרט וחיזרו על המדידה עם 5 משקולות בעגלה. אח"כ 4 משקולות בעגלה, וכך הלאה עד שיש ברשותכם 5 סרטי מדידה.

שימו לב: את המשקולות שמסירים מהעגלה מניחים בצד (ולא שמים אותן בסל).

**עיבוד הנתונים:**

עיבוד סרטי הנייר מרשם הסמן יעשה כבחלק א' בשינויים הבאים:

1. 5 הטבלאות בגיליון האלקטרוני יתאימו כל אחת למספר משקולות שונה בעגלה, כך שכל טבלה תראה כך:

 כותרת הטבלה: **חלק ב', הרצה מס' \_\_\_ מספר המשקולות בעגלה**\_\_\_\_\_\_\_

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  | מס' נקודה |
|  |  |  | 0 | 0 |
|  |  |  |  | 1 |
|  |  |  |  | 2 |
|  |  |  |  | 3 |
|  |  |  |  | 4 |
|  |  |  |  | 5 |

1. לכל טבלה בנו דיאגרמת פיזור של המהירות כפונקציה של הזמן. בכותרת הגרף ציינו גם את מספר המשקולות בעגלה המתאים לאותה הרצה.
2. בעזרת הגיליון האלקטרוני העבירו את קו המגמה. הציגו בגרף גם את משוואת הישר ואת R2. שנו במשוואה שקיבלתם את שמות המשתנים מ- x ,y ל- t ,v. במשוואה הליניארית שקיבלתם שיפוע הקו (המקדם של t ) מייצג את תאוצת המערכת באותה הרצה.
3. חזרו על התהליך (סעיפים 1-3) עבור כל הסרטים שהפקתם (סה"כ 5 גרפים).
4. הפיקו על מערכת צירים אחת את 5 הגרפים. סמנו ליד כל קו את מספר המשקולות בעגלה המתאים לו ואת משוואתו. וודאו שהגרף גדול דיו (לפחות חצי דף A4).

**הצגת התאוצה כפונקציה של מסת המערכת וחישוב הכוח השקול:**

1. רכזו בטבלה הבאה את התוצאות מ- 5 הגרפים שהפקתם, והעבירו את הטבלה לגיליון אלקטרוני.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | מספר המשקולות בעגלה |
|  |  |  | 6 |
|  |  |  | 5 |
|  |  |  | 4 |
|  |  |  | 3 |
|  |  |  | 2 |

תזכורת: M היא מסת המערכת הכוללת (כלומר הסכום של מסת העגלה + מסת המשקולות בעגלה + מסת הסלסלה + מסת המשקולות בסלסלה) ו- a נלקח ממשוואות חמשת גרפי v(t).

1. בנו דיאגרמת פיזור של גודל התאוצה כפונקציה של מסת המערכת הכוללת, a(M).

הקפידו על כותרת משמעותית לגרף, כותרות לצירים ויחידות.

1. הגרף המתקבל אינו ליניארי. נבחר משתנה חדש, שהוא פונקציה של M, כך שהקשר בין a ובין המשתנה החדש יהיה ליניארי. מהכרות עם החוק השני של ניוטון, אנו יודעים כי משתנה זה הוא 1/M.
2. הוסיפו לטבלה הקודמת עמודה חדשה ובה ערכי המשתנה החדש (1/M) ביחידות של (1/kg).
3. בנו דיאגרמת פיזור של התאוצה כפונקציה של המשתנה החדש, (1/M)a.
4. הוסיפו קו מגמה. הציגו את משוואת הישר ואת R2. שנו במשוואה שקיבלתם את שמות המשתנים מ- x ,y ל- 1/M ,a. (לדוגמה במקום המשוואה y=4.1x+8 רשמו: a=4.1(1/M)+8).
5. רשמו את המקדם של 1/M שנתקבל במשוואה: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ (הוסיפו את היחידות המתאימות).

**המשך ניתוח התוצאות יעשה בפרק שאלות הסיכום.**

**שאלות סיכום:**

**הדו"ח המסכם יכלול את התשובות לשאלות המסכמות וכן את כל סרטי הנייר, הטבלאות והגרפים שנדרשו במהלך העבודה**.

**שאלות כלליות:**

1. א. שרטטו תרשים של המערכת, סמנו בו את כל הכוחות הפועלים על כל גוף (בהנחה שיש חיכוך החלקה הפועל על העגלה, אולם ללא חיכוך בגלגלת), ופתחו ביטוי לגודל תאוצת המערכת.

ב. מהו הביטוי לגודל תאוצת המערכת כתלות בגודל הכוח השקול המושך את המערכת, כאשר כוח חיכוך ההחלקה על העגלה זניח?

1. האם, בזמן תנועת המערכת, המתיחות בחוט גדולה/קטנה/שווה לכוח הכובד שפועל על הסל והמשקולות שבתוכו? נמקו.
2. העריכו מהם גורמי השגיאה בניסוי זה.

**שאלות לחלק א':**

1. האם הגרף a(F) שקיבלתם עובר בראשית (או קרוב מאד לראשית)? אם לא, הסבירו מדוע.
2. מצאו מתוך שיפוע משוואת הישר a(F) שקיבלתם את מסת המערכת (בהנחה שהחיכוך זניח). נסמן מסה זאת בתור M(fromgraph). בנוסף, רשמו את מסת המערכת שהתקבלה ממדידת המסות במאזניים בתחילת הניסוי, נסמן מסה זאת בתור המסה "הידועה", M(known).
3. חשבו את הסטייה היחסית בין מסת המערכת שהתקבלה מהגרף ובין המסה "הידועה". את הסטייה היחסית יש לחשב על פי הנוסחה:



1. הראו באמצעות סקיצה גראפית איך יראה הישר a(F) אם תחזרו על הניסוי עם מסת מערכת גדולה יותר (לעומת הישר במערכת שלנו). הסבירו מדוע מסת המערכת מבטאת את **מידת ההתמדה** של המערכת?
2. מהי מסקנתכם לגבי הקשר בין גודל תאוצת המערכת לבין גודל הכוח השקול המניע אותה כאשר מסת המערכת קבועה?

**שאלות לחלק ב':**

1. מצאו מתוך משוואת הישר a(1/M) את גודל הכוח השקול המניע את המערכת (בהנחה שהחיכוך זניח). נסמן גודל זה בתור F(fromgraph). בנוסף, רשמו את גודל הכוח השקול המתקבל ממכפלת מסת הסלסלה עם המשקולות בתוכה ב- g. נסמן גודל זה בתור גודל הכוח "הידוע", F(known).
2. חשבו את הסטייה היחסית בין גודל הכוח השקול שהתקבל מהגרף ובין גודל הכוח השקול "הידוע". את הסטייה היחסית יש לחשב על פי הנוסחה:



1. הראו באמצעות סקיצה גראפית איך יראה הישר a(1/M) אם תחזרו על הניסוי עם כוח שקול גדול יותר.
2. מהי מסקנתכם לגבי הקשר בין תאוצת המערכת לבין מסת המערכת הכוללת, כאשר הכוח השקול המקנה את התאוצה קבוע?