

סודם של שעוני חול - פעילות חקר פתוח במסגרת פל"א

חזי יצחק, בי"ס תיכון לחינוך סביבתי, מדרשת שדה בוקר
המחלקה לאנרגיה סולארית ופיזיקה סביבתית - המכונים לחקר המדבר,
אוניברסיטת בן גוריון

מה חדש
במעבדה



"מפיקדון הפתוח של חרוט האפופן"

צ'וכר וצורם חול קפצן - אלמס כן

צפה האידה, מאלא הנופלו

שקצרויה קריסטל היא כל לולאו.

חוסה לואיס בורגס - "שעון החול"

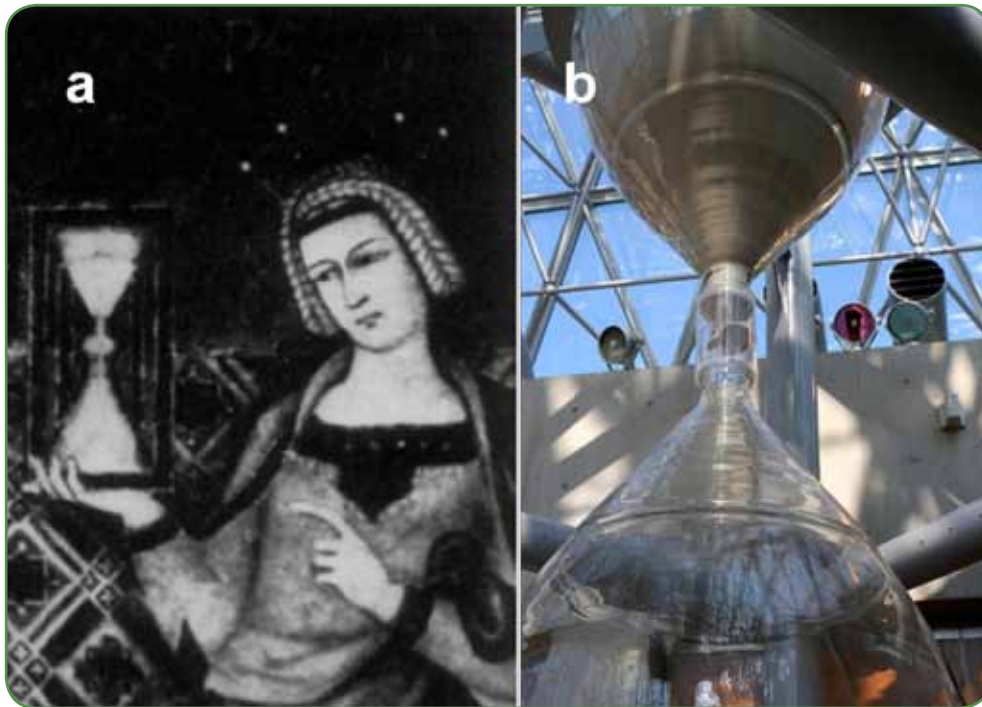
תקציר

המאמר מתאר פעילות חקר פתוח בנושא של שעוני חול; פעילות הקשורה לתכונות הפיזיקליות המיוחדות של החול שהוא חומר גרגרי. האמצעים הדרושים לביצוע הפעילות הם פשוטים ביותר, ובכל זאת התוצאות הן מפתיעות משום שקצב ריקון החול הוא קבוע ואינו תלוי בכמות החול בבקבוק. המאמר כולל גם דגשים דידיקטיים בכל הנוגע להעברת הפעילות בכיתה. הפעילות פותחה במסגרת תכנית פל"א, הכוללת הזמנה לחקר, ניסוח שאלות מחקר, תכנון ניסוי, בניית מערכת הניסוי, ביצוע הניסוי, ניתוח התוצאות, שיתוף עמיתים בתוצאות ודיון מסכם. הפעילות בוצעה עם תלמידי הגברה פיזיקה בכיתה י"א בתיכון לחינוך סביבתי במדרשת שדה בוקר.

1. רקע תאורטי

שעון חול הוא מכשיר למדידת זמן. הוא בנוי משתי שפופרות העשויות מחומר שקוף המוצבות אחת מעל האחרת ומחוברות זו לזו כך שביניהן מעבר צר. אחת מהשפופרות מלאה בדרך כלל בחול דק, אשר זורם באמצעות כוח הכבידה דרך המעבר אל השפופרת התחתונה. אף שטכנולוגיית ייצור הזכוכית הייתה ידועה ליוונים ולרומאים ולבני תרבויות קדומות אחרות, אין כל עדות חד-משמעית לקיומם של שעוני חול בעת העתיקה#. מאחר ששעון החול היה אחד מן האמצעים הבוודיים והמהימנים למדידת זמן בים, משערים כי השתמשו בו באוניות כבר מן המאה ה-11 כעזר ניווט בצד המצפן המגנטי והוא נקרא גם "שעון ימי" (Sea Clock). בספינות השתמשו בשתי גרסאות של שעון חול, האחד של 30 שניות ששימש למדידת מהירות הספינה בקשרים, והאחר של 39 דקות ששימש למדידת זמן המשמרות של הספנים (8 שעות כל משמרת)¹. אולם העדות הקדומה ביותר לקיומם של שעוני חול היא רק מן המאה ה-14, בציור מ-1328 של הצייר אמברוג'ו לורנצטי (איור 1a).

אמנם השימוש בזכוכית אינו הכרחי אבל הוא מאפשר לעצב את החיבור בין שני החלקים של השעון וכן מאפשר לראות מתי זרימת החול נפסקת.



איור 1: (a) שעון חול המופיע בציור מ-1328 של הצייר אמברוג'ו לורנצטי. (b) שעון החול הגדול בעולם במוזאון נימה ביפן, שזמן הריקון שלו הוא שנה אחת.

שעון החול הופיע לעתים קרובות על דגלי פירטים וסימל את העובדה שחיי האדם הם בני חלוף; באנגליה נהגו להניח שעוני חול בארונות קבורה, כדי לסמל ש"החול בשעון החיים" אזל. בספרות שעוני חול מייצגים לעתים את המוות, ובאמנות מוצגת לפעמים דמותו של מלאך המוות כשהוא אווז בידו שעון חול. שעון החול הגדול ביותר בעולם נמצא במוזאון החול Nima ביפן ומכיל טון חול (איור 1b). מדי שנה, בחצות של 31 בדצמבר, הופכים את השעון, וזמן הריקון שלו הוא בדיוק שנה. קוטר גרגרי החול שבו הוא 0.13 מ"מ וקוטר החור הוא 0.85 מ"מ.

חומר גרגרי - בין מוצק לנוזל

חומר גרגרי (Granular matter) (למשל, חול, סוכה, מלח...) מציג מגוון של תכונות ייחודיות, שאינן ניתנות לסיווג כתכונות של נוזלים או מוצקים². החול מורכב מגרגרים שהם מוצקים, אך התכונות של התווך כולו הן הרבה יותר מורכבות. כך לדוגמה, ערמת חול היא יציבה כל עוד זווית השיפוע שלה קטנה מזווית שנקראת זווית התנוחה (θ_r angle of repose) שהיא כ- 33° עבור חול יבש. חול יתחיל לזרום כאשר זווית השיפוע תהיה גדולה מזווית התנוחה. עבור $\theta > \theta_r$ תתחיל זרימה של חול בשכבה דקה של חול על פני המשטח, ושאר הגרגרים שבעומק הערמה לא ישתתפו בתנועה. מסיבה זו

גל גבני פל"א בהוראת פיזיקה

בשנת הלימודים תש"ע אישר הפיקוח להוראת הפיזיקה מסלול חדש לבחינת הבגרות פל"א (פיזיקה לומדים אחרת) המשלב בהוראה גישה מקדמת-חקה. גישה זו מציעה למורים הזדמנות לגוון את דרכי ההוראה וההערכה ולחשוף את התלמידים גם לנושאים שהם מעבר לתכנית הלימודים. התכנית מבוססת על הערכה מתמשכת המסוכמת בתלקיט. החקר במסגרת פל"א יכול להתבצע בסביבות למידה מגוונות כגון מעבדה, סביבות וירטואליות, מאמרים וסיוורים לימודיים.

כאשר בונים שעון חול, יש לדאוג שהזווית ליד הפתח שבצוואר שעון החול תהיה גדולה מזווית התנוחה של החול, כי אחרת לא יזרום חול דרך הנקב. על פי תכונה אחרת שמנוצלת בשעון החול, הלחץ בתחתית עמוד החול אינו תלוי בגובה החול, להבדיל מנוזל שבו הלחץ ההידרוסטטי הוא פרופורציוני לגובה הנוזל. ההסבר המקובל לתופעה זו הוא שהחיכוך בין גרגרי החול לבין דופנות המיכל הוא גדול מספיק כדי להחזיק את משקל החול שמעליו.² לחומרים גרגריים תכונה נוספת של יצירת קשתות וחללים בתוך החומר (arching). קשתות אלו נשענות על הדפנות הצדדיות של שעון החול. גם קשתות אלו מסוגלות להחזיק את משקל הגרגרים שמעליהן וכך להקטין את הלחץ בתחתית עמוד החול. בנוסף לכך יצירת קשתות אלו יכולה לגרום למעין מעצורים בזרימת החול, כאשר היחס בין קוטר הגרגר לגודל הנקב גדל. לכן בשעון חול קצב זרימת החול הוא קבוע ויש קשר ליניארי בין כמות החול לזמן הריקון. (יש להניח שבערמת חול שאינה תחומה בכלי תהיה תלות של הלחץ בתחתית הערמה בגובה הערמה - אם כי לא בהכרח תלות ליניארית). אלו הן רק חלק קטן מהתכונות המיוחדות של החומר הגרגרי.

גרגרי החול בונים גם את דיונות החול שמכסות כ-20% משטח המדבריות בעולם והבנת הפיזיקה של הסעת חול ע"י הרוח חשובה מאוד להבנת התהליכים של התפשטות או של התייצבות דיונות הקשורים לשינויי אקלים.³ כאשר מהירות הרוח עולה מעבר לסף מסוים (כ-6 מטר לשנייה), היא יכולה להסיע את גרגרי החול בתנועה שנקראת סולטאציה או בעברית 'הקפצה' (saltation). בתנועה זו גרגרי החול נעים בקפיצות על פני המשטח כמו כדור פונג פונג שמנתר על פני משטח קשה.

בפעילות המתוארת כאן התלמידים נחשפים לעולם המיוחד של החומר הגרגרי.

לקשר התאורטי בין קצב ריקון החול dm/dt לבין הגדלים השונים ניתן להגיע בשיטה שנקראת אנליזת מִמדים. השיטה מבוססת על כך שבשני האגפים של נוסחה פיזיקלית יש אותן יחידות. הפרמטרים העיקריים שמשפיעים על קצב הריקון הם כמובן קוטר החור D , צפיפות החול ρ_b (לא מדובר בצפיפות גרגר בודד, אלא בצפיפות של החול שמכיל חללים). צפיפות זו נקראת bulk density, והיא נמוכה מצפיפות גרגר בודד, שהיא בד"כ צפיפות של קוורץ 2.65 גרם/סמ"ק. פרמטר נוסף הוא כמובן תאוצת הכובד g , כלומר:

$$\frac{dm}{dt} \propto D^a \rho_b^b g^c \quad 1.$$

משיקולים של אנליזת מִמדים נוכל לרשום:⁴

$$\frac{[M]}{[T]} = [L]^a \frac{[M]^b}{[L]^3} \frac{[L]^c}{[T]^2} \quad 2.$$

כאשר $[M]$ הן יחידות מסה, $[L]$ יחידות אורך ו- $[T]$ הן יחידות זמן, a, b, c הם מערכי החזקות שאותם יש למצוא משוויון היחידות של שני האגפים (משוואה 2).

מ-2 ניתן לקבל ש-

$$b = 1, c = 0.5, a = 2.5 \quad 3.$$

כלומר:

$$\frac{dm}{dt} \propto D^{2.5} \rho_b g^{0.5} \quad 3.$$

לנוסחה זו בדרך כלל מכניסים תיקון⁵ הנובע מכך שהקוטר האפקטיבי, כלומר, הקוטר בפועל שאותו "מרגישים" הגרגרים הוא קטן יותר מקוטר החור בשל חיכוך של הגרגרים עם שפת החור (בדרך כלל הוא קטן בקוטר של גרגר חול אחד d).

כמו כן, מכיוון שזמן הריקון t פרופורציוני ל- $m/(dm/dt)$ - נוכל לכתוב:

$$t \propto \frac{Vg^{-0.5}}{(D-d)^{2.5}} \quad 4$$

כאשר d הוא קוטר גרגר חול (הקוטר השכיח של גרגרי חול דיונות הוא 0.25 מ"מ), $V = m/\zeta b$ הוא נפח החול בשעון החול. ניסויים שונים שבוצעו בשעוני חול הראו שכדי שהחול יזרום ללא הפרעה חייבים לדרוש ש- $D > 5d$ זאת כדי שלא ייווצרו קשתות יציבות שיחסמו את זרימת החול. התלות בקוטר החור בחזקה של 2.5 הנובעת מאנליזת הממדים (באופן תאורטי היא נובעת גם ממשוואות הזרימה של חול⁶) אינה אינטואיטיבית, משום שניתן היה לצפות שקצב הריקון יהיה פרופורציוני לשטח החור, כלומר - לתלות ב- $(D-d)^2$.

2. הפעילות בכיתה

הרעיון המרכזי שעומד מאחורי הפעילות של שעון החול הוא לנצל מערכת פשוטה מאוד לחקר התנהגות של חול. חול מהווה דוגמה לתווך גרגרי שהוא בעל תכונות מיוחדות שבדרך כלל אינן נלמדות בבית הספר התיכון. הפעילות בוצעה כפעילות חקר פתוח במסגרת הפעילויות של פל"א⁷ וכללה ארבעה שלבים:

שלב א', שלב ההזמנה לחקר - בשלב זה קיבלו התלמידים שני שעוני חול (ראו איור 2) והיו צריכים לבצע תצפית על ריקון החול, לתאר את התופעה בשני אופנים שונים ולנסח שאלות על התופעה. כבר בשלב התצפית הם ביצעו מדידות של זמן הריקון שנתנו להם אינפורמציה ראשונית על התנהגות שעון החול. לאחר מכן הם התבקשו לנסח לפחות חמש שאלות חקר. דוגמאות לשאלות שהתלמידים שאלו: כיצד לחץ האוויר משפיע על זמן הריקון? כיצד קוטר החור משפיע על זמן הריקון? האם צורת החור משפיעה על זמן מעבר החול (לא עיגול אלא משולש או מרובע)? החור ממוקם באמצע הפקק ומסביבו יש משטח, כלומר המעבר של החול מהבקבוק לחור עצמו הוא לא מעבר ישיר. האם יש למבנה זה השפעה על הקצב והזמן שבו החול עובר מבקבוק אחד לאחר?

שלב ב', שלב מימוש החקר - בשלב זה עבדו התלמידים בקבוצות. החברים של כל קבוצה בחרו שאלת חקר אחרת והעלו השערה. כדי לבדוק את ההשערה, הם תכננו ניסוי ולאחר אישור שלי בנו את מערכת הניסוי, ביצעו את הניסוי ועיבדו את התוצאות. בשלב זה נחשפו התלמידים לתאוריה ע"י דף הסבר שבו הוצג הניתוח באמצעות אנליזת הממדים ומשוואה 4.

שלב ג', שלב השיתוף בחקר - בשלב זה כתבו התלמידים דו"ח על פי קריטריונים שניתנו להם בדף הפעילות וכן הכינו מצגת על הניסוי שביצעו ועל התוצאות והציגו אותה בפני שאר הקבוצות.

שלב ד': מה למדנו? בשלב זה כתבו התלמידים משוב על תהליך הלמידה, הן מהיבטי החקר והן מהיבטי תחום התוכן.



איור 2: המערכת הניסוינית הכוללת שני בקבוקי שתייה בנפח של חצי ליטר המחוברים זה לזה באמצעות שני פקקים שבהם חור. החול זורם מן הבקבוק העליון לבקבוק התחתון.



איור 3 : בניית שעוני החול ע"י התלמידים. בניית שעוני החול היא פשוטה. חול ניתן להביא משפת הים, אך ניתן להשתמש גם בסוכר ובמלח כחומרים גרגריים.

בסעיף הבא מוצגים שלושה ניסויים שתוכננו ובוצעו ע"י התלמידים. בחרתי לערוך את כל השלבים ברצף, כולל סיכומים ודיון, וכל הפעילות ארכה 12 שעות לימוד ונמשכה שבועיים. בשלב ההכנה של מערכות הניסוי דאגנו שיימצאו כל הכלים במעבדה, והתלמידים נהנו מאוד להכין בעצמם את שעוני החול (ראו איור 3).

3. ניסויים ותוצאות

א. תלות קצב הריקון בצפיפות החומר הגרגרי

בניסוי זה בדקו התלמידים את קצב הריקון של החול לסוגים שונים של גרגרים. את צפיפות החומר הם חישובו באמצעות

מדידת המסה של 50 מ"ל של החומר הגרגרי באמצעות מבחנה שמסתה 58.25 גרם. מדידת הצפיפות בשיטה זו היא רגישה מאוד, משום שקשה לדייק במילוי המבחנה עד השַׁגְת של 50 סמ"ק, וזה מביא לשינויים בחישוב הצפיפות. כדי להגדיל את הדיוק במדידה ולהקטין את השגיאה היחסית, כדאי לחזור על המדידה מספר פעמים ולחשב ממוצע, או למדוד נפח גדול יותר של חול. בכל מקרה חשוב מאוד להקיש קלות על תחתית המבחנה בשולחן כדי לדחוס את הגרגרים ולהגדיל את הדיוק במדידת הצפיפות.

תוצאות מדידת הצפיפות נתונות בטבלה 1.

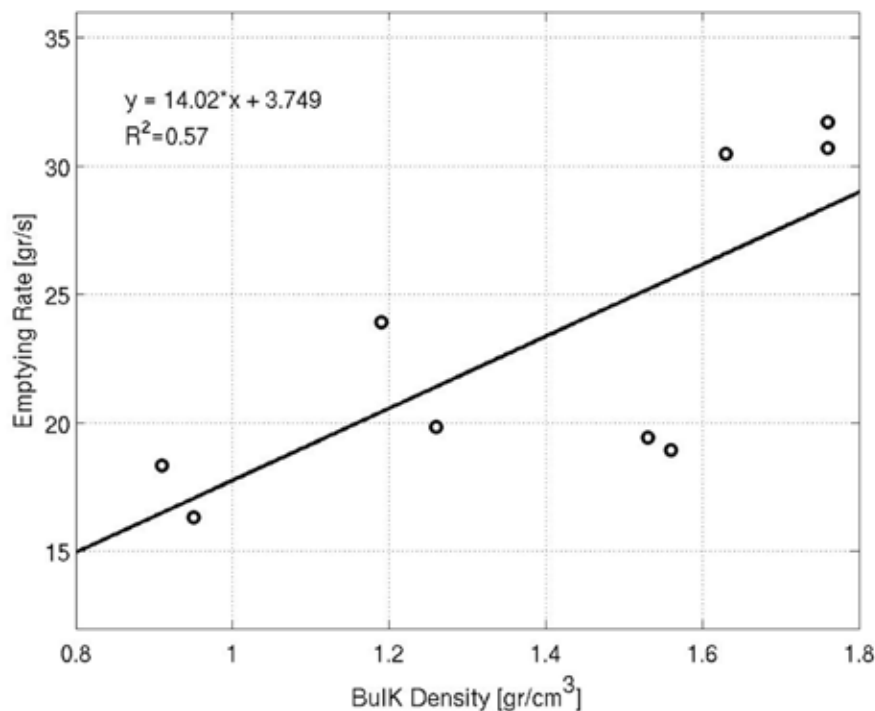
rb[gr/cm ³]	m[gr ³]	V[cm ³]	סוג חומר גרגרי
1.76	88.42	50	חול לא ממוין מוואדי ראם
1.63	81.67	50	חול גס מקטורה
1.56	78.14	50	חול דק מקטורה
1.53	76.7	50	חול דיונות ממדבר טאקלימקאן שבסין
1.76	88.4	50	חולות מהערבה הירדנית
0.95	47.77	50	סוכר דמררה
0.91	45.84	50	סוכר לבן
1.19	59.68	50	מלח שולחן
1.26	63.31	50	מלח גס

טבלה 1: מדידת הצפיפויות של החומרים הגרגריים השונים שבהם השתמשו התלמידים בניסוי.

תוצאות מדידת זמני הריקון וחישוב קצב הריקון dm/dt (ממוצע של 5 מדידות) דרך נקב שקוטרו 10 מ"מ מוצגים בטבלה 2, והגרף של תלות קצב הריקון בצפיפות החומר הגרגרי מוצג באיור 4.

סוג חומר גרגרי	כמות החומר (גרם)	זמן ריקון ממוצע (שניות)	קצב ריקון (גרם/שנייה)
חול לא ממוין מוואדי ראם	195.19	6.15	31.73
חול גס מקטורה	195.19	6.4	30.49
חול דק מקטורה	195.19	10.3	18.95
חול דיונות ממדבר טאקלימקאן שבסין	195.19	10.04	19.44
חולות מהערבה הירדנית	195.19	6.36	16.32
סוכר דמררה	195.19	11.96	18.36
סוכר לבן	195.19	10.63	23.92
מלח שולחן	195.19	8.16	19.83
מלח גס	195.19	9.84	16.34

טבלה 2: קצב הריקון של החומרים הגרגריים השונים. זמן הריקון הממוצע חושב על פי 5 מדידות שונות לכל חומר.



איור 4: קצב הריקון כפונקציה של צפיפות התווך הגרגרי והקירוב הליניארי. מקדם הקורלציה הוא 0.57.

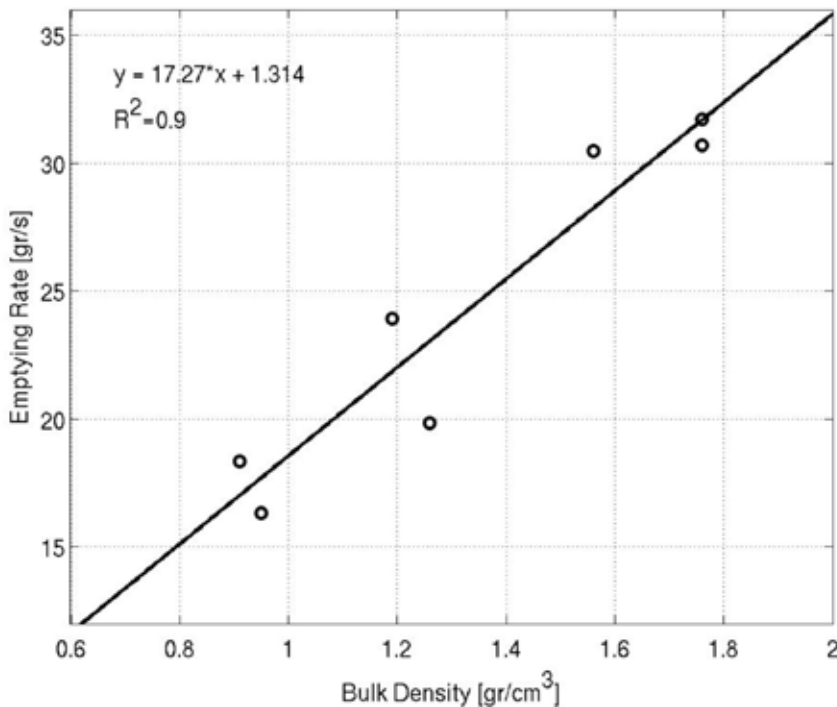
ההתאמה לקו ישר ($R^2 = 0.57$) אינה טובה מספיק. הסיבה לכך היא שמלבד צפיפות הגרגרים יש חשיבות גם לצורה שלהם שמשפיעה על קצב זרימת החול בשל החיכוך בין הגרגרים. ככל שהגרגרים כדוריים וקטנים יותר, יגדל שטח המגע ביניהם (יהיו פחות חללים), ולכן יגדל החיכוך ביניהם וקצב הזרימה שלהם יקטן, ואף יכולים להיווצר מעין מעצורים רגעיים בזרימת החול דרך הנקב. באיור 5 ניתן לראות הגדלה במיקרוסקופ של גרגרי חול גס מחולות כסוי המורכב בעיקר מקלציט. ניתן להבחין כי בחול גס צורת הגרגרים אינה כדורית מושלמת, בניגוד לחול דיונות, למשל. הקבוע בנוסחת הקו



איור 5: צילום במיקרוסקופ של גרגרי חול גס מחולות כסוי, דרום הנגב. ניתן לראות שהגרגרים אינם בעלי צורה כדורית מושלמת וכן שיש התפלגות של גרגרים בעלי קוטר שונה. צילום, חזי יצחק.

הישר קשור לפרמטרים הגאומטריים של מערכת הניסוי כמו צורת הנקב וצורת הבקבוקים.

האפקט של השפעת גודל הגרגר על קצב הזרימה בולט במיוחד בשני סוגי החול הדק מהדיונות בקטורה ומהדיונות בסין. נוכל לקבל התאמה טובה יותר לתאוריה אם נסיר את המדידות של שני סוגי החול הללו מהתוצאות. זו הייתה גם ההצעה של התלמידים שרצו מאוד לקבל התאמה טובה לתאוריה, אך לא רצו להשקיע מאמץ כדי להבין מה יכולה להיות הסיבה האפשרית להתנהגות החריגה של שני סוגי החול הדק. לדוגמה ניתן היה לחזור על הניסוי לחור בעל קוטר גדול יותר ולבדוק אם מתקבלת התאמה טובה יותר לתאוריה. איור 6 מציג את הגרף המתוקן.



איור 6: זמן הריקון כפונקציה של צפיפות החול ללא המדידות של החול הדק. הקירוב הליניארי הרבה יותר טוב ($R^2 = 0.9$). כל החומרים הגרגריים המופיעים באיור מורכבים מגודלי גרגר העולים על אלה של החול הדק.

ב. תלות קצב הריקון במסה ההתחלתית של החול בבקבוק

בניסוי זה בדקו התלמידים אם קצב ריקון החול תלוי בכמות החול בבקבוק.

על פי האינטואיציה של נוזלים, כמו זרימה של מים - הם ציפו לקבל תוצאה שלפיה קצב הריקון של החול יהיה תלוי במסה ההתחלתית של החול. הניסוי התבצע באמצעות מדידת זמן הריקון של 5 כמויות שונות של חול באותה מערכת. כלומר, קוטר החור (10 מ"מ) וכן סוג החול (חול דיונות מהערבה) נשאר קבועים לאורך הניסוי. לכל מסת חול בוצעו 4 מדידות חוזרות וחושב הממוצע. למעשה בדקו התלמידים בניסוי שקצב הריקון הממוצע (גרם לשנייה) הוא קבוע ואינו תלוי במסה ההתחלתית בבקבוק.

קצב ריקון ממוצע (גרם/שניה)	ממוצע (שניות)	מדידה IV (שניות)	מדידה III (שניות)	מדידה II (שניות)	מדידה I (שניות)	מסת החול (גרם)
0.945	9.45	9.8	9.3	9.8	8.9	100
0.952	19.05	18.1	20.1	18.4	19.6	200
0.947	28.42	26.9	29.3	27.6	29.9	300
0.969	38.77	37.1	40.2	36.4	41.4	400
0.939	46.97	50	45.7	47.8	44.4	500

טבלה 3: מדידת קצב הריקון למסות שונות של חול דיונות מהערבה. קוטר החור 10 מ"מ.

בניסוי השני הוגדל קוטר החור ל-13 מ"מ. זמן הריקון התקצר, אך גם במקרה זה התקבל שקצב הריקון אינו תלוי במסה ההתחלתית של החול. ניתן לבצע מדידה ישירה של קצב הריקון ע"י ריקון בקבוק חול דרך הפקק לתוך מכל שמונח על מאזניים, ושרטוט המסה של החול שזרם כפונקציה של הזמן⁸. תלות ליניארית תעיד על קצב זרימה קבוע.

משני הניסויים ניתן להסיק שקצב זרימת החול בבקבוק הוא קבוע ואינו תלוי בגובה עמוד החול. זוהי תכונה ייחודית של התווך הגרגרי שמיושמת בשעוני החול.

ג. התלות בין זמן הריקון לבין קוטר החור

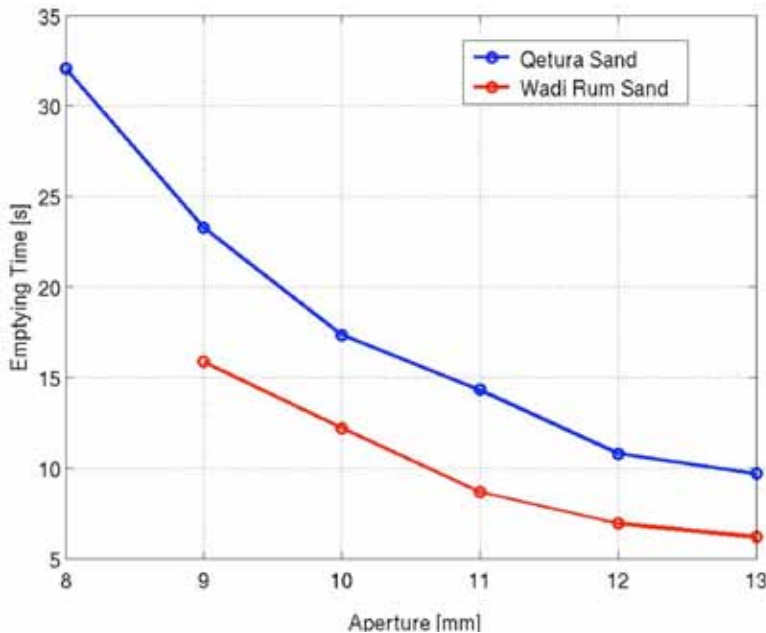
בניסוי בדקנו את התלות של זמן הריקון בקוטר החור בעבור מסת חול קבועה של 202 גרם. לכל קוטר חור בוצעו 6 מדידות ובדקו שני סוגים של חול: חול דק גרגר מהערבה וחול גס גרגר מוואדי ראם.

תוצאות מדידת זמן הריקון מובאות באיור 7. לחול מוואדי ראם בוצעו מדידות בנקבים של 13-9 מ"מ, ואילו לחול מקטורה - בנקבים של 13-8 מ"מ. מהגרפים ניתן ללמוד שהתלות בין זמן הריקון לגודל החור היא לא ליניארית.

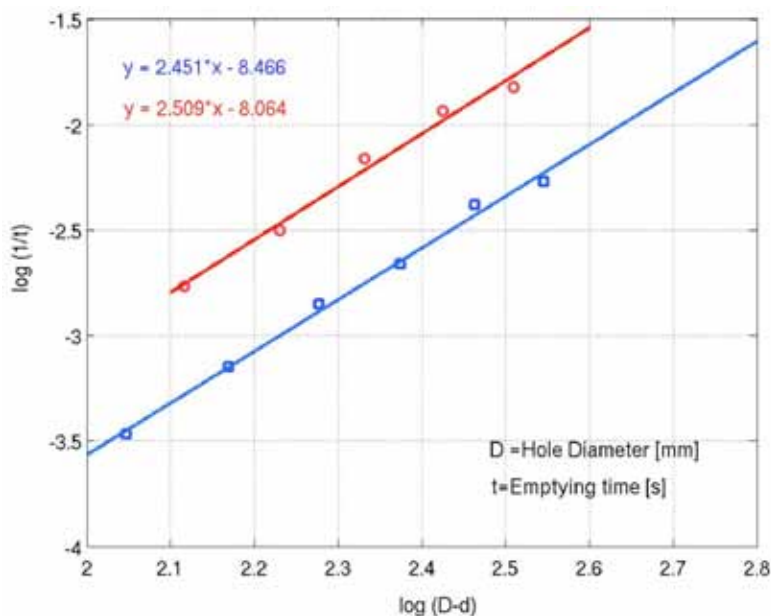
כדי למצוא את התלות של זמן הריקון בקוטר החור (משוואה 2), יש לשרטט גרף של $\log(1/t)$ כפונקציה של $\log(D-d)$ שהקשר ביניהם נתון על פי:

$$\log \frac{1}{t} = -KV + 2.5 \log(D-d) \quad 5.$$

שיפוע הקירוב הליניארי צריך להיות בקירוב 2.5. שרטוט גרף כזה על ידי תלמידים בכיתה י"א חייב



איור 7: זמן הריקון כפונקציה של קוטר החור ל-202 גרם חול. הגדלת קוטר החור מקטינה כמובן את זמן הריקון, אך הקשר אינו ליניארי.



איור 8: $\log(1/t)$ כפונקציה של $\log(D-d)$ לתוצאות המוצגות באיור 7. שיפועי הגרפים הם 2.451 לחול מקטורה 2.511 לחול מוואדי ראם. התוצאה התאורטית שהתקבלה מאנליזת קמדים היא 2.5.

הסבר קצר על פונקציית הלוגריתמים והשימוש בה. איור 8 מציג את תוצאות הניסויים לחול מקטורה שבעבורו $d = 0.25\text{mm}$ ובעבור החול מוואדי ראם שבירדן שקוטר גרגריו $d = 0.7\text{mm}$. נקודת החיתוך עם הציר האנכי קשורה לצורת הבקבוק ולצורתו של החור. לדוגמה, עבור החול מקטורה מתקבל $K = 24.39$ לעומת $k = 21$ שמופיע בספרות למערכת דומה⁵.

4. סיכום

מערכת הניסוי היא מערכת פשוטה מאוד, אך העקרונות הפיזיקליים שקובעים את התנהגותה אינם מוכרים לתלמידים, ובכך יתרונה. היא מאפשרת לתלמידים להפעיל את הדימוין והאינטואיציה שלהם כדי להעלות שאלות חקר רלוונטיות. הניסויים שהוצגו במאמר זה הם רק חלק קטן משאלות חקר שניתן לחקור בעזרת המערכת הפשוטה הזו, למשל:

א. תלות זמן הריקון בצורת הבקבוק ובגודלו. לדוגמה, ניתן להשתמש בבקבוקים של ליטר וחצי.

ב. תלות זמן הריקון בצורת החור.

ג. תלות זמן הריקון בטמפרטורה של החול.

ד. תלות זמן הריקון בתנודות אופקיות של שעון החול.

ה. בדיקת גודלי הגרגרים וצורתם בעזרת מיקרוסקופ.

ו. ניתן ללמוד בעזרת גרגרים הצבועים בצבעים שונים על סוגי הזרימה השונים בשעון חול כתלות בגודל הנקב - זהו נושא מורכב ומרתק⁶.

הפעילות דורשת מהתלמידים לתכנן את מהלך הניסוי, לבנות את המערכת ולבצע את המדידות באופן מדויק. התפקיד של המורה הוא להדריך את התלמידים ולנסות לעזור להם לפתור בעיות שמתעוררות במהלך הניסוי וכן בשלב של בניית השעונים. מכיוון שהתלמידים יכולים לבחור סוגים שונים של חומר גרגרי, יש לצפות להפתעות שיוכלו להתפתח לפעילויות חקר נוספות. חשוב לציין שגם כיום עדיין הפיזיקה של הזרימה של חומר גרגרי דרך נקב צר כמו בניסוי אינה תאוריה סגורה, ומחקרים חדשים הקוראים תגר על התאוריות הקיימות ממשיכים להופיע בספרות המדעית⁹. ניתן לומר שסודם של שעוני החול לא נחשף במלואו.

התלמידים נהנו מהפעילות ובייחוד משלב הבנייה של שעוני החול שדרשה מהם עבודת כפיים שבדרך כלל נעדרת משיעורי הפיזיקה. גם במהלך המדידות הם גילו עניין, אבל לאחר 12 שעות של עבודה על שעוני החול הרגשתי שהם מיצו את העניין. הנושא של הצגת התוצאות ושיתוף הקבוצות הנוספות בחקר דורש עדיין תרגול נוסף. קשה היה להם לשפוט עבודה מדעית של עמיתים ולשאול את השאלות הנכונות.

בתור מורה התנסיתי בשיטת הוראה חדשה שדרשה ממני פתיחות ויצירתיות וכן התמודדות עם בעיות שצצו במהלך הניסויים. זהו לא שיעור רגיל שבו המורה מחזיק בידע ובתשובות לכל שאלה. ידעתי שאני הולך לקראת הרפתקה, אבל היה לי הביטחון שאדע להתגבר על הבעיות משום שבדקתי לפני כן בבית ששעוני החול הפשוטים הללו אכן עובדים. חשוב מאוד שמורה שנכנס לפעילויות חקר יגלה פתיחות וגמישות ויהיה נכון לצאת לדרך שהיא לא תמיד ברורה, אבל זה לדעתי מגדיל את העניין בהוראה לעומת שיטות ההוראה השגרתיות.

תודות: לזהורית קאפח על העזרה בכתיבת התדריך לתלמידים.

מקורות

1. Welland, M. (2009). Sand. University of California Press, Los Angeles.
2. Jaeger H. M. and Nagel S. R. (1992). Physics of the granular state. Science, 255, 1523-1531.
3. Yizahq H, Ashkenazy Y, Tsoar H (2009). Sand dune dynamics and climate change: A modeling approach. Journal of Geophysical Research, 114, F01023.
4. Metin, Y. (2000). The flow of sand. Physics Teacher, 38, 290-291.
5. Millis, A. A. Day, S. and Parkes, S. (1996). Mechanics of sandglass. Eur. J. Phys., 17, 97-109.
6. Savage, S. B (1965). The mass flow of granular materials derived from coupled velocity-stress fields. Br. J. Appl. Phys. 16 1885

7. התדריך שניתן לתלמידים מופיע בקישור:

http://www.boker.org.il/meida/negev/desert_biking/physics/sand_activity1.doc

8. Flores, J. Solovey, G., and Gil, S., (2003). Flow of sand and a variable mass Atwood machine. American Journal of Physics, 71, 7, 715-720.
9. Aguirre, M. A. et al. (2010). Pressure independence of granular flow through an aperture. [arXiv:1005.2884v1](https://arxiv.org/abs/1005.2884v1) [cond-mat.mtrl-sci].