

נוזלים ומוצקים ומה שביניהם בעיות הגדרה של מצבי צבירה

טאהא מסאלחה,
המכללה האקדמית הערבית לחינוך בישראל, חיפה¹



תקציר

ידוע שאחד המאפיינים של מצב נוזל הוא קבלת הצורה של הכלי שבו הוא נמצא, מים בכוס מקבלים צורת כוס. מוצק לעומתו שומר על הצורה שלו ואינו מקבל את צורת הכלי שבו הוא נמצא. מה מסתתר מאחורי אמרות אלה והאם הן תקפות תמיד?

הקדמה

במשך הזמן הצלחנו לסגל לעצמנו תמונה כללית של נוזלים ומוצקים. אנחנו נוהגים לומר כי **נוזלים הם חומר שאין לו צורה מוגדרת - נוזל מקבל את צורת הכלי המאחסן אותו - וכי למוצקים יש צורה מוגדרת: מוצק אינו מקבל את צורת הכלי שבו הוא נתון**. זאת היא התפיסה החושית הרווחת מעולם המקרו בכל הנוגע לתכונה המאפיינת הראשונה של מוצקים ונוזלים; התכונה המאפיינת השנייה היא מעולם המיקרו: צפיפות החומר ותנועת החלקיקים שבו.

ואולם לא כל הנוזלים מתנהגים באותו האופן: אם נתבונן בנוזלים הנמצאים בסביבתנו, נמצא שקיימים נוזלים שאינם מקבלים מידית את צורת הכלי שבו הם נתונים. קיימים נוזלים צמיגיים, כדוגמת דבש וגליצרין, שדרוש להם פרק זמן ארוך, לפעמים מספר דקות, עד שהם מקבלים את צורת הכלי בעוד שמים ואתר מקבלים את צורת הכלי בפרק זמן קצר מאוד - בפחות משנייה אחת. התכונות הנוזליות של זפת וזכוכית באות לידי ביטוי בפרק זמן ארוך בהרבה - כעבור ימים ואף שנים. לשימושים היום יומיים מתייחסים אל זפת וזכוכית כאל כמוצקים, בעוד שהם למעשה נוזלים. ההבדל בצמיגות בין החומרים השונים נובע מההבדל בעצמת הכוחות המולקולריים: בין מולקולות המים ומולקולות האתר כוחות אלו חלשים יותר מהכוחות הפועלים בין מולקולות הנוזלים הצמיגיים יותר; ואלה חלשים הרבה יותר יחסית לאלה השוררים בין מולקולות הזפת והזכוכית.

מבדיקת הספרות המקצועית וספרי הלימוד בארץ ובעולם הדנים בנוזלים ומוצקים מתקבלת תמונה עקבית להגדרות הנאיביות, התומכת בקווי המחשבה שהוצגו לעיל ושמשמשים בסיס להגדרה של נוזלים ומוצקים. במאמר זה ננסה לבדוק את גבולותיהן של ההגדרות האלה ואת מידת תקפותן.

כמו כן קיימת תפיסה מוטעית המשותפת לכל הספרים בכל הנוגע להבחנה בין מוצקים לנוזלים; תפיסה זו נובעת מחוסר ההתייחסות בהגדרה ל"לכמות" - המאופיינת ע"י היחס בין הנפח של הנוזל לבין נפח הכלי שבו הוא נמצא או הנפח שאותו הוא תופס בכלי! בהמשך ייבחנו הגדרות אלה בספרות המקצועית והמסקנות העולות מדיון זה.

1 ד"ר טאהא מסאלחה הוא ראש החוג לפיזיקה, המכללה האקדמית הערבית לחינוך בישראל, חיפה.
e-mail: tahamas@gmail.com

סקירה של ספרות מקצועית

נוזלים (Liquids)

להלן מספר הגדרות מהספרות לנוזלים ולאופן השתלבותם בסביבה הפיזית שבה הם נתונים.

לפי דובסון ואחרים (Dobson, et. Al., 2006), "לנוזלים יש היכולת לקבל את צורת הכלי שלתוכו יצקנו אותם".

גם פרימן (Freeman, 1990), הורטון ואחרים (Horton, et. Al., 2006) מתייחסים לקבלת צורת הכלי: "נוזל הוא מצב צבירה של החומר, שבו אין לחומר צורה עצמית, אבל הוא מקבל את צורת הכלי שבו הוא נתון", "נוזל הוא חומר בעל נפח מוגדר, אולם ללא צורה מוגדרת. כאשר יוצקים אותו מכלי אחד לכלי שני, הנוזל בכל פעם מקבל את צורת הכלי. בכל מקרה הנפח של הנוזל נשמר ללא תלות בצורת הכלי". ביגס ואחרים (Biggs et.al.2005) מתייחסים גם לאנרגיה של החלקיקים בהגדרתם: "חלקיקים נעים: החומר עשוי מחלקיקים נעים. מצב צבירה של החומר נקבע ע"י כמות האנרגיה שיש לחלקיקים ... חלקיקי הנוזל נעים מהר יותר, ויש להם מספיק אנרגיה לנוע. דבר המאפשר לנוזל לקבל את צורת הכלי שבו הוא נמצא".

בנוסף לכך אנו לא תמיד תופסים או מתארים נכון את המציאות. כאשר מחצית הכוס מלאה מים, אנו אומרים שהמים בכוס קיבלו את צורת הכוס, אולם המציאות היא שהמים בכוס קיבלו את צורת מחצית הכוס. מכאן שיש להתייחס למים בכוס כאל מים שקיבלו את הצורה של אחוז מסוים מנפח הכוס. ההגדרה "הקרובה" ביותר למציאות נוסחה ע"י מארשלנד (Marshland, 2000), והיא כדלקמן: "נוזל הוא מצב צבירה או פאזה של החומר, שבו יש לחומר נפח מוגדר ללא צורה מוגדרת. הנוזלים מקבלים את צורתו של חלק הכלי התפוס על ידם".

בספר החדש "יסודות הפיזיקה" (גילי & עובדיה 2007), עמ' 477, הגדרת נוזל הנה: "היות ותכונות חלקיקי הנוזל אינן תלויות בכיוון, חלקיקים אלו יכולים בקלות לשנות את מיקומם ההדדי, ולכן הנוזלים מקבלים את צורת הכלי שבו הם נמצאים".

בספר "פיזיקה לכל: עקרונות מדע החומר והאנרגיה" (היואיט, 1997), עמ' 210, הגדרת נוזל הנה: "המולקולות בנוזל, להבדיל מהמולקולות במוצק, אינן ממוקמות במקומות קבועים. המולקולות בנוזל יכולות לזרום. הן חופשיות לנוע ממקום למקום בהחליקן זו על זו. והנוזל מקבל את צורת כלי הקיבול. מולקולות הנוזל קרובות זו לזו ומגלות התנגדות לדחיסתן. משום כך נוזלים הם, למעשה, בלתי-דחיסים".

מוצקים (Solids)

בפרק זה נציג חלק מההגדרות המקובלות בספרות למוצקים.

לפי פרימן (Freeman, 1990), הורטון ואחרים (Horton, et. Al., 2006), דובסון ואחרים (Dobson, et. Al., 2006), "מוצק: הוא מצב צבירה של החומר שבו לחומר יש נפח מוגדר וצורה מוגדרת". מארשלנד (Marshland, 2000) מגדיר מוצק כ"פאזה או מצב צבירה של החומר, שיש לו צורה ונפח מוגדרים".

ביגס ואחרים (Biggs, et.al., 2005) מתייחסים לאנרגיה של חלקיקי החומר שנמצאים בתנועה: "חלקיקים נעים: החומר עשוי מחלקיקים נעים. מצב צבירה של החומר נקבע ע"י כמות האנרגיה שיש לחלקיקים...חלקיקי המוצק מתנדנדים במקום קבוע, והם נשארים קרובים זה לזה. עובדה זו מקנה למוצק לא רק נפח מוגדר, אלא גם צורה מוגדרת".

יצירת דיסוננס קוגניטיבי בהגדרת מצבי הצבירה של נוזלים ומוצקים

האם ייתכן כי חומר במצב צבירה "נוזלי" לא יקבל את צורת הכלי שבו הוא מצוי? למשל, טיפת מים בכלי זכוכית אינה מקבלת את צורת הכלי, שכן פועלים עליה כוחות מתח פנים ואדהיזה המונעים מהטיפה לזרום. אם התשובה היא כן

(וצפוי שכך יענו חלק מהתלמידים), אזי משתמע מכך שטיפת המים אינה נוזל! זאת בהתאם להגדרת נוזל כפי שבאה לידי ביטוי בספרות המקצועית! הייתכן?

האם ייתכן כי חומר במצב צבירה "מוצק" יקבל את צורת הכלי שבו הוא מצוי? למשל, כדורי ברזל בכלי זכוכית מקבלים צורה של חלק מהכלי שבו הם נמצאים; ככל שגודל הכדוריות (הגרורים) קטן יותר, כך גם מאפייני הפאזה הנוזלית הם משמעותיים יותר (Genies, 1999). אם התשובה היא כן (וצפוי שכך יענו חלק מהתלמידים), אזי בהתאם להגדרת המוצק כפי שבאה לידי ביטוי בספרות המקצועית, אוסף כדורי הברזל אינו מתנהג כמוצק אלא כנוזל.

בלמעלה משלושים שנות הניסיון שלנו בהכשרת מורים - שנים שבהן העברנו השתלמויות למורי מדעים בבתי"ס היסודיים, למורי המדעים בחט"ב ולמורי המדעים בחט"ע (פיזיקה-כימיה-ביולוגיה) - אנו נתקלים באותן תפיסות מוטעות, שלחלקן, כפי שראינו, יש הד גם בספרות המקצועית. ההשוואה בין נוזלים ומוצקים - על פי יכולתם לקבל ו/או לא לקבל את הצורה של חלק הכלי שבו הם נמצאים - אינה מתאימה למציאות ולוקה בחסר, כפי שנראה להלן. **אנו טוענים שלפעמים נוזלים אינם מקבלים את צורתו של חלק הכלי שבו הם נמצאים, ושלעתים אוסף של חלקיקים מוצקים כן מקבלים את צורתו של חלק הכלי שבו הם נמצאים.** בכל ההגדרות הנ"ל המתייחסות לתכונותיהם של נוזלים ומוצקים, לא הובא בחשבון גורם חשוב - "כמות החומר", כפי שהוגדרה לעיל.

כאשר אנו מתעמקים בתכונותיהם של המוצקים, אנו רואים שמה שנתפס אצלנו כל הזמן כנכון לפי הגדרה, אינו תמיד תואם את ההגדרה - למשל, חול. אם ניקח כוס מלאה בגרגרי חול "יבש", החול יקבל את צורתו של חלק הכוס שאותו הוא ממלא. באופן דומה אם ניקח ארגז עמוס בסלעים, הסלעים יקבלו, בקירוב, את צורת חלק הארגז שאותו הם ממלאים. כאן הסלע מקביל לגרגיר חול. תפוזים בתוך ארגז מקבלים את צורתו של חלק הארגז שאותו הם ממלאים. התפוז בתוך הארגז "ממלא תפקיד" של גרגיר החול בכוס. בין התפוזים והסלעים יש אוויר, בדומה לאוויר בין גרגירי החול. סלע בודד (תפוז בודד) הוא בעל צורה מוגדרת ונפח מוגדר, בדיוק כמו גרגיר החול; אולם אוסף הסלעים (התפוזים) ביחד, בדומה לחול בתוך הכוס, מקבל את צורת חלק הכלי שאותו הוא ממלא. למעשה, אלו הן רק חלק קטן מהתכונות המיוחדות של

החול שמהווה מעין מצב צבירה חדש שהוא בין מוצק, נוזל וגז - מצב זה נקרא חומר גרגירי (Granular matter, Jaeger et. al., 2000)².

לחול יש כמה תכונות מיוחדות המבדילות אותו מהמצב הנוזלי (ראו מאמרו של חזי יצחק בגיליון זה). כך למשל, אם נתחיל לערום גרגירי חול לערמה, לא נוכל ליצור ערמה שזווית השיפוע שלה גדולה מ- 33° . מעבר לזווית זו שנקראת זווית התנוחה (Angle of Repose), יתחיל החול לזרום והזווית תקטן. כך קורה למשל בדיונות חול. זווית התנוחה הספציפית לכל חומר תלויה בצורת הגרגירים וגודלם. זוהי הזווית שבה כוח הכובד מתגבר על כוח החיכוך שבין הגרגירים, ואז תתחיל הזרימה.



איור 1: דיונות חול במדבר טקלימקאן שבמערב סין. דיונות חול הן ערמות חול שמעוצבות ע"י הרוח. השיפועים של מדרונות הדיונה הן כ- 33° . צילום: חזי יצחק.

2 עם זאת, יש לשים לב להבדל חשוב: אין מעבר פאזה המאופיין בטמפרטורה קבועה בעת השינוי בין החומר הגרגירי לחומר מוצק.

נוסף לכך, קצב הזרימה של חול בשעון חול אינו תלוי בגובה עמוד החול, וזאת להבדיל מנוזלים. החול זורם, אך אופן זרימתו שונה מזה של נוזלים. לכן היכולת לזרום אינה תכונה בלעדית שיכולה להבדיל בין מוצקים לנוזלים. להבנת הפיזיקה של החומר הגרגירי יש חשיבות מעשית גדולה בעיקר בתעשיית התרופות והמזון, כאשר רוצים להכין תערובות של גרגירים שונים.



איור 2: טיפות של טל שהתעבו על פרח הפטוניה. תודות למתח הפנים הגבוה של המים הטיפות נשארות תלויות ואינן נופלות לארץ. האם טיפות טל אלו מקיימות את ההגדרה של נוזל? צילום - חזי יצחק.

נעבור כעת לנוזל - אם ניקח טיפת מים ונשים אותה בתוך כוס המונחת על גבי שולחן אופקי, תשמור טיפת המים על צורתה ועל נפחה כל זמן שאין גורמים חיצוניים, כגון התאדות או הזזה/או הטיה של הכוס, המשפיעים עליה.

כמה טיפות מים ביחד אנו צריכים על מנת שהמים יתחילו לקבל את צורת חלק הכוס שבו הם נמצאים? הדבר תלוי בגודלה של הכוס ביחס לכמות המים וכן ביחס שבין הכבידה לבין מתח הפנים. הניסוי שבו בודקים את היחס שבין נפח "כמות החומר" (מספר טיפות המים, מספר גירי החול, מספר התפוזים) לבין נפח הכלי, הוא ניסוי פשוט, וניתן לבצעו בכל מקום ובכל זמן.

הגדרה אחרת לנוזלים ומוצקים - מענה למגבלות ההגדרה הקיימת

ההגדרה של מצב צבירה "נוזל" המקובלת בספרות המקצועית נכונה לכל המקרים שבהם נפח הטיפה (הנוזל) "נפח כמות הנוזל" הוא מאותו סדר גודל של נפח חלק הכלי שלתוכו יוצקים את הנוזל; זאת אומרת שההגדרה של מצב צבירה של נוזל תישאר כפי שהייתה. אולם אם היחס בין נפח הטיפה (הנוזל) לבין נפח הכלי שואף לאפס - נפח הטיפה קטן מאוד ביחס לנפח הכלי שבו היא נמצאת, כוחות השפה (מתח הפנים) של טיפת המים גדולים מכוחות המשיכה בין מולקולות הנוזל לבין שפת הכלי, וטיפת הנוזל לא תקבל את צורת הכלי שבו היא נמצאת, אלא צורה אחרת. בעקבות זאת עולה השאלה: האם טיפת מים עונה להגדרה של נוזל?

כאמור, יש להפריד בין אוסף חלקיקים מוצקים לבין חלקיק בודד, ולכן ההגדרה של מצב צבירה "מוצק" המקובלת בספרות המקצועית, נכונה לכל המקרים שבהם היחס בין נפח המוצק לנפח הכלי קטן מאוד. מכאן שהגדרת מצב הצבירה המוצק תישאר כפי שהייתה. אולם אם "כמות" (מספר החלקים) המוצקים גדלה בצורה משמעותית - היחס בין נפח המוצקים לנפח הכלי מתקרב ל-1, אזי יקבל אוסף החלקיקים המוצקים (הגרגירים, כדורי הברזל, הסלעים והתפוזים) צורה מוגדרת - צורת חלק הכלי שבו הוא נמצא.

סיכום

ההגדרות של מצבי הצבירה של "נוזל" ושל "מוצק" המופיעות בספרות המקצועית הבסיסית הן חלקיות ופשטניות ואינן מתאימות למורכבות של החומר. כפי שהראינו, לכמות המוצק או הנוזל יש חשיבות. טיפות מעטות של נוזל לא יזרמו בשל כוחות מתח הפנים, וכמויות גדולות של גרגירים יזרמו כמו נוזל. התכונה המאפשרת לגרגירים לזרום היא תכונה קולקטיבית של כמות גדולה של חלקיקים שכל אחד בפני עצמו הוא מוצק (לדוגמה, חול בנוי מקוורץ). הגדרות מדויקות

של נוזלים ומוצקים חייבות לכלול תכונות כמו צפיפות, צמיגות, דחיסות, טמפרטורה ועוצמה של כוחות בין מולקולריים. קשה מאוד למצוא הגדרה מדויקת לנוזלים ומוצקים שתהיה נכונה לכל החומרים. לכן יש לנתח מספר דוגמאות ולנסות להקנות לתלמידים תחושה של ההבדלים בין נוזלים ומוצקים.

מסקנות

יש ללמד גם את תכונות המקרר וגם את תכונות המיקרו של נוזלים ומוצקים. בהצגת מקרי הגבול הנדונים כאן, יש לנתח את משמעות המאפיינים השונים של מצבי הצבירה נוזל ומוצק ולהראות כי המאפיין הנשמר ללא התייחסות לכמות החומר הוא תנועת החלקיקים (רמת המיקרו). לכן תנועת החלקיקים היא המאפיין הדומיננטי להגדרה, למרות שהיא גודל מופשט וקשה יותר לתפיסה. ניתן לעשות כאן דיון במאפייני ההגדרה בכלל ובשאלה אם לכל המאפיינים יש משקל שווה בהגדרה - דיון זה חורג מגבולות הדוגמאות שהובאו כאן ויכול לסייע בחשיבה ביקורתית (Gardner, 2006).

תודה לד"ר חזי יצחק על הערותיו החשובות ומאירות העיניים ועל התמונות.

ביבליוגרפיה

- גלילי, ג., ועובדיה, ד., (2007). "יסודות הפיזיקה". יש - הפצות ספרים בע"מ, חולון.
- היואיט, פ. ג., (1997). "פיזיקה לכל: עקרונות מדע החומר והאנרגיה". מכון ברנקו וייס לטיפוח החשיבה, ירושלים.
- Biggs A., P., Daniel L., Feather R. M., Ortleb E., Snyder S. L., and Zike D., (2005). Science: Level Red, National Geographic, Teacher Wraparound Edition, Glencoe / McGraw-Hill Company, Pg 74.
- Dobson K., P., Holman J., and Roberts M., (2006). Science Spectrum: Physical Science, Holt, Rinehart and Winston, A Harcourt Education Company, Pg 71-72.
- Freeman, I. M., (1990). Physics Made Simple. Made simple books, Bantam Doubleday Dell Pub. Group, revised Ed. Pg 181 – 183.
- Gardner, H. (2006). Five Minds for the Future, Ch. 2. Harvard Business School Press.
- Jaeger H. M., Shinbrot, T. and Umbanhowar, P. B. (2000). Does the granular matter? PNAS 2000 97 (24) 12959-12960
- Gennes, P. G. (1999). Granular Matter: A Tentative View, Reviews of Modern Physics, Vol. 71 (2), p. 374
- Horton, P., Werwa, E., McCarthy, T., and Zike, D., (2005). The nature of Matter. National Geographic, Teacher Wraparound Ed. Glencoe/McGraw-Hill, Pg. 41 – 42.
- Marshland D., (2000). "Science and Technology Concepts for Middle Schools: Properties of Matter", Student Guide and Source Book. Smithsonian/the National Academies, National Science Resource Center pg 238-239.
- Massalha, T., and Gluck, P., (2010). Defining Solids and Liquids. Physics Education (pp 434-435).