

שגיאות נפוצות של מורים ותלמידים בנושאים של זרימת מים

פרופ' אלי זמסקי

אמריטוס של האוניברסיטה העברית.

לימד וחקר בפקולטה לחקלאות יותר מ-35 שנה והעמיד דורות רבים של תלמידים. כתב וערך 13 ספרים בעברית ובאנגלית בתחומים מגוונים ופרסם מאות מאמרים. כיהן בעבר כמדען הראשי של רשות הטבע והגנים וכנשיא המכללה האקדמית לחינוך אחוה. משמש כיום כראש בית הספר לתואר שני במכללת חמדת הדרום.



משך כחמישים שנה לימדתי נושאים שונים של ביולוגיה של התא ומדעי הצמח באוניברסיטה (הפקולטה לחקלאות) ובמכללות (אחוה, הקיבוצים, חמדת הדרום). במשך הקריירה האקדמית שלי נחשפתי לא אחת לשגיאות שגורות בפי תלמידים ומורים בכל הקשור לתכונות של מים, תנועה של מים ממקום למקום והולכת המים בצמחים. הסוגיות הללו כולן נמצאות בתחום הפיסיקה והתרמודינמיקה ולכן כדי לתאר את המצב של המים יש צורך להשתמש במושגים של אנרגיה ועבודה ואולי זו הסיבה שמתקשים בהבנתם ונזקקים למושגים של האנשה ("המים שואפים" "המים רוצים") כדי להתחמק מדיון לא שגוי. המטרה של הכתוב כאן היא להרחיב את הרקע בנושא המים ולהעמיד את הקורא בפני שאלות שמשבשות את דרך הלימוד השגויה. פרטים נוספים ניתן למצוא בספריי (זמסקי 2015, 2016).

כללים לתנועה שלמים ושיקולים אנרגטיים במקורותינו נאמר - "כל הנחלים הולכים אל הים, והים איננו מלא" (קהלת א ז). בפרק זה נברר את השאלה העולה מחלקו הראשון של הפסוק: מדוע כל הנחלים הולכים אל הים? מים זורמים מנקודה אחת לאחרת על פי עיקרון אחד בלבד: ממקום שבו הם מסוגלים לבצע יותר עבודה למקום שבו הם מסוגלים לבצע פחות עבודה. לדוגמה, מים נופלים במפל (תמונה 1). בכל סוגי תנועת המים,

גם בתנועת מים מלמטה למעלה בתוך הצמח, אפשר לתאר את תנועת המים על פי אותם עקרונות של נפילת מים במפל (ממקום שאפשר לבצע יותר עבודה למקום שאפשר לבצע פחות עבודה). כבר לפני אלפי שנים ידעו בני האדם לנצל את כושרם של המים לבצע עבודה באמצעות רתימת המפל להנעת גלגל בתחנות קמח. כשהמים נופלים במפל הם מאבדים מכושרם לבצע עבודה ולכן הירידה הזאת מסומנת בסימן שלילי ΔG - שמשמעותו ירידה באנרגיה החופשית של גיבס (Gibbs free energy, המסומנת באות G). האנרגיה החופשית של גיבס היא אנרגיה זמינה של חומר שאפשר לבצע בה עבודה (בטמפרטורה ובלחץ קבועים). G מבטא למעשה את הפוטנציאל התרמודינמי של המערכת כשהמשתנים הטבעיים שלו הם טמפרטורה ולחץ והוא גם קובע לאיזה כיוון תתבצע התגובה הכימית כשהלחץ והטמפרטורה נשלטים. ΔG - מבטא ירידה במידת העבודה "החופשית" שאפשר להפיק ממערכת סגורה כשהלחץ והטמפרטורה קבועים. קשה לחשב את הערכים המוחלטים של G, אך אפשר לחשב בקלות את ΔG , כלומר את ההפרש באנרגיה בין תחילת התהליך לסופו.

תנועה של מים ממקום למקום היא תנועה ספונטנית אקראית. המים זורמים אל תוך התא או מן התא החוצה בדיוק לפי אותם הכללים המכתיבים את נפילת המים במפל. המים זורמים כמסה ממקום למקום בכיוון המפל של האנרגיה הפוטנציאלית (potential energy), היא



תמונה 1 : מפל מים בנחל יהודייה ברמת הגולן. המים הנופלים במפל מפסידים אנרגיה ולכן יכולים לבצע פחות עבודה בתוך הברכה מאשר במעלה המפל.

(בתנאי לחץ וטמפרטורה קבועים), ממקום שבו אין חומר סופח מים למקום שבו יש חומר סופח מים. בכל הדוגמאות הללו, המים נעים כאמור ממקום שבו כושרם לבצע עבודה (פוטנציאל המים) הוא גבוה, למקום שבו כושרם לבצע עבודה הוא נמוך. לכן אפשר לומר שמים יכולים לקבל ערכים שליליים (כמו למשל מים בתמיסה, מים בתאים, או מים בקרקע), או אפס (מים טהורים ללא מומסים, בגובה פני הים בלחץ אטמוספרי) או ערכים חיוביים (אם מפעילים על המערכת לחץ, מחממים אותה, או מים הנמצאים במקום גבוה מפני הים). הפסוק שהובא לעיל מקהלת: "כל הנחלים הולכים אל הים והים איננו מלא..." מתאר בדיוק את הנאמר: המים הנקווים בהרים ובנהרות הם בעלי ערכים חיוביים בגלל האנרגיה הפוטנציאלית שלהם (יכולתם לבצע עבודה, כמו במפל). משם הם זורמים אל הים, שבו כושרם לבצע עבודה הוא שלילי. יש לזכור שלתמיסת מי הים ערכים שליליים בגלל נוכחות המלחים, ורק למים טהורים בגובה פני הים יש ערכים של אפס. המים כמובן מצייתים לחוק השני של התרמודינמיקה. לחוק כמה ניסוחים: כמות האנטרופיה (ראו להלן)

האנרגיה האצורה בגוף וניתנת להמרה לצורת אנרגיה אחרת. אפשר לנצל את האנרגיה הפוטנציאלית של המים בעזרת הכבידה ולהפוך אותה לאנרגיה קינטית ולאנרגיה מכנית, כפי שאכן נעשה בהפעלת תחנות כוח. האנרגיה הפוטנציאלית של המים, או כושרם של המים לבצע עבודה, מכונה פוטנציאל המים (water potential) ומסומנת באות היוונית פסי (Ψ). כשהמים זורמים במערכת, או נופלים במפל, חלה ירידה בכושרם לבצע עבודה, ויש צורך להשקיע עבודה כדי להעלות את המים במעלה המפל בחזרה, כמו שאי-אפשר להחזיר גז מתפשט למצבו ההתחלתי בלי להשקיע עבודה בדחיסתו. מכאן אפשר ללמוד כי בתהליכים ספונטניים, כמו בזרימה של מים ממקום למקום, גדלה האקראיות, או כפי שהיא מכונה אנטרופיה ($entropy$), המסומנת באות S ויחידותיה (cal/deg) .

מולקולות של מים ינועו במערכת ממקום למקום בתנאים הבאים: ממקום שבו הטמפרטורה גבוהה למקום שבו הטמפרטורה נמוכה, ממקום שבו הלחץ גבוה למקום שבו הלחץ נמוך, ממקום שבו ריכוז המומסים נמוך למקום שבו ריכוז המומסים גבוה

במערכת סגורה לעולם אינה קטנה ויכולה רק לגדול; במערכת סגורה לעולם גדל האי-סדר. יוצא אפוא שהאנרגיה חופשית של המערכת במצב הסופי נמוכה תמיד מהאנרגיה הפוטנציאלית של המערכת במצב ההתחלתי. תהליך כזה מכונה אקסרגוני (exergonic, אנרגיה החוצה). רק תהליך אקסרגוני מתבצע ספונטנית. המילה "ספונטני" עשויה להטעות שכן מבחינה אנרגטית לעתים יש צורך באנרגיית אקטיבציה כדי שהתהליך יצא אל הפועל, כמו למשל בתהליך אנזימתי, זאת אף על פי שמבחינה אנרגטית התהליך צריך לצאת אל הפועל, או יוצא אל הפועל במהירות נמוכה מאוד. כלומר המונח ספונטני מראה את כיוון הראקציה, אך לא את מהירות הראקציה. שני גורמים קובעים אם התהליך הוא ספונטני. האחד הוא ΔH : המבטא את השינוי בתכולת החום של המערכת, כאשר H מציין את האנתלפיה (enthalpy). השינוי בתכולת החום הוא קרוב מאוד לשינוי באנרגיה הפוטנציאלית. הגורם השני הקובע את כיוון התהליך הוא האנטרופיה (entropy) המצוינת באות S. האנטרופיה כאמור היא ערך המבטא את ה"סדר" או את ה"אקראיות" של המערכת. השינוי הכללי של תכולת החום והאנטרופיה במערכת מכונה השינוי באנרגיה החופשית (free energy change) ומבוטא כאמור ב- ΔG . אם התהליך הוא ספונטני-אקסרגוני, התוצאה הסופית תהיה שהאנרגיה במערכת תרד, ולכן מסמנים תהליך כזה בסימן מינוס, ΔG - (ראו סימון המפל בתמונה 1). אם התהליך דורש אנרגיה הוא נקרא תהליך אנדרגוני (endergonic), שינוי האנרגיה של המערכת הוא חיובי ($+\Delta G$). כשאין שינוי באנרגיה החופשית המערכת נמצאת במצב שיווי משקל $\Delta G = 0$. המבנה המולקולרי של המים מקנה להם תכונות מיוחדות, כמו התנגדות ללחץ או למתח. אם לוחצים או מותחים מים, אין מבחינים בשינוי בנפח המים, אך הפעולה משפיעה על מולקולות המים ועל כושרן לבצע עבודה (פוטנציאל המים). אני מציע למורים להדגים זאת לתלמידים באופן הבא: אפשר להדגים זאת בלחיצה על בוכנה של מזרק מלא מים שפתחו נאטם באצבע. כמובן שלא ניתן להקטין את הנפח של המים במזרק אבל בעזרת הלחץ הוספנו אנרגיה למים! עובדה, אם נסיר את האצבע מפתח המזרק המים יפרצו החוצה. בדומה לכך, משיכה לאחור של בוכנת המזרק המלא במים כאשר פתחו אטום באצבע. "המתח" שיצרנו במים מוריד את כושרם של המים לבצע עבודה.

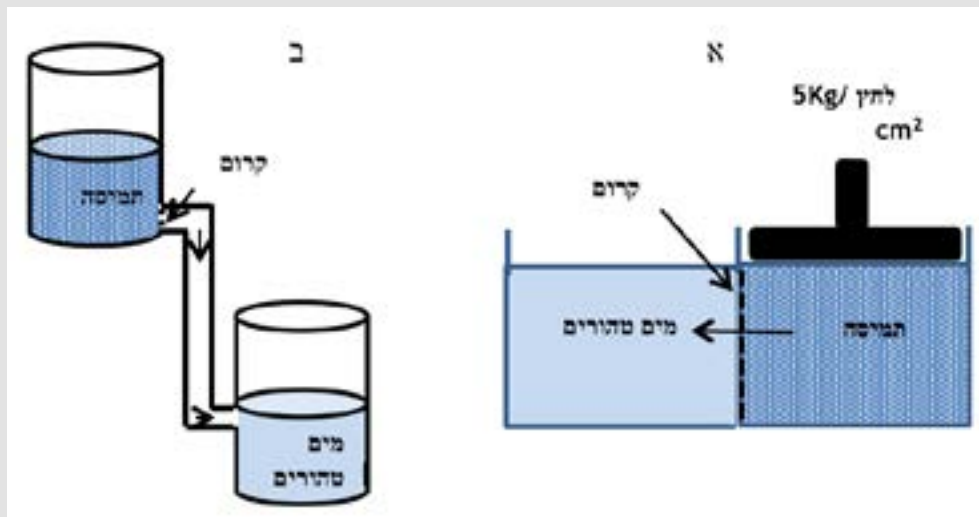
מהאמור לעיל נובע כי לתנועה של המים ממקום למקום אין "שאיפות", ו"המים אינם שואפים להשוות ריכוזים" (כפי שאומרים סטודנטים על בסיס מה שלמדו בתיכון ועל כך נרחיב את הדיון בהמשך),

הם נעים ממקום למקום על פי נתונים אנרגטיים של המערכת. אי-לכך מים עשויים גם לנוע מתוך תמיסה אל מים טהורים. ראו את שני המצבים המודגמים בתמונה 2. במצב א: מפעילים לחץ גבוה על התמיסה (אפשר לחשב איזה לחץ להפעיל כדי להתגבר על השפעת המומסים), מעלים בה את פוטנציאל המים מעל לאפס והמים יזרמו מהתמיסה אל המים הטהורים. במצב ב: כלי שבו תמיסה מורס מעל כלי שבו מים טהורים. פוטנציאל המים בתמיסה עולה על זה של המים הטהורים (פוטנציאל אפס בגובה פני הים בלחץ אטמוספרי) והמים יזרמו דרך הקרום כלפי מטה. אם כן, לפנינו שני מצבים מתוך רבים אחרים המבטלים את ההגדרה השגורה בפי התלמידים ש"מים שואפים להשוות ריכוזים". הדוגמאות הללו אינן תיאוריות גרדא, הן קיימות בטבע.

המסקנה היא שצריך להביא בחשבון את כל הרכיבים המשפיעים על כושרם של המים לבצע עבודה בתוך המערכת ויש כמה כאלה. במערכות ביולוגיות ובקרקע הגורמים העיקריים המשפיעים על פוטנציאל המים הם מומסים (s), המורידים את פוטנציאל המים, לחץ (p), המעלה את פוטנציאל המים, וחומרים סופחי מים (m), המורידים את פוטנציאל המים.

שאלות לחשיבה

1. מדוע המים זורמים אל הים?
2. הנביא ישעיהו ניבא: "ושאבתם מים בששון ממעיני הישועה" (יב ג). כידוע את המים שאבו בימי קדם מן הבאר בעזרת חבל וכלי קיבול. לאן "נעלמת" העבודה שמשקיעים בהעלאת המים מן הבאר?
3. היכן יש למים יותר אנרגיה פוטנציאלית: בכלי שעל גב הגמל, על פי הבאר, או במעמקי הבאר?
4. במקומות יישוב רבים אפשר להבחין בברכות מים גדולות הממוקמות במקומות הגבוהים ביותר של היישוב. מדוע נבחר המקום הגבוה ביותר?
5. האם אפשר לגרום למים לנוע דרך קרום בררני מתמיסה מרוכזת לתמיסה מהולה בניגוד למפל הריכוזים?
6. האם אפשר להשתמש באנרגיה של המים הנופלים במפל כדי להעלות אותם בחזרה למעלה?
7. אילו כוחות מעלים את המים לפה בשתייתם מכוס בעזרת קשית?
8. מיכל מים העשוי פלסטיק קשיח ומכיל 10 מטר מעוקב של מים ועומד בגובה של 5 מטרים נוקב לאורכו בשלושה נקבים שהמרחק ביניהם הוא מטר. האם זרימת המים מהנקבים תהיה בעוצמה שונה או זהה?



תמונה 2: תנועה של מים מתמיסה אל מים טהורים דרך קרום בררני בניגוד למפל הריכוזים, בה־שפעת לחץ (מימין א), או בהשפעת הכבידה (משמאל ב).

אוסמוזה ופוטנציאל המים

אוסמוזה מוגדרת כתנועה ספונטנית אקראית של חלקיקים בתמיסה המופרדת על ידי קרום בררני (או תווך אחר) החדיר במידה שונה לרכיבים שבתמיסה (ממס ומומסים). הממס הטבעי הם מים ולכן בדרך כלל מדברים על מים. הבדלים בפוטנציאל המים משני צדי הקרום יגרמו לתנועה של מים מפוטנציאל גבוה אל פוטנציאל נמוך (כמו נפילת מים במפל). תאים מכילים כמות רבה של מומסים שונים, אך מהירות תנועתם של מומסים דרך הקרום היא אטית יחסית, או אפס, ותלויה בגורמים רבים (דיפוזיה, דיפוזיה מסתייעת, הובלה בעזרת נשאים המעוגנים בקרום, תנועה בכיוון מפל הריכוזים או נגד מפל הריכוזים). לכן עדיף להשתמש במושג "קרום בעל חדירות בררנית" ולא "קרום חצי חדיר". לעומת המומסים, מהירות מעבר מים דרך הקרומים היא גבוהה יחסית בגלל נוכחות של נקבים הידרופיליים. במערכת של אוסמוזה חייבים להתקיים שני תנאים: 1. נוכחות קרום בררני המאפשר חדירת רכיבים במהירויות שונות. הקרום עשוי להיות בלתי עביר לרכיב מסוים ואז מתייחסים אליו כאל "חצי חדיר" (זהו מקרה פרטי של קרום בררני), כלומר בלתי חדיר לרכיב המסוים אך חדיר למים. 2. אפשרות להתפתחות לחץ.

נדגים את הכוחות הפועלים ומכוונים את תנועת המים בעזרת כלי המכונה אוסמומטר (תמונה 3). אוסמומטר הוא כלי העשוי זכוכית בדרך כלל, בצורת משפך, המכיל תמיסה. חלקו הרחב של הכלי מכוסה בקרום בררני וטבול בתוך מים. במקרים השכיחים הקרום מעביר מים במהירות רבה ומומסים במהירות אטית. לכן ההשפעה הראשונית המתקבלת היא מעבר מים דרך הקרום. כשמולקולות המומס גדולות מאוד (למשל חלבונים וחומצות גרעין) הן אינן עוברות דרך הקרום ואז אפשר להתייחס אל הקרום כ"חצי חדיר" שהמעבר דרכו יהיה רק של מים. כשהמומס שבאוסמומטר מורכב ממולקולות קטנות, כמו מלחים או חד-סוכרים, גם הן יעברו דרך הקרום, אך בדיפוזיה אטית. עם מעבר מולקולות המומס נקבל גם תנועה של מים באותו כיוון דרך הקרום, כדי לפצות על מעבר המומסים. בהדרגה, עם מעבר המומס בדיפוזיה מהאוסמומטר אל הכלי של המים, הם יחדלו להיות "טהורים" ויתקבל פוטנציאל שלילי שילך ויעשה בהדרגה שלילי יותר. התפתחות פוטנציאל שלילי בכלי המים החיצוני ילווה בחזרה מקבילה של מים מהאוסמומטר אל כלי המים. כך יתקבל שיווי משקל דינמי, כשחדירת מומס דרך הקרום מלווה בחדירת מים באותו כיוון. בסופו של התהליך, יתקבל מצב של שיווי משקל שבו פוטנציאל המים בתוך האוסמומטר

ומחוץ לו, בכלי המים, יהיה שווה, גם מבלי שתחול השוואת ריכוזים! נברר כיצד יקרה כדבר הזה של שיווי משקל ללא השוואת ריכוזים. יש לזכור שבקרומים הביולוגיים של התאים לעולם אין השוואת ריכוזים של מומס מסוים, ולמרות זאת מתקבל שיווי משקל דינמי משני צדי הקרום!

נא לשים לב לדיון הבא: בדיון עם תלמידים וסטודנטים, חביבה עליי השאלה: "עד מתי ייכנסו מים לתוך האוסמומטר?" או בניסוח אחר: "מתי המערכת תגיע למצב שווי משקל שבו לא ייכנסו יותר (נטו...) מים לתוך האוסמומטר?" קיבלתי שפע של תשובות מפי האמיצים, אבל רק לעתים נדירות קיבלתי את התשובה הנכונה. התשובה השגויה הנפוצה היא "עד שיושוו הריכוזים" (כי כך לימדו אותנו בתיכון... וזה כמובן שגוי!). התשובה הנכונה היא ש"מים ייכנסו לאוסמומטר עד שכושרם של המים לבצע עבודה (פוטנציאל המים) בתוך האוסמומטר יהיה שווה לכושרם של המים לבצע עבודה בכלי החיצוני", ובמצב כזה לא יושוו הריכוזים כלל! אבל (וכאן אני ממשיך להציק): "כושרם של מים טהורים לבצע עבודה בגובה פני הים שווה לאפס, אם כך כיצד ייתכן שכושרם של המים שבתמיסת האוסמומטר, שהוא שלילי, יהיה שווה לאפס" גם כן?

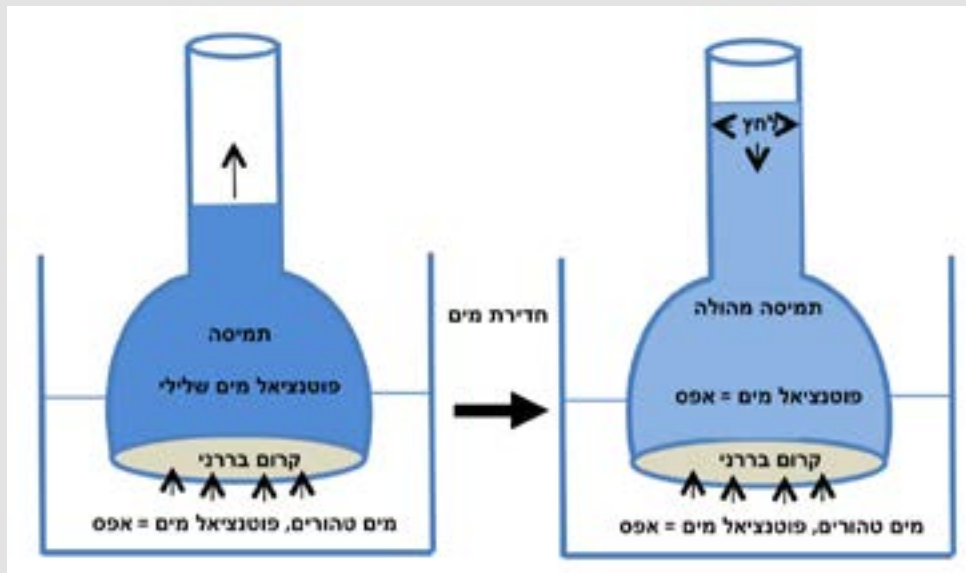
ובכן הדבר יקרה כשהלחץ ההידרוסטטי, דהיינו לחץ עמודת המים הנוצרת באוסמומטר (פוטנציאל חיובי) על דפנות הכלי והקרום הבררני, יהיה שווה ובסימן הפוך לפוטנציאל המומסים (פוטנציאל שלילי). ככל שעמודת המים תהיה גבוהה יותר (אם ריכוז התמיסה באוסמומטר היה גבוה), יגדל הלחץ ההידרוסטטי. כשהמערכת תהיה במצב של שיווי משקל, לא ייכנסו עוד מים נטו לתוך האוסמומטר. הנה ראינו שכושרם של המים לבצע עבודה עלה מערכים שליליים בתוך האוסמומטר לאפס, כמו זה של מים טהורים, וזאת בהשפעת הלחץ שבמערכת. יש לזכור שכשהמומס עובר גם הוא דרך הקרום הבררני, באטיות אמנם בהשוואה למים, עמודת התמיסה באוסמומטר תהיה נמוכה מהצפוי, אבל גבוהה מאשר בזמן אפס. המצב הזה מדמה את משק המים של התא הצמחי כמוסבר להלן. האם ישנם מקרים שמים יכולים לעבור מתוך תמיסת האוסמומטר אל מים טהורים דרך הקרום? ודאי שכן! ראינו קודם לכן שאם נפעיל לחץ בעזרת בוכנה על התמיסה שבאוסמומטר, שיבטל את השפעת המומסים, יעברו מים מהאוסמומטר אל הכלי עם המים הטהורים.

באוסמומטר הלחץ המתקבל עם כניסת המים לתמיסה הוא לחץ הידרוסטטי, לחץ של עמוד המים על דפנות הכלי ועל הקרום. בתא צמחי הלחץ המתקבל

מכניסת מים לתוכו הוא לחץ הטורגור, הלחץ שמפעיל הפרוטופלסט החי על דופנות התא וכתוצאה מכך לוחץ הדופן על התא באותו הכוח. תאים של בעלי חיים הם חסרי דופן תא, אבל הלחץ מתקבל מההילחצות שלהם זה אל זה ברקמה. אפשר לבצע במעבדה את ניסוי האוסמומטר בעזרת משפך וקרום של שקית דיאליזה. שימו לב, השימוש במונח ריכוז כדי לתאר תנועה של מים מריכוז אחד לריכוז אחר אינו ראוי (גם כאשר מדברים על "ריכוז המים" לא על "ריכוז המומסים", ראו להלן). כפי שראינו המים יכולים לנוע מריכוז גבוה של תמיסה לריכוז נמוך של תמיסה עם מפעילים על תמיסת הריכוז הגבוה לחץ גדול מספיק, או אם בתמיסה בריכוז נמוך המומס סופח מים. המונח ריכוז מבטא כמות מומס ביחידת נפח של ממיס. מבטאים זאת במולריות של תמיסה וסימנה M (מספר מולים של מומס בליטר של תמיסה) או מולליות שסימנה mol (מספר מולים של מומס ב-1 ק"ג של ממס). לכן הנפח הסופי של תמיסה מולרית הוא 1 ליטר, אבל הנפחים הסופיים של תמיסות מולליות אינם שווים. שימו לב להבדל הגדול בין שני המונחים. בתמיסה מוללית ממיסים את החומר בתוך 1 ליטר של מים, ובתמיסה מולרית ממיסים את החומר במים ומשלימים את הנפח הסופי ל-1 ליטר. מכאן נובע שמולריות נמדדת על פי נפח התמיסה ומולליות נמדדת על פי מסת התמיסה. אף על פי שהתמיסות של 1 מולל מכילות מספר זהה של חלקיקים (מספר אבוגדרו ולכן השפעתם על התמיסה היא שווה), הנפחים של תמיסות 1 מולל של חומרים שונים אינם זהים. ישנן אף תמיסות 1 מולל (של מלחי כספית הסופחים מים) שהנפח הסופי שלהן קטן אפילו מ-1 ליטר (מאחר שריכוז מבטא כמות לנפח, האם נאמר שריכוז המים עלה, כי הנפח קטן? חס וחלילה!). שימו לב, אף על פי שבתמיסות 1 מולל של חומרים שונים מתקבלים נפחים שונים, ההשפעה שלהם על פוטנציאל המים תהיה זהה (לפי חוק ראול המבטא את הקשר הישיר בין לחץ האדים לשבר המולי של התמיסה), בתנאי שהמומסים הם אידאליים (שאינם מגיבים עם המים). לאור זאת הביטוי הנכון של פוטנציאל המים יהיה על פי לחץ האדים מעל התמיסה, או השבר המולי שלה ולא "ריכוז המומס (כמות בנפח...)", או "ריכוז" המים.

כיצד עולים המים בצמח?

אחת השגיאות הנפוצות אצל מורים ותלמידים היא שהמים עולים בצמח בכוחות נימיים. מדוע נפוצה האיוולת הזו? אולי כי כך הכי פשוט להסביר כיצד מים עולים בניגוד לכוח הכבידה... להלן נוכיח מדוע זו איוולת



תמונה 3: תרשים של אוסמומטר דמוי משפך הפוך שבתוכו תמיסה ופתחו המונח במים טהורים חסום בקרום בררני. תחילת הניסוי (משמאל) ובמצב שיווי משקל (מימין). במצב שיווי משקל, אם הקרום אינו עביר למומס, לא יושוו הריכוזים כלל, אלא יושוו פוטנציאל המים בכלי ובאוסמומטר והוא יהיה שווה לאפס. פוטנציאל המים באוסמומטר, שהיה בתחילת הניסוי בעל ערך שלילי, עלה לאפס (כמו פוטנציאל המים הטהורים) עקב הלחץ ההידרוסטטי שהתפתח עם כניסת מים לתוכו. במצב שיווי משקל, הלחץ ההידרוסטטי מבטל את ההשפעה השלילית של המומס על פוטנציאל המים.

מדוע המים אינם עולים בכוחות נימיים?

הנימי קטן יותר, יעלו המים לגובה רב יותר. החישוב מראה כי מים יטפסו לגובה של 14.87 מטר בצינור נימי בקוטר $1\mu\text{m}$, אך אין צינורות מוליכי מים בקוטר כזה בצמחים. מים יעלו בצינור נימי בטרקאה ממוצעת בקוטר של $100\mu\text{m}$ רק לגובה של 14.87 ס"מ! וזה כמובן לא יכול להיות הגורם לעליית המים לגובה של עשרות מטר בעצים!

מחישוב זה יוצא כי מים אינם עולים בצמח בכוחות נימיים. שתי סיבות לכך:

1. אין הכוחות הללו מספיקים כדי להעלות מים לגובה רב במערכת הצמחית.

2. בצינורות הולכת המים בצמח אין מצב "נימי", כלומר אין נוכחות של אוויר מעל המים. מערכת הולכת המים רוויה במים והם ממלאים את כל הצנרת ועמודת המים היא רציפה! יתר על כן טרכאות שיש בהן אוויר הן טרכאות שלמעשה הפסיקו להוליך מים. משיקולים פיזיקליים, בטרקאות רחבות אי-אפשר לדחוק החוצה את האוויר שבטרקאות שאינן מוליכות מים כדי שיחזרו לתפקד משום שלשם כך נדרשים לחצים של מאות אטמוספרות. לכן טרכאות שפרץ לתוכן אוויר, לא יוכלו לשוב ולהתמלא במים, או לשוב ולתפקד אלא אם כן הן צרות (כמו במקרה של קפיאת המים בצנרת בחורף ושחרור האוויר שכלוא בקרח לאחר ההפשרה באביב) והאוויר שבהן נמס בתוך המים.

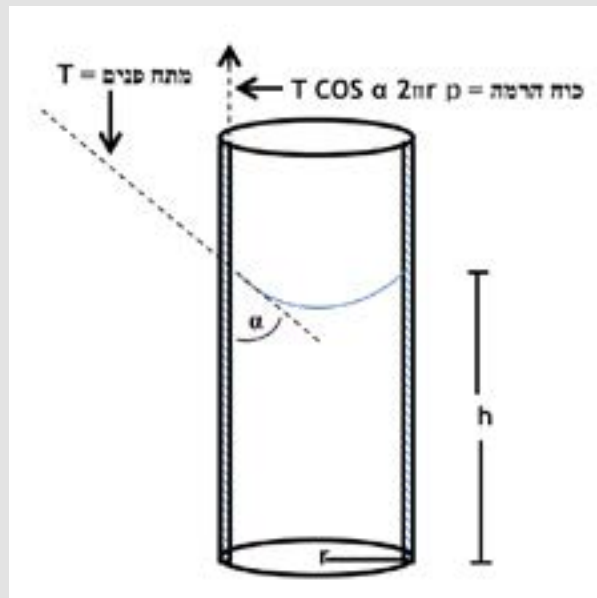
בצמחים ישנם שני סוגי רכיבים המובילים מים והם נוצרו מתאים מתים: טרכאות וטרכאידים. הטרקאות הם צינורות הבנויים מחוליות היושבות זו על גבי זו ונקבים ביניהן. כל חוליית טרכאה נוצרה מתא אחד שמת ונותרה רק דופןו אך לפני שמת נוצרו נקבים בדפנו הרוחב שלו. טרכאידים הם תאים בודדים, מתים, החופפים בקצותיהם אלה את אלה ואינם יוצרים מבנה צינורי כמו בטרקאות. קוטר הרכיבים המובילים מים בצמחים נע בין $30\mu\text{m}$ ל- $500\mu\text{m}$ בטרקאות וכ- $20\mu\text{m}$ ל- $30\mu\text{m}$ בטרכאידים. המוליכים הטובים ביותר הם טרכאות בצמחים דו-פסיגיים ובמטפסים (שקוטרן כחצי מ"מ) והגורעים ביותר הם טרכאידים, המשמשים לצד הטרקאות בצמחים מכוסה הזרע ונפוצים בחשופי הזרע באופן בלעדי במערכת הולכת המים. אם כן, בעזרת נוסחאות פיזיקליות אפשר לחשב את כוח הנימיות שמבטא את הקשר שבין כוחות התאחיזה של המים בדופנות הצינורית, את זווית הטיפוס של המים בדופנות הכלי ואת גובה פני המים בצינור נימי. נשאלת השאלה - לאיזה גובה יעלו מים בצינור נימי שקוטרו כשל טרכאה רחבה בקוטר ממוצע של $100\mu\text{m}$? כוחות התאחיזה שבין מולקולות המים לדופנות צינורות ההובלה זהים כמעט לכוחות התאחיזה שבין מולקולות המים לדופנות הצינור הנימי העשוי מזכוכית (תמונה 4) ולכן אפשר לבצע את הניסוי בצינור קפילרי מזכוכית. מובן שכל שקוטר הצינור

מדוע המים אינם עולים בלחץ השורש?

בצמחים מסוימים, בעיקר במטפסים, בשעות הבוקר אפשר למדוד לחץ שורש. בצמחים עשבוניים, חד-פסיגיים ודו-פסיגיים, אפשר לראות בשעות הבוקר המוקדמות טיפות מים זעירות בקצות העורקים שבשפת העלים. טיפות אלה אינן טל, אלא מוהל המים שבעצה הנדחף החוצה בלחץ והתופעה מכונה דמיצה (Guttation). כובע הנזיר (Tropaeolum) ויהודי נודד (Tradescantia) הם צמחים מצוינים להמחשת תופעה זו (תמונה 5). הטיפות מופרשות מהטרקאות דרך רקמות מיוחדות הנמצאות בקצות העורקים של העלה ומכונות הידטודות. הטיפות מעידות על קיומו של לחץ שורש, אך הן נעלמות לאחר זריחת החמה, בשעות שהצמח נזקק למים. דוגמה נוספת אפשר לראות בענף של גפן (Vitis). אם גוזמים ענף של גפן בשעות הבוקר, מוהל המים שבמערכת ההובלה יופיע כטיפות על פני שטח החתך של הזמורה המחוברת לגפן. טיפות של תמיסת מים יזלגו משטח החתך במשך דקות ארוכות בשעות הבוקר. משמעות הדבר היא שהמים שבמערכת העצה של הגפן (או צמחים מטפסים) אכן שרויים בלחץ המכונה לחץ השורש. אילו המים היו שרויים ב"מתח מים" (ב"לחץ שלילי"), הם היו נסוגים משטח החתך פנימה ולא היינו מבחינים בהם על פני שטח החתך. לחץ שורש נוצר בדרך כלל במהלך הלילה, כשהדיות

(הטרנספירציה) נמוכה ולחות הקרקע גבוהה. הלחץ נוצר בגלל הפרשת יונים לתוך מערכת הולכת המים (העצה) באמצעות שכבת האנדודרמיס, השכבה הפנימית של הקליפה העוטפת את הגליל המרכזי שבו נמצאות מערכות ההובלה, העצה, מערכת הולכת המים, והשיפה, מערכת הולכת המוטמעים. כשתנועת המים במערכת פוסקת, או שהיא אטית מאוד במהלך הלילה והדיות מזערית היונים המופרשים מהאנדודרמיס מצטברים בצינורות העצה שבמערכת השורשים ובעקבותיהם חוזרים גם מים מהקרקע למערכת ההובלה בשורש וגורמים להתפתחות לחץ הידרוסטטי הדוחף את התמיסה כלפי מעלה. תופעת לחץ השורש אינה יכולה להסביר את תנועת המים מהשורשים אל העלים מכמה סיבות:

1. לחץ שורש מתפתח רק בקבוצות מסוימות של צמחים (בדרך כלל עשבוניים ומטפסים).
2. גם בצמחים שמתפתח אצלם לחץ שורש הוא נעלם במהלך שעות הבוקר ובמקומו מתפתח מתח מים. בשעות החמות של היום, כשהצמח דורש אספקת מים ניכרת לעלים, פוטנציאל המים במערכת נעשה שלילי ("מתח מים") ואין מבחינים בלחץ שורש.



תמונה 4: כוח ההרמה של נוזל בצינור נימי שווה ל- $T \cos \alpha$ ככל שכוחות התאחיזה (כוחות הטיפוס) של הנוזל בדפנות הצינור הנימי חזקים יותר (והמיניסקוס של פני הנוזל קעור יותר), זווית α תהיה קטנה יותר, $\cos \alpha$ גדל, וכוח ההרמה עולה בהתאם.



תמונה 5: דמיעה (Guttation) בעלים של כובע הנזיר (Tropaeolum). התופעה מופיעה בשולי העלה, בנקודת הקצה של צורות ההובלה ונראית רק בשעות הבוקר המוקדמות. בשעות הבוקר המאוחרות, עם התגברות הדיות, נעלמות הטיפות.

2. כוחות התאחיזה החזקים שבין מולקולות המים לבין עצמן.

3. המתח נוצר במסת המים בתוך מערכת ההובלה. הערכים השליליים ביותר של פוטנציאל המים הם בעלים ומשם מתפתח מפל של מתח לאורך הצמח עד לשרשים.

יוצא מזה שהמים זורמים על פי הכללים שלמדנו קודם לכן: מפוטנציאל מים גבוה (בשרשים) לפוטנציאל מים נמוך (בעלים ובאוויר), אלא שכיוון הזרימה בצמח הוא כלפי מעלה ועמודת המים היא רציפה (אין נימיות!).

לשם המחשה אפשר לראות את עמודת המים בצמח כעשויה מחוליות של מולקולות הקשורות זו לזו כמו בשרשרת, בכוחות תאחיזה של קשרי מימן, ונסחבות מלמעלה. כשחוליה אחת ניתקת מהעלה לאוויר נוצרת מתיחה (משיכה) של כל החוליות כלפי מעלה והמתח הנוצר מגביר את כוחות היניקה של המים מהקרע על ידי השרש. הלוח שלהלן מדגים הפרשים משוערים בפוטנציאל המים מהקרע, דרך הצמח, לאוויר.

ההפרשים בפוטנציאל המים לאורך המסלול מראים כי הכוח המניע את תנועת המים בצמח הוא הדיות. מולקולות מים עוזבות את העלה במהירות רבה יחסית כי האוויר "יבש", ומושכות אחריהן את מסת המים למעלה. דומה הדבר לפתיל הטבול במים שקצהו העליון באוויר. אפשר להוכיח זאת במספר רב

3. בעצים הגבוהים ביותר על פני כדור הארץ, איקליפטוסים (Eucalyptus) באוסטרליה (מכוסה זרע, שעיקר הולכת המים בו נעשה בטרקאות) ועצי סקוויה (Sequoia) בקליפורניה (חשוף זרע, שעיקר הולכת המים בו נעשה בטרקאידים), אין מבחינים בלחץ שורש כלל.

4. ערכי הלחץ שנמדדו בשעות המוקדמות של הבוקר אינם מספיקים כדי להעלות את תמיסת המים בעצה לגובה רב. הערך המקסימלי של לחץ, שנמדד בצמחים מטפסים, הוא 0.6 מגה-פסקל. פסקל היא יחידת לחץ בדומה ל"אטמוספירה", "בר", "טור" ו"פסי" (מגה-פסקל אחד, או 106 פסקל, שווה ל-10 בר, או ל-9.8 אטמוספרות). באופן תאורטי, לחץ של 0.6 MPa יכול לדחוף מים לגובה של כ-60 מטר, אך בהתחשב בכבידה המתנגדת לעליית המים ולחיכוך במערכת ההובלה, הערך המעשי יהיה כמחצית מהערך התאורטי. מהשיקולים האלה יוצא שמים אינם עולים בצמחים בגלל לחץ השורש.

כיצד, אם כן, עולים המים אל צמרות עצים גבוהים? המנגנון המעלה מים בצמחים מכונה טרנספירציה (דיות)-תאחיזה (קוהזיה)-מתח. השם מרמז על שלושה כוחות הפועלים במערכת:

1. הכוח המניע את התהליך הוא הדיות מהעלים (אך גם מהענפים הצעירים).

של דרכים. אחת מהן היא השוואה של עצמת קליטת המים מהקרקע לעצמת הדיות לאורך היום (תמונה 6). דרך נוספת להוכיח, שעמודת המים בצמח נמצאת במתח ולא בלחץ, היא לחתוך ענף ולבדוק את מצב המים בשטח הפנים של שני החצאים שלו (תמונה 7). אם המים הם בלחץ, תופיע טיפת מים על שטח הפנים של המקטע התחתון המחובר לצמח (תמונה 7ב) כי הלחץ בא מלמטה. אך אין זה המצב בצמחים, חוץ מאשר במטפסים ובצמחים עשבוניים בשעות הבוקר. כשהמים נמצאים במתח, הם ייסוגו לאחור, אל תוך הצמח, משני צדי החתך (תמונה 7ג). אפשר לדמיין את עמודת המים לקפיץ מתוח האחוז בשני קצותיו ולחשוב מה יקרה לקפיץ אם ייחתך במרכזו. מובן ששני חלקי הקפיץ ייסוגו לאחור, למצב נינוח מבחינה אנרגטית. מכאן אנו למדים שהמים העולים בצמח אינם נדחפים מלמטה, אלא נמשכים מלמעלה והכוח המניע את

התהליך הוא ההפרש בין פוטנציאל המים בעלה לזה שבאוויר.

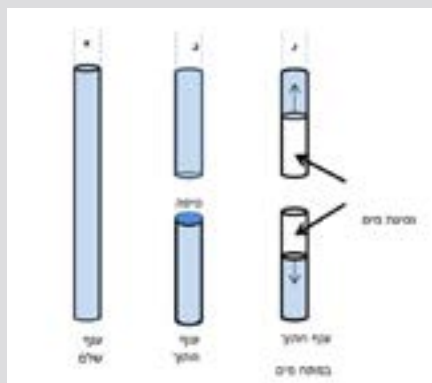
כדי לבדוק אם המנגנון של טרנספירציה-תאחיזה-מתח תקף ויכול להתקיים יש צורך לענות על שלוש שאלות:

1. האם מולקולות המים יכולות ל"אחוז" זו בזו (כוחות תאחיזה) מבלי להינתק במתחים הקיימים במערכת?

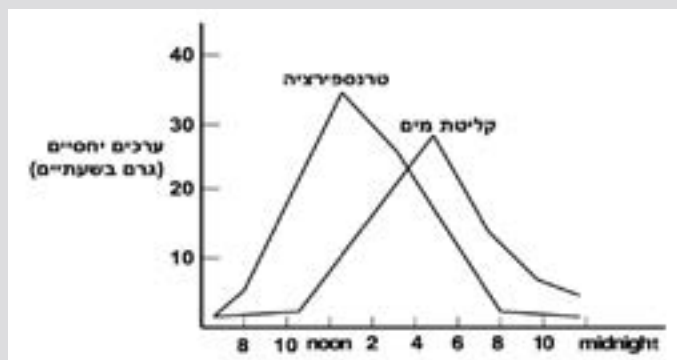
2. האם המים יוצרים עמודה רציפה בתוך המערכת?

3. האם מולקולות המים אכן נמצאות במתח בתוך המערכת?

התשובה לשלוש השאלות היא "כן".



תמונה 7: ענף או גבעול של צמח (א) שנחתך. האם הוא במצב של לחץ מים (ב) או של מתח מים (ג)? המצב הקיים בצמח הוא מתח מים ולכן המים בענף נסוגים משני צדי החתך (ג).



תמונה 6: קליטת מים ואיבוד מים (טרנספירציה, דיות) בעץ צעיר של מילה (*Fraxinus*). שימו לב ש'הסובב' (הגורם) הוא הדיות וה'מסובב' (התוצאה), הוא קליטת המים כי העלייה בדיות במהלך היום יוצרת מתח ומקדימה את קליטת המים.

ביבליוגרפיה

זמסקי, א. 2015. חשיבה יצירתית בהוראת מדעי הטבע. הוצאת מכון מופ"ת.

זמסקי, א. 2017. תהליכים ומנגנונים בעולם הצמחים. הוצאת מאגנס, האוניברסיטה העברית.