

## מוליכות חשמלית – לא רק בניסוי בפיסיקה

מים ממקורות שונים כגון מי שתיה, מים בקרקע ומי ים מכילים סוגים שונים של יונים וכמויות שונות של יונים. מצב דומה קיים גם בתאים של יצורים חיים.



תמיסות מימיות המכילות יונים הן מוליכות חשמל, ערך אותו אפשר למדוד באמצעות מד מוליכות<sup>1</sup>. היחידות של המוליכות הנמדדת במכשירי המדידה הן ms/cm (מילי-סימנס/ס"מ) או µs/cm (מיקרו-סימנס/ס"מ).

מה המידע שאפשר להפיק מתוצאות המדידה?

ידוע שיש יחס ישר בין ריכוז יונים בתמיסה למוליכות החשמלית של

התמיסה, ולכן הערך שנמדד במד מוליכות מבטא את ריכוז היונים בתמיסה.

מכאן שאפשר להשתמש במד מוליכות ולקבל ערך מספרי המאפיין תמיסות של קרקעות ממקורות שונים, כגון קרקעות שנלקחו ממרחקים שונים מקו המים בים. אפשרות אחרת היא להכין מיצויים מימיים מתאים של צמחים שעברו טיפולים שונים ולהשוות בין ערכי המוליכות שיתקבלו או להשרות במים רקמות של צמחים שעברו טיפולים שונים.

החיסרון של השימוש במד מוליכות הוא שתוצאת המדידה אינה ספציפית ליונים מסוימים. יש מדי מוליכות שבהם האלקטרודה נמצאת בתוך כיסוי עבה העשוי מחומר פלסטי (ראו תמונה) ולכן אי אפשר לטבול אותה במבחנה. במקרים אלה מומלץ להכניס כ- 10 מ"ל מהתמיסה הנבדקת לכוס קטנה לשימוש חד פעמי או להכין נפח יחסית גדול (15 - 25 מ"ל) של דגימה בכלי מתאים כך שהאלקטרודה תהיה טבולה בתמיסה הנבדקת.

אם אין מד מוליכות במעבדה לביולוגיה, כדאי שתבדקו, אולי הוא מצוי במעבדה לכימיה או במעבדה לפיזיקה.

**בהמשך מתוארות שתי דוגמאות לבדיקת משתנה תלוי באמצעות מד מוליכות.**

<sup>1</sup> לדוגמה: [מד מוליכות 1](#), [מד מוליכות 2](#). לפני רכישת מד מוליכות חשוב להתייעץ עם ספקים לצידוד מעבדה בנוגע לבחירת מכשיר שטווח הערכים שאפשר למדוד בו יתאים לצרכים שלכם.

## דוגמה 1

מדידת המוליכות בתמיסה לניסויים בהם בודקים את השפעת טמפרטורות קיצוניות או חומרים מיוחדים על יציאת יונים מהתאים אל תמיסה חיצונית בה הם מושרים.

### כלים וחומרים

- סכין לחיתוך
- עט לסימון על זכוכית
- 6 מבחנות רגילות
- 10 - 12 עלים טריים של בצל ירוק
- 6 שקיות ניילון קטנות (גודלן כשקיות להכנת כריכים)
- 6 מדבקות לסימון השקיות
- מד טמפרטורה שמתאים למדידה בתא ההקפאה ( $20^{\circ}\text{C}$  – או טמפרטורות נמוכות יותר)
- תא הקפאה

### מהלך העבודה

מהלך זה מתאים לניסויים בהם המשתנה התלוי הוא מידת הנזק שנגרם לתאי צמח ודרך המדידה של משתנה זה היא מוליכות התמיסה בה הושהו תאי הרקמה. המהלך המתואר מתייחס למקרה בו המשתנה הבלתי תלוי הוא משך החשיפה של עלי בצל לטמפרטורה נמוכה מאד.

1. בחרו עלים טריים של בצל ירוק, במספר שיתאים לכל הטיפולים.
2. חיתכו מהעלים חלקים באורך 7 ס"מ.
3. חלקו את העלים לקבוצות (כמספר הטיפולים) שבכל אחת מהן 2 – 3 חלקים של עלים. מיינו את חלקי העלים, כך שבכל קבוצה יהיו חלקי עלים בגודל דומה.
4. הכינו מדבקות ורשמו על כל מדבקה את משך הזמן שתשהו את חלקי העלים בתא ההקפאה. הדביקו מדבקה על כל אחת מהשקיות. ייחדו קבוצה אחת לבקרה, כלומר 0 דקות של שהיית עלי בצל ירוק בהקפאה. הכניסו לכל שקית קבוצה של חלקי עלים וסגרו את השקית.
5. מדדו את הטמפרטורה של תא ההקפאה שבמקרה ורשמו ערך זה.
6. הכניסו לתא ההקפאה שקית ובה עלים שמשך שהייתם בתא ההקפאה הוא הארוך ביותר. הכניסו בהדרגה את שאר השקיות לפי תכנון זמן ההשהייה בתא ההקפאה.

**מידת הפגיעה בקרום מתבטאת בדיפוזיה של חומרים מתאי הבצל אל הסביבה החיצונית.  
בדיקת המוליכות תתבצע לאחר הוצאת העלים מתא ההקפאה והשרייה במים של כל אחת  
מקבוצות העלים במשך כ- 20 דקות.**

7. הכינו מבחנות מסומנות ומתאימות לגודלם של חלקי העלים והוסיפו לכל אחת 10 מ"ל מים מזוקקים.
8. לאחר שכל שקית שהתה בתא ההקפאה את פרק הזמן שתכננתם מראש, הוציאו את כל הקבוצות מתא ההקפאה והעבירו כל קבוצה של עלים למבחנה המתאימה והמסומנת. העבירו למבחנה המסומנת "בקרה" את העלים המתאימים (בקרה ללא הקפאה). אם חלקי העלים לא מכוסים במים, הוסיפו נפח זהה של מים לכל אחת מהמבחנות. רשמו את השעה.
9. לאחר 20 דקות הוציאו את חלקי העלים מכל טיפול ומדדו את המוליכות בנוזל שבמבחנות בכל אחד מהטיפולים והבקרות (בקרה ללא רקמה ובקרה ללא הקפאה). הקפידו לשטוף במים מזוקקים את האלקטרודה לאחר כל מדידה ומדידה. רשמו את כל התוצאות.
10. אם ברשותכם מד מוליכות שהאלקטרודה שלו נמצאת בתוך כיסוי עבה, השאירו את העלים בכל אחת מהמבחנות והעבירו מכל אחת מהן את הנוזל לכוסית חד פעמית קטנה ונקיה. בצעו את המדידות כמפורט בסעיף 9 לעיל.

**הערות לגבי הכנות לניסוי**

- א. המיון של חלקי העלים חשוב מכיוון שבין עלי הבצל יש עלים דקים ויש גם עבים יותר. צפוי שהמסה של העלים תהיה דומה בכל הקבוצות, אך היא בוודאי לא תהיה שווה. לכן מומלץ לשקול כל קבוצה של עלים בטיפול מסוים לפני הכנסתם לשקית (סעיף 4). בסיום הניסוי (סעיף 10) יש לייחס את הערך של המוליכות שנמדד בכל קבוצה למשקל ההתחלתי של חלקי העלים בקבוצה.
- ב. חשוב מאד למדוד גם את המוליכות של המים המזוקקים בהם השתמשתם בניסוי (בקרה ללא רקמה). ערך זה הוא המוליכות ההתחלתית בכל הטיפולים. אפשר להתחשב בערך זה בעיבוד תוצאות הניסוי.
- ג. מאזור החיתוך של העלים יש דליפה של תוכן התאים החתוכים וכתוצאה מכך יש מומסים בתמיסת ההשריה שאינם קשורים לטיפולים בניסוי. לכן, חשוב שחלקי העלים שמכינים יהיו בגודל המרבי המתאים למבחנות רגילות ולא חתוכים לפיסות קטנות. חשוב גם למדוד את המוליכות בטיפול הבקרה בו יש רקמה שלא הוקפאה.
- ד. אם רוצים לבדוק את ההשפעה של חומרים כגון אלכוהול או דטרגנט, או את השפעת דרגת pH של התמיסה על יציאת יונים מהתאים, יש לנקוט משנה זהירות ולא להשתמש במד מוליכות אלא אם היצרן או היבואן אישר שחומרים אלה לא פוגעים באלקטרודה או בחלק אחר של מד המוליכות שברשותכם.

## הערות לגבי ביצוע ניסוי ושיטת המדידה

- ה. הכנסת השקיות לתא ההקפאה בצורה מדורגת תאפשר להוציא את כולן באותו זמן. לסדר פעולות כזה יש יתרון מבחינת הנוחות של ביצוע השלבים הבאים במהלך העבודה.
- ו. טמפרטורה של נוזל משפיעה על הערך שיימדד במד מוליכות. ברוב המכשירים מתבצע "תיקון אוטומטי" של ערך זה. צפוי שלאחר 20 דקות מחוץ לתא ההקפאה הטמפרטורה בכל המבחנות תהיה דומה (סעיף 9).
- ז. אם המוליכות של תמיסה בה הושרו עלים שהוקפאו גבוהה מהערכים שנמדדו במבחנות הבקרה (במבחנה ללא רקמה ובמבחנה עם רקמה, אך ללא הקפאה) ניתן להסיק שיונים יצאו מהתאים בהשפעת ההקפאה. צפוי שהפגיעה תהיה משמעותית יותר ככל שמשך ההשקות של קטעי העלים בתא ההקפאה יהיה ארוך יותר.

## דוגמה 2

מדידת המוליכות בתמיסה מתאימה לניסויים בהם בודקים את השפעת ריכוז המלח (לדוגמה NaCl) בתמיסות גידול על תכולת יונים בתאים של צמחים שגדלו בתמיסות אלה.

### כלים וחומרים

- נבטי חיטה או צמחים צעירים של חיטה וכלים מתאימים להנבטה
- תמיסות NaCl בריכוזים שונים (לדוגמה: 0M - 0.25M)
- מכתש ועלי
- מים מזוקקים

### מהלך העבודה

- בדקו בניסוי מקדים את הטווח המתאים של המשתנה הבלתי תלוי בניסוי (ריכוז תמיסות NaCl בהן מגדלים את הצמחים) ואת משך הניסוי עד להתפתחות מתאימה של עלים ושורשים.
1. השרו זרעי חיטה במים למשך כיממה והנביטו את הזרעים המותפחים עד להצצת שורשון.
  2. התבססו על הניסוי המקדים והכינו תמיסות NaCl בטווח הריכוזים הרלוונטי לניסוי.
  3. העבירו את הזרעים שבהם הציצו שורשונים לכלים שיאפשרו צמיחה והשקיה סדירה. בניסוי מקדים יש לבחון אחת משתי האפשרויות האלה: השקיה ראשונה בתמיסת מלח בריכוז המתוכנן והשקיה במי ברז במהלך הצמיחה או השקיה בתמיסת מלח בריכוז המתוכנן במשך כל תקופת הצמיחה (ראו הערה א עמוד 5).

4. בסיום הניסוי, בכל טיפול הפרידו משאריות הזרעים את העלים ואת השורשים. העבירו כל קבוצה של עלים או של שורשים לכלי מתאים ומסומן.
5. שטפו **בנפרד** שורשים מכל אחד מהטיפולים, עשו זאת כך:
  - הכניסו שורשים מטיפול מסוים לתוך מסננת וטבלו אותה בכלי גדול ובו מים מזוקקים.
  - הוציאו בזריזות את המסננת עם השורשים מהמים.
  - החליפו את המים המזוקקים שבכלי הגדול וחזרו על השטיפה והוצאת המסננת מהמים.
  - הניחו לזמן קצר את השורשים על פיסת נייר מגבת נפרדת ומסומנת.
6. נגבו בעדינות את השורשים שבכל האחת מהקבוצות. שקלו את העלים של כל קבוצה בנפרד ורשמו את התוצאות.
7. הכינו מיצויים מימיים של שורשים מכל טיפול.
8. מדדו את המוליכות בכל מיצוי שהכנתם ורשמו את התוצאות (ראו הערות בסעיפים ג, ד, שבהמשך).

## הערות לגבי ביצוע ושיטת המדידה 2

- א. מומלץ להכין **לפחות 20** זרעים בכל טיפול (ריבוי פריטים).  
בדקו בניסוי מקדים מהו מספר הזרעים שיש להכין בכל טיפול כדי לקבל נפח מתאים של מיצוי שיידרש כדי לבדוק את המוליכות.  
לגבי דרך ההנבטה מומלץ לקרוא הנחיות מפורטות בקובץ [הנבטה, שיטות והמלצות](#). על דרך ההשקיה מומלץ לקרוא בקובץ [השקיה בניסויים ארוכי טווח](#).
- ב. המטרה של שטיפת השורשים בתום הניסוי היא להרחיק את שאריות המלח שנמצאות מחוץ לתאים. חשוב שהשטיפה תהיה קצרה כדי שלא יצאו מלחים מתוך התאים למי השטיפה. הייבוש העדין של השורשים יצמצם את נפח המים שעל השורשים.
- ג. בסעיפים 5-7 לא נכללה הנחיה לשטוף את העלים לפני הכנת המיצוי. הסיבה היא שבמהלך הניסוי העלים לא באו במגע עם תמיסות המלח בעוד שהשורשים היו טבולים בהן ויתכן שהשטיפה לא הסירה את כל המלחים שמחוץ לתאי השורשים. לכן, הערך של המוליכות שיתקבל במיצוי העלים הוא **מהימן** מזה שיתקבל במדידת המוליכות במיצוי השורשים.

- ד.** הצמחים שצמחו בתמיסות שלהן ריכוז גבוה של מלח יהיו פחות מפותחים מאלה שצמחו במים או בתמיסות שלהן ריכוז מלח נמוך. לכן, צפוי שנפח המיצי שתכינו מהצמחים הפחות מפותחים יהיה קטן בהשוואה לנפח שתקבלו מצמחי אחרים. במקרה זה יש למהול את המיצי ולאחר קריאת המוליכות במד יש להכפיל את הערך שנמדד בפקטור המיהול. אם ברשותכם מד מוליכות שהאלקטרודה שלו מכוסה בכיסוי עבה, סביר שצריך יהיה למהול גם את המיצויים שהכנתם מחלקי צמחים שגדלו בריכוזים נמוכים של מלח. חשבו את המוליכות של המיצויים בכל טיפול. רשמו את התוצאות.
- ה.** מומלץ לייחס את הערך של המוליכות למשקל הצמחים בכל טיפול.
- הערה:** מומלץ לתכנן את הניסוי כך שיהיה עודף של עלים ושורשים בכל טיפול. אפשר להשתמש בעודף זה כדי למצוא מהו המשקל היבש בכל קבוצה. את הערך הנמדד של המוליכות יש ליחס למשקל היבש של כל קבוצה.