

# מיפוי פוטנציאל חשמלי

## מבוא

בניסוי זה אתם תמפו את הפוטנציאל החשמלי הדו-ממדי שנוצר בדף בעל התנגדות, כתוצאה ממערך נתון של אלקטרודות בהן מאולץ הפרש מתחים. מיפוי הקווים שווי-הפוטנציאל על הדף מדגים את השתנות הפוטנציאל החשמלי בחומר מוליך. בניסוי, אתם תשוו התפלגות זו לפתרון של משוואת לפלס המתאר את המערכת, ומקביל במובנים רבים לפתרון של משוואת לפלס עבור התפלגות של מטענים חשמליים במרחב.

## שדה חשמלי

השדה החשמלי  $\vec{E}$  בנקודה כלשהי במרחב מוגדר כווקטור שכיוונו ככיוון הכוח הפועל על מטען חיובי נקודתי וגודלו כגודל הכוח הפועל על יחידת מטען. כלומר  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$ , כאשר  $\vec{F}$  הוא הכוח הפועל על המטען  $q_0$  בנקודה בה מחושב השדה החשמלי  $\vec{E}$ . יחידות השדה החשמלי הינן ניוטון לקולון ( $N/C$ ) או וולט למטר ( $V/m$ ).

## פוטנציאל חשמלי

במרחב בו פועל שדה חשמלי, הפוטנציאל החשמלי  $V$  מוגדר כעבודה החיצונית שיש להשקיע כנגד הכוחות החשמליים כדי להזיז מטען חיובי מרמת ייחוס שרירותית מוסכמת (בדרך כלל באינסוף) ועד נקודה נתונה במרחב. פוטנציאל חשמלי נמדד ביחס לרמת הייחוס (בדומה לאנרגיה כובדית) ולכן יש משמעות פיזיקלית רק להפרש פוטנציאלים (מתח חשמלי) בין שתי נקודות במרחב. כאשר מתרחשת תזוזה של מטען מנקודה  $A$  לנקודה  $B$ , העבודה החשמלית המושקעת הינה:

$$W = \Delta U = - \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = -q_0 \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = -q_0(V_B - V_A) = q_0 \Delta V \quad (1)$$

העבודה הינה גם השינוי באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המערכת  $\Delta U = U_B - U_A$ . האנרגיה הפוטנציאלית ליחידת מטען  $U/q_0$  אינה תלויה בערך של מטען הבדיקה  $q_0$  וניתן להגדיר אותה גם כן כפוטנציאל החשמלי, בדומה לפוטנציאל גובה. הפרש הפוטנציאלים והשינוי באנרגיה הפוטנציאלית קשורים לפי  $\Delta U = q_0 \Delta V$ . היחידות עבור הפרש הפוטנציאלים הן ג'אול לקולון ( $J/C$ ) או וולט ( $V$ ).

## הקשר בין שדה חשמלי ופוטנציאל חשמלי

השדה החשמלי  $E$  והפוטנציאל החשמלי  $V$  קשורים במשוואה 1 ע"י  $\Delta V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$ . את הפרש הפוטנציאלים  $dV$  בין שתי נקודות במרחק  $ds$  זה מזה ניתן לבטא כ-

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

ומתקיים

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3)$$

השדה החשמלי מצביע בכיוון הירידה המקסימלית בפוטנציאל החשמלי. כלומר, הפוטנציאל הגבוה דוחה את המטען החיובי.

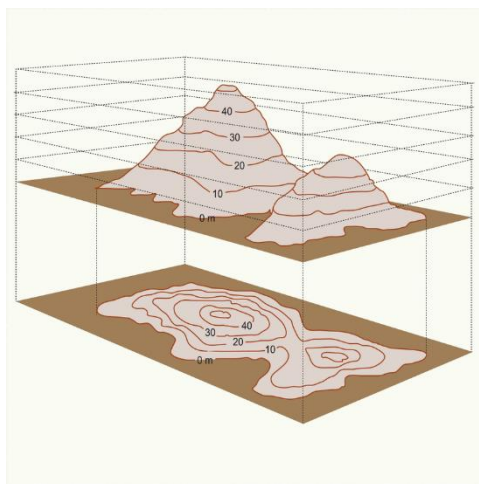
## קווי שדה חשמלי ומשטחים שווי פוטנציאל

השדה החשמלי מיוצג על ידי קווים שכיוונם ככיוון השדה. קווים אלו הינם דמיוניים ומסומנים עליהם חיצים המצביעים על כיוון ווקטור השדה החשמלי. באזורים שבהם גודל השדה חזק יותר נהוג לשרטט קווי שדה צפופים יותר.

משטח שווה פוטנציאל הוא משטח המורכב מאוסף כל הנקודות בהן הפוטנציאל החשמלי שווה לערך נתון. מכיוון שעל המשטח הפוטנציאל קבוע, לא נעשית עבודה כאשר מזיזים מטען מנקודה אחת לאחרת על המשטח. הדבר מקביל להזזת מסה בתנועה בגובה קבוע בשדה הכבידה.

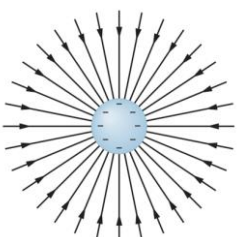
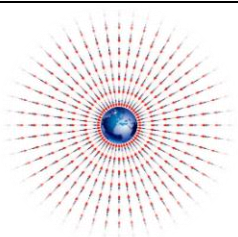
לפי נוסחה 3, קווי השדה החשמלי תמיד מאונכים למשטחים שווי פוטנציאל. הדבר דומה למפה טופוגרפית (איור 1). ניתן להקביל את המשטחים שווי הפוטנציאל לקווי גובה (פוטנציאל גובה) ואת השדה החשמלי לשדה הכבידה. בטבלה 1 מוצגת השוואה בין שדה חשמלי לשדה הכבידה. הדמיון בין השדות מאפשר לפתח אינטואיציה עבור השדה והפוטנציאל החשמליים של התפלגות מטענים.

בניסוי אתם תמדדו את הפוטנציאל בנקודות שונות על דף בעל התנגדות, תמפו קווים שווי פוטנציאל בדף (שקולים למשטחים שווי פוטנציאל במרחב תלת ממדי) ותסיקו מהם את קווי השדה החשמלי שבדף.



איור 1: מפה טופוגרפית בה ניתן לראות קווים שווי פוטנציאל גובה.

טבלה 1: השוואת שדה חשמלי לשדה כבידה

שדה חשמלי	שדה כבידה
בנוכחות שדה חשמלי יופעל על מטען כוח.	בנוכחות שדה כבידה יופעל על מסה כוח.
גודל השדה החשמלי	גודל שדה הכבידה
$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$	$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$
גודלו של הכוח החשמלי בין שני מטענים	גודלו של כוח הכבידה בין שתי מסות
$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$	$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
כיוונו של הכוח החשמלי הינו דחייה או משיכה.	כיוונו של כוח הכבידה הינו משיכה בלבד.
	

## משוואת פואסון ושיטת הדמויות (מטעני דמות)

משוואת פואסון מקשרת בין הפוטנציאל להתפלגות מטען ע"י המשוואה:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0} \quad (4)$$

כאשר  $\rho(\vec{r})$  הוא צפיפות המטען ליחידת נפח ונמדד ביחידות של קולון למטר מעוקב ( $C/m^3$ ). המקרה הפרטי של משוואת פואסון, באזור ריק ממטענים ( $\rho(x, y, z) = 0$ ), נקרא משוואת לפלס:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (5)$$

ובקואורדינטות גליליות המשוואה נכתבת כך:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

פתרון המשוואה הוא הפוטנציאל בכל נקודה במרחב בה אין מטען, עבור תנאי שפה מסוימים. מכך נובע שאם נתונות שתי התפלגויות מטענים שונות שגורמות לתנאי שפה זהים בתחום כלשהו – הפוטנציאל באותו תחום יהיה זהה (יחידות הפתרון של משוואת לפלס).

בנוסף משוואת פואסון היא לינארית ולכן ניתן לסכום את הפתרונות שלה (עקרון הסופרפוזיציה). לדוגמה: הפוטנציאל של מטען נקודתי המונח ליד תיל טעון בצפיפות אחידה, בכל נקודה במרחב בה אין מטען, יהיה הסכום של הפוטנציאל של מטען נקודתי וזה של התיל. באופן זה, ידיעת מספר מצומצם של פתרונות מאפשרת לפתור מערכות מסובכות יותר.

נשתמש בסופרפוזיציה וביחידות הפתרון בדוגמה הבאה:

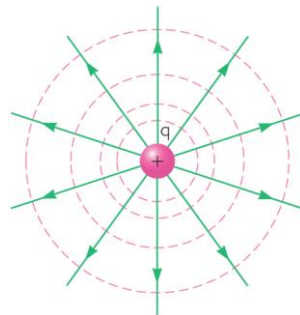
### פוטנציאל של מטען נקודתי

עבור מטען נקודתי  $q$ , הנמצא בנקודה  $\vec{r}_0$ , הפוטנציאל בכל נקודה במרחב הינו:

$$V(\vec{r}) = \frac{kq}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}_0|} \quad (7)$$

כאשר  $k \approx 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$  הינו קבוע קולון ו- $\epsilon_0 = 8.8541 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$  הינו המקדם הדיאלקטרי של הריק.

ניתן לראות באיור 2 את קווי שווי הפוטנציאל (מעגלים) ואת קווי השדה (חיצים) של מטען נקודתי חיובי הנמצא בראשית הצירים.



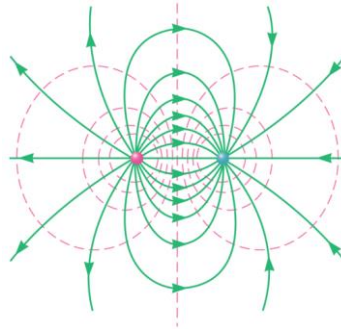
איור 2: פוטנציאל ושדה חשמלי של מטען נקודתי. קווי השדה מופיעים בירוק וקווים שווי פוטנציאל בוורוד.

**פוטנציאל של דיפול חשמלי**

הדיפול החשמלי הוא מערכת הבנויה משני מטענים שווים בגודלם והפוכים בסימנם  $\pm q$  במרחק  $2x_0$  זה מזה. מעקרון הסופרפוזיציה, הפוטנציאל החשמלי בכל נקודה במרחב הוא סכום של הפוטנציאל של המטען החיובי והמטען השלילי והינו:

$$V(x, y, z) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\sqrt{(x-x_0)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{-q}{4\pi\epsilon_0\sqrt{(x+x_0)^2 + y^2 + z^2}} \quad (8)$$

באיור 3 ניתן לראות את הפוטנציאל והשדה החשמליים של הדיפול.



איור 3: פוטנציאל ושדה חשמלי של דיפול חשמלי.

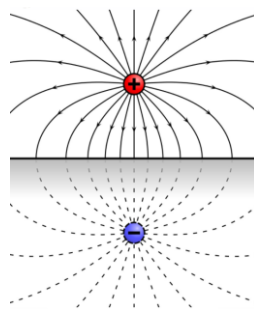
נשים לב שכל נקודה על ציר  $y$  נמצאת במרחק שווה משני המטענים, ולכן על הציר עובר הקו שווה הפוטנציאל של הערך של 0.

**פוטנציאל של מטען נקודתי ליד לוח מוליך מוארק**

מערכת זו כבר "מסובכת" יותר לפתרון בעזרת משוואת פואסון, כיוון שהתפלגות המטען על הלוח המוליך אינה ידועה. עם זאת, ידוע כי בגלל שהלוח מוליך, תיווצר עליו התפלגות מטען שתגרום לקווי השדה לחצות אותו בניצב ושהפוטנציאל עליו קבוע. כלומר, הלוח המוליך קובע תנאי שפה על הפוטנציאל. במקום לפתור את משוואת פואסון, נשתמש בשיטת הדמויות, בה מוסיפים למערכת מטעני דמות דמיוניים שיוצרים את תנאי השפה הדרושים. אז, הפתרון למשוואת פואסון מתקבל בעזרת פתרונות ידועים ושימוש ביחידות הפתרון.

נשים לב כי אם נוסיף למערכת הדיפול לוח מוליך על ציר  $y$ , ההוספה לא תשנה את הפוטנציאל במרחב כיוון שהוא קבוע על הציר והדרישה של פוטנציאל קבוע על המוליך כבר מתקיימת (יחידות הפתרון). עם זאת, ברור לנו כי הוספת הלוח ממסכת את המטענים זה מזה, והסרה של אחד מהם כעת לא תשנה את הפתרון בחצי המרחב של המטען השני.

בכך, אנו נשארים עם מטען נקודתי ליד לוח מוליך – כאשר הפתרון בחצי המרחב זהה לזה של דיפול (מיחידות הפתרון – אותם תנאי שפה ייתנו את אותו הפוטנציאל) והפתרון בחצי המרחב השני הוא פוטנציאל 0 אחיד. ראו איור 4.



איור 4: מטען נקודתי מעל לוח מוליך, הדגמת שיטת הדמויות.

**נכליל:** בשיטת הדמויות נרצה לנתח את הפוטנציאל של מערכת של מטענים נקודתיים ליד מוליכים באמצעות הוספת מטעני דמות "שמייתרים" את המוליכים (= יוצרים עליהם פוטנציאל קבוע). אז, נחשב את הפוטנציאל לפי עקרון הסופרפוזיציה - נסכם את התרומה מכל מטען נקודתי. באופן זה אנחנו לא מחשבים מפורשות את התפלגות המטען על המוליך וגם משתמשים בפתרון ידוע (של מטען נקודתי) במקום לפתור את משוואת לפלס עצמה עבור סט של מטענים.

כדי ליצור את הפוטנציאל הקבוע על המוליך, מטעני הדמות שמוסיפים מקיימים סימטריה סביב המוליך. לכן, ניוחש אינטואיטיבי היכן למקם אותם יהיה לחשוב על המוליך כמו על מראה ואז להוסיף את מטעני הדמות היכן שהשתקפויות המטענים האמיתיים צריכות להופיע.

## הקשר בין קווי השדה החשמלי בריק לבין קווי צפיפות הזרם בדף בעל התנגדות

בניסוי אתם תמפו פוטנציאל על דף עם ציפוי פחם שהופך אותו לבעל התנגדות משטחית של  $5k\Omega$  לריבוע. הנגד המשטחי הזה הוא בעל מוליכות נמוכה יחסית למוליכים בהם אנו משתמשים להעברת זרם חשמלי, כמו חוטים. עדיין, הדף מוליך בצורה מספיק טובה כך שעבור הפרש מתחים בין אלקטרודות שמחוברות לדף יזרום בו זרם המקיים את חוק אוהם  $I = \frac{V}{R}$ .

ההתנגדות  $R$  של כל נגד תלויה בהתנגדות הסגולית שלו  $\rho$ , מאורך  $L$  ושטח הנגד  $A$  ע"פ הנוסחה  $R = \frac{\rho L}{A}$ . המתח ליחידת אורך קטנה מקיים  $V = EdL$  ואם נחלק את חוק אוהם ביחידת שטח  $dA$  נקבל את צפיפות הזרם  $J$ . לכן, ניתן לרשום עבור יחידת נפח קטנה:

$$J = \frac{I}{dA} = \frac{V}{RdA} = \frac{V}{\frac{\rho dL}{dA} dA} = \frac{EdL}{\rho dL} = \frac{1}{\rho} E = \sigma E \quad (9)$$

קיבלנו קשר בין צפיפות הזרם  $J$ , השדה החשמלי  $E$  והמוליכות החשמלית הסגולית  $\sigma$ . הקשר  $J = \sigma E$  הינו **חוק אוהם המיקרוסקופי**. באופן מיקרוסקופי צפיפות הזרם החשמלי נובעת מהכוח שהשדה החשמלי מפעיל על המטענים. לדף שבניסוי יש מוליכות סגולית קבועה, לכן צפיפות הזרם בו פרופורציונלית לשדה החשמלי. למרות שבדף זורם זרם, אין בו הצטברות של מטענים והתפלגות המטען בו היא 0. לכן, אם מאלצים את האלקטרודות להיות בהפרש פוטנציאלים מסוים אז הפוטנציאל בנקודות שונות בדף יקיים את משוואת לפלס בדיוק כמו בריק וכמוהו גם השדה החשמלי.

הבדל מהותי אחד בין מערכת של מטענים שיוצרים פוטנציאל בריק לבין מערכת של אלקטרודות שיוצרות פוטנציאל בדף הוא שהדף הוא מרחב דו ממדי. לכן פתרון של מטען נקודתי בתלת ממד לא יהיה נכון עבור מגעים נקודתיים על הדף.

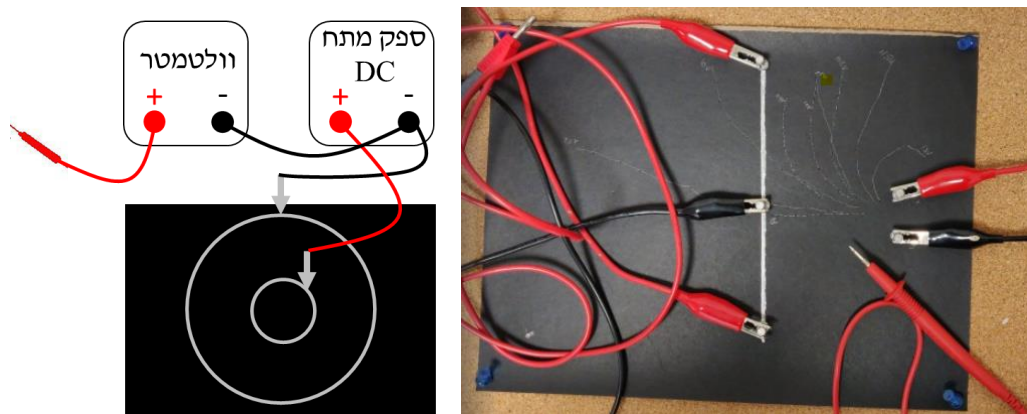
כדי לפתור את משוואת לפלס עבור הפוטנציאל שבדף, צריך להשתמש בקואורדינטות פולאריות. לחלופין, אפשר להשתמש בקואורדינטות גליליות, כאשר בציר "z" הניצב לדף אין שינויים. בקואורדינטות גליליות, הנקודה שעל הדף שקולה לתיל מוליך, פס על הדף שקול ללוח וכו'. אזי, הפתרון של הפוטנציאל על פני הדף יהיה זהה לפתרון של תילים, לוחות וגלילים תלת ממדיים.

## מערכת הניסוי

במעבדה זו תמדדו ותמפו תבניות של קווים שווי פוטנציאל. לצורך מיפוי הפוטנציאל החשמלי נשתמש בנייר מצופה פחם שחור (ראו איור 7), המאפשר למדוד את הפוטנציאל החשמלי בכל נקודה עליו. חשוב שהדף יוליך בצורה טובה אך לא טובה מדי משום שבמידה והנייר היה מוליך מצוין,  $\sigma \rightarrow \infty$ , השדה החשמלי היה שואף לאפס ואם הנייר היה מוליך גרוע,  $\sigma \rightarrow 0$ , הזרם בדף היה שואף לאפס והייתה הצטברות של מטענים (היה נוצר קבל באופן אפקטיבי).

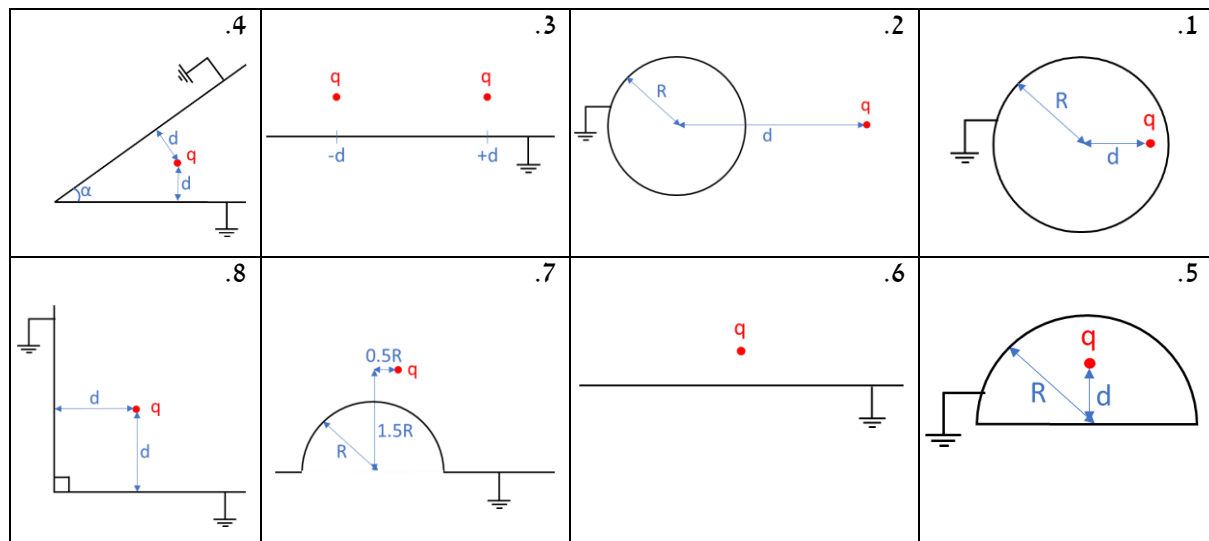
אתם תשתמשו בצבע מוליך כדי להכין מגעים על הדף בקונפיגורציות הרצויות (ראו טבלה 2). לאחר מכן, תצמידו את הדף ללוח שעם ותנעצו במגעים נעצים מוליכים, אליהם ניתן לחבר חוטים מספק המתח. באופן זה, הפרש המתחים שמייצר ספק המתח יועבר למגעים על הדף ויזרום זרם בין המגעים.

את הפוטנציאל בכל נקודה על הדף תמדדו עם וולטמטר. ההדק הנמוך יחובר להדק השלילי של ספק המתח וההדק החיובי יחובר למחט המדידה. שימו לב שמעגל זה אינו מוארק, ואין "אדמה" או פוטנציאל 0 באף נקודה. אתם תמדדו את הפוטנציאל ביחס להדק השלילי של הספק.



איור 5: תמונת של מדידת קונפיגורציה וסכימת החיבורים.

טבלה 2: הצעות לקונפיגורציות של אלקטרודות



דרכים לפתור את הפוטנציאל עבור קונפיגורציות בטבלה 2 ניתן למצוא כאן :

[https://en.wikipedia.org/wiki/Method\\_of\\_image\\_charges](https://en.wikipedia.org/wiki/Method_of_image_charges)

כמו כן, ניתן להשתמש בסימולציות של מערכי מטענים :

1. <https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields>

2. <https://www.falstad.com/vector2de/vector2de.html?f=InverseRadialDipole&fc=Floor>

<https://www.falstad.com/vector2de/vector2de.html?f=InverseRadialDipole&fc=Floor%3A%20field%20magnitude&fl=Overlay%3A%20equipotentials&d=partsvel&m=Mouse%20%3D%20Adjust%20Angle&st=19&pc=1&a1=30&ft=true&rx=63&ry=0&rz=0&zm=1.2>

כדי לצייר קווים שווי פוטנציאל או קווי שדה, אפשר להשתמש בדוגמאות הבאות :

1. <https://scipython.com/book/chapter-7-matplotlib/examples/electrostatic-potential-of-an-electric-dipole>

2. <https://www.geeksforgeeks.org/matplotlib-pyplot-streamplot-in-python>

3. <https://jakevdp.github.io/PythonDataScienceHandbook/04.04-density-and-contour-plots.html>

## שאלות הכנה

1. **ציירו** את קווי השדה של קונפיגורציה 3 באופן איכותי. **הוסיפו** את הקווים שווי הפוטנציאל. לאחר מכן, **השוו** את הציור שלכם לסימולציה או גרף מחושב.
2. **פתרו** את משוואת לפלס בקואורדינטות גליליות עבור תיל טעון. מהו הפוטנציאל כתלות במרחק מהתיל?
3. נתונים שני תילים טעונים מקבילים הנמצאים במרחק  $d$  זה מזה. **מהי הנוסחה של הפוטנציאל** לאורך הקו המחבר ביניהם (וניצב לשניהם)?
4. **פתרו** את משוואת לפלס בקואורדינטות גליליות עבור שני גלילים מוליכים קונצטריים כאשר החיצוני מוארק והפנימי מוחזק בפוטנציאל של 1V. **מהו הפוטנציאל במרחב** (בתוך הגליל הפנימי, בין הגלילים ומחוץ לגליל החיצוני)?

## מהלך הניסוי

בניסוי זה תמדדו ותמפו קווים שווי פוטנציאל וקווי שדה חשמלי על גבי דף בעל התנגדות עבור שני מערכים שונים של מוליכים (טבלה 2). את תוצאות המדידה תשוו לפתרונות התיאורטיים.

### דגשים:

1. לא לשנות את חיבורי המעגל כשספק המתח פועל. **לכבות אותו בכל שינוי.**
2. הקפידו לסגור את הפקק של שפופרת הצבע **עוד הסוף** כדי שלא תתייבש.
3. לציור מעגלים, ניתן להשתמש בשבלונות מוכנות. את הפסים יש לצייר עם סרגל. מגעים "נקודתיים" יש לצייר ככתם עגול ברדיוס הנעץ כדי להבטיח שטח מגע טוב.
4. כדי להבטיח הולכה טובה בפסים, יש לצייר פסים עבים ורציפים. **לחצו על שפופרת הצבע** תוך כדי ציור כדי להוציא מספיק צבע לשם כך. יש להתחיל בלחיצה עדינה ולהגביר לפי הצורך.
5. את הנעצים המוליכים **יש לנעוץ "עוד הסוף"** לתוך השעם בשביל שיהיו מוליך טוב. מומלץ להיעזר במשטח הסרגל לשם כך. בסיס הנעץ צריך לגעת בכתם הצבע שהכנתם בשבילו על הדף.
6. כדאי להאריק את הפסים ביותר מנקודה אחת כדי להבטיח שהפוטנציאל עליהם קבוע בקירוב.
7. הצבע מוליך באופן יציב **רק לאחר כ-20 דקות, כאשר הוא יבש.**



8. צריך לוודא על ידי מדידה שהפוטנציאל בצמוד לפסים הוא קבוע. אם לא – לתקן עם תוספת צבע.

## משימות לביצוע

1. **קראו** את משימות הביצוע **עד סופן**, כולל ניתוח הנתונים, **וודאו** שאתם מבינים את כל ההנחיות ואיך לבצע אותן.
2. **בחרו** שתי קונפיגורציות אותן תמדדו. ניתן לבחור מתוך טבלה 2, או להציע קונפיגורציה חדשה. שימו לב שניתן להוסיף מוליכים לקונפיגורציה גם מבלי לחבר אליהם מתח – **מה צפויה להיות ההשפעה שלהם?**
3. חיבור המערכת (20 נקודות):
  - א. באמצעות הצבע המוליך **ציירו על דף הפחם את הקונפיגורציה הראשונה** (קונפיגורציה א').
  - המתינו כ-20 דקות עד להתייבשות הצבע.**
  - ב. **קבעו** את הדף ללוח השעם באמצעות נעצים שקופים (לא מוליכים).
  - ג. **קבעו** נעצים מוליכים על הצבע המוליך.
  - ד. בספק המתח (כשהוא מנותק) **הגבילו** את הזרם ל-1A ואת המתח ל-20V. **כבו** את הספק. **שימו לב, יש לכבות את ספק המתח בכל שינוי במעגל.**
  - ה. השתמשו בחוטי בננה-תנין כדי לשים את מתח הספק על הנעצים המוליכים.
  - ו. **כוונו** את הוולטמטר למדידת מתח והעבירו אותו למצב "**fast**" (ראו "שימוש במולטימטר דיגיטלי"). **חברו** חוט שחור בין ההדק השלילי בוולטמטר להדק השלילי בספק. **חברו** את החוט האדום עם המחט להדק החיובי של הוולטמטר.
  - ז. **בדקו** שחיברתם את המעגל בהתאם לאיור 5.
  - ח. **הדליקו** את ספק המתח.
  - ט. **בדקו** בעזרת המחט, ע"י בחינת המתח הנמדד, שהנעצים מעבירים את המתח בצבע המוליך כפי שתכננתם. כלומר, לבדוק שהפוטנציאל על הפסים המוליכים אכן קבוע. בפסים מוליכים, במידת הצורך, יש לקצר בכמה נקודות באמצעות הוספת נעצים מוליכים וחוטים נוספים ביניהם.
4. מדידה איכותית של קווים שווי פוטנציאל (10 נקודות):
  - א. **רשמו** את הנוסחה התיאורטית לפוטנציאל במרחב של קונפיגורציה א'.
  - ב. **הציגו באמצעות גרף איור** של הקווים שווי הפוטנציאל עבור קונפיגורציה א' המבוססת על הנוסחה מסעיף א'. אפשר להשתמש בתוכנה או בסימולציה.
  - ג. **מדדו לפחות 3 קווים שווי פוטנציאל** על הדף המוליך: מדדו באמצעות המחט נקודות בעלות פוטנציאל זהה וסמנו אותם על גבי הדף באמצעות עיפרון. חברו נקודות אלו בקו רציף וכתבו את הפוטנציאל שלו.
5. מדידה כמותית של הפוטנציאל (10 נקודות):
  - א. לפי הגרף של הפוטנציאל **בחרו מסלול** על הדף עבורו קל לחשב את שינויי המתח הצפויים באמצעות נוסחה כמותית. בדרך כלל זה יהיה ציר הסימטריה של המערכת.
  - ב. **מדדו על מסלול זה את המתח כתלות במיקום** (לפחות 10 נקודות). סמנו בעיפרון את הנקודות שמדדתם.



ג. **שמרו** את ווקטור המתח ווקטור המיקום שמדדתם. **סרטטו** גרף של המתח כתלות במיקום של התוצאות שקיבלתם.

6. בחינת קווי שדה חשמליים (10 נקודות):

- א. **בחרו נקודה** כלשהי ע"ג הדף המוליך, שאינה על קו הסימטריה, ומדדו בה את המתח.
- ב. **ציירו** סביב נקודה זו מעגל קטן. **מצאו** על המעגל את הנקודה בה המתח הינו מקסימלי ואת הנקודה בה המתח הינו מינימאלי.
- ג. **חברו** את הנקודות האלו למקטע של שדה חשמלי, יש לציין את כיוון השדה באמצעות חץ (שימו לב להגדרת הכיוון של השדה לפי הנוסחה).
- ד. סביב הנקודה בעלת המתח המינימאלי **ציירו מעגל קטן** וחזרו על סעיפים ב' ו-ג' מספר פעמים.

7. **בצעו** את אותן המדידות עבור הקונפיגורציה השנייה. (50 נקודות סה"כ)

## תכולת ההגשה ל-wCP

1. תמונות של שני הדפים המוליכים, של קונפיגורציה א' ו-ב'.
2. קובץ קוד עם תוצאות המדידות של המתח והמיקום עבור שתי הקונפיגורציות.
3. גרף של המתח כתלות במיקום. סעיף 5 ג'.

## שיעורי בית – תוכן ההגשה docCP

לכל קונפיגורציה:

1. בחינת קווים שווי פוטנציאל:
  - א. **דונו**: לפי הגרף שהתקבל, האם קיימת התאמה איכותית בין קווי הפוטנציאל התיאורטיים לבין הקווים שסרטטם? באיזה מובן?
  - ב. **סרטטו** גרף של המתח כתלות במיקום של התוצאות שקיבלתם בסעיף 5 ג'.
  - ג. **הוסיפו** לגרף את העקום התיאורטי. הציגו את המשוואה התיאורטית.
  - ד. **נסחו מסקנה** לגבי התאמת העקום המדוד למערכת התיאורטית.
2. בחינת קווי שדה חשמליים:
  - א. **הסבירו** את משמעות הקו שסימנתם. מה הקשר בין קווים כאלו לבין הקווים שווי הפוטנציאל שציירתם קודם?
  - ב. **נסחו מסקנה**: האם הקו תואם לתיאוריה (באופן איכותי)? באיזה מובן?
3. מסקנה מסכמת: נסחו מסקנה פיזיקלית לפי התכונות הספציפיות של הקונפיגורציה (מה היא מדגימה). יש להתייחס **גם להבדלים והדמיון** בין התיאוריה של מטענים חשמליים בוואקום לבין מערכת הניסוי (זרמים בדף בעל התנגדות), **כפי שהתבטאו בתוצאות הניסוי**.