

## הוראות לדף הנוסחאות



### הוראות הדפסה!

את הדף יש להדפיס עם שוליים מותאמות אישית ברוחב 0.5 בכל צד.

ב WORD, יש לבחור בלשונית הדפסה את חלון השוליים, לבחור שוליים מותאמים אישית ולשנות ל 0.5 בכל הכיוונים

### עריכה:

בדף הכנסנו כמה שיותר הסברים, נוסחאות ותמונות. אם מספר העמודים חורג ממספר העמודים המותר בבחינה ניתן לערוך את קובץ ה WORD ולהוריד הסברים מורחבים, תמונות או נוסחאות טריוויאליות. ניתן גם כמובן להוסיף הסברים שלכם או נוסחאות.

בכל מקרה מומלץ מאוד לעבור על הדף לפני המבחן!! הוא גם סיכום של החומר.

אין להוריד את הסמל של GOOL או כל סימן מסחרי אחר!!

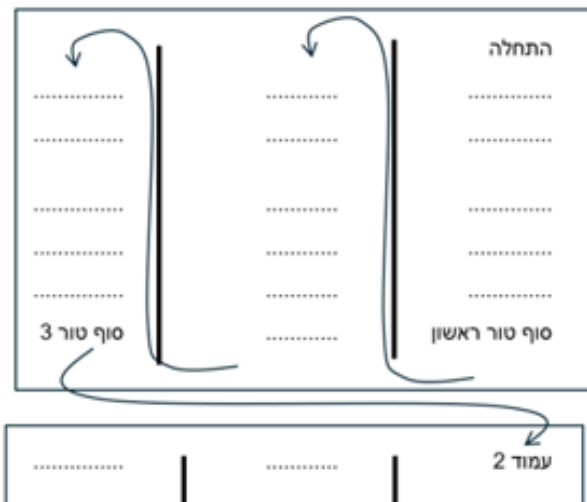
### מבנה הדף:

הדף בנוי משלושה טורים.

ההתחלה היא בפינה הימנית העליונה.

בסוף הטור הראשון עוברים לטור השני באותו עמוד (ולא לעמוד הבא). בסוף הטור האחרון עוברים לטור הראשון (הימני) בעמוד הבא.

ניתן לשנות את כיוון הפריסה לרוחב, זה יוצר מראה יותר מרווח על חשבון מספר עמודים.



כל הזכויות שמורות למני גבאי ולאתר GOOL

הדף מיועד לכל שימוש שאינו מסחרי ובפרט לשימוש מרצים, מורים, סטודנטים ותלמידים בקורסים שונים, ניתן לערוך את הדף אך יש להשאיר סימונים של אתר גול.

צפיפות נפחית/משטחית/אורכית:

$$\rho = \frac{M}{V}; \sigma = \frac{M}{S}; \lambda = \frac{M}{l}$$

$V, S, l$  הם נפח, שטח ואורך הגוף.

גרדיאנט בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

גרדיאנט בגליליות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

בכדוריות (\*):

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \hat{\varphi}$$

דיברגנט div בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

div בגליליות:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial(F_\theta \sin \varphi)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial(F_\varphi \sin \varphi)}{\partial \varphi}$$

div בכדוריות:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial(F_\theta \sin \varphi)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial(F_\varphi \sin \varphi)}{\partial \varphi}$$

רוטור (Rot/Curl) בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left( \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

רוטור (Rot/Curl) בגליליות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left( \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בגליליות (\*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left( \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בכדוריות (\*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left( \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x במערכות צירים צריך להתקיים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

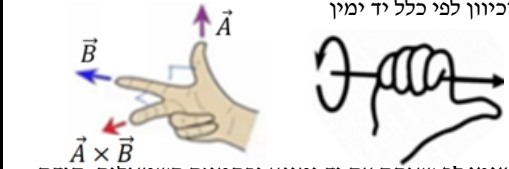
שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

וכיוון לפי כלל יד ימין



שימו לב שאתם עם יד ימין!! ובתמונה השמאלית, קודם לעשות אקדה ואחרי כן לפתוח את האמה!

גרדיאנט בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

בגליליות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

בכדוריות (\*):

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \hat{\varphi}$$

רוטור (Rot/Curl) בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left( \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בגליליות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left( \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בכדוריות (\*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left( \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x במערכות צירים צריך להתקיים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

$$\vec{E} = \frac{kq}{r^2} \hat{r} = \frac{kq}{r^3} \vec{r}$$

$\vec{r}$  - וקטור מהמטען  $q$  אל הנקודה בה מחשבים את השדה. שימו לב שבנוסחה הזו המטען הוא זה שיוצר את השדה.

הכוח הפועל על מטען  $q$  הנמצא בשדה חשמלי  $\vec{E}$ :

$$\vec{F} = q \vec{E}$$

שימו לב שבנוסחה הזו המטען  $q$  הוא המטען שמרגיש את הכוח (המטען בעצמו גם יוצר שדה אבל זה לא רלוונטי לנוסחה הזו והמטען לא מרגיש את השדה שהוא יוצר) חישבו שדה או כוח שיוצרת התפלגות מטען רציפה: נחלקת את הגוף לחתיכות קטנות, נחשב את השדה שיוצרת כל חתיכה בנקודה ונסכום על כל החתיכות. שימו לב שלסכום על כל רכיב (x, y, z) בנפרד. אלמנט המטען של חתיכה קטנה הוא:

$$dq = \lambda dl / \sigma ds / \rho dv$$

כאשר  $dl$  ו- $ds$  הם אלמנט אורך, שטח ונפח בהתאמה. הביטוי של האלמנטים מופיע במבוא מתמטי תחת הקורדינטות המתאימות.

### פוטנציאל

הגדרת הפוטנציאל:  $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$  או  $\varphi = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$

אנרגיה פוטנציאלית חשמלית:  $U = q\varphi$

מתח:  $V = \Delta\varphi$

העבודה של הכוח החשמלי:  $W = -\Delta U = -q\Delta\varphi$

עבודה להזיז מטען נגד הכוח החשמלי:  $W = \Delta U = q\Delta\varphi$

פוטנציאל של מטען נקודתי:  $\varphi = \frac{kq}{r}$

מוליכים: המטענים בתוך מוליך חופשיים לזוז.

במצב סטטי (ללא זרם או תנועת מטען) השדה (או הכוח) בתוך המוליך מתאפס.

על השפה יכול להיות שדה מאונך לשפה.

במצב סטטי, המטען הכולל בכל נקודה בתוך המוליך הוא אפס למעט על השפה.

הפוטנציאל במוליך אחיד (קבוע).

הארקה - חיבור לקרקע, מאפסת את הפוטנציאל. שיטות לחישוב פוטנציאל:

1. אם ניתן לחשב את השדה (בד"כ עם חוק גאוס) או אם השדה נתון, נעשה אינטגרל לא מסוים על השדה בכל תחום ונוסיף קבוע. את הקבועים מוציאים על ידי תנאי הרציפות של הפוטנציאל וכיוול (בחינת נק' האפס).

2. חלוקת הגוף לחתיכות קטנות, חישוב הפוטנציאל של כל חתיכה כמו גוף נקודתי  $d\varphi = \frac{k dq}{r}$  וסכימה. (הסבר על  $dq$  בחוק קולון)

### מציאת התפלגות מטען

למצא צפיפות נפחית נעשה:  $\rho = \epsilon_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{E}$

למצא צפיפות משטחית:  $\sigma = \epsilon_0 \Delta \varphi_{\perp}$

כאשר  $\Delta \varphi_{\perp}$  היא הקפיצה בשדה המאונך למשטח.

מטען נקודתי: אם יש שדה מהצורה  $\vec{E} = \frac{\alpha}{r^2} \hat{r}$

(בקורדינטות כדוריות) באזור הכולל את הראשית או יש מטען נקודתי כך ש  $q = \frac{\alpha}{k}$ .

צפיפות מטען אורכית: אם יש שדה מהצורה  $\vec{E} = \frac{\alpha}{r} \hat{r}$

(בקורדינטות גליליות) באזור הכולל את הראשית או יש צפיפות מטען אורכית כך ש  $\lambda = 2\pi \epsilon_0 \alpha$ .

אם נתון הפוטנציאל אז קודם נמצא את השדה באמצעות  $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$  (הנוסחאות של הגרדיאנט בפרק וקטורים)

### אנרגיה הדרושה לבניית מערכת

$$U = \sum \frac{1}{2} \varphi_i q_i = \int \frac{\epsilon_0}{2} E^2 dv$$

הסכום הוא על כל המטענים כפול הפוטנציאל שהם נמצאים בו.

בנוסחה עם האינטגרל על השדה אפשר להשתמש רק אם אין מטענים נקודתיים או התפלגות קווית

$\mu_E = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$  נקראת צפיפות האנרגיה החשמלית

### מעגלי זרם ישר

זרם:  $I = \frac{dq}{dt}$

כמות המטען שעוברת (דרך שטח חתך) ביחידת זמן.

חוק אוהם - הקשר בין המתח לזרם בנגד:  $V = IR$

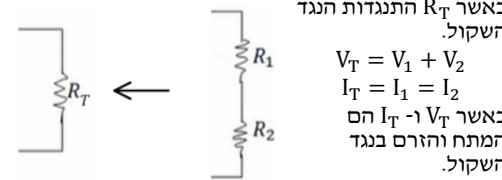
חיבור נגדים בטור - נגדים עם זרם זהה:  $R_T = R_1 + R_2$

כאשר  $R_T$  התנגדות הנגד השקול.

$V_T = V_1 + V_2$

$I_T = I_1 = I_2$

כאשר  $V_T$  ו- $I_T$  הם המתח והזרם בנגד השקול.



### מבוא מתמטי

קואורדינטות גליליות:  $(r, \theta, z)$

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

$$z = z$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

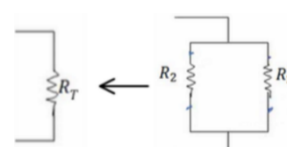
$$\tan \theta = \frac{y}{x}$$

$$dl = dr/r d\theta / dz$$

$$ds = r dr d\theta / r d\theta dz$$

$$dv = r dr d\theta dz$$
</

יציבות נגדים במקביל - נגדים עם מתח זהה:



$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$
$$I_T = I_1 + I_2$$
$$V_T = V_1 = V_2$$

עבור יותר משני נגדים הנוסחאות ממשיות באופן דומה:

$$\text{בטור: } R_T = \Sigma R_i, V_T = \Sigma V_i, I_T = I_i$$

$$\text{במקביל: } \frac{1}{R_T} = \Sigma \frac{1}{R_i}, I_T = \Sigma I_i, V_T = V_i$$

מד זרם (אמפרמטר) אידיאלי - מחובר בטור ובעל התנגדות זניחה.

מד מתח (וולטמטר) אידיאלי - מחובר במקביל לרכיב הנמדד, בעל התנגדות מאוד גבוהה.

$$\text{החספק בנגד: } P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

$P = IV$  נכון לכל רכיב חשמלי, שני השוויונים האחרים הם לאחר שימוש בחוק אוהם ונכונים רק בנגד.

נתק - מצב בו לא עובר זרם - חוט חתוך או התנגדות אינסופית.

קצר - מצב בו אין התנגדות

$$\text{מקור מתח לא אידיאלי: } V = \mathcal{E} - Ir$$

$V$  - מתח הדקים, המתח בין קצוות הסוללה או המתח שמרגיש המעגל - תלוי בזרם.

$\mathcal{E}$  - כא"מ הסוללה, מתח פנימי שאינו משתנה.

$r$  - ההתנגדות הפנימית.

חוקי קירכהוף (לפתרון מעגלים מורכבים):

נגדיר זרם לכל חוט במעגל.

- נרשום משוואות מתחים, סכום המתחים במסלול סגור שווה לאפס. (להוסיף משוואות עד שעוברים על כל הרכיבים במעגל).

- נרשום משוואות זרמים, בכל צומת סך הזרם שנכנס שווה לסך הזרם שיוצא.

- נפתור את מערכת המשוואות.

$$\text{שיטת קרמר (לפתרון מערכת משוואות): } I_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}$$

$\Delta$  - דטרמיננטה של מערכת המשוואות ההומוגנית (ללא הפתרונות). לדוגמה, עבור מערכת המשוואות הבאה:

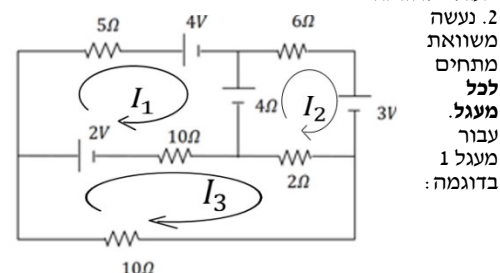
$$\begin{cases} 3I_1 + 4I_2 + 8I_3 = 5 \\ 2I_1 - 5I_2 + 9I_3 = 1 \\ 4I_1 + 3I_2 - 7I_3 = 3 \end{cases} \quad \Delta = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$\Delta_i$  - דטרמיננטה של מערכת המשוואות שהחלפה בה העמודה  $i$  בעמודות התשובות. לדוגמה, במערכת הנ"ל:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 & 5 & 8 \\ 2 & 1 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

זרמי חוגים:

1. נחלק את המעגל למעגלים סגורים ונבחר זרמים לכל מעגל. לדוגמה:



2. נעשה משוואות מתחים לכל מעגל.

$$5I_1 + 4 + 4 + 10(I_1 - I_3) - 2 = 0$$

3. נפתור את מערכת המשוואות

**חומרים דיאלקטריים**

חומר דיאלקטרי הוא חומר מבודד (בפשטות, במקרים יותר מורכבים אפשר לדבר גם על חומרים דיאלקטריים מוליכים)

בחומר דיאלקטרי יש דיפולים, כאשר החומר נמצא בשדה חשמלי הדיפולים מתיישרים בכיוון השדה ויוצרים שדה נגדי.

השדה השקול בתוך החומר (בהנחה שהחומר אחיד ובעל סימטריה):

$$\vec{E}_T = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon_r}$$

$\vec{E}_T$  - השדה השקול בתוך החומר, זה השדה שמרגיש מטען בתוך החומר.  $\vec{E}_0$  - שדה שנוצר מהמטען חיצוני (ולא מהדיפולים של החומר).  $\epsilon_r$  - מקדם דיאלקטרי יחסי, קבוע חסר יחידות שתלוי בסוג החומר וקיים בטבלאות.

- לפעמים נתון המקדם הדיאלקטרי (הלא יחסי) והקשר הוא:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$$

**חומרים דיאלקטריים**

$$\text{גדרת הקיבול: } C = \frac{|q|}{|V|}$$

הקיבול היא תכונה קבועה ותלויה רק במבנה הגיאומטרי של הגוף (ולא במתח או במטען על הרכיב).

קיבול של קבל לוחות:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad A - \text{שטח כל לוח. } d - \text{מרחק בין הלוחות, } d \ll \sqrt{A}$$

שדה בתוך קבל לוחות:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{V}{d} \quad \sigma - \text{צפיפות המטען ליחידת שטח בכל לוח. } V - \text{המתח בין הלוחות. } d - \text{מרחק בין הלוחות.}$$

קיבול של קבל גלילי:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}} \quad a - \text{רדיוס הגליל הפנימי והחיצוני בהתאמה. } L - \text{אורך הגלילים, } a, b \ll L$$

הקיבול של קבל המלא בחומר דיאלקטרי אחיד:  $C' = kC_0$  ( $\epsilon_r$  או  $k$ ) - המקדם הדיאלקטרי של החומר.

$C_0$  - הקיבול ללא החומר הדיאלקטרי.

חיבור קבלים בטור (קבלים עם מטען זהה):

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{כאשר } V_T = V_1 = V_2 \quad Q_T = Q_1 = Q_2$$

$$\text{חיבור קבלים במקביל (מתח זהה): } C_T = C_1 + C_2 \quad \text{כאשר } V_T = V_1 = V_2 \quad Q_T = Q_1 + Q_2$$

שיטה 1 לחישוב קיבול - לפי הגדרה:

א. נניח שיש מטען  $Q$  על לוחות הקבל.

ב. נחשב את השדה בין הלוחות

ג. נחשב את המתח בין הלוחות

ד. נציב בנוסחה (בדרי"כ  $Q$  יצטמצם)

שיטה 2 לחישוב קיבול - פירוק הקבל לקבלים חלקיים:

א. נפרק את הקבל לקבלים שמחוברים בטור או במקביל

ב. נחשב את הקיבול של כל אחד

ג. נחבר חזרה באמצעות הנוסחאות

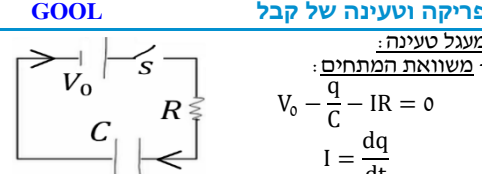
$$\text{אנרגיה האגורה בקבל: } U_C = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} qV$$

$$\text{העבודה שמבצעת הסוללה: } W_s = \Delta q V_s = -2\Delta U_C \quad \Delta q \text{ הוא המטען שעבר דרכה (זוה המטען שקיבל הקבל)}$$

$$\text{הכוח הפועל על חומר דיאלקטרי בקבל: } F = \left| \frac{dU_C}{dx} \right|$$

הכוח תמיד מושך את החומר פנימה.

**פריקה וטעינה של קבל**



מעגל טעינה:

משוואת המתחים:

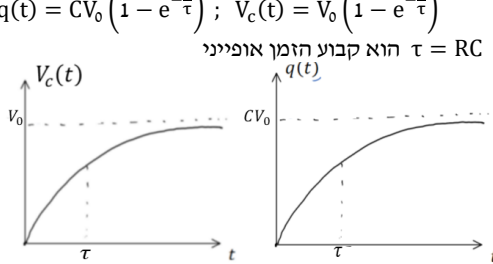
$$V_0 - \frac{q}{C} - IR = 0$$

$$I = \frac{dq}{dt}$$

המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בטעינה):

$$q(t) = CV_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}); V_C(t) = V_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$\tau = RC$  הוא קבוע הזמן אופייני



הזרם כתלות בזמן:

$$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

בהתחלה ( $t = 0$ ) הקבל מתנהג כמו קצר, המתח והמטען על הקבל הם אפס והזרם הוא  $\frac{V_0}{R}$

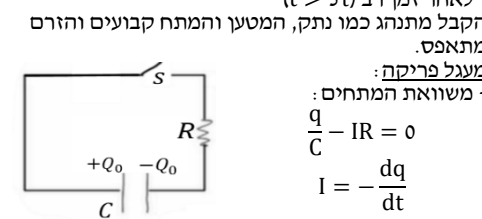
לאחר זמן רב ( $t > 5\tau$ ) הקבל מתנהג כמו נתק, המטען והמתח קבועים והזרם מתאפס.

מעגל פריקה:

משוואת המתחים:

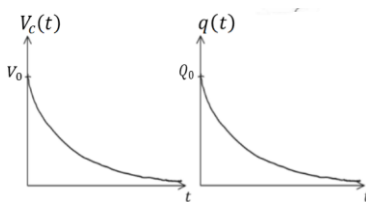
$$\frac{q}{C} - IR = 0$$

$$I = -\frac{dq}{dt}$$



המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בפריקה):

$$q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}; V_C(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}; Q_0 = CV_0$$



$$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{הזרם כתלות בזמן בפריקה זהה לטעינה:}$$

**מבנה הנגד וצפיפות זרם**

$$\text{התלות של ההתנגדות במבנה הנגד: } R = \rho \frac{L}{S}$$

$\rho$  - ההתנגדות סגולית, תלויה בחומר (לא להתבלבל עם צפיפות מטען נפחית).

$L$  - אורך הנגד, הדרך שהמטענים עושים בנגד.

$S$  (או  $A$ ) - שטח החתך, משטח שמאונך לכיוון הזרם.

הערה: **שטח החתך וההתנגדות הסגולית צריכים להיות אחידים לאורך הנגד.** במדידה והם לא אחידים צריך לחלק את הנגד לחתיכות, לחשב התנגדות של כל חתיכה ולסכום לפי סוג החיבור (במקביל/בטור)

$$\text{מוליכות (לא לבלבל עם צפיפות מטען משטחית): } \sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\vec{J} - \text{צפיפות הזרם ליחידת שטח: } I = \int \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

כאשר האינטגרל הוא על שטח החתך, שטח שמאונך ל- $\vec{J}$ .

$$I = JS \quad \text{אם } \vec{J} \text{ אחידה אז:}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{חוק אוהם הדיפרנציאלי:}$$

כאשר  $\sigma$  היא המוליכות ו- $E$  השדה החשמלי.

חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען נפחית בתנועה:

$$\vec{J} = \rho \vec{v}$$

כאשר  $\rho$  היא צפיפות נושאי המטען ליחידת נפח ו- $\vec{v}$  היא מהירות נושאי המטען. במוליך,  $\rho = nq$  כאשר  $n$  הוא מספר נושאי המטען ליח נפח ו- $q$  הוא המטען של נושא מטען יחיד, בד"כ אלקטרון. מהירות המטענים נקראת מהירות הסחיפה  $\vec{v}_{drift}$ .

$$\vec{k} - \text{צפיפות הזרם ליחידת אורך: } I = \int \vec{k} \cdot d\vec{l}$$

כאשר האינטגרל הוא על אורך שמאונך ל- $\vec{k}$

$$\text{אם } \vec{k} \text{ אחידה אז: } I = kl$$

$$\vec{k} = \sigma \vec{v} \quad \text{חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען משטחית בתנועה:}$$

$$I = \lambda v \quad \text{עבור צפיפות מטען ליחידת אורך } \lambda \text{ בתנועה נקבל:}$$

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad \text{חוק לורנץ - הכוח המגנטי:}$$

ניתן לחשב את הכוח בשתי דרכים.

דרך דטרמיננטה (ראו מכפלה וקטורית בוקטורים).

$$F_B = qvB \sin \alpha \quad \text{דרך גודל וכיוון בנפרד, הגודל הוא:}$$

כאשר  $\alpha$  היא הזווית בין המהירות לשדה. וכיוון לפי כלל יד ימין:

שימו לב שאתם עם יד ימין!

- כיוון הכוח הוא עבור מטען חיובי (עבור מטען שלילי הכוח בכיוון הפוך).

- לא להפוך את הסדר של האצבע והאמה (עדיף לעשות קודם אקדח).

תנועה בשדה אחיד: מטען  $q$  בעל מסה  $m$  הנע במהירות  $v$  בשדה מגנטי אחיד (המאונך למהירות) עושה תנועה מעגלית, רדיוס המעגל הוא:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

אם  $v$  לא מאונך למהירות אז התנועה תהיה בורגית כאשר המעגל יהיה מסביב לשדה, רדיוס המעגל יהיה:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$$

$$\text{הכוח המגנטי על תיל נושא זרם: } \vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

הכוח על לולאה סגורה בשדה אחיד מתאפס.

הכוח על תיל בשדה אחיד אינו תלוי בצורת התיל, הכוח יהיה זהה לכוו הפועל על תיל ישר המתחיל ומסתיים באותם נקודות.

**חוק ביו-סבר**

חוק ביו-סבר, השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם:

$$\text{הכוח הפועל על חתיכת תיל קטנה באורך } dl \text{ עם זרם } I$$

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad \text{הנמצאות בשדה מגנטי } \vec{B} \text{ הוא:}$$

$$F = BIL \sin \alpha \quad \text{אם התיל ישר בשדה אחיד אז גודל הכוח הוא:}$$

את כיוון הכוח יש למצא לפי כלל יד ימין כמו בחוק לורנץ על מטען בודד כאשר כיוון הזרם (או כיוון ה- $d\vec{l}$ ) מחליף את המהירות.

הכוח על לולאה סגורה בשדה אחיד מתאפס.

הכוח על תיל בשדה אחיד אינו תלוי בצורת התיל, הכוח יהיה זהה לכוו הפועל על תיל ישר המתחיל ומסתיים באותם נקודות.

**חוק ביו-סבר**

חוק ביו-סבר, השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם:

$$\text{הכוח הפועל על חתיכת תיל קטנה באורך } dl \text{ עם זרם } I$$

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad \text{הנמצאות בשדה מגנטי } \vec{B} \text{ הוא:}$$

$$F = BIL \sin \alpha \quad \text{אם התיל ישר בשדה אחיד אז גודל הכוח הוא:}$$

את כיוון הכוח יש למצא לפי כלל יד ימין כמו בחוק לורנץ על מטען בודד כאשר כיוון הזרם (או כיוון ה- $d\vec{l}$ ) מחליף את המהירות.

הכוח על לולאה סגורה בשדה אחיד מתאפס.

הכוח על תיל בשדה אחיד אינו תלוי בצורת התיל, הכוח יהיה זהה לכוו הפועל על תיל ישר המתחיל ומסתיים באותם נקודות.

**חוק ביו-סבר**

**מציאת צפיפות זרם קווית**  $\vec{K}$  משדה מגנטי נתון (כאשר יש  $\hat{n}_{1 \rightarrow 2} \times \Delta \vec{B} = \mu_0 \vec{K}$  : ארציפות בשדה):  
 כאשר  $\hat{n}_{1 \rightarrow 2}$  הוא וקטור יחידה בכיוון הקפיצה מתחום 1 לתחום 2 ו-  $\vec{B}_1 - \vec{B}_2 = \Delta \vec{B}$   
 בשביל למצוא זרם של תיל נחפש שדה מהצורה  $\vec{B} = \frac{C}{r} \hat{\theta}$   
**בוקאורדינטות גליליות ובאזור הכולל את הראשית ו- C**  
 קבוע כלשהו. נשווה לשדה של תיל אינסופי (ו-  $\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ ) ונקבל

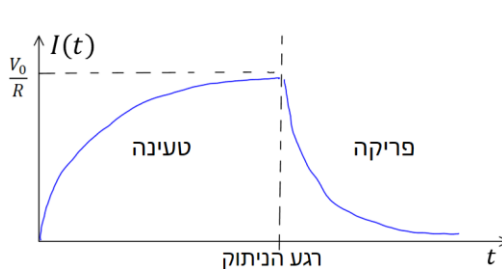
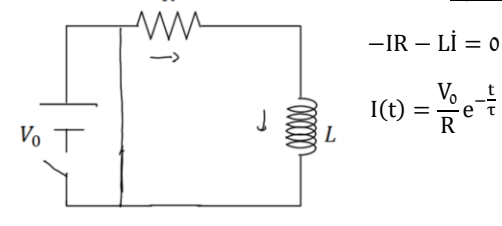
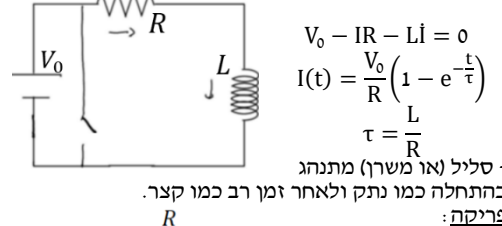
**השראות**  $I = \frac{C2\pi}{\mu_0}$   
**השראות ברכיב:**  $L = \frac{\Phi_B}{I}$

$\Phi_B$  הוא השטף המגנטי דרך הרכיב ו- I הזרם ברכיב.  
 - ההשראות היא **תכונה שתלויה רק במבנה** ולכן היא ב"כ קבועה.  
 חישוב השראות לפי הגדרה:  
 1. נניח שזרם זרם I ברכיב.  
 2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם בתוך הרכיב.  
 3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב.  
 4. נציב בנוסחה של ההשראות והזרם יצטמצם.

**השראות של סליל:**  $L = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{l}$   
 מספר הליפופים הכולל, l אורך הסליל ו- a רדיוס טבעת  
**כא"מ ברכיב עם השראות L:**  $\varepsilon = -L \dot{I}$   
**האנרגיה האגורה בסליל (או בכל רכיב בעל השראות):**

$U_L = \frac{1}{2} L I^2$   
**האנרגיה האגורה בשדה המגנטי:**  $U = \int \frac{B^2}{2\mu_0} dV$   
 - את האינטגרל עושים על כל המרחב.  
 - זו אותה האנרגיה שמחשבים באמצעות ההשראות (פשוט צורת חישוב אחרת).  
 - ניתן לחשב השראות דרך השוואה של שתי הנוסחאות האחרונות של האנרגיה (תניחו זרם והוא יצטמצם בסוף).  
**המתח על סליל (משך) במעגל:**  $V_L = L \dot{I}$   
 הצד הגבוה הוא בנקודה שבה נכנס הזרם לסליל.

**GOOL** **RL מעגלי**



**חיבור סלילים (משרנים) במעגל הוא כמו חיבור נגדים:**  
 בטור:  $L_T = L_1 + L_2 + \dots$   
 כאשר  $V_T = V_1 + V_2 + \dots$  ו-  $I_T = I_1 = I_2 = \dots$   
 במקביל:  $\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots$   
 כאשר  $V_T = V_1 = V_2 = \dots$  ו-  $I_T = I_1 + I_2 + \dots$

**GOOL** **מעגלי זרם חילופין**



**טרנספורמציה יחסותית (לורנץ) לשדות**  
 טרנספורמציה של השדות עבור צופה הנע במהירות  $\vec{v}$   
**ביחס למעבדה:**  $\vec{E}'_{\parallel} = \vec{E}_{\parallel}$  ;  $\vec{E}'_{\perp} = \gamma(\vec{E}_{\perp} + \vec{v} \times \vec{B}_{\perp})$   
**ביחס למעבדה:**  $\vec{B}'_{\parallel} = \vec{B}_{\parallel}$  ;  $\vec{B}'_{\perp} = \gamma(\vec{B}_{\perp} - \frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E}_{\perp})$  ;  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$   
 הם השדות במערכת המעבדה ו-  $\vec{E}, \vec{B}$  הם השדות במערכת הנעה.  
**הטרנס' ההפוכה:**  $\vec{E}_{\parallel} = \vec{E}'_{\parallel}$  ;  $\vec{E}_{\perp} = \gamma(\vec{E}'_{\perp} - \vec{v} \times \vec{B}'_{\perp})$   
**הטרנס' ההפוכה:**  $\vec{B}_{\parallel} = \vec{B}'_{\parallel}$  ;  $\vec{B}_{\perp} = \gamma(\vec{B}'_{\perp} + \frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E}'_{\perp})$   
 טרנספורמציה של צפיפויות המטען:

$\lambda = \gamma \lambda_0$  ;  $\sigma = \gamma \sigma_0$  ;  $\rho = \gamma \rho_0$   
 כאשר  $\lambda_0, \sigma_0, \rho_0$  הן צפיפויות אורכיות, משטחיות ונפחיות במערכת העצמית של הגוף.  
 - הסיבה לטרנספורמציה היא שסך המטען זהה בשתי המערכות אבל האורך משתנה.  
 נוסחאות לצפיפויות הזרם:  
 $\vec{J} = \gamma \rho_0 \vec{v}$  ;  $\vec{K} = \gamma \sigma_0 \vec{v}$  ;  $I = \gamma I_0$   
 כאשר  $\lambda_0, \sigma_0, \rho_0$  הן צפיפויות אורכיות, משטחיות ונפחיות במערכת העצמית של הגוף.

**GOOL** **חוק פאראדי**

**חוק פאראדי:**  $\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$  ;  $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$   
 הכא"מ מתנהג כמו מקור מתח במעגל.  
 בד"כ נמצא באמצעות החוק את גודל הכא"מ ואת הכיוון נמצא לפי חוק לנץ.  
**חוק לנץ:** הזרם נוצר בניגוד לשינוי בשטף.



**הספק של כוח הפועל על גוף בתנועה:**  $P = \vec{F} \cdot \vec{v}$   
 כאשר  $\vec{v}$  היא מהירות הגוף (שימו לב למכפלה הסקלרית)  
 כא"מ הנוצר במוט הנע בשדה מגנטי:  $\varepsilon = BLv \sin \alpha$   
 כאשר  $v$  היא מהירות המוט,  $L$  האורך שלו ו-  $\alpha$  היא הזווית בין המהירות לשדה.  
 כיוון הכא"מ הוא בכיוון של הכוח המגנטי הפועל על מטען חיובי בתוך המוט.

**GOOL** **שדות משתנים בזמן חרם העתקה**

ממשוואות מקסוול רואים ששדה מגנטי שמשנתה בזמן יוצר שדה חשמלי ולהפך.  
**אם נתון שדה מגנטי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה החשמלי אז:** נשתמש במשוואה השלישית של מקסוול כמו חוק פאראדי ובמקום הכא"מ נחשב את האינטגרל כאשר בדרכ"י יש סימטריה גלילית והאינטגרל הופך ל  $E2\pi r$   
**אם נתון שדה חשמלי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה המגנטי אז:** נשתמש במשוואה הרביעית כמו חוק אמפר רק שבמקום זרם יש  $\int \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} d\vec{s}$  (או במקום צפיפות זרם  $\int \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} d\vec{s}$ )  
 שנקרא זרם העתקה (לא באמת זרם).

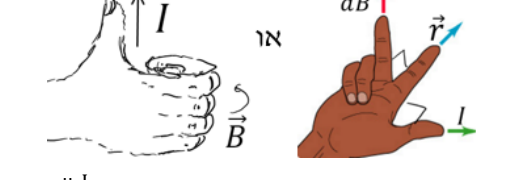
**GOOL** **וקטור פוינטינג והאנרגיה האגורה בשדות אנרגיה אלקטרו מגנטית האגורה בשדות:**

$U = \int \left( \frac{\varepsilon_0 (\vec{E})^2}{2} + \frac{(\vec{B})^2}{2\mu_0} \right) dv$   
 צפיפות האנרגיה (אנרגיה ליח' נפח):  $u_{em} = \frac{\varepsilon_0 (\vec{E})^2}{2} + \frac{(\vec{B})^2}{2\mu_0}$   
**וקטור פוינטינג:**  $\vec{s} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$   
 שטף האנרגיה ליחידת שטח וליחידת זמן.  
**הקשר בין האנרגיה לוקטור פוינטינג בריק:**  $\oint \vec{s} \cdot d\vec{s} = -\frac{dU}{dt}$   
 בצד שמאל עושים אינטגרל של וקטור פוינטינג על משטח סגור (שטף) ובצד ימין גוזרים בזמן את האנרגיה האגורה בשדות בנפח הכלוא במשטח.

**GOOL** **מציאת צפיפות זרם משדה מגנטי נתון (חוק)**

**מציאת צפיפות זרם משטחית**  $\vec{J}$  משדה מגנטי נתון (חוק)  $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$   
**אמפר הדיפרנציאלי:**

$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{|\vec{r}|^2}$   
 $\vec{r}$  הוא הוקטור מהחתיכה לנקודה בה מחפשים את השדה.  
 $d\vec{l}$  הוא אורך החתיכה וכיוונו בכיוון הזרם.  
 - חישוב הכיוון לפי כלל יד ימין:



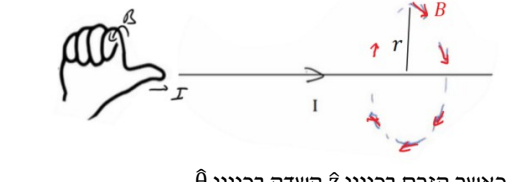
**השדה של תיל סופי:**  $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$   
 - במרכז התיל  $B =$

$\frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left( \frac{L}{2} + a^2 \right)^{\frac{3}{2}}$  (L אורך התיל)  
**שדה של טבעת לאורך ציר הסימטריה:**  $B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$

- כיוון השדה לפי כלל הבורג:  
**כוח ליחידת אורך בין שני תילים מקבילים:**  
 $\frac{d\vec{F}}{dl} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$   
 הכוח הוא כוח משיכה אם הזרמים באותו כיוון, ודחייה אם כיוון הזרמים הפוך.

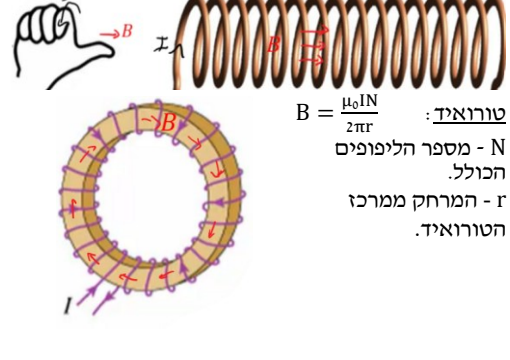
**GOOL** **חוק אמפר**

**חוק אמפר:**  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{in}$  ;  $I_{in} = \int \vec{J} \cdot d\vec{s}$   
 - כאשר האינטגרל הוא על הרכיב המשיק של B לאורך מסלול סגור. בדרכ"י נבחר מקרים בהם B אחיד לאורך המסלול והאינטגרל יהיה B כפול אורך המסלול.  
 - הזרם הוא סך הזרם שעובר דרך השטח הסגור במסלול.  
**המקרים הנפוצים של חוק אמפר:**  
 1. תיל / גליל / מעטפת גלילית אינסופיים.  
 2. מישור אינסופי.  
 3. סליל אינסופי / טורואיד.  
**שדה של תיל אינסופי:**  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$   
 כאשר r הוא המרחק מהתיל.



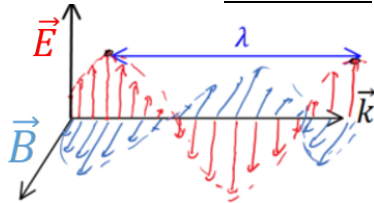
כאשר הזרם בכיוון  $\hat{z}$  השדה בכיוון  $\hat{\theta}$   
**שדה של מישור אינסופי:**  
 עבור מישור דק הטעון בצפיפות משטחית  $\sigma$  ונע בכיוון  $\hat{x}$  במהירות  $v$ .  
 $\vec{B} = \frac{\mu_0 \sigma v}{2} \begin{cases} -\hat{y}, & z > 0 \\ \hat{y}, & z < 0 \end{cases}$

**שדה של סליל אינסופי/סולנואיד:**  $B = \mu_0 I n$   
 כאשר n הוא מספר הליפופים ליחידת אורך של הסליל.  
 - כיוון: לפי כלל הבורג, האצבעות בכיוון הזרם והאגודל בכיוון השדה.



$\vec{B} = \frac{1}{c} \vec{k} \times \vec{E}$  ;  $\vec{E} = c \vec{B} \times \vec{k}$

צורת הגל במרחב:



השדה החשמלי תמיד מאונך לשדה המגנטי ושניהם תמיד מאונכים לכיוון התקדמות הגל.

$\lambda$  הוא אורך הגל (המרחק בין שיא לשיא):  $|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$

יחס הדיספרסיה:  $\omega = c|k|$

היחס מתקבל מהצבה של הפתרון במשוואת הגלים.

פתרון נוסף (עם פלוס):  $E_i(\vec{r}, t) = A_i \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t)$

במקרה הזה הגל מתקדם בכיוון הפוך ל  $\vec{k}$

**דיפול חשמלי**

דיפול חשמלי הוא זוג מטענים בעלי מטען זהה וסימון הפוך הנמצאים במרחק  $d$  זה מזה.

מומנט הדיפול:  $\vec{p} = q\vec{d}$

כיוונו מהמטען השלילי לחיובי.

הפוטנציאל שיוצר דיפול במרחק גדול  $r \gg d$ :

$\phi = \frac{k(\vec{p} \cdot \vec{r})}{r^3} = \frac{k(\vec{p} \cdot \hat{r})}{r^2}$

השדה של דיפול במרחק גדול:

$\vec{E} = \frac{k[3(\vec{p} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{p}]}{r^3}$

מומנט דיפול של מערכת מטענים:

$p_x = \sum x_i q_i = \int x dq$

מומנט כוח הפועל על דיפול הנמצא בשדה חשמלי חיצוני:

$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$

אנרגיה פוטנציאלית של דיפול בשדה חיצוני:

$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$

כוח הפועל על דיפול הנמצא בשדה חיצוני:

$\vec{F} = (\vec{p} \cdot \nabla) \cdot \vec{E} = -\nabla U$

השוויון האחרון נכון רק אם השדה משמר (שדה שנוצר ממטענים) ומומנט הדיפול אחיד (לא תלוי בקואורדינטות).

**חומרים דיאלקטריים**

חומר דיאלקטרי הוא חומר שמכיל דיפולים. במצב רגיל כל דיפול לכיוון שונה והשדה הממוצע בחומר הוא אפס. כשמכנסים את החומר לשדה חצוני הדיפולים מתיישרים ויוצרים שדה מנוגד לשדה החיצוני.

השדה בתוך חומר דיאלקטרי לינארי ואיזוטרופי:

$\vec{E} = \frac{\vec{E}_{free}}{\epsilon_r}$

$\vec{E}_{free}$  הוא השדה שנוצר ממטענים חופשיים/מחוץ לחומר.

$\vec{E}$  הוא השדה הכולל בתוך החומר (מהמטענים החופשיים והדיפולים של החומר).

$\epsilon_r$  א - מקדם דיאלקטרי של החומר -תכונה של החומר

בדרי"כ קבוע וידוע.  $\epsilon > 1$   $\epsilon_r$  -1  $\epsilon_0 \epsilon_r$

$\sigma_{free}$  - צפיפות המטען שיוצרת את השדה החיצוני:

$\sigma_{free} = \epsilon_0 \Delta E_{free\perp}$

$\sigma_T = \epsilon_0 \Delta E_{\perp}$  - צפיפות המטען הכוללת:

$\sigma_i$  - צפיפות מטען מושרית/קשורה: צפיפות מטען שנוצרת על שפת החומר הדיאלקטרי מהקיטוב של הדיפולים.

$\sigma_i = \sigma_T - \sigma_{free}$

$\vec{P}$  - וקטור הפולריזציה. צפיפות הדיפולים ליחידת נפח:

$\vec{P} = N \vec{p}_1$

$\vec{p}_1$  - מומנט הדיפול של דיפול יחיד בחומר.

$N$  - מספר הדיפולים ביחידת נפח. יחידות של  $[\frac{1}{m^3}]$ .

מומנט הדיפול הכולל בחומר:

$\vec{p} = \int \vec{P} dV$

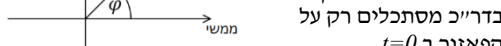
הקשר בין  $\vec{P}$  לצפיפות המושרית על השפה:

$\sigma_i \equiv \sigma_b = \vec{P} \cdot \hat{n}$

בעבודה עם מספרים מורכבים אפשר להוריד את התלות בזמן

**פאזור**: תיאור של המספר המורכב באמצעות וקטור במערכת דו מימדית.

הפאזור מסתובב בזמן אבל בדרי"כ מסתכלים רק על הפאזור ב  $t=0$



$Z = \frac{\vec{v}}{I}$

תכונה שתלויה רק במבנה (קבועה כל עוד המבנה קבוע).

**הפאזה של העכבה** היא הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב:

$\phi_z = \phi_v - \phi_I$

$|Z| = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

**הגודל של העכבה:**

| הרכיב | העכבה של הרכיב Z      | הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב              |
|-------|-----------------------|--------------------------------------------|
| נגד   | R                     | המתח והזרם בנגד הם באותה הפאזה             |
| סליל  | iωL                   | בסליל המתח מקדים את הזרם ב $\frac{\pi}{2}$ |
| קבל   | $\frac{1}{i\omega C}$ | בקבל המתח מפגר אחרי הזרם ב $\frac{\pi}{2}$ |

**ניתן לחבר עכבות בדיוק כמו חיבור של נגדים ולקבל את העכבה הכוללת של המעגל:**

$\vec{V}_S = Z_T \vec{I}_S$

$\vec{I}_S$  -  $\vec{V}_S$  הם הזרם והמתח של המקור (בייצוג המורכב).

ערכי **RMS** (ממוצע של ריבוע הגודל בזמן):

$I_{RMS} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$  ;  $V_{RMS} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$

**הספק רגעי**:

$P(t) = V(t)I(t)$

לשים לב שההספק הרגעי הוא לא גודל לינארי ולכן אי אפשר לחשב אותו באמצעות הייצוג המורכב של המתח והזרם.

**הספק ממוצע**:  $\bar{P} = \frac{V_{max} I_{max}}{2} \cos \phi$

$V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi$

כאשר  $\phi$  היא הפאזה של המתח ביחס לזרם.

$\cos \phi$  הוא מקדם/גורם ההספק. מצביע על ניצול האנרגיה במעגל.

**משוואות מקסוול**

**הצורה הדיפרנציאלית** ; הצורה האינטגרלית:

1. חוק גאוס  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$  ;  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho dV$

2.  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$  ;  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$

השטף מגנטי על משטח סגור תמיד אפס, אין מטען מגנטי.

3.  $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$  ;  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s}$

מהמשוואה ניתן לקבל את חוק פאראדי  $\epsilon = -\phi_B$

4.  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{j} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \int \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$  ;

$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$

חוק אמפר והתיקון של מקסוול (שנקרא גם זרם העתקה)

**גלים אלקטרומגנטיים**

**משוואות הגלים בריק** ( $\rho = j = 0$ ):

$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2}$  ;  $\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{B}}{dt^2}$

c היא מהירות האור כאשר  $\frac{1}{c^2} = \mu_0 \epsilon_0$

- למשוואות מגיעים ממשוואות מקסוול.

- המשוואה מתקיימת עבור כל רכיב בנפרד:

$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} \Rightarrow$

z כנל ;  $\vec{\nabla}^2 E_x = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E_x}{dt^2}$  ;  $\vec{\nabla}^2 E_y = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E_y}{dt^2}$

- תזכורת ללאפלסיאן:  $\vec{\nabla}^2 E_i = \frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2}$

פתרון המשוואה עבור רכיב כלשהו של  $\vec{E}$  או של  $\vec{B}$ :

$E_i(\vec{r}, t) = A_i \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$

$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$  הוא וקטור הגל, כיוונו הוא כיוון התקדמות הגל.

$\vec{k} \cdot \vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$

**פתרון**:  $q(t) = A \cos(\omega t + \phi)$  ;  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$

**האנרגיה האגורה במעגל**:

$E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} L I^2$

**מעגל RLC**

**משוואת המעגל**:

$I = -\dot{q} - i \ddot{q} + \frac{R}{L} \dot{q} + \frac{1}{LC} q = 0$

(ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מרוסנת. נגדיר  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$

$\Gamma = \frac{R}{2L}$

הפתרון מתחלק לשלושה מקרים:

**מקרה 1 - ריסון חזק**:  $\Gamma > \omega_0$

$q(t) = A e^{-\lambda_1 t} + B e^{-\lambda_2 t}$

$\lambda_{1,2} = \Gamma \pm \sqrt{\Gamma^2 - \omega_0^2}$

**מקרה 2 - ריסון קריטי**:  $\Gamma = \omega_0$

$q(t) = A e^{-\omega_0 t} + B t e^{-\omega_0 t}$

בריסון קריטי קצב הדעיכה הוא הגבוה ביותר

משלושת המקרים.

**מקרה 3 - ריסון חלש**:  $\Gamma < \omega_0$

$q(t) = A e^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t + \phi)$

$\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \Gamma^2}$

בכל המקרים האנרגיה של המעגל (שאגורה בסליל ובקבל) דועכת בקצב כפול:

$E \propto e^{-2\Gamma t}$

(בריסון חזק קבוע הדעיכה הוא  $\lambda$  במקום  $\Gamma$ )

**מעגלים עם מקור מתח חילופני**:

**משוואת המעגל**:

$\ddot{I} + \frac{R}{L} \dot{I} + \frac{1}{LC} I = -\omega V_0 \sin(\omega t)$

$I = \dot{q}$

(ניתן גם להגיע למשוואה דומה עבור המטען)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מאולצת.

פתרון המשוואה:

פתרון הומוגני  $I(t) = I_{max}(\omega) \cos(\omega t + \phi)$

- הפתרון ההומוגני הוא פתרון מעגל RLC והוא דועך בזמן.

- הפתרון הפרטי נקרא הפתרון של המצב העמיד (לאחר זמן רב) בדרי"כ מתייחסים רק אליו.

$I_{max}(\omega) = \frac{V_0}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2 + R^2}}$

$\tan \phi = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$

**תהודה**: מצב שבו  $I_{max}(\omega)$  מקסימאלי.

- שימו לב,  $I_{max}$  הוא אמפליטודת הזרם במעגל עם מקור בעל תדירות  $\omega$  מסוימת. תהודה מדברת על איזה תדירות צריך שתהיה למקור כך שהאמפליטודה הזו תהיה הכי גבוהה שאפשר.

- בשביל למצוא את תדירות התהודה במקרה כללי צריך לגזור את  $I_{max}$  לפי  $\omega$  ולהשוות לאפס. עבור  $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$

$I_{max}(\omega)$  עבור  $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$



מקבלים אמפליטודה מקסימאלית כאשר  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

**פתרון עם מספרים מורכבים**:

אם כל המשתנים הם פונקציות מהצורה  $A \cos(\omega t + \phi)$  והמשוואות שלנו לינאריות. אז יותר נוח לעבוד עם מספרים מורכבים. כך ש:

$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \phi) = \text{Re}\{\tilde{I}(t)\}$

$\tilde{I}(t) = I_0 e^{i(\omega t + \phi)}$

(בדרי"כ לא רושמים את הגל)

$$\vec{\mu} = I\vec{A} \quad : \text{ (}\vec{m} \text{ - מסומן ב-} \vec{m}\text{) : לפעמים מסומן ב-} \vec{\mu}\text{)}$$

I - הזרם בלולאה.  $\vec{A}$  - השטח הסגור על-ידי הלולאה.  
כיוונו במאונך למשטח ובהתאם לכלל יד ימין של הזרם.  
השדה שיוצר דיפול מגנטי במרחק הגדול בהרבה מממדיי

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 [3(\vec{\mu} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{\mu}]}{4\pi r^3}$$

הדיפול :  
מומנט כוח שפועל על דיפול מגנטי הנמצא בשדה מגנטי

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

חיצוני :  
האנרגיה הפוטנציאלית של דיפול מגנטי בשדה מגנטי

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

חיצוני :