פיסיקה 2 (אלקטרומגנטיות) לתלמידי הנדסה

סמסטר א' תשס"ח

תכן הקורס:

1. אלקטרוסטטיקה וחוק קולומב, השדה החשמלי וחוק גאוס (פרקים 27-29)
2. פוטנציאל חשמלי ואנרגיה חשמלית (פרק 30)
3. חוק גאוס הדיפרנציאלי, משוואות פואסון ולפלס (תוספות)
4. קבלים וחומרים דיאלקטריים (פרק 31)
5. מעגלי זרם ישר (פרקים 32-33)
6. השדה המגנטי (מטענים וזרמים בשדות מגנטיים) (פרק 34)
7. חוק אמפר (פרק 35)
8. חוק ההשראה של פרדיי (פרק 36)
9. התכונות המגנטיות של החומר (פרק 37)
10. השראות (פרק 38)
11. משוואות מכסוול אינטגרליות ודיפרנציאליות (פרק 40 ותוספות)
12. גלים אלקטרומגנטיים (פרק 41 ותוספות)

ספרות:

Physics by Halliday, Resnick and Krane

(מהדורה חמישית)

חוק קולון, שדה חשמלי וחוק גאוס

1.א. חוק קולון: $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\hat{r}$

2.א. שדה חשמלי: $\vec{E} = \lim(q_2 \to 0)\frac{\vec{F}}{q_2}$

2.ב. חוק גאוס: $\varepsilon_0 \oint \vec{E}.d\vec{s} = q_{enc}$

תוצאות:

1. מטען חשמלי על פני מוליך מרוכז כולו על פני המשטח החיצוני
2. שדה חשמלי ליד פני מוליך טעון: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$
3. שדה חשמלי במרחק r מתיל אינסופי מוליך, טעון: $E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$
4. שדה חשמלי ליד מוליך מישורי אינסופי דק: $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$
5. שדה חשמלי מחוץ לכדור מוליך טעון: $\vec{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\hat{r}$
6. שדה חשמלי בתוך מוליך כדורי טעון: $E = 0$
7. שדה חשמלי בתוך מבודד כדורי טעון באופן אחיד: $E = \frac{qr}{4\pi\varepsilon_0 R^3}$

פוטנציאל חשמלי

3.א. אנרגיה פוטנציאלית חשמלית: $\Delta U = U_f - U_i = -W_\infty$

3.ב. פוטנציאל חשמלי: $\Delta V = V_f - V_i = -W_\infty / q$ - (יחידות: וולט)

פוטנציאל עקב נקודת מטען: $V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}$

התפלגות מטען רציפה: $V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V \frac{\rho dV}{r}$

פוטנציאל דיפול חשמלי: $V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p\cos\theta}{r^2}$

דיסקה מבודדת טעונה על הציר המרכזי: $V(x) = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}(\sqrt{x^2 + R^2} - x)$

3.ג. משטחים שווי פוטנציאל: אוסף הנקודות לגביהן $V(\vec{r}) = const.$

3.ד. הקשר שדה פוטנציאל: הגדרה $V_f - V_i = -\int_i^f \vec{E} \bullet d\vec{l}$

מכאן נובע כי: .1 $\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla V(\vec{r})$ .2 $\nabla \times \vec{E} = 0$

חוק גאוס הדיפרנציאלי, משוואות פואסון ולפלס

4.א. הגדרת הדיברגנץ $\vec{\nabla} \bullet \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial Fy}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$

משפט הדיבירגנץ $\oint \vec{F} \bullet d\vec{A} = \int \vec{\nabla} \bullet \vec{F}\, dV$

4.ב. חוק גאוס הדיפרנציאלי $\vec{\nabla} \bullet \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$

יישום לגליל אינסופי ולכדור מבודד טעון

4.ג. משוואות פואסון ולפלס

משוואת פואסון: $\vec{\nabla}^2 V(x,y,z) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$

משוואת לפלס: $\vec{\nabla}^2 V(x,y,z) = 0$

4.ד. אופרטור ה- curl ומשוואת סטוקס

הגדרת ה- curl

חוק סטוקס $\oint \vec{F} \bullet d\vec{l} = \int_{surface} curl\vec{F} \bullet d\vec{A}$

כוחות משמרים

קבלים וחומרים דיאלקטריים

5.א. קבולת

חישובי קבולת: קבל לוחות $C = \frac{\varepsilon_0 A}{D}$

קבל צילינדרי (רדיוסים a,b) $C = 2\pi\varepsilon_0 L / \ln(\frac{b}{a})$

קבל כדורי (רדיוסים a,b) $C = 4\pi\varepsilon_0 (\frac{ab}{b-a})$

כדור טעון ברדיוס R: $C = 4\pi\varepsilon_0 R$

5.ב. קבלים במעגל חשמלי

חיבור במקביל $C = C_1 + C_2 + ...$

חיבור בטור $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ...$

5.ג. אנרגית השדה החשמלי

אנרגיה אצורה בקבל לוחות: $E = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} = \frac{1}{2}CV^2$

צפיפות האנרגיה החשמלית: $u = \frac{U}{V} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$

אנרגיה של כדור טעון: $E = \frac{q^2}{8\pi\varepsilon_0 R}$

5.ד. חומרים דיאלקטריים

שינוי פוטנציאל וקיבולת בנוכחות חומר דיאלקטרי

$$C \to kC \quad , \quad V \to \frac{V}{k}$$

חוק גאוס בנוכחות חומר דיאלקטרי

$$k\varepsilon_0 \oint \vec{E} \bullet d\vec{A} = q_{net} \qquad \oint \vec{D} \bullet d\vec{A} = q_{net}$$

מעגלי זרם ישר

6.א. זרם חשמלי

הגדרת הזרם $q = \int i dt$, $i = dq/dt$

יחידות הזרם (אמפר)

צפיפות זרם $i = \int \vec{j} \bullet d\vec{A}$

מהירות תנועת מטענים (מהירות סחף) $v_d = j / ne$ $\vec{j} = -ne\,\vec{v}_d$

6.ב. מוליכות, התנגדות וחוק אוהם

הגדרת ההתנגדות $R = V / i$

התנגדות סגולית $\rho = 1/\sigma$

מוליכות סגולית והיחס צפיפות זרם שדה $\vec{j} = \sigma\vec{E}$ $R = \rho \dfrac{L}{A}$,

חוק אוהם (מיקרוסקופי)

6.ג. מעברי אנרגיה במעגל זרם

הספק ואנרגיה חשמלית : כללי $dU = dqV_{ab} = iV_{ab}dq$, $P = dU/dt = iV_{ab}$

על פני נגד $P = i^2 R$

6.ד. מעגלי זרם ישר

כח אלקטרו מניע (כא״מ) - ε

חוק קירכהוף מספר 2 (שימור אנרגיה)

התנגדות פנימית והפרש פוטנציאלים

חיבורי נגדים במעגלי זרם. בטור : $R_{eq} = \Sigma R_i$ במקביל: $\dfrac{1}{R_{eq}} = \Sigma \dfrac{1}{R_i}$

חוק קיכהוף מספר 1 (שימור מטען)

6.ה. מעגלי RC

טעינת מעגל RC: $q = \varepsilon C[1 - \exp(-\dfrac{t}{RC})]$

פרוק מעגל RC : $q = \varepsilon C \exp(-\dfrac{t}{RC})$

השדה המגנטי

הקדמה: מטען חשמלי ושדה חשמלי, זרם ושדה מגנטי

7.א. כוח מגנטי על מטען נע $\vec{F} = q\vec{v}x\vec{B}$

יחידות: טסלה וגאוס

כח לורנץ (שדה חשמלי ומגנטי): $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v}x\vec{B})$

7.ב. תנועת מטענים בשדה מגנטי

שדה אחיד וכוח מרכזי $qvB = mv^2 / r = m\omega^2 r$

רדיוס ותדירות הציקלוטרון $\omega = \dfrac{qB}{m}$ $\quad r = \dfrac{mv}{qB}$,

ספקטרוגרף מסות

מאיצי חלקיקים: ציקלוטרון וסינכרוטרון

תנועת מטענים בשדה המגנטי של כדור הארץ וכוכבי ניטרונים

7.ג.אפקט הול (Hall)

שדה חשמלי, שדה מגנטי וצפיפות מטענים חופשיים

7.ד. כוח מגנטי על מוליך נושא זרם

$$\vec{F} = i\vec{L}x\vec{B}$$

7.ה. מומנט מגנטי ודיפול מגנטי

דיפול מגנטי $\vec{\tau}_B = \vec{\mu}x\vec{B}$, $\mu = iNA$

אנרגיה מגנטית פוטנציאלית $U = -\vec{\mu} \bullet \vec{B}$

אנלוגיה לדיפול חשמלי $\vec{\tau}_E = \vec{p}x\vec{E}$, $U = -\vec{p} \bullet \vec{E}$

חוק אמפר

8.א. חוק ביו-סבר (Biot-Savart)

כוח על זרם 2 עקב שדה מגנטי $d\vec{F}_{21} = i_2 d\vec{l}_2 \times \vec{B}_1$

חוק ביו-סבר $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$

במרחק R מתיל ארוך נושא זרם $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}$

בנקודה z על ציר הסימטרייה של טבעת זרם $B = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}$

ליד פס רחב נושא זרם $\frac{\mu_0 i}{\pi a}\tan^{-1}(\frac{a}{2R})$

8.ב. קווי השדה המגנטי

8.ג. כוח בין תיילים נושאי זרם

מרחק d משיכה ודחייה ע"פ כוון הזרם: $F_{21} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{Li_1 i_2}{d}$

8.ד. חוק גאוס למגנטיות

לשדה מגנטי אין מקורות (אין מונופול מגנטי): $div\vec{B} = 0$, $\oint \vec{B} \bullet d\vec{A} = 0$

8.ה. חוק אמפר

חוק אמפר בצורה אינטגרלית $\oint \vec{B} \bullet d\vec{l} = \mu_0 i = \int \vec{J} \bullet d\vec{A}$

שדה של סולנואיד $B = \mu_0 in$

שדה של טורואיד במרחק r $B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{iN}{r}$

הצורה הדיפרנציאלית של חוק אמפר $\mu_0 \vec{J} = curl\vec{B}$

חוק ההשראה של פרדיי

9.א. זרמים מושרים:

ניסויי פרדיי והנרי

9.ב. חוק ההשראה של פרדיי

$$\epsilon \quad \Phi_B = \int_S \vec{B} \bullet d\vec{A} \qquad = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

זרמי מערבולת

9.ג. חוק לנץ:

כוון הזרם המושרה

9.ד. כא"מ עקב תנועה:

תיל באורך l נע במהירות v בשדה מגנטי אחיד $\epsilon = Blv$, $i = \frac{Blv}{R}$

הספק הכוח המניע $P = \frac{B^2 l^2 v^2}{R}$

תיל ישר בתנועה מעגלית סיבובית $\epsilon = \frac{1}{2} B\omega R^2$

גנרטור לזרם חילופין $\epsilon = \omega NAB \sin \omega t$

9.ה. שדה חשמלי מושרה

$$\epsilon \qquad = \oint \vec{E} \bullet d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{dt}$$

בצורה דיפרנציאלית: $curl\vec{E} = -\frac{\partial \Phi_B}{dt}$

התכונות המגנטיות של החומר

10.א. חוק גאוס למגנטיות

$$div\vec{B} = 0 \quad , \qquad \oint_S \vec{B} \bullet d\vec{A} = 0$$

10.ב. מגנטיות של אטומים ומוליקולות

מומנט דיפול מגנטי של אלקטרון עקב תנע זוויתי $\vec{\mu}_L = \frac{-e}{2m}\vec{L}$

כאשר התנע הזוויתי הוא $L = n\frac{h}{2\pi} = mvr$: $(n = 1,2,3,...)$

ספין ומומנט דיפול עצמי

חמרים דיאמגנטיים, פרה-מגנטיים ופרומגנטיים

כוח על דיפול מגנטי בשדה מגנטי משתנה מרחבית:

$$\vec{F} = \pi r^2 i \frac{\partial B}{\partial z}\vec{k} = \vec{\mu}\frac{\partial B}{\partial z}$$

מגנטיות גרעינית

10.ג. מגנטיזציה

הגדרה: $\vec{M} = \frac{\Sigma\vec{\mu}_i}{V}$

שדה מגנטי בחומר: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M \quad , \quad \vec{B}_M = \mu_0\vec{M}$

או: $\vec{B} = \kappa_m\vec{B}_0$

השראות

11.א. השראות הדדית

$$M_{21} = \frac{N_2\Phi_{21}}{i_1} = -\frac{\varepsilon_{21}}{di_1/dt}$$ וידוע כי $$M_{21} = M_{12}$$

שני סלילים דקים קונצנטריים (גדול 1, קטן 2): $$M = \frac{\pi\mu_0 N_1 N_2 R_2^2}{2R_1}$$

טורואיד בתוך טורואיד: $$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 h}{2\pi}\ln\frac{b}{a}$$

11.ב. השראות עצמית

$$L = \frac{N\ \Phi}{i} = -\frac{\varepsilon}{di\ \ /dt}$$

השראות של סליל ארוך ליחידה שארכה l ושטח חתך A $$L = \mu_0 n^2 lA$$

השראות עצמית של טורואיד $$L = \frac{\mu_0 Nh}{2\pi}\ln\frac{b}{a}$$

11.ג. מעגלי RL

במעגל RL עם מקור כא"מ $$i = \frac{\varepsilon}{R}[1-\exp(-tR/L)]$$

11.ד. אנרגיית השדה המגנטי

אנרגיה מגנטית של משרן (סליל) $$U_B = \frac{1}{2}Li^2$$

צפיפות האנרגיה המגנטית ליחידת נפח $$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

משוואות מכסוול

12.א. האיבר החסר בחוק אמפר $\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}$

12.ב. זרם ההעתקה $i_D = \varepsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{E} \bullet d\vec{A}$

12.ג. משוואות מכסוול:

	צורה אינטגרלית	**צורה דיפרנציאלית**
חוק גאוס לשדה חשמלי:	$\varepsilon_0 \oint \vec{E} . d\vec{s} = q_{enc}$	$\vec{\nabla} \bullet \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
חוק גאוס לשדה מגנטי:	$\oint_S \vec{B} \bullet d\vec{A} = 0$	$div\vec{B} = 0$
חוק אמפר:	$\oint \vec{B} \bullet d\vec{l} = \mu_0 (i + i_D)$	$curl\vec{B} = \mu_0 \vec{J}$
חוק פרדיי:	$\epsilon = \oint \vec{E} \bullet d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{dt}$	$curl\vec{E} = -\frac{\partial \Phi_B}{dt}$

12.ד. E, B, והקבועים הבסיסיים של הטבע:

משיקולי ממדים: $\frac{[E]}{[B]} = [v] = \frac{1}{\left[\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}\right]}$ כאשר $v = c = 3 \cdot 10^8 \, m / \sec$

גלים אלקטרומגנטיים

13.א. שדה חשמלי ושדה מגנטי נעים במרחב

זרם במישור אינסופי, לזמן קצוב, יוצר גל א״מ הנע במרחב במהירות האור

13.ב. משוואת הגלים:
$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}-\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2}=0$$

פתרונות: כל פונקציה מן הצורה $f=f(x\pm vt)=f(kx\pm\omega t)$

כאשר $v=\dfrac{\omega}{k}$ היא מהירות הפאזה (מהירות הגל)

גל במיתר מתוח (כוח אלסטי F ומסה ליחידת אורך μ). מהירות הגל: $v=\sqrt{\dfrac{F}{\mu}}$

גל הרמוני: $\Psi=\Psi_0\sin(kx\pm\omega t)$

כאשר $k=\dfrac{2\pi}{\lambda}$ (מספר הגל) ו- $\omega=\dfrac{2\pi}{T}$ (תדירות הגל) ו- $v=\dfrac{\lambda}{T}=\lambda\gamma$

עקרון הסופרפוזיציה: אם Ψ_1 ו- Ψ_2 מקיימות את משוואת הגלים, כך גם $\Psi_1+\Psi_2$

13.ג. גלים אלקטרומגנטיים

מקרה פרטי: $\vec{E}=\vec{E}(z,t)\quad\vec{B}=\vec{B}(z,t)$

מקבלים: $E_z=B_z=0$ ושאר הרכיבים מקיימים, כל אחד בנפרד, את משוואת הגלים,

למשל $E_x=E_{0x}(z-ct)$ כאשר $v=\dfrac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}=c$, $E_x=cB_y$ ו- $E_y=-cB_x$

גל אלקטרומגנטי הרמוני: $E_x=E_{0x}\cos(kz-\omega t+\varphi_E)$

גלים עומדים: $\Psi=A(z)\cos(\omega t)$ כאשר $A(z)=\cos(kz)$

נקודות צומת $kz=\dfrac{\pi}{2},\dfrac{3\pi}{2},...$

וקטור פוינטינג: $\vec{S}=\dfrac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B}$ כוונו ככוון התקדמות הגל ו- $\left|\vec{S}\right|=\dfrac{EB}{\mu_0}=\varepsilon_0 cE^2$ נותן את הספק מעבר האנרגיה ליחידת שטח בכוון התקדמות הגל.