עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 3, אביב

# על הקורס

לקורס החינמי הזה יש 10 יחידות ו-6 מעבדות. אלה המספרים האמיתיים, לא תוכנית ארוכה יותר שקוצרה.

בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד קורס שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר המודפס והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.

זהו מתווה של קורס חינמי ללימוד עצמי שנכתב על ידי Saving Planets. הוא אינו קורס אוניברסיטאי, אינו מעניק נקודות זכות אקדמיות, ואף מוסד לימודים אינו מעורב בו.

היקפו עוקב אחר קורס סמסטריאלי בשנה השלישית במבנים אווירונאוטיים. הוא מבוסס על הנושאים והעומק של MIT 16.20 Structural Mechanics ושל חלקי המבנים ב־MIT 16.01–16.04 Unified Engineering (בחינם ב־MIT OpenCourseWare), ועל קורסים כמו Purdue AAE 352 ו־Georgia Tech AE 3140, בעזרת הפרק על מבנה המטוס ב־FAA Pilot's Handbook וסימולציות PhET, שאליהם אנו מקשרים היכן שהם עוזרים. אף אחד מהמחברים, המוסדות או הגופים האלה אינו תומך בדף זה.

מה אנחנו מוסיפים: כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית עם מקור ציבורי מצוטט (כנפיים מרוכבות עם תמוכות, ייצור מרוכבים בקצב גבוה וחומרים קלים), כל מספר בדף מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני הפרסום, ולכל מעבדה יש סימולציה חינמית, גיליון אלקטרוני או גרסה ביתית בטוחה.

עברו עליו לפי הסדר. בכל יחידה יש מטרות, רעיונות מרכזיים, משוואות, דוגמאות צעד אחר צעד, תרגול עם תשובות מלאות, טעויות נפוצות, כרטיסיות ובוחן. ההתקדמות שלכם נשמרת רק בדפדפן הזה.

## איך הקורס הזה עוזר להציל את כדור הארץ

מטוס נושא את המבנה שלו בכל טיסה, ולכן כל קילוגרם של מבנה עולה דלק לאורך כל חיי המטוס. כנפיים וגופי מטוס קלים יותר, שמתאפשרים בזכות ניתוח טוב יותר וחומרים טובים יותר, הם אחד המנופים העיקריים לטיסה נקייה יותר.

NASA מונה טכנולוגיית מטוסים יעילה כאחת משלוש הדרכים העיקריות להפוך את התעופה לבת־קיימא. כל יחידה מסתיימת בפרק קצר עם מקורות. ערכים שאינם ממקור מסומנים כערכים לדוגמה או כערכי ספר לימוד.

## למורים

אפשר ללמד את הקורס הזה, או לתת לתלמיד לעבור אותו לבד. הוא חינם. Saving Planets לא נותנת ציון ולא נקודות זכות.

- העמוד הזה הוא כל הקורס: 10 יחידות ו-6 מעבדות (AERO 330).
- תכננו 15 שבועות, בערך 6 עד 9 שעות בשבוע, כולל שבועות המעבדה.

- עקבו אחרי לוח 15 השבועות. קראו את היחידה, פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה. בשבוע מעבדה עשו את המעבדה או את הגרסה הביתית.
- בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר שרואים והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.
- השתמשו בהדפסת העמוד, או הורידו את מדריך הלימוד ב-PDF. דף הנוסחאות נמצא לקראת הסוף.
- שאלו: איך היחידה הזו עוזרת לאנשים ולכוכב? בכל יחידה יש תיבה ירוקה עם עובדה ומקור.
- העתיקו את תבנית המדריך למורה וכתבו את שם הכיתה, הזמן שיש לכם, והשאלות שתשאלו. פתיחת תבנית המדריך למורה

# לפני שמתחילים

### ידע מוקדם

- חוזק חומרים: יסודות של מאמץ, עיבור, כפיפה, פיתול וקריסה.
- סטטיקה: תרשימי גוף חופשי, דיאגרמות גזירה ומומנט.
- חדו״א II ואלגברה לינארית: אינטגרלים ומטריצות.
- ביצועי מטוסים עוזר במקדמי עומס אך אינו נדרש.

### איך ללמוד

- התחילו כל בעיה בתרשים גוף חופשי ובמסלול העומס: היכן העומס נכנס, וכיצד הוא מגיע לתמיכות?
- הפרידו בין עומסים גבוליים לעומסי הרס, וכתבו במפורש את מקדם הביטחון.
- בדפנות דקות, חשבו קודם בזרם גזירה q (N/m), ואז חלקו בעובי.
- בדקו קשיחות וקריסה, לא רק חוזק: מבנים קלים בדרך כלל נכשלים בקריסה.
- השוו חומרים לקילוגרם (קשיחות סגולית וחוזק סגולי), לא למטר מעוקב.
- פתרו כל תרגיל על נייר לפני שאתם פותחים את התשובה, וחזרו על הבחנים כעבור כמה ימים.

### מה צריך

- מחשב או טאבלט לסימולציה החינמית PhET Hooke’s Law.
- סרגל מעץ או מפלסטיק, קצה שולחן, מטבעות או משקולות קטנות, סרט הדבקה וסרגל נוסף למדידה.
- ספגטי יבש, משקל מטבח, מהדקים ומשקפי מגן.
- תוכנת גיליון אלקטרוני למעבדות החומרים, גוף המטוס והמרוכבים.

# לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

כ־6 עד 9 שעות בשבוע: קריאה, תרגילים, ובשבועות המעבדה גם המעבדה.

| שבוע | יחידה | נושאים | קריאה |
|---|---|---|---|
| 1 | עומסי טיסה, מקדמי ביטחון וחומרים | מסלולי עומס, מקדמי עומס, מקדמי ביטחון, חומרים; מעבדה A | FAA PHAK Ch. 3 |
| 2 | עומסי גזירה וכפיפה בכנף | דיאגרמות גזירה וכפיפה בכנף | MIT 16.01 |

| שבוע | יחידה | נושאים | קריאה |
|---|---|---|---|
| 3 | כפיפה של קורות דקות דופן | מאמץ כפיפה וחתכים מאודיאלים; מעבדה B | MIT 16.20 |
| 4 | כפיפה של קורות דקות דופן | תכנון פסי קורה, כפיפה לא סימטרית | MIT 16.20 |
| 5 | פיתול וזרם גזירה בחתכים סגורים | פיתול וזרם גזירה בחתכים סגורים | MIT 16.20 |
| 6 | גזירה בחתכים פתוחים ומרכז הגזירה | חתכים פתוחים ומרכז הגזירה | MIT 16.20 |
| 7 | קריסה של עמודים, מחזקים ולוחות | קריסת עמודים; תרגול לבחינת אמצע | MIT 16.20 |
| 8 | קריסה של עמודים, מחזקים ולוחות | קריסת לוחות ולוחות מחוזקים; מעבדה C | MIT 16.20 |
| 9 | גופי מטוס בלחץ וקליפות דקות | גופי מטוס בלחץ; מעבדה D | FAA PHAK Ch. 3 |
| 10 | חומרים מרוכבים ולמינטים | סיבים, מטריצות, כלל התערובות | MIT 3.032 |
| 11 | חומרים מרוכבים ולמינטים | למינטים וייצור; מעבדה E | NASA HiCAM |
| 12 | עייפות, שבר וסבולת נזק | עייפות וכלל מיינר | MIT 3.032 |
| 13 | עייפות, שבר וסבולת נזק | שבר וסבולת נזק; מעבדה F | MIT 3.032 |
| 14 | תכנון קל משקל ומבנים בני־קיימא | משקל, דלק ומדדי חומרים | חומרים קלים של ה־DOE |
| 15 | תכנון קל משקל ומבנים בני־קיימא | מחזור חיים ומבנים בני־קיימא; תרגול לבחינה הסופית | NASA; DOE |

## ההתקדמות שלכם

סמנו יחידות ומעבדות כשאתם מסיימים אותן, ועשו את הבחנים. ההתקדמות והציונים נשמרים רק בדפדפן הזה ולעולם לא נשלחים אלינו.

## יחידות

# עומסי טיסה, מקדמי ביטחון וחומרים

החלקים המבניים של מטוס ומסלולי העומס שלהם, מקדמי עומס, עומסים גבוליים ועומסי הרס, מקדם הביטחון 1.5, שולי ביטחון, ובחירת חומרים לפי קשיחות סגולית וחוזק סגולי.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לעקוב אחר מסלול העומס דרך הכנף, גוף המטוס והזנב.
- לחשב עומסים גבוליים ועומסי הרס ממקדם עומס.
- לחשב שולי ביטחון.
- להשוות חומרים לפי קשיחות סגולית וחוזק סגולי.

## מושגי מפתח

- העילוי על ציפוי הכנף עובר למחזקים ולצלעות, אחר כך לקורות, ואז דרך תיבת הכנף לגוף המטוס. כל חלק במטוס מתוכנן לפי מסלול העומס הזה.
- העומסים משתנים עם מקדם העומס n = L/W. העומס הגבולי הוא העומס הגדול ביותר הצפוי בשירות (למשל n = 2.5 למטוסי תובלה רבים); המבנה חייב לשאת אותו בלי עיוות קבוע.
- עומס ההרס הוא העומס הגבולי כפול מקדם ביטחון, באופן מסורתי 1.5 בתעופה; המבנה חייב לשאת אותו בלי להיכשל, ולו לכמה שניות.
- שולי ביטחון = MS מותר/בפועל 1 −. שוליים חיוביים עוברים; מתכננים שואפים לשוליים חיוביים קטנים, כי שוליים נוספים פירושם משקל נוסף.
- מכיוון שהמשקל חשוב, משווים חומרים לקילוגרם: קשיחות סגולית E/ρ וחוזק סגולי σ/ρ. לאלומיניום, לטיטניום ולפלדה E/ρ כמעט זהה; מרוכבי פחמן עולים על שלושתם.

## משוואות מפתח

$$n = \frac{L}{W}$$

n=L/W

מקדם עומס

$$P_{ult} = 1.5\,P_{limit}$$

P_ult=1.5 P_limit

עומס הרס

$$MS = \frac{\sigma_{allow}}{\sigma} - 1$$

MS=σ_allowσ-1

$$\frac{E}{\rho},\ \frac{\sigma}{\rho}$$



## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 1.1** מטוס הנוסעים לדוגמה שוקל 588.6 kN ומקדם העומס הגבולי שלו 2.5. מצאו את העומסים הגבולי וההרס על הכנף.

1. גבולי 588.6 × 2.5 = 1471.5 kN.
2. הרס 1471.5 × 1.5 =.

**תשובה:** גבולי 1471.5 kN; הרס 2207 kN.

**דוגמה 1.2** חלק מ־7075 (σ_y = 503 MPa) נתון ל־400 MPa בעומס גבולי. מצאו את שולי הביטחון לכניעה.

1. MS = 503/400 − 1.

**תשובה:** MS = 0.258 (חיובי, ולכן עובר).

**דוגמה 1.3** השוו את הקשיחות הסגולית של אלומיניום 7075 ושל למינט הפחמן לדוגמה.

1. Al: 71.7 × 10⁹/2810 = 25.5 MJ/kg.
2. CFRP: 70 × 10⁹/1600 = 43.75 MJ/kg.

**תשובה:** הלמינט קשיח פי 1.71 לקילוגרם.

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את החוזק הסגולי של אלומיניום 7075.

   503 × 10⁶/2810 = 179 kN·m/kg.

2. מצאו את החוזק הסגולי של Ti-6Al-4V.

   880 × 10⁶/4430 = 199 kN·m/kg.

3. מצאו את E/ρ של פלדה 4130.

205 × 10⁹/7850 = 26.1 MJ/kg, כמעט כמו אלומיניום.

4. מה פירוש MS = −0.1?

החלק אינו עומד בדרישה; יש לתכנן מחדש.

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** מקדם ביטחון גדול יותר תמיד עדיף.

**בפועל:** הוא מוסיף משקל וצריכת דלק לכל חיי המטוס.

**מיתוס:** פלדה קשיחה יותר, ולכן היא יוצרת מטוסים קשיחים יותר.

**בפועל:** לקילוגרם היא אינה קשיחה יותר מאלומיניום.

**מיתוס:** עומס ההרס הוא העומס הצפוי.

**בפועל:** העומס הגבולי הוא המרבי הצפוי; עומס ההרס הוא פי 1.5 ממנו.

## כרטיסיות

**מקדם עומס**

n = L/W.

**עומס גבולי**

הגדול ביותר הצפוי בשירות.

**עומס הרס**

1.5 × גבולי.

**שולי ביטחון**

σ_allow/σ − 1.

**קשיחות סגולית**

E/ρ.

**חוזק סגולי**

σ/ρ.

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. עומס ההרס שווה ל…**

1.5 × גבולי

גבולי

2 × גבולי

גבולי 1.5/

× 1.5 גבולי. מקדם הביטחון בתעופה.

**2. קשיחות סגולית היא…**

E/ρ

Eρ

σ/E

ρ/E

E/ρ. ליחידת מסה.

**3. שולי ביטחון חיוביים פירושם ש…**

החלק עובר

הוא נכשל

הוא קל מדי

כלום

החלק עובר. המותר עולה על המצוי.

**4. העילוי מגיע לגוף המטוס בעיקר דרך…**

הקורות ותיבת הכנף

החלונות

המנועים

כן הנסע

הקורות ותיבת הכנף. מסלול העומס.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

תוכנית החומרים הקלים של ה־DOE מדווחת שבמכוניות ובמשאיות הפחתה של 10% במשקל הרכב יכולה לשפר את יעילות הדלק ב־6% עד 8%, כי נדרשת פחות אנרגיה להאיץ עצם קל יותר. ה־DOE מציין הפחתות מסה אופייניות של 50–70% למרוכבי סיבי פחמן, 30–60% לאלומיניום ו־40–55% לטיטניום כשהם מחליפים חלקי פלדה רגילה.

מטוסים מרוויחים מחיסכון במשקל אף יותר ממכוניות, כי עליהם גם להחזיק את משקלם באוויר לאורך כל הטיסה. בחירת חומרים לפי קשיחות סגולית וחוזק סגולי היא נקודת ההתחלה של החיסכון הזה.

ב־Saving Planets: חוזק חומרים · פתרונות

מקורות: U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks)

## מקורות לימוד חינמיים

- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): פרק FAA על חלקי שלד המטוס.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): פרק מספר לימוד חינמי.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): רשימות MIT על מבנים.
- PhET: Hooke’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/hookes-law): קשיחות באופן אינטראקטיבי.

**סיימתי את היחידה הזו**

# עומסי גזירה וכפיפה בכנף

הכנף כקורה זיזית, פילוגי עילוי לאורך המוטה, דיאגרמות כוח גזירה ומומנט כפיפה, עומסים בשורש, הקלה ממשקל הכנף והדלק, וכיצד מקדם העומס מגדיל הכול.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- למדל כנף כקורה זיזית.
- לשרטט דיאגרמות גזירה ומומנט כפיפה לעילוי מפולג.
- לחשב את כוח הגזירה ומומנט הכפיפה בשורש.
- להסביר את הקלת הכפיפה מהדלק ומהמנועים על הכנף.

## מושגי מפתח

- כל חצי כנף נושא מחצית מהעילוי ופועל כקורה זיזית המרותקת לגוף המטוס. הגזירה והמומנט מרביים בשורש.
- לעילוי אחיד w (N/m) על חצי מוטה s, הגזירה בשורש היא V = ws והמומנט בשורש M = ws²/2.
- פילוג עילוי אליפטי ממקם את מרכז חצי העילוי במרחק 4s/(3π) מהשורש, מעט פנימה מ־s/2 של המקרה האחיד, ולכן המומנט בשורש נמוך יותר.
- מבנה הכנף והדלק מכבידים על הכנף, בכיוון הפוך לעילוי. הקלת הכפיפה הזו היא הסיבה שמטוסי נוסעים נושאים דלק בכנפיים ושמנועים על הכנף עוזרים.
- כל העומסים משתנים עם מקדם העומס: ב־n = 2.5 המומנט בשורש הוא פי 2.5 מערכו ב־1-g.

## משוואות מפתח

$$V(y) = \int_{y}^{s} w\, dy$$

V(y)=_y^s w dy

גזירה מעומס מפולג

$$M(y) = \int_{y}^{s} V\, dy$$

M(y)=_y^s V dy

מומנט מגזירה

$$M_{root} = \tfrac{1}{2} w s^2$$

M_root=12ws^2

עילוי אחיד

$$M_{root} = \frac{L}{2} \cdot \frac{4s}{3\pi}$$

M_root=2⋅4s3π

עילוי אליפטי

## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 2.1** למטוס הנוסעים לדוגמה (588.6 kN) חצי מוטה של 17 m. בהנחת עילוי אחיד ב־1 g, מצאו את w, את הגזירה בשורש ואת המומנט בשורש לכנף אחת.

1. חצי עילוי = 294.3 kN; w = 294300/17 = 17.31 kN/m.
2. V = 294.3 kN.
3. M = 17,312 × 17²/2.

**תשובה:** w = 17.31 kN/m; V = 294.3 kN; M = 2.50 MN·m.

**דוגמה 2.2** חזרו על חישוב המומנט לפילוג האליפטי.

1. M = 294,300 × 4 × 17/(3π).

**תשובה:** M = 2.12 MN·m, נמוך ב־15.1%.

**דוגמה 2.3** מצאו את המומנט בשורש בעילוי אחיד בעומס גבולי (n = 2.5) ובעומס הרס (1.5×).

1. גבולי: 2.50 × 2.5 = 6.25 MN·m.
2. הרס: 6.25 × 1.5.

**תשובה:** גבולי 6.25 MN·m; הרס 9.38 MN·m.

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מקטינים בחצי את חצי המוטה באותו עילוי. מהו המומנט בשורש?

   קטן בחצי (M = Ls/4 לעילוי אחיד).

2. מצאו את יחס המומנטים, אליפטי לאחיד.

   8/(3π) = 0.849.

3. מדוע מטוסי נוסעים משתמשים בדלק הכנף ראשון או אחרון?

דלק בכנף מקל על הכפיפה; שמירתו זמן רב יותר עוזרת.

4. הגזירה בשורש ב־$n = 2.5$?

$2.5 \times 294.3 = 735.8$ kN.

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** קצה הכנף נושא את העומסים הגדולים ביותר.

**בפועל:** השורש נושא אותם.

**מיתוס:** משקל הכנף מוסיף למומנט הכפיפה.

**בפועל:** הוא מקל עליו.

**מיתוס:** המומנט משתנה עם חצי המוטה.

**בפועל:** ב־$w$ קבוע הוא משתנה כמו $s^2$.

## כרטיסיות

**כנף זיזית**

מרותקת בשורש.

**גזירה בשורש**

חצי עילוי.

**מומנט בשורש, עילוי אחיד**

$ws^2/2$.

**מרכז אליפטי**

$4s/(3\pi)$.

**הקלת כפיפה**

משקל הכנף והדלק.

**מקדם עומס**

מגדיל את כל העומסים.

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. המומנט בשורש לעילוי אחיד $w$ על מוטה $s$ הוא…**

$ws^2/2$

$ws$

$ws^3$

w/s

$ws^2/2$. זיז.

**2. מרכז העילוי האליפטי נמצא ב...**

$4s/(3\pi)$

s/2

s

s/3

$4s/(3\pi)$. מהשורש.

**3. דלק בכנף...**

מקל על הכפיפה

מוסיף כפיפה

לא עושה דבר

מוסיף פיתול בלבד

מקל על הכפיפה. פועל נגד העילוי.

**4. הכפלת n מכפילה...**

את כל העומסים

רק את הגזירה

רק את המשקל

כלום

את כל העומסים. לינארי.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

פריט הניסוי SWEET-15 של NASA הוא כנף מרוכבת באורך 15 רגל הנתמכת בתמוכה אווירודינמית, המבוססת על תפיסת Transonic Truss-Braced Wing של NASA. התמוכה נושאת חלק מעומס הכפיפה סמוך לאמצע המוטה, כך שהכנף יכולה להיות ארוכה ודקה בלי מומנט שורש עצום.

מהנדסי NASA כופפו את כנף הניסוי במשך כמה חודשים ב־Flight Loads Laboratory באֵרְמסטרונג, עם חיישני עיבור ועומס רבים, כולל חיישני עיבור בסיבים אופטיים. הנתונים אישרו את תחזיות המודלים הממוחשבים והראו שהכנף עמדה בכוחות הצפויים בטיסה.

ב־Saving Planets: סטטיקה · ביצועי מטוסים

מקורות: NASA: NASA Pushes New Wing Design to Find Structural Limits (Jul. 17, 2026) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/nasa-pushes-new-wing-design-to-find-structural-limits/)

## מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 12.2 Examples of static equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-2-examples-of-static-equilibrium): פרק מספר לימוד חינמי.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות MIT על קורות.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): מבנים ב־MIT.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): פרק FAA על כנפיים.

**סיימתי את היחידה הזו**

# כפיפה של קורות דקות דופן

מאמץ כפיפה σ = My/I, מאודיאליזציה של תיבת כנף לפסים ולציפויים, מומנט שטח שני, כוחות בפסים, כפיפה לא סימטרית, ותכנון פסי קורה לעומס הרס.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב מאמץ כפיפה מ־M, y ו־I.
- למדל קורת תיבה כשטחי פסים מרוכזים.
- לתכנן פסי קורה למומנט הרס.
- לזהות כפיפה לא סימטרית.

## מושגי מפתח

- בכפיפה σ = My/I: המאמץ גדל לינארית מהציר הנייטרלי. החומר הרחוק מהציר הנייטרלי עושה את רוב העבודה.
- תיבות כנף ממודלות כשטחי פסים מרוכזים (booms) הנושאים מאמץ ישיר, המחוברים בציפויים דקים הנושאים גזירה.
- לשני פסים בשטח A במרחק h זה מזה, I = 2A(h/2)² = Ah²/2 והכוח בפס הוא F = M/h.
- תיבות כנף עמוקות יותר צריכות פסים קטנים יותר לאותו מומנט. לכן שורשי כנף עבים חוסכים משקל, ולכן כנפיים דקות בעלות יחס ממדים גבוה צריכות עזרה כמו תמוכות.
- אם החתך אינו סימטרי, או שהמומנט אינו סביב ציר ראשי, כפיפה סביב ציר אחד גורמת להתכופפות סביב הציר האחר (כפיפה לא סימטרית).

## משוואות מפתח

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

σ=My/I

מאמץ כפיפה

$$I = \sum A_i y_i^2$$

I= A_iy_i^2

חתך מאודיאל עם booms

$$F = \frac{M}{h}$$

F=M/h

כוח בפס

$$A = \frac{M}{\sigma_{allow} h}$$

A=σ_allowh

שטח פס נדרש

## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 3.1** מומנט ההרס בשורש הוא 9.38 MN·m ועומק תיבת הכנף 0.6 m. מצאו את הכוח בפס.

1. $F = 9.38 \times 10^6 / 0.6$.

**תשובה:** $F = 15.6$ MN.

**דוגמה 3.2** תכננו כל פס למאמץ מותר של 400 MPa.

1. $A = 9.38 \times 10^6 / (400 \times 10^6 \times 0.6)$.

**תשובה:** $A = 0.0391$ m² (391 cm²) לכל פס.

**דוגמה 3.3** מצאו את $I$ לשני פסים של 0.0391 m² במרחק 0.6 m, ובדקו את $\sigma$.

1. $I = 0.0391 \times 0.6^2/2 = 0.00704$ m⁴.
2. $\sigma = 9.38 \times 10^6 \times 0.3 / 0.00704$.

**תשובה:** $\sigma = 400$ MPa, כמתוכנן.

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מכפילים את עומק התיבה. מהו שטח הפס הנדרש?

   קטן בחצי.

2. היכן מאמץ הכפיפה אפס?

   בציר הנייטרלי.

3. מצאו את $I$ לפסים של 0.01 m² ב־$\pm 0.25$ m.

   $2 \times 0.01 \times 0.25^2 = 0.00125$ m⁴.

4. מדוע פסי הקורה ממוקמים למעלה ולמטה?

y הגדול ביותר נותן הכי הרבה I לקילוגרם.

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** ציפויים דקים נושאים את רוב הכפיפה.

**בפועל:** במאודיאליזציה, הפסים והמחזקים נושאים מאמץ ישיר; הציפויים נושאים גזירה.

**מיתוס:** המאמץ אחיד לאורך חתך הקורה.

**בפועל:** הוא משתנה לינארית עם y.

**מיתוס:** קורה עמוקה יותר כבדה יותר.

**בפועל:** בדרך כלל היא צריכה פחות חומר בפסים.

## כרטיסיות

**כפיפה**

σ = My/I.

**מאודיאליזציית booms**

הפסים נושאים σ, הציפויים נושאים q.

**I של שני פסים**

Ah²/2.

**כוח בפס**

M/h.

**עומק**

עמוק יותר – קל יותר.

**כפיפה לא סימטרית**

התכופפויות מצומדות.

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. מאמץ הכפיפה הוא...**

My/I

M/A

VQ/It

Tr/J

My/I. נוסחת הכפיפה.

**2. הכוח בפס לעומק h הוא...**

M/h

Mh

M/h²

Vh

M/h. צמד כוחות.

**3. תיבות עמוקות יותר צריכות...**

פסים קטנים יותר

פסים גדולים יותר

אותו דבר

בלי פסים

פסים קטנים יותר. 1/h ∝ A.

**4. בתיבות מאודיאלות, הציפויים נושאים...**

גזירה

מאמץ ישיר בלבד

כלום

פיתול בלבד

גזירה. לוחות גזירה.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA מתארת את הכנף עם התמוכות ככנף ארוכה ודקה עם תמוכות מבניות בעלות צורה אווירודינמית, שעשויה להפחית דלק ועלויות תפעול במטוסי נוסעים עתידיים. NASA ו־Boeing בחנו דגם חצי־מוטה של התפיסה במנהרת רוח גדולה בלחץ בדצמבר 2025.

לכנף דקה יש תיבה רדודה, ולכן לפי F = M/h הפסים שלה היו צריכים להיות כבדים. התמוכה מקטינה את M, וכך הכנף נשארת דקה בלי להכביד.

ב־Saving Planets: חוזק חומרים · אווירודינמיקה 1

מקורות: NASA: NASA, Boeing Advance Truss-Braced Wing Research in Test (Apr. 29, 2026) (https://www.nasa.gov/image-article/nasa-boeing-advance-truss-braced-wing-research-in-test/)

## מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): רשימות MIT על כפיפת קורות.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות MIT.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): פרק מספר לימוד חינמי.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): פרק FAA על קורות.

**סיימתי את היחידה הזו**

# פיתול וזרם גזירה בחתכים סגורים

זרם גזירה q, פיתול ברדט–בתו של חתכים סגורים דקי דופן, מאמץ גזירה בציפוי, קצב פיתול, תיבות רב־תאיות, ומדוע כנפיים נבנות כתיבות סגורות.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשתמש בזרם גזירה q = τt.
- ליישם את ברדט–בתו: T = 2Aq.
- לחשב את קצב הפיתול של חתך סגור.
- להסביר מדוע חתכים סגורים עמידים כל כך בפיתול.

## מושגי מפתח

- בדופן דקה, מאמץ הגזירה כפול העובי הוא זרם הגזירה q = τt (N/m). סביב חתך סגור הנושא פיתול טהור, q קבוע.
- ברדט–בתו: T = 2A_e q, כאשר A_e הוא השטח הכלוא בקו האמצע של הדופן.
- קצב הפיתול הוא dθ/dz = (T/(4A_e²G)) ∮ ds/t.
- תיבות סגורות קשיחות בפיתול הרבה יותר מחתכים פתוחים מאותו חומר, ולכן כנפיים נבנות כתיבות פיתול מקורות וציפויים.
- פיתול הכנף נובע מעילוי הפועל לפני מרכז הגזירה או אחריו, וממאזנות וממנועים. קשיחות פיתול נמוכה מדי עלולה לגרום להיפוך מאזנות או לרפרוף.

## משוואות מפתח

$$q = \tau t$$

q=τ t

זרימת גזירה

$$T = 2A_e q$$

T=2A_eq

ברדט–בתו

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{T}{4A_e^2 G}\oint \frac{ds}{t}$$

(dθ)/(dz)=(T)/(4A_e^2G)ds/t

קצב פיתול

$$\tau = \frac{T}{2A_e t}$$

τ=(T)/(2A_et)

מאמץ גזירה בציפוי

## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 4.1** תיבת כנף בממדים 2.0 m × 0.6 m נושאת מומנט פיתול של 500 kN·m. מצאו את זרם הגזירה.

1. $A_e = 1.2\ \text{m}^2$.
2. $q = 500{,}000 / (2 \times 1.2)$.

**תשובה:** $q = 208.3\ \text{kN/m}$.

**דוגמה 4.2** מצאו את מאמץ הגזירה בציפויים בעובי 4 mm.

1. $\tau = 208{,}333 / 0.004$.

**תשובה:** $\tau = 52.1\ \text{MPa}$.

**דוגמה 4.3** מצאו את קצב הפיתול ($G = 27\ \text{GPa}$, דופן אחידה בעובי 4 mm).

1. $\oint ds/t = 1300 / 0.004 = 5.2$.
2. $d\theta/dz = 500{,}000 \times 1300 / (4 \times 1.2^2 \times 27 \times 10^9)$.

**תשובה:** $d\theta/dz = 4.18 \times 10^{-3}\ \text{rad/m}$.

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. צינור דק ברדיוס 0.1 m ובעובי דופן 2 mm נושא 10 kN·m. מצאו את τ.

   $T/(2\pi r^2 t) = 79.6\ \text{MPa}$.

2. מצאו את J של הצינור הזה.

   $2\pi r^3 t = 1.257 \times 10^{-5}\ \text{m}^4$.

3. מכפילים את השטח הכלוא באותו מומנט פיתול. מהו זרם הגזירה?

קטן בחצי.

4. מדוע חריץ בצינור הורס את קשיחות הפיתול שלו?

הוא הופך לחתך פתוח.

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** זרם הגזירה משתנה סביב חתך סגור בפיתול טהור.
**בפועל:** הוא קבוע.

**מיתוס:** ציפויים עבים יותר הם תמיד מה שעוזר הכי הרבה בפיתול.
**בפועל:** השטח הכלוא חשוב יותר.

**מיתוס:** חתכים פתוחים וסגורים דומים בפיתול.
**בפועל:** הסגורים קשיחים פי כמה וכמה.

## כרטיסיות

**זרימת גזירה**

.q = τt

**ברדט–בתו**

.T = 2A_e q

**קצב פיתול**

.ds/t/(4A_e²G)∮T

**תיבת פיתול**

קורות וציפויים סגורים.

**צינור דק**

.τ = T/(2πr²t)

**רפרוף**

דורש קשיחות פיתול.

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. ברדט–בתו נותן T = …**

2Aq

Aq

qt

q/A

2Aq. חתך סגור.

**2. זרם הגזירה הוא...**

τt

τ/t

σt

T/A

τt. הגדרה.

**3. כנפיים נבנות כתיבות סגורות לשם...**

קשיחות פיתול

מראה

דלק בלבד

העילוי

קשיחות פיתול. תיבת פיתול.

**4. בפיתול טהור q...**

קבוע

אפס

מרבי בפינות

באקראי

קבוע. שיווי משקל.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA מדווחת ש־SWEET-15 שילב חמש טכנולוגיות מתקדמות לייצור ולהרכבה של מרוכבים, ושגישת הייצור, שפותחה ב־Langley עם הרובוט Integrated Structural Assembly of Advanced Composites, נועדה לייצר מבנים מרוכבים קלים וחזקים יותר לכלי טיס וחלל.

תיבת כנף מרוכבת עדיין חייבת לקיים את ברדט–בתו: החיבורים בין הציפויים לקורות מעבירים את זרם הגזירה שמונע מהתיבה להתפתל.

ב־Saving Planets: חוזק חומרים · דינמיקה

מקורות: NASA: NASA Pushes New Wing Design to Find Structural Limits (Jul. 17, 2026) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/nasa-pushes-new-wing-design-to-find-structural-limits/)

## מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): רשימות MIT על פיתול.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות MIT.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): פרק FAA על מבנה הכנף.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): פרק מספר לימוד חינמי.

**סיימתי את היחידה הזו**

# גזירה בחתכים פתוחים ומרכז הגזירה

מאמץ גזירה בקורות τ = VQ/(It), זרם גזירה בחתכים פתוחים דקי דופן, מרכז הגזירה, מדוע פרופילי תעלה מתפתלים תחת עומס, ופיגור גזירה.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- השתמשו ב-τ = VQ/(It).
- למצוא זרם גזירה בחתך פתוח דק דופן.
- לאתר באופן איכותי את מרכז הגזירה.
- להסביר מדוע עומסים מחוץ למרכז הגזירה גורמים לפיתול.

## מושגי מפתח

- גזירה רוחבית יוצרת מאמץ גזירה τ = VQ/(It), כאשר Q הוא המומנט הראשון של השטח שמעבר לחתך.
- בחתכים פתוחים דקי דופן, זרם הגזירה מתחיל מאפס בקצה חופשי ומצטבר לאורך הדופן: q = VQ/I.
- מרכז הגזירה הוא הנקודה שבה עומס רוחבי גורם לכפיפה בלי פיתול. בקורות I סימטריות ובתיבות סגורות הוא על ציר הסימטריה; בפרופיל תעלה הוא מחוץ לדופן האנכית.
- עומסים המופעלים הרחק ממרכז הגזירה מפתלים את החתך. מתכננים ממקמים קורות ומחזקים כך שמרכז הגזירה של הכנף יהיה במקום שבו פועלים העומסים האווירודינמיים, או מספקים קשיחות פיתול מספקת.
- פיגור גזירה: בפסים רחבים, המאמץ הישיר גבוה ביותר ליד הדפנות האנכיות ונמוך יותר ביניהן, ולכן לא כל הפס יעיל במלואו.

## משוואות מפתח

$$\tau = \frac{VQ}{It}$$

τ=VQ/It

מאמץ גזירה בקורה

$$q = \frac{VQ}{I}$$

q=VQ/I

זרימת גזירה

$$Q = \int y\,dA$$

Q= y dA

מומנט ראשון של שטח

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A}$$

τ_max=3V/2A

מלבן, מרבי

## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 5.1** קורה מלבנית מלאה ברוחב 20 mm ובעומק 60 mm נושאת גזירה של 6 kN. מצאו את מאמץ הגזירה המרבי.

1. A = 1200 mm².
2. τ_max = 1.5 × 6000/1200.

**תשובה:** τ_max = 7.5 MPa בציר הנייטרלי.

**דוגמה 5.2** עובי הדופן האנכית של קורת I הוא 4 mm; בציר הנייטרלי Q = 50 × 10³ mm³ ו־I = 20 × 10⁶ mm⁴. מצאו את τ עבור V = 40 kN.

1. τ = 40,000 × 50,000/(20 × 10⁶ × 4).

**תשובה:** τ = 25 MPa.

**דוגמה 5.3** מצאו את זרם הגזירה שם.

1. q = τt = 25 × 4.

**תשובה:** q = 100 N/mm (100 kN/m).

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. היכן זרם הגזירה אפס בחתך פתוח?

   בקצוות החופשיים.

2. מרכז הגזירה של תיבה סגורה סימטרית תחת עומס סימטרי?

   על ציר הסימטריה.

3. מדוע פרופיל תעלה מתפתל כשהוא מועמס דרך הדופן האנכית שלו?

מרכז הגזירה נמצא מחוץ לדופן האנכית.

4. מכפילים את V במלבן. מהו τ_max?

15 MPa.

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** מאמץ הגזירה מרבי בסיבים החיצוניים.

**בפועל:** הוא מרבי בציר הנייטרלי.

**מיתוס:** מרכז הגזירה הוא מרכז הכובד.

**בפועל:** רק בחתכים בעלי סימטריה כפולה.

**מיתוס:** פסים רחבים יעילים במלואם.

**בפועל:** פיגור גזירה מקטין את יעילותם.

## כרטיסיות

**נוסחת הגזירה**

τ = VQ/(It).

**חתך פתוח**

q מתחיל מאפס בקצוות חופשיים.

**מרכז גזירה**

נקודת עומס ללא פיתול.

**פרופיל תעלה**

מרכז הגזירה מחוץ לדופן האנכית.

**מלבן**

τ_max = 1.5V/A.

**פיגור גזירה**

מאמץ לא אחיד בפס.

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. מאמץ הגזירה בקורה הוא…**

VQ/(It)

My/I

Tr/J

P/A

VQ/(lt). נוסחת הגזירה.

**2. בקצה חופשי, זרם הגזירה בחתך פתוח הוא...**

אפס

מקסימלי

קבוע

שלילי

אפס. תנאי שפה.

**3. העמסה דרך מרכז הגזירה גורמת ל...**

ללא פיתול

מתפתלים

קריסה

כניעה

ללא פיתול. הגדרה.

**4. τ_max במלבן הוא...**

1.5V/A

V/A

2V/A

3V/A

1.5V/A. פרבולי.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ניסוי SWEET-15 של NASA הסתיים בניסוי מכוון עד הרס. הכנף כשלה בכ־127% מעומס הגבול התכנוני שלה, עם נזק נראה ליד השפה האחורית של הכנף ובציפוי העליון, מה שסיפק תובנה על התנהגות החיבורים לתמוכה הראשית ולתמוכת העזר מעבר למעטפת הטיסה.

NASA מציינת שזו הייתה הפעם הראשונה שתצורה מייצגת של כנף מרוכבת עם תמיכת מסבך עברה הערכה מבנית מסוג זה. ניסויים כאלה בודקים בדיוק את תחזיות הגזירה והפיתול שביחידות 4 ו־5.

ב־Saving Planets: חוזק חומרים · סטטיקה

מקורות: NASA: NASA Pushes New Wing Design to Find Structural Limits (Jul. 17, 2026) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/nasa-pushes-new-wing-design-to-find-structural-limits/)

## מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): רשימות MIT על זרם גזירה.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות MIT.
- OpenStax UP1, 12.2 Examples of static equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-2-examples-of-static-equilibrium): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): פרק מספר לימוד חינמי.

**סיימתי את היחידה הזו**

# קריסה של עמודים, מחזקים ולוחות

קריסת אוילר של עמודים ותנאי קצה, תמירות, מחזקים כעמודים, קריסת לוחות ציפוי, חוזק לאחר קריסה של לוחות מוקשחים, ומדוע מבנים קלים מתוכננים לרוב לפי יציבות.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב עומסי קריסת אוילר עם מקדמי ריתום קצה.
- לחשב את מאמץ הקריסה של לוח ציפוי.
- להסביר מדוע לוחות מוקשחים נושאים עומס לאחר קריסת הציפוי.
- לזהות מתי הקריסה, ולא הכניעה, היא הקובעת.

## מושגי מפתח

- עמוד תמיר קורס ב־P_cr = π²EI/(KL)², כאשר K = 1 לקצוות פרקיים, 0.5 לקצוות רתומים ו־2 לזיז.
- הקריסה תלויה בקשיחות E ובגאומטריה, לא בחוזק, ולכן חומרים בעלי חוזק גבוה אינם עוזרים לעמוד תמיר.
- לוח שטוח דק בלחיצה קורס ב־σ_cr = kπ²E/(12(1 − ν²)) (t/b)², עם k = 4 ללוח ארוך הנתמך בפשטות.
- מותר לציפויי מטוסים לקרוס בגזירה או בלחיצה בעומסים נמוכים בהרבה מעומס ההרס; אז המחזקים והקורות נושאים את העומס (שדה מתיחה והתנהגות לאחר קריסה).
- מאחר שמבנים קלים דקים, הקריסה קובעת לרוב את מידות הציפויים הלחוצים, המחזקים ודפנות הקורות.

## משוואות מפתח

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

P_cr=(π^2EI)/((KL)^2)

קריסת אוילר

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2$$

σ_cr=(kπ^2E)/(12(1-ν^2))( tb)^2

קריסת לוחות

$$\lambda = \frac{KL}{r}$$

=KL/r

תמירות

$$r = \sqrt{I/A}$$

רדיוס התמד

## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 6.1** מחזק אלומיניום ($E = 71.7\ \text{GPa}$, $I = 2 \times 10^{-8}\ \text{m}^4$) משתרע $0.5\ \text{m}$ בין צלעות, בקצוות פרקיים. מצאו את $P_{cr}$.

1. $P_{cr} = \pi^2 \times 71.7 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-8} / 0.5^2$.

**תשובה:** $P_{cr} = 56.6\ \text{kN}$.

**דוגמה 6.2** חזרו על החישוב עם קצוות רתומים ($K = 0.5$).

1. פי ארבעה מהערך הפרקי.

**תשובה:** $P_{cr} = 226\ \text{kN}$.

**דוגמה 6.3** מצאו את מאמץ הקריסה של לוח ציפוי בעובי $2\ \text{mm}$ וברוחב $150\ \text{mm}$ ($k = 4$, $\nu = 0.33$).

1. $\sigma_{cr} = 4\pi^2 \times 71.7 \times 10^9 / (12 \times 0.891) \times (0.002/0.15)^2$.

**תשובה:** $\sigma_{cr} = 47.1\ \text{MPa}$, הרבה מתחת לכניעה של $503\ \text{MPa}$.

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מקטינים בחצי את המרווח בין הצלעות. מהו עומס הקריסה של המחזק?

   פי ארבעה.

2. מכפילים את עובי הציפוי. מהו $\sigma_{cr}$?

   פי ארבעה: $188\ \text{MPa}$.

3. האם סגסוגת חזקה יותר עם אותו $E$ מעלה את $P_{cr}$?

   No.

4. מהו $K$ לתורן דגל (זיז)?

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** קריסה היא כשל חוזק.

**בפועל:** זהו כשל קשיחות (יציבות).

**מיתוס:** ציפוי שקרס פירושו כנף שכשלה.

**בפועל:** לוחות מוקשחים נושאים עומס לאחר קריסת הציפוי.

**מיתוס:** עמודים ארוכים יותר קורסים בעומס נמוך יותר באופן יחסי.

**בפועל:** לפי $1/L^2$, נמוך בהרבה.

## כרטיסיות

**אוילר**

$\pi^2EI/(KL)^2$.

**K**

פרקי 1, רתום 0.5, זיז 2.

**לוח**

$k\pi^2E(t/b)^2/(12(1-\nu^2))$.

**k**

4 ללוח ארוך נתמך.

**לאחר קריסה**

המקשיחים נושאים את העומס.

**תמירות**

$KL/r$.

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. עומס אוילר משתנה לפי…**

$1/L^2$

$1/L$

$L$

$L^2$

$1/L^2$. $\pi^2EI/L^2$.

**2. קצוות רתומים מכפילים את P_cr ב...**

4

2

0.5

1

.4. K = 0.5

**3. מאמץ הקריסה של לוח משתנה לפי...**

(t/b)²

t/b

b/t

t

²(t/b). נוסחת הלוחות.

**4. הקריסה תלויה ב...**

E ובגאומטריה

חוזק כניעה

צפיפות

צבע

E ובגאומטריה. יציבות.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

פרויקט HiCAM של NASA מונה את החדרת השרף בין הטכנולוגיות שהוא בוחן: יציקה נוזלית שיכולה לייצר מבנים גדולים ומשולבים עם פחות מחברים, ותרמופלסטים שאפשר להתיך ולרתך לחיבור מהיר.

לוחות מוקשחים משולבים, שבהם המחזקים והציפוי מיוצרים כחלק אחד, עומדים בפני קריסה בלי משקל המחברים והאחים. זו דרך אחת לשלדות המרוכבות הקלות יותר ש־HiCAM שואף אליהן.

ב־Saving Planets: חוזק חומרים · אלגברה לינארית

מקורות: NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/)

## מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): רשימות MIT על קריסה.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות MIT.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): פרק FAA על מחזקים וציפויים.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): פרק מספר לימוד חינמי.

**סיימתי את היחידה הזו**

# גופי מטוס בלחץ וקליפות דקות

לחץ בתא הנוסעים, מאמצים היקפיים וציריים בגלילים דקים, מחיצות כדוריות, לחץ וכפיפה משולבים, פתחים וריכוזי מאמץ סביב חלונות ודלתות, ועייפות ממחזורי לחץ.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב מאמץ היקפי וצירי בגליל בלחץ.
- למצוא את עובי הציפוי הדרוש למאמץ נתון.
- להסביר מדוע החלונות מעוגלים.
- לקשר מחזורי לחץ לעייפות.

## מושגי מפתח

- לגליל דק ברדיוס r ובעובי דופן t תחת הפרש לחצים Δp יש מאמץ היקפי σ_h = Δp r/t ומאמץ צירי σ_a = Δp r/(2t): המאמץ ההיקפי כפול מהצירי.
- לקליפה כדורית σ = Δp r/(2t), ולכן מחיצות לחץ קמורות יכולות להיות דקות מהגליל.
- גוף המטוס גם מתכופף תחת משקלו ועומסי הזנב, וזה מתווסף למאמץ הצירי למעלה או למטה.
- פתחים לחלונות ולדלתות מרכזים מאמץ; פינות מעוגלות ולוחות כפלה שומרים על ריכוז נמוך. פינות חדות עלולות לרכז מאמץ פי שלושה ויותר.
- כל טיסה היא מחזור לחץ אחד. לאורך עשרות אלפי טיסות, מחזורים אלה מניעים סדיקת עייפות, נושא יחידה 9.

## משוואות מפתח

$$\sigma_h = \frac{\Delta p\, r}{t}$$

```
σ_h=(Δ p r)/(t)
```

מאמץ טבעתי

$$\sigma_a = \frac{\Delta p\, r}{2t}$$

```
σ_a=(Δ p r)/(2t)
```

מאמץ צירי

$$\sigma_{sphere} = \frac{\Delta p\, r}{2t}$$

```
σ_sphere=(Δ p r)/(2t)
```

קליפה כדורית

$$t = \frac{\Delta p\, r}{\sigma_{allow}}$$

```
t=Δ p rσ_allow
```

עובי נדרש

## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 7.1** לגוף מטוס ברדיוס 2 m עם ציפוי של 1.6 mm יש הפרש לחצים בתא של 55 kPa (ערך לדוגמה). מצאו את המאמצים ההיקפי והצירי.

1. σ_h = 55,000 × 2/0.0016.
2. σ_a = σ_h/2.

**תשובה:** σ_h = 68.75 MPa; σ_a = 34.4 MPa.

**דוגמה 7.2** איזה עובי שומר על מאמץ היקפי של 100 MPa?

1. t = 55,000 × 2/100 × 10⁶.

**תשובה:** t = 1.1 mm (לפני מרווחי עייפות וסבילות לנזק).

**דוגמה 7.3** מצאו את המאמץ במחיצה חצי־כדורית באותו רדיוס ובעובי 1.6 mm.

1. σ = 55,000 × 2/(2 × 0.0016).

**תשובה:** σ = 34.4 MPa.

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מכפילים את רדיוס גוף המטוס באותו ציפוי. מהו המאמץ ההיקפי?

   הוא מוכפל.

2. מדוע סדקים בגוף המטוס נמשכים לעתים קרובות לאורכו?

   המאמץ ההיקפי, שפותח אותם, כפול מהצירי.

3. מדוע חלונות מטוסי נוסעים מעוגלים?

כדי להקטין את ריכוז המאמץ.

4. מקטינים את הפרש הלחצים בתא ב־20%. מהו המאמץ?

נמוך ב־20%.

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** המאמצים הצירי וההיקפי שווים.

**בפועל:** ההיקפי כפול מהצירי.

**מיתוס:** גוף מטוס גדול יותר יכול להשתמש באותו ציפוי.

**בפועל:** המאמץ גדל עם הרדיוס.

**מיתוס:** הלחץ חשוב רק בשיוט.

**בפועל:** כל מחזור מוסיף נזק עייפות.

## כרטיסיות

**מאמץ טבעתי**

Δp r/t.

**מאמץ צירי**

Δp r/(2t).

**כדור**

Δp r/(2t).

**פתחים**

פינות מעוגלות, לוחות כפלה.

**מחזור לחץ**

אחד לכל טיסה.

**עובי**

Δp r/σ.

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. המאמץ ההיקפי הוא…**

Δp r/t

Δp r/(2t)

Δp t/r

Δp/t

Δp r/t. גליל דק.

**2. היחס היקפי/צירי הוא...**

2

1

0.5

4

2. גליל.

**3. חלונות מעוגלים מקטינים...**

ריכוז מאמץ

המשקל בלבד

לחץ

גרר

ריכוז מאמץ. גאומטריה.

**4. כל טיסה היא...**

מחזור לחץ

אירוע קריסה

כניעה

כלום

מחזור לחץ. עייפות.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

פרויקט HiCAM של NASA מתקדם לקראת הדגמות ייצור בקנה מידה גדול של מקטע גוף מטוס ותיבת כנף מרוכבים ב־2028 וב־2029. NASA מציינת שחומרים מרוכבים כבר משמשים בחלקים נרחבים של מטוסים מודרניים, כולל מקטעי גוף וכנף של מטוסים כמו Boeing 787.

מקטע גוף מרוכב נושא את אותם מאמצים היקפיים וציריים כמו מקטע מתכתי; היתרון הוא שהמרוכבים נושאים אותם במסה קטנה יותר ואינם מתאכלים באותו אופן.

ב־Saving Planets: חוזק חומרים · תרמודינמיקה

מקורות: NASA: NASA Hosts 2026 Review on Advanced Composite Manufacturing (Jun. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/directorate/armd/aavp/hicam/nasa-hosts-2026-review-on-advanced-composite-manufacturing/)

## מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): רשימות MIT על קליפות.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): פרק FAA על גופי מטוסים.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): פרק מספר לימוד חינמי.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות MIT.

**סיימתי את היחידה הזו**

# חומרים מרוכבים ולמינטים

סיבים ומטריצות, שבר נפחי של סיבים, כלל התערובות לקשיחות ולצפיפות, קשיחות רוחבית, כיוון שכבות ולמינטים, ערימות כמו־איזוטרופיות, וייצור מרוכבים.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשתמש בכלל התערובות לקשיחות אורכית ולצפיפות.
- להעריך קשיחות רוחבית.
- להסביר מדוע למינטים משתמשים בכמה זוויות שכבה.
- להשוות לוחות מרוכבים ומתכתיים בקשיחות שווה.

## מושגי מפתח

- שכבה מרוכבת היא סיבים קשיחים (פחמן, זכוכית) בתוך מטריצה רכה יותר (אפוקסי או תרמופלסט). הסיבים נושאים את העומס; המטריצה מחזיקה אותם יחד ומעבירה עומס.
- לאורך הסיבים חל כלל התערובות: $E_1 = E_fV_f + E_mV_m$, והצפיפות $\rho = \rho_fV_f + \rho_mV_m$.
- לרוחב הסיבים חל הכלל ההפוך: $1/E_2 = V_f/E_f + V_m/E_m$, ולכן שכבה קשיחה פחות ברוחב פי כמה וכמה.
- למינטים עורמים שכבות ב־$\pm 45°$, $0°$ ו־$90°$ כדי שהחלק יהיה קשיח בכל כיוון שבו הוא מועמס. ערימה כמו־איזוטרופית מתנהגת במישורה כמעט כמו פח מתכת, אך קלה יותר.
- ללוח בכפיפה בקשיחות שווה, המסה משתנה לפי $\rho/E^{(1/3)}$, ולכן חומרים בעלי צפיפות נמוכה מנצחים בציפויים.

## משוואות מפתח

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m$$

`E_1=E_fV_f+E_mV_m`

כלל התערובות

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

`(1)/(E_2)=(V_f)/(E_f)+(V_m)/(E_m)`

הכלל ההפוך

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

`ρ=ρ_fV_f+ρ_mV_m`

צפיפות

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1/3}$$

```
(m_2)/(m_1)=(ρ_2)/(ρ_1)((E_1)/(E_2))^1/3
```

מסת לוח בקשיחות שווה

## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 8.1** סיבי פחמן ($E = 230$ GPa, $\rho = 1800$ kg/m³) באפוקסי ($E = 3.5$ GPa, $\rho = 1200$ kg/m³) ב־$V_f = 0.6$ (ערכי ספר לימוד). מצאו את $E_1$ ואת $\rho$.

1. $E_1 = 230 \times 0.6 + 3.5 \times 0.4$.
2. $\rho = 1800 \times 0.6 + 1200 \times 0.4$.

**תשובה:** $E_1 = 139.4$ GPa; $\rho = 1560$ kg/m³.

**דוגמה 8.2** מצאו את $E_2$.

1. $1/E_2 = 0.6/230 + 0.4/3.5$.

**תשובה:** $E_2 = 8.55$ GPa, נמוך פי 16.3 מ־$E_1$.

**דוגמה 8.3** לוח ציפוי מ־7075 מוחלף בלמינט לדוגמה ($E = 70$ GPa, $\rho = 1600$) בקשיחות כפיפה שווה. מהו יחס המסות?

1. $m_2/m_1 = (1600/2810) \times (71.7/70)^{(1/3)}$.

**תשובה:** $m_2/m_1 = 0.574$: קל ב־42.6%.

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את $E_1$ ב־$V_f = 0.5$.

   $230 \times 0.5 + 3.5 \times 0.5 = 116.8$ GPa.

2. מדוע לא לכוון את כל השכבות ל־0°?

   הוא יהיה חלש ורופס בכיוונים אחרים.

3. מצאו את הקשיחות הסגולית של השכבה החד־כיוונית שלמעלה.

.139.4 × 10⁹/1560 = 89.4 MJ/kg

4. מה תפקיד המטריצה?

מחזיקה את הסיבים ומעבירה עומס.

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** מרוכבים קשיחים בכל כיוון.

**בפועל:** רק לאורך הסיבים; ערימות פותרות זאת.

**מיתוס:** יותר סיבים זה תמיד טוב יותר.

**בפועל:** מעט מדי מטריצה משאיר אזורים יבשים.

**מיתוס:** מרוכב הוא סתם מתכת קלה.

**בפועל:** הוא אניזוטרופי ונכשל אחרת.

## כרטיסיות

**סיב**

נושא עומס.

**מטריצה**

מחזיקה ומעבירה.

**כלל התערובות**

.E_fV_f + E_mV_m

**הכלל ההפוך**

.$1/E_2 = V_f/E_f + V_m/E_m$

**כמו־איזוטרופי**

ערימה 0/±45/90.

**מדד לוח**

.ρ/E^(1/3)

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. המודול האורכי מקיים...**

את כלל התערובות

את הכלל ההפוך

אוילר

רק את הוק

את כלל התערובות. קפיצים במקביל.

**2. המודול הרוחבי מקיים…**

את הכלל ההפוך

את כלל התערובות

Bredt

Paris

את הכלל ההפוך. קפיצים בטור.

**3. שכבות ‎±45° נושאות בעיקר…**

גזירה

עומס צירי בלבד

לחץ

חום

גזירה. כיווני גזירה.

**4. מסת הלוח בקשיחות שווה משתנה לפי…**

ρ/E^(1/3)

ρE

E/ρ

ρ

ρ/E^(1/3). כפיפה.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת ש־HiCAM נועד לענות על הביקוש להחליף מטוסי תובלה ישנים וכבדים במטוסים מרוכבים קלים שמפחיתים צריכת דלק ופליטות פחמן. יחד עם שותפיה ב־Advanced Composites Consortium, NASA פועלת להגדלת קצב הייצור של מטוסים מרוכבים.

סקירת האביב HiCAM 2026 של NASA, שנערכה ב־5–7 במאי ב־Langley, כינסה כ־150 אנשים מהקונסורציום, שותפות ציבורית־פרטית של 22 חברים, ובחרה את הטכנולוגיות בעלות ההשפעה הגדולה ביותר על קצב הייצור לתוכנית המטוס הבאה.

ב־Saving Planets: כימיה כללית I · פתרונות

מקורות: NASA: NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/) · NASA Hosts 2026 Review on Advanced Composite Manufacturing (Jun. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/nasa-hosts-2026-review-on-advanced-composite-manufacturing/)

## מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/): קורס MIT על חומרים.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): רשימות MIT על מרוכבים.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): פרק FAA על בנייה מרוכבת.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): פרק מספר לימוד חינמי.

**סיימתי את היחידה הזו**

# עייפות, שבר וסבולת נזק

עקומות S-N וגבול עמידות, כלל Miner לנזק מצטבר, ריכוזי מאמץ, מקדם עוצמת המאמץ, חוסן שבר ואורך סדק קריטי, התפשטות סדקים וחוק Paris, ותכן סבילות לנזק ובדיקות.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשתמש בכלל Miner.
- לחשב את מקדם עוצמת המאמץ של סדק.
- למצוא אורך סדק קריטי.
- להסביר תכן חיים בטוחים, תכן כשל בטוח ותכן סבילות לנזק.

## מושגי מפתח

- עומסים חוזרים הנמוכים בהרבה מהכניעה יכולים להגדיל סדקים עד שחלק נכשל: זו עייפות. עקומות S-N נותנות את מספר המחזורים עד כשל לכל משרעת מאמץ.
- כלל Miner מסכם נזק מרמות מאמץ שונות: D = Σ nᵢ/Nᵢ, וכשל צפוי ב־D = 1.
- לסדק באורך a תחת מאמץ σ יש עוצמת מאמץ K = σ√(πa) (כפול מקדם גאומטרי). שבר מתרחש כאשר K מגיע לחוסן השבר של החומר K_IC.
- לכן אורך הסדק הקריטי הוא a_c = (K_IC/σ)²/π. סדקים גדלים בכל מחזור לפי da/dN = C(ΔK)^m (חוק Paris), ולכן מרווחי הבדיקה נקבעים כך שסדקים יתגלו הרבה לפני a_c.
- מטוסים מודרניים סובלי נזק: הם מתוכננים לשאת עומס גבולי כשיש סדק או נזק, עד שהבדיקה הבאה תגלה אותו.

## משוואות מפתח

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

D=(n_i)/(N_i)

כלל Miner

$$K = \sigma \sqrt{\pi a}$$

עוצמת מאמץ

$$a_c = \frac{1}{\pi}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma}\right)^2$$

a_c=(1)/(π)(_ICσ)^2

אורך סדק קריטי

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

da/dN=C(Δ K)^m

חוק Paris

## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 9.1** חלק עובר $10^4$ מחזורים ברמה שבה $N = 10^5$, ו־$2 \times 10^5$ מחזורים ברמה שבה $N = 10^6$. מצאו את נזק Miner.

1. $D = 10^4/10^5 + 2 \times 10^5/10^6$.

**תשובה:** $D = 0.30$: נוצלו 30% מהחיים.

**דוגמה 9.2** מצאו את K לסדק של 10 mm תחת 100 MPa.

1. $K = 100 \times \sqrt{(\pi \times 0.01)}$.

**תשובה:** $K = 17.7\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

**דוגמה 9.3** מצאו את אורך הסדק הקריטי ב־100 MPa לסגסוגת עם $K_{IC} = 37\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (ערך לדוגמה).

1. $a_c = (37/100)^2/\pi$.

**תשובה:** $a_c = 43.6$ mm.

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מכפילים את המאמץ. מהו אורך הסדק הקריטי?

   רבע: 10.9 mm.

2. איזה D חוזה Miner בכשל?

   1.

3. מדוע מטוסים עוברים בדיקות מתוזמנות?

   כדי למצוא סדקים לפני שהם מגיעים ל־$a_c$.

4. מצאו את K לסדק של 40 mm ב־50 MPa.

.50√(π × 0.04) = 17.7 MPa√m

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** עייפות דורשת מאמץ מעל הכניעה.

**בפועל:** היא מתרחשת הרבה מתחת לכניעה.

**מיתוס:** סדק פירושו שהחלק חייב להיכשל.

**בפועל:** חלקים סובלי נזק נושאים עומס עד הבדיקה.

**מיתוס:** כלל Miner מדויק.

**בפועל:** הוא הערכה; סדר העומסים משנה.

## כרטיסיות

**עייפות**

כשל תחת עומסים חוזרים.

**עקומת S-N**

מחזורים עד כשל כנגד מאמץ.

**Miner**

.Σ n/N = 1

**עוצמת מאמץ**

.σ√(πa)

**סדק קריטי**

.(K_IC/σ)²/π

**סבילות לנזק**

בטוח עד שמתגלה.

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. כשל לפי Miner ב…**

D = 1

D = 0

D = 0.5

D = 2

D = 1. נזק מצטבר.

**2. K משתנה לפי...**

σ√a

σa

σ/a

a²

σ√a. σ√(πa).

**3. a_c משתנה לפי...**

(K_IC/σ)²

K_IC/σ

σ

K_IC

(K_IC/σ)². שבר.

**4. חוק Paris מתאר...**

התפשטות סדקים

קריסה

כניעה

זחילה

התפשטות סדקים. da/dN.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

תיק HiCAM של NASA כולל בדיקה אוטומטית: מערכות רובוטיות שמאתרות פגמים במהלך הבנייה, ומפחיתות בדיקות איכות ותיקונים גוזלי זמן לאחר הייצור, ומודלים של הנדסה דיגיטלית שחוזים ביצועים מבניים ופגמי ייצור לפני ההרכבה.

גילוי פגמים מוקדם וחיזוי התפשטותם הם לב הסבילות לנזק. הדבר מאפשר למתכננים להשתמש בביטחון במבנים דקים וקלים יותר.

ב־Saving Planets: חוזק חומרים · סטטיקה

מקורות: NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/)

## מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/): קורס MIT על עייפות ושבר.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): רשימות MIT.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): פרק FAA על בנייה.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): פרק מספר לימוד חינמי.

**סיימתי את היחידה הזו**

# תכנון קל משקל ומבנים בני־קיימא

פילוח משקל, אפקט כדור השלג של גידול משקל, משקל מבני ודלק לפי משוואת ברגה, מדדי חומרים לתכן קל, מבנים רב־חומריים ומשולבים, מיחזור וחשיבת מחזור חיים.

## מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להעריך את הדלק שנחסך בהסרת משקל מבני.
- להסביר את כדור השלג של המשקל.
- להשתמש במדדי חומרים לבחירת חומרים.
- לדון בפשרות של מיחזור ומחזור חיים.

## מושגי מפתח

- המבנה הוא בדרך כלל בין רבע לשליש ממשקל ההמראה של מטוס נוסעים (טווח מספרי לימוד), ולכן המשקל המבני הוא מנוף מרכזי על הדלק.
- משקל מתגלגל ככדור שלג: מבנה נוסף דורש יותר עילוי, יותר דלק ומנועים גדולים יותר, שמוסיפים עוד מבנה. החיסכון מתגלגל באותו אופן בכיוון ההפוך.
- ממשוואת ברגה בטווח קבוע, הדלק הנשרף W_landing (e^(Rc/(V·L/D)) − 1) =, ולכן הדלק משתנה לפי משקל הנחיתה; כל קילוגרם שנחסך מקטין את הדלק באופן יחסי.
- מדדי חומרים בוחרים את החומר הקל ביותר לכל משימה: E/ρ למוטות מתיחה, E^(1/2)/ρ לקורות ו־E^(1/3)/ρ ללוחות בכפיפה.
- גם מחזור החיים חשוב: אנרגיית הייצור, יכולת התיקון ומיחזור המרוכבים והסגסוגות נספרים לצד הדלק בשירות.

## משוואות מפתח

$$m_{fuel} = m_{land}\left(e^{Rc/(V\,L/D)} - 1\right)$$

m_fuel=m_land(e^Rc/(V L/D)-1)

דלק בטווח קבוע

$$\Delta m_{fuel} = \Delta m\left(e^{Rc/(V\,L/D)} - 1\right)$$

Δ m_fuel=Δ m(e^Rc/(V L/D)-1)

דלק שנחסך לכל קילוגרם

$$\frac{E^{1/2}}{\rho}$$

מדד קורה

$$\frac{E^{1/3}}{\rho}$$



## דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

**דוגמה 10.1** מטוס סילון נוחת במשקל 45000 kg אחרי טיסה שמעריך ברגה שלה הוא 0.2877 (e^0.2877 = 1.333; ערכים לדוגמה). כמה דלק הוא שרף?

1. m_fuel = 45000 × (1.3333 − 1).

**תשובה:** m_fuel = 15000 kg.

**דוגמה 10.2** חלקים מרוכבים חוסכים 600 kg של מבנה. כמה דלק נחסך בכל טיסה?

1. Δm_fuel = 600 × 0.3333.

**תשובה:** כ־200 kg בכל טיסה.

**דוגמה 10.3** דרגו אלומיניום, טיטניום, פלדה והלמינט לדוגמה לפי מדד הלוח E^(1/3)/ρ (על בסיס GPa).

1. Al: 71.7^(1/3)/2810 × 1000 = 1.48.
2. Ti: 1.09; פלדה: 0.75; למינט: 2.58.

**תשובה:** הלמינט ראשון, אחריו אלומיניום, טיטניום, פלדה.

## תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. ב־1000 טיסות בשנה, כמה דלק חוסכים 200 kg לטיסה?

200 טון בשנה.

2. בהנחה של 3.16 kg $CO_2$ לכל kg דלק (ערך מספרי לימוד), כמה $CO_2$ נחסך בשנה?

632 טון.

3. איזה מדד חל על קורת כנף בכפיפה?

E^(1/2)/ρ (קורה).

4. מדוע חיסכון במשקל בתכן חדש יכול לחסוך יותר מהמסה עצמה?

אפקט כדור השלג.

## תפיסות שגויות נפוצות

**מיתוס:** רק המנועים קובעים את צריכת הדלק.

**בפועל:** המשקל והגרר חשובים באותה מידה.

**מיתוס:** מרוכבים תמיד ירוקים יותר.

**בפועל:** גם הייצור והמיחזור נספרים.

**מיתוס:** קילוגרם שנחסך חוסך קילוגרם דלק.

**בפועל:** הוא חוסך חלק ממנו בכל טיסה, לאורך אלפי טיסות.

## כרטיסיות

**כדור שלג**

שינויי משקל מצטברים.

**דלק ומשקל**

דלק ∝ משקל נחיתה.

**מדד מוט מתיחה**

E/ρ.

**מדד קורה**

E^(1/2)/ρ.

**מדד לוח**

E^(1/3)/ρ.

**מחזור חיים**

ייצור, שימוש, מיחזור.

## בוחן לבדיקה עצמית

**1. הדלק בטווח קבוע משתנה לפי…**

משקל הנחיתה

צבע הכנף

הגובה בלבד

כלום

משקל הנחיתה. ברגה.

**2. מדד הלוח הוא...**

E^(1/3)/ρ

E/ρ

Eρ

σ/E

E^(1/3)/ρ. לוח בכפיפה.

**3. כדור השלג של המשקל פירושו ש...**

החיסכון מצטבר

כלום

המשקל קבוע

רק הדלק משתנה

החיסכון מצטבר. התאמת מידות מחדש.

**4. מדד הקורה הוא...**

E^(1/2)/ρ

E/ρ

E^(1/3)/ρ

ρ/E

E^(1/2)/ρ. קורה בכפיפה.

**לנסות שוב את הבוחן**

## איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

DOE מעריך ששימוש ברכיבים קלים ובמנועים יעילים במיוחד ברבע מצי הרכב בארה"ב יכול לחסוך יותר מ־5 מיליארד גלונים של דלק בשנה עד 2030, ומציין שחומרים קלים חשובים במיוחד לרכב חשמלי, שבו הם מקזזים את משקל הסוללה ומאריכים את הטווח.

NASA מציינת שצורך באנרגיה נמוכה יותר לטיסה פירושו פחות דלק או, במטוסים חשמליים, פחות חשמל המופק במקום אחר, וכך יורדות פליטות מחזור החיים לאורך כל זמן השימוש במטוס. מבנה קל הוא הדרך שבה מתכננים משיגים זאת.

ב־Saving Planets: ביצועי מטוסים · פתרונות

מקורות: U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks) · NASA: Sustainable Aviation (https://www.nasa.gov/directorates/armd/sustainable-aviation/)

## מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/): קורס MIT על חומרים.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): מבנים ב־MIT.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות MIT.
- U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks): חומרים קלים של DOE.

**סיימתי את היחידה הזו**

# תרגילים

התרגילים האלה נמצאים בתוך כל יחידה. פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה.

1. עומסי טיסה, מקדמי ביטחון וחומרים
   4 תרגילים
2. עומסי גזירה וכפיפה בכנף
   4 תרגילים
3. כפיפה של קורות דקות דופן
   4 תרגילים
4. פיתול וזרם גזירה בחתכים סגורים
   4 תרגילים
5. גזירה בחתכים פתוחים ומרכז הגזירה
   4 תרגילים
6. קריסה של עמודים, מחזקים ולוחות
   4 תרגילים
7. גופי מטוס בלחץ וקליפות דקות
   4 תרגילים
8. חומרים מרוכבים ולמינטים
   4 תרגילים
9. עייפות, שבר וסבולת נזק

# המעבדה (Structures lab)

המעבדה היא החלק המעשי של הקורס. כאן היא חינמית ולתרגול בלבד, ללא נקודות זכות.

כל מעבדה אפשר לבצע בסימולציה חינמית, בגיליון אלקטרוני או בחפצים ביתיים. הרכיבו משקפי מגן בעת כיפוף או שבירה של כל דבר שעלול להישבר בפתאומיות, שמרו על עומסים קטנים וקרובים לרצפה, ופנו את אזור העבודה ממכשולים שאפשר למעוד עליהם.

מקור בטיחות: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

## מעבדה A: בחירת חומרים לפי תכונות סגוליות

שבוע 1

**מטרה:** בנו גיליון אלקטרוני של קשיחות וחוזק סגוליים לחומרי תעופה וחלל, ודרגו אותם למוטות מתיחה, לקורות וללוחות.

$$\frac{E}{\rho},\ \frac{\sigma}{\rho},\ \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

מדדי חומרים

### מהלך הניסוי

1. הזינו E, σ ו־ρ עבור אלומיניום 7075, Ti-6Al-4V, פלדה 4130 והלמינט הפחמני לדוגמה.
2. חשבו E/ρ ו־σ/ρ.
3. הוסיפו את מדדי הקורה והלוח.
4. דרגו את החומרים לכל משימה.

### טבלת נתונים

| חומר | E/ρ (MJ/kg) | σ/ρ (kN·m/kg) |
|---|---|---|
| 7075 Al | 25.5 | 179 |
| Ti-6Al-4V | 25.7 | 199 |
| פלדה 4130 | 26.1 | 55.4 |
| למינט פחמני | 43.75 | 375 |

*מחושב מערכי ספר לימוד ומערכים לדוגמה.*

### חישוב לדוגמה

1. Al: 71.7 × 10⁹/2810 = 25.5 MJ/kg.
2. למינט: 600 × 10⁶/1600 = 375 kN·m/kg.

### בטיחות

- מחשב בלבד.

### חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

PhET: Hooke’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/hookes-law) · MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/)

**הקשר לכדור הארץ:** DOE מציין הפחתות מסה של 50–70% כשמרוכבי סיבי פחמן מחליפים חלקי פלדה. U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

## מעבדה B: שקיעת סרגל בזיז

שבוע 3

**מטרה:** מדדו כמה סרגל המהודק לשפת שולחן שוקע תחת משקל קטן והשוו לתורת הקורות.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI}, \quad I = \frac{bt^3}{12}$$

=(PL^3)/(3EI),\ \ I=(bt^3)/(12)

שקיעת קצה הזיז

### מהלך הניסוי

1. חקרו קשיחות ב־PhET Hooke’s Law.
2. הדביקו סרגל שטוח לשולחן בסרט הדבקה כך ש־0.25 m בולטים החוצה.
3. תלו שקית מטבעות של 100 g (כ־1 N) בקצה; מדדו את ירידת הקצה בעזרת סרגל שני.
4. חזרו עם בליטה של 0.20 m והשוו ל־$\delta \propto L^3$.

### טבלת נתונים

| בליטה | עומס | שקיעה חזויה |
|---|---|---|
| 0.25 m | 1 N | 7.72 mm |
| 0.20 m | 1 N | 3.95 mm |

*חזוי לסרגל עץ 3 mm × 30 mm עם E = 10 GPa (ערכים לדוגמה); הסרגל שלכם יהיה שונה.*

### חישוב לדוגמה

1. $I = 0.03 \times 0.003^3/12 = 6.75 \times 10^{-11}$ m⁴.
2. $\delta = 1 \times 0.25^3/(3 \times 10 \times 10^9 \times 6.75 \times 10^{-11}) = 7.72$ mm.

### בטיחות

- שמרו על עומסים קטנים; סרגל שנשבר עלול להעיף מטבעות. הרכיבו משקפי מגן.

### חלופה ביתית או וירטואלית

- זוהי מעבדה ביתית.

PhET: Hooke’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/hookes-law)

**הקשר לכדור הארץ:** NASA כופפה את כנף SWEET-15 במשך חודשים בזמן שחיישני סיב אופטי עקבו אחר המעוות. NASA: NASA Pushes New Wing Design to Find Structural Limits (Jul. 17, 2026) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/nasa-pushes-new-wing-design-to-find-structural-limits/)

- [ ] השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)

## מעבדה C: קריסת עמוד ספגטי

שבוע 8

**מטרה:** העמיסו קצה אל קצה גבעולי ספגטי יבשים בודדים על משקל מטבח ובדקו את חוק אוילר 1/L².

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L^2}, \quad I = \frac{\pi d^4}{64}$$

```
P_cr=(π^2EI)/(L^2),\ \ I=(π d^4)/(64)
```

קריסת אוילר, קצוות פרקיים

### מהלך הניסוי

1. חתכו גבעולים באורך 0.20 m ו־0.10 m.
2. העמידו גבעול על משקל מטבח מאופס ולחצו בעדינות בחפץ שטוח עד שהוא מתעקם; רשמו את הקריאה המרבית.
3. חזרו חמש פעמים לכל אורך וחשבו ממוצע.
4. השוו את היחס למקדם החזוי 4.

### טבלת נתונים

| אורך | P_cr חזוי | קריאת המשקל |
|---|---|---|
| 0.20 m | 0.381 N | 38.9 g |
| 0.10 m | 1.53 N | 155.5 g |

*חזוי לגבעולים בקוטר 1.8 mm עם E = 3 GPa (ערכים לדוגמה); פסטה אמיתית משתנה.*

### חישוב לדוגמה

1. $I = \pi \times 0.0018^4/64 = 5.15 \times 10^{-13}$ m⁴.
2. $P_{cr}(0.20) = \pi^2 \times 3 \times 10^9 \times 5.15 \times 10^{-13}/0.04 = 0.381$ N.

### בטיחות

- הרכיבו משקפי מגן; פסטה שנשברת עפה.
- לחצו בעדינות בספר, לא בכף היד.

### חלופה ביתית או וירטואלית

- זוהי מעבדה ביתית.

MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-20/02/)

**הקשר לכדור הארץ:** HiCAM של NASA בוחן החדרת שרף למבנים משולבים גדולים עם פחות מחברים. NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

## מעבדה D: גיליון מאמצי לחץ בגוף המטוס

שבוע 9

**מטרה:** חשבו מאמץ היקפי לגופי מטוס בגדלים שונים ומצאו את הציפוי הדרוש למאמץ יעד.

$$\sigma_h = \frac{\Delta p\, r}{t}$$

```
σ_h=(Δ p r)/(t)
```

מאמץ טבעתי

### מהלך הניסוי

1. קבעו Δp = 55 kPa ו־t = 1.6 mm.
2. חשבו את σ_h לרדיוסים של 1.5, 2.0 ו־3.0 m.
3. מצאו את עובי הציפוי ל־100 MPa בכל רדיוס.
4. דונו מדוע ציפויי מטוסים רחבי גוף עבים יותר.

### טבלת נתונים

| רדיוס | מאמץ טבעתי |
|---|---|
| 1.5 m | 51.6 MPa |
| 2.0 m | 68.75 MPa |
| 3.0 m | 103.1 MPa |

*ערכים מחושבים עם הפרש לחצים לדוגמה.*

### חישוב לדוגמה

1. σ_h(3.0) = 55,000 × 3/0.0016 = 103.1 MPa.
2. t ל־100 MPa ב־1.65 mm = 3.0 m.

### בטיחות

- במחשב בלבד. לעולם אל תכניסו לחץ לבקבוקים או לפחיות כדי לבדוק זאת.

### חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf)

**הקשר לכדור הארץ:** HiCAM של NASA מתכנן הדגמה של מקטע גוף מרוכב ב־2028–2029. NASA: NASA Hosts 2026 Review on Advanced Composite Manufacturing (Jun. 4, 2026) https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/nasa-ho

(/sts-2026-review-on-advanced-composite-manufacturing

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

## מעבדה E: מחשבון שכבה מרוכבת

שבוע 11

**מטרה:** חשבו קשיחות אורכית ורוחבית של שכבת פחמן/אפוקסי כנגד השבר הנפחי של הסיבים.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m, \quad \frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

```
E_1=E_fV_f+E_mV_m,\ \ (1)/(E_2)=(V_f)/(E_f)+(V_m)/(E_m)
```

מיקרומכניקה

### מהלך הניסוי

1. הזינו E_f = 230 GPa ו־E_m = 3.5 GPa.
2. חשבו $E_1$ ו־$E_2$ עבור V_f = 0.4, 0.5 ו־0.6.
3. שרטטו את שניהם כנגד V_f.
4. הסבירו מדוע $E_2$ כמעט אינו משתנה.

### טבלת נתונים

| V_f | $E_1$ (GPa) | $E_2$ (GPa) |
|---|---|---|
| 0.4 | 94.1 | 5.77 |
| 0.5 | 116.8 | 6.90 |
| 0.6 | 139.4 | 8.55 |

*מחושב מערכי ספר לימוד לסיב ולמטריצה.*

### חישוב לדוגמה

1. $E_1(0.5) = 230 \times 0.5 + 3.5 \times 0.5 = 116.8$ GPa.
2. $E_2(0.4) = 1/(0.4/230 + 0.6/3.5) = 5.77$ GPa.

### בטיחות

- מחשב בלבד.

### חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/)

**הקשר לכדור הארץ:** NASA אומרת ש־HiCAM נועד להחליף מטוסי תובלה ישנים וכבדים במטוסים מרוכבים קלים. NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

## מעבדה F: עייפות מהדקי נייר וכלל Miner

שבוע 13

**מטרה:** כופפו מהדקי נייר הלוך ושוב עד כשל בשתי זוויות כיפוף ובדקו את כלל Miner.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

```
D=(n_i)/(N_i)
```

כלל Miner

### מהלך הניסוי

1. ישרו כמה מהדקים זהים.
2. כופפו אחד ב־90°± עד שהוא נשבר; ספרו מחזורים. חזרו ב־45°±.
3. על מהדק חדש, נצלו מחצית מהחיים ב־90°±, ואז כופפו ב־45°± עד כשל.
4. השוו את מחזורי השלב השני לחיזוי של Miner.

### טבלת נתונים

| כיפוף | מחזורים עד כשל |
|---|---|
| 90°± | 12 |
| 45°± | 30 |
| 6 ב־90°±, אחר כך 45°± | 15 חזויים |

*ערכים לדוגמה; המהדקים שלכם יהיו שונים, וסדר העומסים משנה את התוצאה.*

### חישוב לדוגמה

1. 6/12 = 0.5 מהחיים נוצלו ב־90°±.
2. נותרו 15 = 30 × 0.5 מחזורים ב־45°±.

### בטיחות

- הרכיבו משקפי מגן; הקצוות השבורים חדים והתיל מתחמם.
- השליכו את החלקים בבטחה.

### חלופה ביתית או וירטואלית

- זוהי מעבדה ביתית.

MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/)

**הקשר לכדור הארץ:** HiCAM של NASA מפתח בדיקה אוטומטית לאיתור פגמים במהלך הבנייה. NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

# מערכי תרגול למבחן

מדדו זמן: כ־10 דקות לבעיה. אחר כך השוו לפתרונות המלאים.

## סט תרגול לבחינת אמצע (יחידות 5–1)

1. למטוס של 10 kN מקדם עומס גבולי של 3.8. מצאו את עומס ההרס.

   .1 10 × 3.8 × 1.5.

   **תשובה:** 57 kN.

2. מצאו את מומנט השורש לעילוי אחיד של 2 kN/m על חצי מוטה של 5 m.

   .1 2 × 5²/2.

   **תשובה:** 25 kN·m.

3. מצאו את כוח הפס עבור 25 kN·m בתיבה בעומק 0.1 m.

   .1 25/0.1.

   **תשובה:** 250 kN.

4. חתך סגור כולא 0.05 m² ונושא 20 kN·m. מצאו את q.

   .1 20,000/(2 × 0.05).

   **תשובה:** 200 kN/m.

5. מצאו את τ_max בחתך מלבני של 600 mm² תחת 3 kN.

   .1 1.5 × 3000/600.

   **תשובה:** 7.5 MPa.

## מערך תרגול מסכם (כל היחידות)

1. מצאו את עומס אוילר של עמוד פרקי באורך 1 m עם E = 70 GPa ו־I = 10⁻⁸ m⁴.

   .1 π² × 70 × 10⁹ × 10⁻⁸/1.

   **תשובה:** 6909 N.

2. מצאו את המאמץ ההיקפי עבור r = 1.8 m, Δp = 60 kPa, t = 1.5 mm.

   1. 1.8/0.0015 × 60,000.

   **תשובה:** 72 MPa.

3. מצאו את $E_1$ עבור $E_f = 230$, $E_m = 3.5$ GPa, $V_f = 0.55$.

   1. 0.45 × 3.5 + 0.55 × 230.

   **תשובה:** 128.1 GPa.

4. מצאו את $a_c$ עבור $K_{IC} = 30$ MPa√m ב־150 MPa.

   1. π/(30/150)².

   **תשובה:** 12.7 mm.

5. מצאו את נזק Miner עבור $2 \times 10^4$ מתוך $10^5$ ו־$5 \times 10^5$ מתוך $10^6$ מחזורים.

   1. 0.5 + 0.2.

   **תשובה:** 0.7.

6. עם מקדם דלק של 0.25 לקילוגרם, כמה דלק חוסכים בכל טיסה של מבנה שנחסך 300 kg?

   1. 0.25 × 300.

   **תשובה:** 75 kg.

## דף נוסחאות

$$n = L/W,\ P_{ult} = 1.5 P_{lim},\ MS = \sigma_{allow}/\sigma - 1$$

$$M_{root} = w s^2/2,\ M_{ell} = (L/2)(4s/3\pi)$$

$$\sigma = My/I,\ F = M/h$$

$$q = \tau t,\ T = 2A_e q,\ d\theta/dz = T \oint ds/t/(4A_e^2 G)$$

$$\tau = VQ/(It),\ \tau_{max} = 3V/(2A)$$

$$P_{cr} = \pi^2 EI/(KL)^2,\ \sigma_{cr} = k\pi^2 E(t/b)^2/(12(1-\nu^2$$

$$\sigma_h = \Delta p r/t,\ \sigma_a = \Delta p r/(2t)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m,\ 1/E_2 = V_f/E_f + V_m/E_m$$

$$D = \sum n_i/N_i,\ K = \sigma\sqrt{\pi a},\ a_c = (K_{IC}/\sigma)^2/\pi$$

$$E/\rho,\ E^{1/2}/\rho,\ E^{1/3}/\rho$$

**קבועים**

| קבוע | ערך |
|---|---|
| אלומיניום 7075-T6 (ערכי ספר לימוד) | E = 71.7 GPa, σ_y = 503 MPa, ρ = 2810 kg/m³, G = 27 GPa, ν = 0.33 |
| טיטניום Ti-6Al-4V (ערכי ספר לימוד) | E = 114 GPa, σ_y = 880 MPa, ρ = 4430 kg/m³ |
| פלדה 4130 (ערכי ספר לימוד) | E = 205 GPa, σ_y = 435 MPa, ρ = 7850 kg/m³ |
| למינט פחמן/אפוקסי כמו־איזוטרופי (ערכים לדוגמה) | E = 70 GPa, חוזק 600 MPa, ρ = 1600 kg/m³ |
| מטוס נוסעים לדוגמה (ערכים לדוגמה) | W = 588.6 kN, חצי מוטה 17 m, מקדם עומס גבולי 2.5, מקדם ביטחון 1.5 |
| הכבידה | g = 9.81 m/s² |

מקור: NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

# טקסטים וסימולציות בחינם

השתמשו בהרצאות, במדריכים ובסימולציות החינמיים האלה לצד הקורס.

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): הרצאות ותרגילים חינמיים של MIT על מבנים.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות חינמיות של MIT על קורות וחומרים.
- MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/): קורס חינמי של MIT על עייפות ושבר.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): פרק חינמי של FAA על מבני כלי טיס.
- OpenStax University Physics Volume 1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): פרק מספר לימוד חינמי.
- PhET: Hooke’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/hookes-law): קשיחות באופן אינטראקטיבי.

# מילון מונחים

**קריסה**

אי־יציבות צידית פתאומית של איבר לחוץ.

**סבילות לנזק**

יכולת לשאת עומס בבטחה עם סדקים עד שבדיקה מגלה אותם.

**עייפות**

כשל תחת העמסה חוזרת מתחת לכניעה.

**חוסן שבר**

עוצמת המאמץ שבה סדק מתפשט.

**מאמץ טבעתי**

מאמץ היקפי בגליל בלחץ.

**למינט**

ערימה של שכבות מרוכבות בזוויות נבחרות.

**עומס גבולי**

העומס הגדול ביותר הצפוי בשירות.

**מקדם עומס**

העילוי חלקי המשקל.

**שולי ביטחון**

המותר חלקי הממשי, פחות אחד.

**כלל Miner**

סכום נזק העייפות המצטבר.

**Rib**

איבר בכיוון המיתר שמעצב את הכנף ותומך במחזקים.

**מרכז גזירה**

נקודה שבה עומס רוחבי אינו גורם לפיתול.

**זרימת גזירה**

כוח גזירה ליחידת אורך לאורך דופן דקה.

**קורה**

הקורה הראשית של הכנף בכיוון המוטה.

**קשיחות סגולית**

מודול האלסטיות חלקי הצפיפות.

**מקדם עוצמת מאמץ**

מדד למאמץ ליד קצה סדק.

**מחזק**

מקשיח בכיוון המוטה המחובר לציפוי.

**תיבת פיתול**

תיבת כנף סגורה המתנגדת לפיתול.

**עומס הרס**

עומס גבולי כפול מקדם הביטחון.

**תיבת כנף**

קורות וציפויים היוצרים את המבנה הראשי של הכנף.

## מחוון להערכה עצמית

לא ניתנים ציון או נקודות זכות. השתמשו בזה כדי להעריך בכנות איפה אתם עומדים בכל יחידה.

| רמה | איך זה נראה |
|---|---|
| 4 · שליטה מלאה | עוקב אחר מסלול העומס, מבחין בין עומס גבולי לעומס הרס, בודק חוזק, קשיחות, קריסה ועייפות, ובוחר חומרים לפי תכונות סגוליות. |
| 3 · מיומן | פותר את התרגילים עם טעויות יחידות מזדמנות. |
| 2 · מתפתח | עוקב אחר הדוגמאות הפתורות אך בודק רק חוזק, לא קריסה. |
| 1 · מתחיל | מציב מספרים בנוסחאות בלי מסלול עומס; צריך לחזור על היחידה. |

### שקלול מוצע אם רוצים ציון

| חלק | משקל |
|---|---|
| תרגילים | 20% |
| מעבדות | 25% |
| מערך תרגול לאמצע הקורס | 25% |
| מערך תרגול מסכם | 30% |

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

## קורסים קשורים

- ביצועי מטוסים AERO 320
- מכניקה מסלולית AERO 340
- אווירודינמיקה 1 AERO 310
- כל הקורסים