עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 1, סתיו

על הקורס

לקורס החינמי הזה יש 9 יחידות ו-4 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 תואם קורסי גרפיקה ותכן הנדסי של שנה ראשונה כמו MIT 2.007 ו-2.00b, קורסי ההנדסה והגרפיקה הממוחשבת של Purdue, קורס ME 1770 של Georgia Tech ורצף הגרפיקה ההנדסית של Embry-Riddle, בכלים חינמיים: תוכנית Onshape Free ו-FreeCAD. אנו מקשרים לחומרים חינמיים לאורך כל הדרך. אף אחד מהארגונים האלה אינו תומך בדף זה.

מה אנחנו מוסיפים: כל יחידה מקשרת בין החלטות תכן לחומר, לאנרגיה ולפסולת, כל מספר בדף מחושב מחדש על ידי סקריפט בדיקה לפני הפרסום, וארבע מעבדות מעשיות מובילות אתכם מסקיצה לחלק מודפס וקל יותר.

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

רוב החומר, האנרגיה והפסולת של מוצר נקבעים כבר על שולחן השרטוט. מהנדסים שממדלים ומשרטטים היטב יכולים להסיר חומר שאינו עושה עבודה, לבחור חלקים עמידים וברי תיקון, ולקבוע טולרנסים שאינם הדוקים מהנדרש.

כל יחידה מסתיימת בחלק קצר עם מקורות שמראה איך הרעיונות שלה עוזרים לאנשים ולכדור הארץ.

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: 9 יחידות ו-4 מעבדות (ENGR 120).
- 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

- גאומטריה וטריגונומטריה ברמת תיכון.
- נוחות בעבודה עם מחשב ועכבר; עכבר עם שלושה כפתורים עוזר בתלת-ממד (3D).
- לא נדרש כישרון ציור: סקיצות הן מיומנות שתתרגלו.

איך ללמוד

- שרטטו סקיצה ביד לפני שאתם ממדלים. חמש דקות על הנייר חוסכות שעה ב-CAD.
- בנו מחדש בעצמכם ב-CAD כל דוגמה פתורה.
- תנו שמות לסקיצות ולפיצ׳רים; אתם של העתיד תודו לכם.
- בדקו כל שרטוט כאילו הייתם צריכים לייצר את החלק מתוכו בלבד.
- פתרו כל תרגיל לפני שאתם פותחים את התשובה.
- עשו שוב את הבחנים כעבור כמה ימים. תרגול מרווח עדיף על מפגש ארוך אחד.

מה צריך

- מחשב עם דפדפן (Onshape רץ בדפדפן; נדרש חשבון חינמי) או FreeCAD מותקן.
- נייר משבצות או נייר איזומטרי, עיפרון, מחק וסרגל.
- קליבר (קליבר דיגיטלי זול מספיק).
- אופציונלי: גישה למדפסת תלת-ממד (3D) בספרייה, בבית ספר או במייקרספייס.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

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

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	סקיצות והדמיה	סקיצות, סוגי קווים, קנה מידה	MIT 2.00b
2	היטל אורתוגרפי ואיזומטרי	היטל אורתוגרפי; זווית ראשונה ושלישית	מוסכמות ASME Y14
3	היטל אורתוגרפי ואיזומטרי	שרטוט איזומטרי; אורך אמיתי	Onshape Learning Center
4	חתכים ומבטי עזר	חתכים ומבטי עזר	FreeCAD TechDraw

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
5	מתן מידות ויסודות GD&T	כללי מתן מידות; מישורי ייחוס	ASME Y14.5
6	מתן מידות ויסודות GD&T	GD&T: צורה, כיוון, מיקום; MMC	ASME Y14.5
7	טולרנסים והתאמות	גבולות, התאמות ISO, שרשראות טולרנס; תרגול לבחינת אמצע	ISO 286
8	מידול תלת-ממדי (3D) פרמטרי	סקיצות, אילוצים, שליפה וסיבוב	Onshape / FreeCAD
9	מידול תלת-ממדי (3D) פרמטרי	פיצ'רים, משתנים, תכונות מסה; מעבדה A	Onshape Learning Center
10	הרכבות ושרטוטים	הרכבות, צימודים, מנגנונים	ויקי FreeCAD
11	הרכבות ושרטוטים	שרטוטי פרט ושרטוטי הרכבה, רשימת חלקים; מעבדה B	FreeCAD TechDraw
12	הדפסת תלת-ממד (3D) ותכן לייצור	תהליכי ייצור; DFM/DFA	MIT 2.007
13	הדפסת תלת-ממד (3D) ותכן לייצור	תכן והערכות להדפסת תלת-ממד (3D); מעבדה C	NIST AM
14	תכן לקיימות והפחתת משקל	הפחתת משקל ותכן לקיימות; מעבדה D	DOE; EPA
15	חזרה	חזרה וסדרת תרגול מסכמת	כל היחידות

ההתקדמות שלכם

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

יחידות

סקיצות והדמיה

סקיצה ביד חופשית ככלי הנדסי: קווים, עיגולים, פרופורציה, וראיית עצמים תלת-ממדיים (3D) בראש.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לשרטט ביד חופשית קווים ישרים, עיגולים וקשתות בפרופורציה טובה.
- להשתמש בתיבות בנייה כדי לשרטט עצמים בפרופורציה.
- לקרוא ולשרטט עצמים פשוטים במבטים ציוריים אלכסוניים ואיזומטריים.
- להסביר את תפקיד הסקיצה בתהליך התכן.

מושגי מפתח

- מהנדסים משרטטים סקיצות כדי לחשוב, לחקור רעיונות רבים במהירות ולתקשר. סקיצה מהירה עולה דקות; מודל CAD שגוי יכול לעלות שעות.
- סמנו קודם את הגודל הכולל בתיבת בנייה בהירה, אחר כך הוסיפו פרטים, ולבסוף הדגישו את הקווים הסופיים.
- בסקיצה הפרופורציה חשובה יותר מהמידה המדויקת: העריכו יחסים כמו רוחב : גובה.
- הדמיה מרחבית, היכולת לסובב ולחתוך עצמים בדמיון, היא מיומנות שמשתפרת בתרגול.
- לעובי הקו יש משמעות: קווים נראים עבים, קווים נסתרים דקים (מקווקווים), קווי מרכז דקים (קו-נקודה ארוך-קצר).

משוואות מפתח

$$\text{scale} = \frac{\text{drawing size}}{\text{real size}}$$

```
scale= sizereal size
```

קנה מידה של שרטוט

$$\frac{w}{h} = \frac{w'}{h'}$$

```
w/h=(w')/(h')
```

שמירה על פרופורציות בשינוי קנה מידה

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 בלוק ברוחב 120 mm ובגובה 80 mm. אתם משרטטים את רוחבו כ-60 mm. מה צריך להיות גובה הסקיצה?

1. קנה מידה 0.5 = 60/120 =.
2. גובה 0.5 × 80 =.

תשובה: 40 mm (סקיצה בקנה מידה 1:2).

דוגמה 1.2 חלק באורך 450 mm. איזה קנה מידה תקני יכניס אותו לשטח שרטוט של 250 mm: 1:1, 1:2 או 1:5?

1. 450 mm → 1:1 (גדול מדי).
2. 225 mm → 1:2 (נכנס).

תשובה: 1:2, קנה המידה הגדול ביותר שנכנס, כך שהפרטים נשארים קריאים.

דוגמה 1.3 בקנה מידה 2:1, באיזה גודל משורטט חור של 3 mm?

1. 2 × 3.

תשובה: 6 mm על הנייר (המידה עדיין מציינת את ה-3 mm האמיתיים).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. בקנה מידה 1:5, מה אורכה על הנייר של קורה באורך 1200 mm?

   240 mm.

2. סקיצה משורטטת בקנה מידה 1:2. קו בה אורכו 35 mm. מה האורך האמיתי?

   70 mm.

3. איזה סוג קו מראה מקצוע נסתר?

   קו דק מקווקו.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: סקיצות הן רק לאמנים.
בפועל: זו מיומנות הנדסית נלמדת שמשתפרת מהר בתרגול.

מיתוס: המידות בשרטוט בקנה מידה מראות את הגודל המשורטט.
בפועל: הן תמיד מראות את הגודל האמיתי.

מיתוס: להתחיל בפרטים.
בפועל: לסמן קודם את המעטפת הכוללת, ואחר כך להוסיף פרטים.

כרטיסיות

קווי בנייה

קווי עזר בהירים, שנמחקים או נשארים חיוורים.

קו נראה

עבה, רציף.

קו נסתר

דק, מקווקו.

קו מרכז

דק, קו-נקודה ארוך-קצר.

קנה מידה

גודל משורטט ÷ גודל אמיתי.

הדמיה מרחבית

סיבוב וחיתוך של עצמים תלת-ממדיים (3D) בדמיון.

בוחן לבדיקה עצמית

1. קו מרכז משורטט כ…

עבה רציף

דק מקווקו

דק ארוך-קצר

זיגזג

דק ארוך-קצר. מוסכמת קווים תקנית.

2. בקנה מידה 1:2, חלק של 100 mm משורטט…

200 mm

50 mm

100 mm

25 mm

50 mm. בחצי מגודלו.

3. הצעד הראשון בשרטוט עצם הוא…

להדגיש את המקצועות

לסמן תיבת בנייה בהירה

להוסיף מידות

להצליל אותו

לסמן תיבת בנייה בהירה. קודם המעטפת.

4. מקצועות נסתרים מסומנים ב...

קווים מקווקווים

קווים עבים

בלי קווים

קווים אדומים

קווים מקווקווים. קווים דקים מקווקווים.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

המקום הזול ביותר לחסוך בחומר הוא הסקיצה. רעיונות כמו פחות חלקים, מחברים תקניים וחיבורים ברי תיקון קל לבחון על הנייר ויקר לשנות אחרי שהתבניות יוצרו.

גישת הניהול בר-הקיימא של חומרים של ה-EPA בוחנת חומרים לאורך כל מחזור חייהם, החל מהתכן.

ב־Saving Planets: מבוא להנדסת אווירונאוטיקה וחלל

מקורות: MIT · EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics) OpenCourseWare 2.00b: Toy Product Design (https://ocw.mit.edu/courses/2-00b-toy-product-design-spring-2008/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 2.00b: Toy Product Design (https://ocw.mit.edu/courses/2-00b-toy-product-design-spring-2008/): קורס תכן המוצר של MIT, עתיר סקיצות.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): תכן וייצור ב-MIT.

- [ ] סיימתי את היחידה הזו

היטל אורתוגרפי ואיזומטרי

שפת השרטוט הטכני: היטל רב-מבטי (אורתוגרפי) ומבטים איזומטריים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- ליצור מבט חזית, מבט על ומבט צד ימין ביישור נכון.
- להכיר את סמלי ההיטל בזווית ראשונה ובזווית שלישית.
- לשרטט מבטים איזומטריים של חלקים פשוטים.
- למצוא אורך אמיתי וקיצור.

מושגי מפתח

- היטל אורתוגרפי מציג עצם בקרני היטל מקבילות הניצבות לכל מישור מבט. שלושה מבטים (חזית, על, ימין) מתארים בדרך כלל חלק באופן מלא.
- היטל בזווית שלישית (ארה"ב, ASME) מציב את מבט העל מעל מבט החזית; היטל בזווית ראשונה (רוב אירופה ואסיה, ISO) מציב אותו מתחתיו. סמל בטבלת הכותרת מציין איזה מהם.
- המבטים נשארים מיושרים: הרוחב משותף לחזית ולמבט העל, הגובה לחזית ולצד, והעומק למבט העל ולצד.
- מבט איזומטרי מטה את העצם כך ששלושת צִיריו מרוחקים 120° זה מזה. מקצועות לאורך הצירים מתקצרים פי $\sqrt{(2/3)} \approx 0.816$; שרטוט איזומטרי מתעלם מכך ומשרטט אותם באורך מלא.
- קו מופיע באורכו האמיתי רק במבט המקביל לו.

משוואות מפתח

$$k = \sqrt{2/3} \approx 0.816$$

```
k=2/3≈0.816
```

מקדם הקיצור האיזומטרי

$$L_{true} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

```
L_true=Δ x^2+Δ y^2+Δ z^2
```

אורך אמיתי של מקצוע מתוך קואורדינטות

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 מקצוע של קובייה הוא 100 mm. מה אורכו בהיטל איזומטרי אמיתי, ומה בשרטוט איזומטרי?

1. היטל: 0.816 × 100.
2. שרטוט: בגודל מלא לפי המוסכמה.

תשובה: 81.6 mm בהיטל; 100 mm בשרטוט איזומטרי.

דוגמה 2.2 מקצוע עובר מ-(0, 0, 0) ל-(30, 40, 0) mm. מה אורכו האמיתי, ובאיזה מבט הוא מופיע באורכו האמיתי?

1. $\sqrt{(30^2 + 40^2)} = 50$.

תשובה: 50 mm; באורך אמיתי במבט לאורך z (הוא נמצא במישור x–y).

דוגמה 2.3 מקצוע עובר מ-(0, 0, 0) ל-(20, 20, 10). מצאו את אורכו האמיתי.

1. $\sqrt{(400 + 400 + 100)} = \sqrt{900}$.

תשובה: 30 mm. אף מבט ראשי אינו מראה אותו באורכו האמיתי; צריך מבט עזר (יחידה 3).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. בהיטל בזווית שלישית, היכן ממוקם מבט צד ימין?

   מימין למבט החזית.

2. אילו שני מבטים חולקים את מידת העומק?

   מבט העל ומבט הצד.

3. מצאו את האורך האמיתי של מקצוע מ-(0, 0, 0) ל-(12, 16, 0).

   20.

4. בהיטל איזומטרי אמיתי, מה האורך הנראה של מקצוע של 50 mm לאורך ציר?

   ≈ 40.8 mm.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: שרטוטים איזומטריים משורטטים ב-81.6%.
בפועל: שרטוטים איזומטריים משתמשים באורך מלא; רק ההיטל האיזומטרי מקוצר.

מיתוס: זווית ראשונה ושלישית הן רק סגנונות שונים.
בפועל: הן מחליפות את מיקומי המבטים; קריאה שגויה של הסמל יוצרת חלק במראה הפוכה.

מיתוס: יותר מבטים זה תמיד טוב יותר.

בפועל: השתמשו במספר המבטים הקטן ביותר שמתאר את החלק במלואו.

כרטיסיות

היטל אורתוגרפי

קרני היטל מקבילות וניצבות; מבטים מרובים.

זווית שלישית

מבט על מעל החזית (ארה"ב).

זווית ראשונה

מבט על מתחת לחזית (ISO ברוב העולם).

איזומטרי

צירים מרוחקים 120° זה מזה.

קיצור

המקצוע נראה קצר מאורכו האמיתי.

אורך אמיתי

נראה רק במבט מקביל.

בוחן לבדיקה עצמית

1. בהיטל בזווית שלישית מבט העל נמצא...

מתחת למבט החזית

מעל מבט החזית

משמאל למבט החזית

לא בשימוש

מעל מבט החזית. מוסכמת ASME.

2. הצירים האיזומטריים מופרדים ב...

90°

120°

45°

60°

°120. זוויות שוות.

3. מקדם הקיצור האיזומטרי ≈

0.5

0.707

0.816

1

√(2/3) .0.816.

4. מבט החזית ומבט העל חולקים…

גובה

רוחב

עומק

כלום

רוחב. הם מיושרים אנכית.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

שרטוטים ברורים מונעים פסולים. סמל היטל שנקרא שגוי עלול לייצר חלק בתמונת ראי, וכל חלק שנפסל מבזבז את החומר והאנרגיה שהושקעו בו.

תקנים בינלאומיים להיטל ולטולרנסים מאפשרים לייצר שרטוט אחד נכון בכל מקום, כך שאפשר לרכוש חלקים במקום ולייצר חלקי חילוף שמתאימים.

ב־Saving Planets: חשבון אינפיניטסימלי 1

מקורות: ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing) · EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics)

מקורות לימוד חינמיים

- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): קורסים בשרטוט ובמידול.
- ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing): תקן השרטוט האמריקאי.

- [ ] **סיימתי את היחידה הזו**

חתכים ומבטי עזר

לפתוח חלקים כדי להראות את פנימם, ולסובב את המבט כדי לראות פאות משופעות בגודלן האמיתי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לשרטט חתכים מלאים, חצי חתכים, חתכים מדורגים וחתכים חלקיים עם קווקוו.
- ליישם מוסכמות חתך (צלעות, צירים ומחברים אינם מקווקווים בחתך לאורכם).
- לבנות מבט עזר ראשוני של משטח משופע.
- למצוא גודל אמיתי ואורך אמיתי.

מושגי מפתח

- מבט חתך מדמיין מישור חיתוך שפורס את החלק; החצי שהוסר מאפשר לפרטים הפנימיים להופיע כקווים נראים במקום קווים נסתרים מבלבלים.
- חומר חתוך מקווקו בקווים דקים, בדרך כלל ב-45°. צלעות דקות, צירים, ברגים ופינים שנחתכו לאורכם אינם מקווקווים לפי המוסכמה.
- קו מישור חיתוך עם חיצים ואותיות (A–A) מראה היכן החתך ולאיזה כיוון מסתכלים.
- משטח משופע מופיע מקוצר במבטים הראשיים. מבט עזר מוטל על מישור המקביל לו ומראה את גודלו האמיתי.
- אורך משופע = √(אופקי² + אנכי²) במבט שבו הוא מופיע כמקצוע.

משוואות מפתח

$$L = \sqrt{a^2 + b^2}$$

L=^2+b^2

אורך אמיתי של מקצוע משופע

$$A_{true} = \frac{A_{proj}}{\cos\theta}$$

A_true=_projθ

שטח אמיתי של פאה המוטה ב-θ ממישור המבט

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 פאה משופעת מופיעה כמקצוע במבט החזית, ועולה 30 mm לאורך 40 mm. עומק החלק 25 mm. מצאו את הגודל האמיתי של הפאה.

1. אורך המקצוע = √(30² + 40²) = 50 mm.
2. גודל אמיתי = 50 × 25 =.

תשובה: $50\ \text{mm} \times 25\ \text{mm} = 1{,}250\ \text{mm}^2$.

דוגמה 3.2 פאה זו מוטלת במבט העל. מה השטח שהיא נראית בו שם?

1. מבט העל רואה את המהלך האופקי של $40\ \text{mm} \times 25\ \text{mm}$.

תשובה: $1250 \times \cos\theta$ עם $\cos\theta = 40/50 = 0.8$, כלומר $1000\ \text{mm}^2$.

דוגמה 3.3 לצינור קוטר חיצוני של $40\ \text{mm}$ ודפנות של $3\ \text{mm}$. בחתך מלא, מה רוחב כל רצועה מקווקוות?

1. עובי דופן $3\ \text{mm}$ = בכל צד.
2. קוטר פנימי $= 40 - 6 = 34\ \text{mm}$.

תשובה: שתי רצועות מקווקוות של $3\ \text{mm}$, ובניהן קדח פתוח של $34\ \text{mm}$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. למה לא מקווקווים צלעות שנחתכו לאורכן?

   קווקוו היה גורם לצלע דקה להיראות כגוש מלא ומציג את החלק באופן שגוי.

2. פאה עולה $5\ \text{mm}$ לאורך $12\ \text{mm}$. מה האורך האמיתי של המקצוע שלה?

   $13\ \text{mm}$.

3. פאה באורך $60\ \text{mm}$ מוטה כך ש-$\cos\theta = 0.6$ במבט העל. איזה אורך מראה מבט העל?

   $36\ \text{mm}$.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: גם חתכים מראים קווים נסתרים.

בפועל: בדרך כלל קווים נסתרים מושמטים בחתכים.

מיתוס: מבטי עזר חייבים להראות את כל החלק.

בפועל: מבטי עזר חלקיים שמראים רק את הפרט המשופע הם המקובלים.

מיתוס: כל משטח חתוך מקווקו.

בפועל: צלעות, צירים ומחברים שנחתכו לאורכם נשארים ללא קווקוו לפי המוסכמה.

כרטיסיות

מבט חתך

חיתוך דמיוני להצגת הפנים.

קו מישור חיתוך

קו עבה עם חיצים ואותיות.

קווקוו

קווים דקים על חומר חתוך.

חצי חתך

רבע מוסר; חצי מראה את הפנים.

מבט עזר

מבט מקביל לפאה משופעת.

גודל אמיתי

צורה ושטח ללא עיוות.

בוחן לבדיקה עצמית

1. קווקוו מראה...

מקצועות נסתרים

חומר חתוך

הברגות

גימור פני שטח

חומר חתוך. החומר שמישור החיתוך עובר דרכו.

2. מבט עזר מקביל ל...

מבט החזית

המשטח המשופע

הרצפה

טבלת הכותרת

המשטח המשופע. כך שהוא מראה גודל אמיתי.

3. חצי חתך מראה...

חצי מהחלק הוסר

רבע אחד הוסר

רק החוץ

מבט מסובב

רבע אחד הוסר. פנים וחוץ בבת אחת בחלקים סימטריים.

4. האורך האמיתי של מקצוע שעולה 9 לאורך 12 הוא…

21

15

10.5

3

√(81 + 144) .15.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

חתכים הם הדרך שבה מתכננים בודקים עובי דפנות, ודפנות דקות יותר במקום שהעומסים מאפשרים פירושן פחות חומר. זו הפחתת משקל כבר על שולחן השרטוט (יחידה 9).

ה-DOE מדווח שהחלפת חלקי פלדה כבדים בחומרים קלים יותר יכולה להפחית את משקל הרכיבים ב-10–60% בטווח הקצר.

ב־Saving Planets: פיזיקה I

מקורות: · U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks) · ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing)

מקורות לימוד חינמיים

- FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started): חתכים ב-FreeCAD TechDraw.
- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): קורסי שרטוט של Onshape.

סיימתי את היחידה הזו

מתן מידות ויסודות GD&T

לומר בדיוק מה הגודל והצורה שחלק חייב להיות: כללי מתן מידות, מישורי ייחוס וטולרנסים גאומטריים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לתת מידות לחלקים בבהירות לפי מוסכמות ASME Y14.5.
- לבחור מישורי ייחוס לפי התפקוד.
- לקרוא מסגרות בקרת מאפיין לשטיחות, ניצבות, מיקום ופרופיל.
- לחשב שגיאת מיקום וטולרנס בונוס ב-MMC.

מושגי מפתח

- כל מאפיין מקבל מידה פעם אחת, במבט שמראה אותו בצורה הטובה ביותר, בלי מידות כפולות או משורשרות שמצברות שגיאות.
- מתן מידות וטולרנסים גאומטריים (GD&T), שתוקננו ב-ASME Y14.5 (המהדורה הנוכחית 2018), שולטים בצורה, בכיוון, במיקום ובפרופיל ביחס למישורי ייחוס, משטחי הייחוס שמתחברים בהרכבה.
- מסגרת בקרת מאפיין נקראת: סמל | טולרנס (עם Ø לאזור גלילי) | מתאם | מישורי ייחוס, למשל ⌖ Ø0.1 A B C Ⓜ.
- שגיאת מיקום של חור (Δx² + Δy²)√2 =; היא חייבת להיות בתוך אזור הטולרנס הגלילי.
- במצב חומר מרבי (MMC) חור מקבל בונוס: ככל שהוא מתרחק מ-MMC (גדל), טולרנס המיקום המותר שלו גדל באותה מידה.

משוואות מפתח

$$\varnothing_{pos} = 2\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

_pos=2Δ x^2+Δ y^2

שגיאת מיקום נמדדת (קוטר)

$$t_{allowed} = t_{MMC} + (d_{actual} - d_{MMC})$$

t_allowed=t_MMC+(d_actual-d_MMC)

טולרנס בונוס לחור ב-MMC

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 חור צריך להיות ב-(50, 30). הוא נמדד ב-(50.03, 29.98). טולרנס המיקום הוא Ø0.1. האם הוא עובר?

1. Δx = 0.03, Δy = 0.02.
2. Ø = 2√(0.0009 + 0.0004) = 0.072.

תשובה: Ø0.1 ≤ Ø0.072: עובר.

דוגמה 4.2 החור Ø10.0–10.2 עם מיקום Ø0.1 ב-MMC. הוא נמדד Ø10.15. איזה טולרנס מיקום מותר?

1. MMC של חור = המידה הקטנה ביותר = 10.0.
2. בונוס = 10.15 − 10.0 = 0.15.
3. מותר = 0.1 + 0.15 = 0.25.

תשובה: Ø0.25.

דוגמה 4.3 שלוש מידות משורשרות של 20 ± 0.1 כל אחת ממקמות מאפיין. מה השונות הגרועה ביותר של הסך הכול?

1. הטולרנסים מצטברים: 3 × 0.1.

תשובה: 0.3 mm ±. מתן כל מידה ממישור ייחוס אחד היה מגביל אותה ל-0.1 ±.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. חור סוטה ב-0.04 ב-x וב-0.03 ב-y. מה שגיאת המיקום?

   Ø0.10.

2. עם Ø0.1 ב-MMC, איזה טולרנס מיקום מותר לחור Ø10.0–10.2 שנמדד ב-Ø10.05?

   Ø0.15.

3. מה מייצג מישור ייחוס?

   ייחוס מדויק תאורטית, בדרך כלל היכן שהחלק מתחבר או מקובע.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: שגיאת המיקום שווה למרחק הסטייה.

בפועל: אזור הטולרנס הוא קוטר, לכן השגיאה × 2 = הסטייה הרדיאלית.

מיתוס: טולרנסים הדוקים יותר תמיד יוצרים חלקים טובים יותר.

בפועל: הם מעלים עלות ופסולים; תנו טולרנס רק לפי מה שהתפקוד דורש.

מיתוס: MMC של חור הוא המידה הגדולה ביותר שלו.

בפועל: חומר מרבי בחור הוא החור הקטן ביותר.

כרטיסיות

GD&T

מתן מידות וטולרנסים גאומטריים.

מישור ייחוס

מאפיין ייחוס מדויק.

מסגרת בקרת מאפיין

סמל | טולרנס | מתאמים | מישורי ייחוס.

מיקום

טולרנס מיקום, בדרך כלל אזור קוטרי.

MMC

מצב חומר מרבי.

טולרנס בונוס

טולרנס נוסף כשמאפיין מתרחק מ-MMC.

בוחן לבדיקה עצמית

1. ASME Y14.5 עוסק ב…

ריתוך

מתן מידות וטולרנסים

סמלים חשמליים

חומרים

מתן מידות וטולרנסים. תקן ה-GD&T.

2. לחור שסוטה ב-0.03 וב-0.04 יש שגיאת מיקום של…

Ø0.05

Ø0.07

Ø0.10

Ø0.14

.Ø0.10. 2 × 0.05

3. MMC של ציר הוא...

המידה הקטנה ביותר

המידה הגדולה ביותר

המידה הנומינלית

אפס

המידה הגדולה ביותר. הכי הרבה חומר.

4. מידות משורשרות...

מקטינות שגיאה

מצברות טולרנסים

הן חובה

מבטלות מישורי ייחוס

מצברות טולרנסים. השגיאות מצטברות לאורך השרשרת.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

מתן טולרנסים נכון הוא כלי להפחתת פסולת. GD&T תפקודי וטולרנס בונוס ב-MMC מקבלים חלקים שיורכבו ויעבדו, במקום לפסול אותם בגלל מספרים הדוקים שרירותיים.

NIST עובד על הגדרה מבוססת מודל, שמכניסה את הטולרנסים ישירות למודל התלת-ממדי (3D) כך שמכונות ובודקים קוראים אותם נכון, מה שמפחית שגיאות ועבודה חוזרת.

ב־Saving Planets: מבוא להנדסת אווירונאוטיקה וחלל

מקורות: ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing) · NIST: Model-based enterprise and PMI testing (https://www.nist.gov/el/systems-integration-division-73400/mbe-pmi-validation-and-conformance-testing)

מקורות לימוד חינמיים

- ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing): התקן.
- NIST: Model-based enterprise and PMI testing (https://www.nist.gov/el/systems-integration-division-73400/mbe-pmi-validation-and-conformance-testing): טולרנסים במודלים תלת-ממדיים (3D).

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

טולרנסים והתאמות

כמה מידות החלקים יכולות להשתנות ועדיין להתאים זה לזה: גבולות, התאמות ISO ושרשראות טולרנס.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב גבולות, מרווח והידוק.
- לקרוא התאמות ISO בשיטת חור בסיס כמו H7/g6 ו-H7/p6.
- לבצע שרשראות טולרנס במקרה הגרוע ובשורש סכום הריבועים (RSS).
- לבחור התאמה לפי התפקוד.

מושגי מפתח

- הגבולות הם המידות הגדולה והקטנה ביותר המותרות. טולרנס = גבול עליון − גבול תחתון.
- התאמות מרווח תמיד משאירות רווח; התאמות הידוק תמיד חופפות (נלחצות יחד); התאמות מעבר יכולות לעשות כל אחד מהשניים.
- ISO 286 מקודד התאמות כאות/מספר של החור מעל אות/מספר של הציר. חורי H מתחילים במידה הנומינלית; המספר הוא דרגת ה-IT. למידות 18–30 mm, IT7 = 21 µm ו-IT6 = 13 µm.
- שרשרת במקרה הגרוע מחברת את כל הטולרנסים; RSS מניחה שונות אקראית בלתי תלויה: √(Σtᵢ²), קטנה ומציאותית יותר כשיש חלקים רבים.

משוואות מפתח

$$c_{\max} = H_{\max} - s_{\min}, \quad c_{\min} = H_{\min} - s_{\max}$$

```
c_=H_-s_, c_=H_-s_
```

גבולות מרווח

$$T_{wc} = \sum t_i$$

```
T_wc= t_i
```

שרשרת במקרה הגרוע

$$T_{RSS} = \sqrt{\sum t_i^2}$$

```
T_RSS= t_i^2
```

שרשרת שורש סכום הריבועים

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 התאמה Ø25 H7/g6: חור 25.000–25.021, ציר 24.980–24.993. מצאו את טווח המרווח.

1. c_min = 25.000 − 24.993 = 0.007.
2. c_max = 25.021 − 24.980 = 0.041.

תשובה: מרווח של 0.007–0.041 mm: התאמת החלקה מדויקת.

דוגמה 5.2 התאמה Ø25 H7/p6: חור 25.000–25.021, ציר 25.022–25.035. מצאו את ההתאמה.

1. חפיפה קטנה ביותר = 25.021 − 25.022 = 0.001.
2. גדולה ביותר = 25.035 − 25.000 = 0.035.

תשובה: הידוק של 0.001–0.035 mm: התאמת לחיצה.

דוגמה 5.3 חלקים של 20 ± 0.10, 30 ± 0.05 ו-10 ± 0.05 mm נערמים. מצאו את הטולרנס במקרה הגרוע וב-RSS.

1. מקרה גרוע: 0.10 + 0.05 + 0.05 = 0.20.
2. RSS: √(0.01 + 0.0025 + 0.0025) = 0.122.

תשובה: 60 ± 0.20 mm במקרה הגרוע; 60 ± 0.12 mm ב-RSS.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. חור במידה 12.000–12.018 וציר 11.984–11.995. מה טווח המרווח?

   0.005–0.034 mm.

2. מה הטולרנס של חור ה-H7 שלמעלה?

   0.021 mm = 21 µm.

3. ארבעה חלקים של 0.05 ± כל אחד: מקרה גרוע ו-RSS?

   0.20 ± ו-0.10 ±.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: RSS תמיד בטוחה.

בפועל: היא מניחה שונות בלתי תלויה וממורכזת; בהתאמות קריטיות לבטיחות השתמשו במקרה הגרוע.

מיתוס: התאמות הידוק לא צריכות חישוב.

בפועל: הידוק גדול מדי עלול לסדוק חלקים; חשבו את הטווח.

מיתוס: מספר הטולרנס הוא במילימטרים.

בפועל: דרגות IT ממופות לערכים במיקרומטרים שתלויים במידה.

כרטיסיות

גבולות

המידות הגדולה והקטנה ביותר המותרות.

התאמת מרווח

תמיד רווח.

התאמת הידוק

תמיד חפיפה.

התאמת מעבר

רווח או חפיפה.

שרשרת במקרה הגרוע

Σt_i.

שרשרת RSS

$\sqrt{\Sigma t_i^2}$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. H7/g6 היא…

- התאמת לחיצה
- התאמת מרווח
- התאמת מעבר
- הברגה

התאמת מרווח. צירי g נמצאים מתחת לחור ה-H.

2. RSS עבור ±0.3 ו-±0.4 היא…

- ±0.7
- ±0.5

±0.35

±0.1

±0.5. √(0.09 + 0.16).

3. IT7 למידות 18–30 mm הוא…

7 µm

13 µm

21 µm

0.7 mm

21 µm. טבלת ISO 286.

4. הגבול התחתון של חור H הוא…

מעל הנומינלי

בדיוק הנומינלי

מתחת לנומינלי

באקראי

בדיוק הנומינלי. שיטת חור בסיס.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

התאמות טובות הופכות מוצרים לברי תיקון: התאמות ISO תקניות מאפשרות להחליף מיסבים, פינים ותותבים בחלקי מדף גם שנים אחר כך, וכך המכונה נשארת בשירות ולא במטמנה.

בחירת RSS במקום המתאים מאפשרת טולרנסים בודדים רחבים יותר, כלומר תהליכים זולים יותר ופחות פסולים באותה איכות הרכבה.

ב־Saving Planets: חשבון אינפיניטסימלי 2

מקורות: ISO 286-1: ISO code system for tolerances and fits (https://www.iso.org/standard/45975.html) · EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics)

מקורות לימוד חינמיים

- ISO 286-1: ISO code system for tolerances and fits (https://www.iso.org/standard/45975.html): שיטת ההתאמות של ISO.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): התאמות בתכן מכונות.

סיימתי את היחידה הזו

מידול תלת-ממדי (3D) פרמטרי

לבנות מודלים מוצקים מסקיצות מאולצות ומפיצ׳רים ב-Onshape או ב-FreeCAD, ולהפוך אותם לקלים לשינוי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- ליצור סקיצות 2D מאולצות לחלוטין.
- להשתמש בפיצ׳רים של שליפה, סיבוב, עיגול פינה, שיפוע, חור, דופן ותבנית חוזרת.
- להניע מודלים במשתנים ובמשוואות (כוונת תכן).
- לחשב תכונות מסה ולהשתמש בהן בתכן.

מושגי מפתח

- מודל פרמטרי הוא מתכון: סקיצות ופיצ׳רים בעץ היסטוריה. משנים מידה והמודל נבנה מחדש.
- סקיצה מאולצת לחלוטין כשאילוצים גאומטריים (מקביל, משיק, מתלכד) ומידות מקבעים כל דרגת חופש. לכל נקודת 2D חופשית יש 2 דרגות חופש.
- כוונת תכן: תנו מידות לפי האופן שבו החלק מתפקד. אם חורים חייבים להישאר ממורכזים, אלצו אותם לנקודת האמצע ולא למקצוע.
- משתנים (Onshape) וגיליונות או ביטויים (FreeCAD) מאפשרים למספר אחד להניע פיצ׳רים רבים.
- CAD מחשב נפח, מסה, מרכז מסה ומומנטי התמד מתוך צפיפות החומר.

משוואות מפתח

$$m = \rho V$$

`m=ρ V`

מסה מתוך נפח

$$\text{DOF}_{sketch} = 2n_{pts} - \sum \text{constraints}$$

`DOF_sketch=2n_pts-`

דרגות חופש של סקיצה (נקודות בלבד)

$$V_{rev} = 2\pi \bar{r} A$$

`V_rev=2π r A`

פפוס: נפח גוף סיבוב

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 לוח אלומיניום במידות 100 × 60 × 5 mm עם ארבעה חורים עוברים Ø6. מצאו את מסתו ($\rho = 2.70\ \text{g/cm}^3$).

1. $V = 100 \times 60 \times 5 - 4 \times \pi \times 3^2 \times 5 = 30{,}000 - 565.5 = 29{,}434.5\ \text{mm}^3$.
2. $m = 29.43\ \text{cm}^3 \times 2.70$.

תשובה: $\approx 79.5\ \text{g}$.

דוגמה 6.2 למלבן שצויר בכלי המלבן יש 4 נקודות פינה (8 דרגות חופש) והוא מגיע עם 2 אילוצים אופקיים ו-2 אנכיים. כמה מידות או אילוצים נוספים יאלצו אותו לחלוטין?

1. נותרות $8 - 4 = 4$ דרגות חופש: רוחב, גובה, ומיקום ב-x וב-y.
2. הוסיפו רוחב וגובה, ואז הפכו פינה אחת למתלכדת עם הראשית (מסיר 2).

תשובה: עוד 4: שתי מידות ועוד שתיים למיקום (למשל פינה מתלכדת עם הראשית).

דוגמה 6.3 טבעת נוצרת מסיבוב מלבן של 4 × 10 mm שמרכז הכובד שלו במרחק 25 mm מהציר. מצאו את נפחה.

1. $A = 40\ \text{mm}^2$.
2. $V = 2\pi \times 25 \times 40$.

תשובה: $\approx 6{,}283\ \text{mm}^3$ ($6.28\ \text{cm}^3$).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. גוש פלדה ($\rho = 7.85\ \text{g/cm}^3$) 50 × 50 × 20 mm. מה המסה?

   $50\ \text{cm}^3 \times 7.85 \approx 392.5\ \text{g}$.

2. למה לאלץ סקיצות לחלוטין?

   כדי ששינויים ייבנו מחדש באופן צפוי; סקיצות בתת-אילוץ זזות כשעורכים אותן.

3. קוביית PLA באורך צלע 20 mm, מלאה ($\rho = 1.24\ \text{g/cm}^3$). מה המסה?

   $8\ \text{cm}^3 \times 1.24 \approx 9.9\ \text{g}$.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מודל שנראה נכון הוא נכון.

בפועל: בדקו סקיצות בתת-אילוץ והפניות שבירות; הן נשברות בעריכה.

מיתוס: תנו מידות מכל מקצוע שנוח.

בפועל: תנו מידות ממישורי ייחוס תפקודיים כדי ללכוד את הכוונה.

מיתוס: תכונות המסה מדויקות.

בפועל: הן טובות רק כמו הצפיפות והמודל שהזנתם.

כרטיסיות

מודל פרמטרי

פיצ׳רים המונעים על ידי מידות ניתנות לעריכה.

אילוץ

קשר גאומטרי, למשל משיקות.

כוונת תכן

המודל מתנהג כפי שהתפקוד דורש.

פיצ׳ר

שליפה, סיבוב, עיגול פינה, חור, תבנית חוזרת...

עץ היסטוריה

רשימה מסודרת של פיצ׳רים.

תכונות מסה

נפח, מסה, מרכז מסה, התמד.

בוחן לבדיקה עצמית

1. לסקיצה מאולצת לחלוטין יש...

אין מידות

אפס דרגות חופש שנותרו

רק אילוצים

רק מידות

אפס דרגות חופש שנותרו. כל דרגות החופש מקובעות.

2. עץ ההיסטוריה מתעד...

דואר אלקטרוני

את רצף הפיצ׳רים

רק חומרים

הגדרות רינדור

את רצף הפיצ'רים. המתכון הפרמטרי.

3. סיבוב שטח A ברדיוס מרכז הכובד r̄ נותן נפח…

πr̄A

2πr̄A

r̄A

2πA

2πr̄A. משפט פפוס.

4. Onshape רץ…

רק בלינוקס

בדפדפן

רק במצב לא מקוון

רק בטלפונים

בדפדפן. CAD מבוסס ענן.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

מודלים פרמטריים הופכים ניסוי של גרסאות קלות יותר לזול: משנים משתנה של עובי דופן וכל החלק מתעדכן, עם המסה החדשה שלו. כך הפחתת משקל הופכת מניחוש למחקר מהיר (מעבדה D).

התוכנית החינמית של Onshape ו-FreeCAD מעמידות מידול מקצועי לרשות כל אחד, כך שאפשר לשתף ולשפר תכנים בקוד פתוח של חלקי תיקון וטכנולוגיה מותאמת.

ב־Saving Planets: מבוא להנדסת אווירונאוטיקה וחלל

מקורות: FreeCAD (https://www.freecad.org/) · Onshape Free plan (חינמי, קוד פתוח) (https://www.onshape.com/en/products/free)

מקורות לימוד חינמיים

- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): קורסי מידול חינמיים בקצב שלכם.
- FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started): יסודות FreeCAD Part Design.
- Onshape Free plan (https://www.onshape.com/en/products/free): הירשמו לתוכנית החינמית.

סיימתי את היחידה הזו

הרכבות ושרטוטים

לחבר חלקים בצימודים, לבדוק תנועה והתנגשויות, ולהפיק שרטוטים שאפשר לבנות מהם.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להרכיב חלקים בצימודים (קבוע, סיבובי, מחליק) ולספור דרגות חופש.
- לבדוק התנגשות ומרווח.
- להפיק שרטוטי פרט ושרטוטי הרכבה עם טבלת כותרת, רשימת חלקים ובלונים.
- להשתמש במשוואת גרובלר למנגנונים מישוריים.

מושגי מפתח

- לגוף קשיח חופשי יש 6 דרגות חופש (3 העתקות, 3 סיבובים). צימוד סיבובי משאיר 1; מחליק משאיר 1; צימוד קבוע משאיר 0.
- הרכבה מלמטה למעלה מכניסה חלקים גמורים; תכן מלמעלה למטה מתכנן חלקים בהקשר של ההרכבה.
- הניידות של מנגנון מישורי היא $M = 3(n-1) - 2j_1 - j_2$ (גרובלר), כאשר n חוליות כולל הקרקע, j_1 מפרקים מלאים ו-j_2 חצאי מפרקים.
- השרטוטים נגזרים מהמודל: מבטים, חתכים, מידות והערות, טבלת כותרת (חלק, חומר, קנה מידה, סמל היטל, יחידות, טולרנסים), ובהרכבות גם רשימת חלקים (BOM) עם בלונים.
- בדיקות התנגשות מגלות חלקים חופפים לפני שמייצרים משהו.

משוואות מפתח

$$M = 3(n-1) - 2j_1 - j_2$$

```
M=3(n-1)-2j_1-j_2
```

משוואת גרובלר (מישורית)

$$\mathrm{DOF}_{3D} = 6 - \text{removed}$$

```
DOF_3D=6-removed
```

דרגות החופש שנותרו לחלק מצומד

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 מצאו את הניידות של מנגנון ארבע חוליות (4 חוליות כולל הקרקע, 4 מפרקי ציר).

1. $M = 3(4-1) - 2(4) = 9 - 8$.

תשובה: M = 1: כניסה אחת מניעה אותו.

דוגמה 7.2 מנגנון ארכובה-מחליק: קרקע, ארכובה, טלטל, מחליק; 3 מפרקי ציר ו-1 מפרק מחליק.

1. $n = 4$, $j_1 = 4$ (מפרקי הציר והמחליק הם מפרקים מלאים).
2. $M = 9 - 8$.

תשובה: M = 1, כמו במנוע.

דוגמה 7.3 רשימת חלקים כוללת × 4 ברגי M5 של 1.2 g, 1 לוח של 79.5 g ו-2 תושבות של 15.0 g. מה המסה הכוללת של ההרכבה?

1. 30.0 + 79.5 + 4.8.

תשובה: 114.3 g.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. ניידות של 5 חוליות ו-5 מפרקי ציר?

   $M = 12 - 10 = 2$.

2. ניידות של 3 חוליות ו-3 מפרקי ציר?

   $M = 6 - 6 = 0$: מבנה קשיח (משולש).

3. מה חייבת לציין כל טבלת כותרת?

שם/מספר חלק, חומר, קנה מידה, יחידות, שיטת היטל, טולרנסים כלליים, מחבר וגרסה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: יותר צימודים זה בטוח יותר.

בפועל: צימודים עודפים יוצרים אילוץ יתר ועלולים להיכשל בפתרון או להסתיר שגיאות.

מיתוס: שרטוטי הרכבה צריכים את כל המידות.

בפועל: שרטוטי פרט נושאים את מידות החלקים; שרטוטי הרכבה מראים איך החלקים מתחברים.

מיתוס: אם המודל מתאים, גם החלקים האמיתיים יתאימו.

בפועל: רק אם הטולרנסים נבדקו (יחידה 5).

כרטיסיות

צימוד

קשר שממקם חלקים.

סיבובי

מפרק ציר; 1 דרגת חופש סיבובית.

גרובלר

$M = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2$.

BOM

רשימת חלקים.

בלון

הפניה ממוספרת שמקשרת חלק לרשימת החלקים.

טבלת כותרת

הזהות, קנה המידה, היחידות והטולרנסים של השרטוט.

בוחן לבדיקה עצמית

1. לגוף קשיח חופשי ב-3D יש…

3 DOF

6 DOF

1 DOF

12 DOF

3 .6 DOF העתקות, 3 סיבובים.

2. למנגנון ארבע חוליות יש ניידות…

0

1

2

3

1. גרובלר.

3. רשימת חלקים מפרטת...

טולרנסים

חלקים וכמויות

רק צבעים

צימודים

חלקים וכמויות. רשימת חלקים.

4. צימוד סיבובי משאיר...

0 DOF

1 DOF

2 DOF

6 DOF

1 DOF. סיבוב אחד.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

שרטוט הרכבה ברור ורשימת חלקים הם מדריך תיקון. תכנים שמשתמשים במחברים תקניים וניתנים לפירוק קלים יותר לתיקון, לחידוש ולמחזור, וזה רעיון מרכזי בניהול בר-קיימא של חומרים.

ספירת החלקים ברשימת החלקים היא גם בדיקת תכן להרכבה: פחות חלקים פירושם בדרך כלל פחות חומר, פחות אנרגיה ופחות תקלות.

ב־Saving Planets: פיזיקה I

מקורות: · EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics)
FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started)

מקורות לימוד חינמיים

- FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started): הרכבות FreeCAD ו-TechDraw.
- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): הרכבות ושרטוטים ב-Onshape.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): מנגנונים ב-MIT 2.007.

סיימתי את היחידה הזו

הדפסת תלת-ממד (3D) ותכן לייצור

איך חלקים מיוצרים בפועל, ואיך לתכנן אותם כך שיהיו קלים, זולים ודלי פסולת לייצור, כולל הדפסת 3D.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לתאר תהליכים מוספים (הדפסת 3D), גורעים (עיבוד שבבי) ועיצוב.
- לתכנן להדפסת FDM: תליות, תמיכות, עובי דופן, כיוון.
- להעריך מסת הדפסה, אורך פילמנט וזמן.
- ליישם כללי תכן לייצור ולהרכבה (DFM/DFA).

מושגי מפתח

- ייצור מוסף בונה חלקים שכבה אחר שכבה; NIST עובד על מדע המדידה ותקנים כדי להפוך חלקי AM לאמינים. עיבוד שבבי מסיר חומר; יציקה ויציקה בתבנית מעצבות אותו.
- הדפסת פילמנט מותך (FDM): תליות תלולות מכ-45° מהאנך דורשות בדרך כלל תמיכות; כוונו חלקים כך שעומסים לא יפרידו שכבות, כי הקשר בין השכבות הוא הכיוון החלש.
- מילוי (לרוב 10–20%) ומעט דפנות היקפיות הופכים הדפסות לקלות; הדפסות מלאות מבזבזות חומר וזמן.
- אורך פילמנט לגרם $1/(\rho \pi r^2)$. ל-PLA בקוטר 1.75 mm (ρ = 1.24 g/cm³) זה כ-33.5 cm לגרם.
- DFM/DFA: פחות חלקים, מאפיינים ומחברים תקניים, רדיוסים נדיבים, מאפייני מיקום עצמי, והימנעות מטולרנסים הדוקים ללא צורך.

משוואות מפתח

$$\ell = \frac{m}{\rho \, \pi r^2}$$

```
=(m)/(ρ π r^2)
```

אורך פילמנט להדפסה במסה m

$$t \approx \frac{V}{w \, h \, v}$$

זמן הדפסה מתוך נפח, רוחב קו w, גובה שכבה h ומהירות v

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 כמה פילמנט PLA בקוטר 1.75 mm צורכת הדפסה של 10 g?

1. חתך $\pi(0.0875\ \text{cm})^2 = 0.02405\ \text{cm}^2$.
2. אורך לגרם $1/(1.24 \times 0.02405) = 33.5\ \text{cm}$.
3. $10 \times$.

תשובה: ≈ 3.35 m.

דוגמה 8.2 העריכו את זמן ההדפסה של 10 g PLA בקו של 0.4 mm ושכבות של 0.2 mm במהירות 50 mm/s.

1. $V = 10/1.24 = 8.065\ cm^3 = 8{,}065\ mm^3$.
2. קצב $= 0.4 \times 0.2 \times 50 = 4\ mm^3/s$.
3. $t = 8{,}065/4 = 2{,}016\ s$.

תשובה: 34 ≈ דקות של שיחול (הדפסות אמיתיות לוקחות יותר בגלל תנועות מעבר).

דוגמה 8.3 קוביית PLA מלאה של 20 mm שוקלת 9.9 g. במילוי של כ-15% עם דפנות היא שוקלת כ-3.5 g. איזה חלק מהחומר נחסך?

1. $(9.9 - 3.5)/9.9$.

תשובה: 65% ≈ פחות פלסטיק (הערכת דוגמה; תוכנת הפריסה שלכם מדווחת את המספר האמיתי).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. כמה גרם שוקל 1 m של PLA בקוטר 1.75 mm?

   $100/33.5 \approx 2.98\ g$.

2. למה להדפיס תושבת כך שהשכבות לאורך מסלול העומס?

   הקשר בין השכבות חלש מהקווים המשוחלים.

3. ציינו שני כללי DFA.

להקטין את מספר החלקים; להשתמש במאפייני מיקום עצמי ובמחברים תקניים.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הדפסת 3D תמיד ירוקה יותר.

בפועל: היא יכולה לחסוך חומר, אבל אנרגיה, הדפסות כושלות ופסולת שלא ממוחזרת משנות; השוו לפי חלק.

מיתוס: הדפסות חזקות באותה מידה בכל כיוון.

בפועל: חלקי FDM החלשים ביותר בין השכבות.

מיתוס: מילוי של 100% הוא החזק ביותר ולכן תמיד הטוב ביותר.

בפועל: הדפנות נושאות את רוב עומס הכפיפה; מילוי נוסף מוסיף מסה וזמן בתועלת מועטה.

כרטיסיות

ייצור מוסף

בנייה שכבה אחר שכבה.

FDM

הדפסת 3D בפילמנט מותך.

מילוי

אחוז הסריג הפנימי.

תמיכה

מבנה זמני מתחת לתליות.

DFM

תכן לייצור.

DFA

תכן להרכבה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. חלקי FDM החלשים ביותר…

לאורך הפילמנט

בין השכבות

על פני השטח

בשום מקום

בין השכבות. הידבקות בין שכבות.

2. תליות מעבר לכ-45° דורשות בדרך כלל…

תמיכות

יותר מילוי

מהירות גבוהה יותר

צבע

תמיכות. אין על מה להדפיס.

3. פילמנט לגרם ל-PLA בקוטר ≈ 1.75 mm

3.4 cm

33.5 cm

3.35 m

335 m

.33.5 cm. 1/(ρπr²)

4. כלל DFA מרכזי הוא...

להוסיף חלקים

להקטין את מספר החלקים

להדק את כל הטולרנסים

להשתמש בברגים מיוחדים

להקטין את מספר החלקים. פחות חלקים, פחות שלבים.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

פלסטיק הוא זרם פסולת גדול: ה-EPA מדווח שייצור הפלסטיק בארה"ב היה 35.7 מיליון טונות ב-2018, 12.2% מהפסולת העירונית המוצקה, ורק 8.7% מוחזרו. תכנון הדפסות עם מילוי נמוך, מעט תמיכות ופחות ניסיונות כושלים מקטין את הפסולת הזאת ישירות.

ייצור מוסף יכול להציב חומר רק היכן שהעומסים צריכים אותו, וכך לאפשר חלקים קלים יותר; העבודה של NIST נועדה להפוך את החלקים האלה לאמינים מספיק לשימושים תובעניים.

ב־Saving Planets: מבוא להנדסת אווירונאוטיקה וחלל

מקורות: EPA: Plastics, material-specific data (https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data) · NIST: Additive manufacturing (https://www.nist.gov/additive-manufacturing)

מקורות לימוד חינמיים

- NIST: Additive manufacturing (https://www.nist.gov/additive-manufacturing): תקנים ומדידה להדפסת 3D.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): תהליכי ייצור.
- EPA: Plastics, material-specific data (https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data): נתוני פלסטיק.

- [ ] **סיימתי את היחידה הזו**

תכן לקיימות והפחתת משקל

להשתמש בכישורי ה-CAD שלכם כדי להפוך חלקים לקלים יותר, עמידים יותר וקלים יותר לתיקון ולמחזור, ולהעריך את התועלת.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשוות חתכים לפי מסה וקשיחות (מומנט שטח שני).
- להעריך חיסכון בדלק ובפליטת CO_2 מהפחתת משקל כלי רכב.
- ליישם עקרונות תכן לתיקון, לפירוק ולמחזור.
- לבחור חומרים תוך התחשבות בכל מחזור חייהם.

מושגי מפתח

- קשיחות הכפיפה תלויה ב-EI. הרחקת חומר מהציר הניטרלי (צינורות, קורות I) מגדילה את I במסה קטנה יותר.
- ה-DOE מדווח שהפחתה של 10% במשקל הרכב יכולה לשפר את צריכת הדלק ב-6–8%, ושחומרים קלים יכולים להפחית את משקל הרכיבים ב-10–60% בטווח הקצר.
- ה-EPA מדווח שכל גלון בנזין שנשרף יוצר כ-8887 g של CO_2 (כ-2.35 kg לליטר).
- תכן לפירוק: ברגים במקום דבק, חומר יחיד היכן שאפשר, ופלסטיק מסומן.
- הקל ביותר אינו תמיד הירוק ביותר: השוו חומרים לאורך מחזור החיים, כולל אנרגיית הייצור ויכולת המחזור.

משוואות מפתח

$$I_{rect} = \frac{b h^3}{12}, \quad I_{tube} = \frac{B^4 - b^4}{12}$$

```
I_rect=(bh^3)/(12), I_tube=(B^4-b^4)/(12)
```

מומנט שטח שני: מוט מלא וצינור מרובע

$$\Delta \mathrm{CO_2} = \Delta \mathrm{fuel} \times 2.35\ \mathrm{kg/L}$$

```
ΔCO_2=Δfuel×2.35\ kg/L
```

CO_2 שנחסך מבנזין

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 השוו מוט מרובע מלא של 20 × 20 mm לצינור מרובע של 25 × 25 mm עם דפנות של 2 mm: שטח (מסה) ו-I.

1. מוט: $A = 400\ \mathrm{mm^2}$, $I = 20^4/12 = 13333\ \mathrm{mm^4}$.
2. צינור: $A = 625 - 441 = 184\ \mathrm{mm^2}$, $I = (25^4 - 21^4)/12 = 16345\ \mathrm{mm^4}$.

תשובה: הצינור משתמש ב-54% פחות חומר והוא קשיח ב-23% יותר בכפיפה.

דוגמה 9.2 מכונית של 1500 kg מוקלת ב-(150 kg) 10%. היא צורכת 8 L/100 km ונוסעת 15000 km בשנה. בעזרת 6–8% של ה-DOE, העריכו את הדלק שנחסך בשנה.

1. דלק שנתי = 15000/100 × 8 = 1200 L.
2. 6%: 72 L; 8%: 96 L.

תשובה: כ-72–96 L בשנה.

דוגמה 9.3 המירו זאת ל-CO_2 בעזרת 8887 g לגלון של ה-EPA.

1. 8.887 kg / 3.785 L = 2.35 kg/L.
2. 72 × 2.35 = 169; 96 × 2.35 = 225.

תשובה: 170–225 kg ≈ של CO_2 למכונית בשנה (הערכה מפושטת).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מה ה-I של מוט מלא 30 mm × 10 שמתכופף סביב הציר שרוחבו (h = 30) 10 mm?

   10 × 30³/12 = 22,500 mm⁴.

2. אותו מוט מונח שטוח (h = 10, b = 30)?

   קשיח פי 9 פחות: 30 × 10³/12 = 2500 mm⁴.

3. כמה ליטרים של בנזין יוצרים 1 טונה של CO_2?

   1,000/2.35 ≈ 426 L.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: קל יותר תמיד אומר ירוק יותר.

בפועל: חלק מהחומרים הקלים דורשים הרבה יותר אנרגיה לייצור; שפטו לאורך מחזור החיים.

מיתוס: הקשיחות תלויה רק בכמות החומר.

בפועל: המיקום של החומר (I) חשוב יותר.

מיתוס: דבק משפר מוצרים.

בפועל: לרוב הוא חוסם תיקון ומחזור.

כרטיסיות

מומנט שטח שני

I; קשיחות כפיפה גאומטרית.

הפחתת משקל

הסרת מסה בלי לאבד תפקוד.

כלל ה-DOE

קל ב-→ 10% צריכת דלק טובה ב-6–8%.

CO_2 מבנזין

≈ 8887 g/gal ≈ 2.35 kg/L.

תכן לפירוק

קל לפירוק לתיקון ולמחזור.

מחזור חיים

חומרים, ייצור, שימוש וסוף חיים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. קשיחות הכפיפה תלויה ב...

E בלבד

EI

מסה בלבד

צבע

EI. מודול × מומנט שטח שני.

2. DOE: רכב קל ב-→ 10% צריכת הדלק משתפרת ב...

1–2%

6–8%

20–30%

50%

6–8%. נתון DOE.

3. גלון בנזין שנשרף יוצר כ…

889 g CO_2

8,887 g CO_2

88 kg CO_2

2 g CO_2

8,887 g CO_2. נתון EPA.

4. בחירת תכן לפירוק היא…

דבק בכל מקום

ברגים וחומרים יחידים

פלסטיק מרובד מעורב

מכסים מרותכים

ברגים וחומרים יחידים. תיקון ומחזור קלים יותר.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

הפחתת משקל היא אחד מכלי האקלים הישירים ביותר שיש למשתמש CAD. ה-DOE מדווח שרכב קל ב-10% יכול להשיג צריכת דלק טובה ב-6–8%, וה-EPA מעריך כל גלון בנזין בכ-8887 g של CO_2.

תכן לתיקון ולמחזור שומר על חומרים בשימוש; ה-EPA מתאר ניהול בר-קיימא של חומרים כגישה שיטתית לשימוש ולשימוש חוזר בחומרים בצורה יצרנית יותר לאורך כל מחזור חייהם.

ב־Saving Planets: פיזיקה I

מקורות: U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks) · EPA: Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle (https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle)

מקורות לימוד חינמיים

- U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks): נתוני חומרים קלים.
- EPA: Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle (https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle): נתוני CO_2 של כלי רכב.
- EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics): חשיבת מחזור חיים.

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

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

1. סקיצות והדמיה
   3 תרגילים
2. היטל אורתוגרפי ואיזומטרי
   4 תרגילים
3. חתכים ומבטי עזר
   3 תרגילים
4. מתן מידות ויסודות GD&T
   3 תרגילים
5. טולרנסים והתאמות
   3 תרגילים
6. מידול תלת-ממדי (3D) פרמטרי
   3 תרגילים
7. הרכבות ושרטוטים
   3 תרגילים
8. הדפסת תלת-ממד (3D) ותכן לייצור
   3 תרגילים
9. תכן לקיימות והפחתת משקל
   3 תרגילים

מעבדות

ארבע מעבדות לוקחות חלק מהנייר לפלסטיק: תושבת פרמטרית ב-Onshape, הרכבה ושרטוט ב-FreeCAD, הערכה והדפסת 3D, ומחקר הפחתת משקל.

נתוני דוגמה מסומנים ככאלה. המדידות שלכם יהיו שונות, והסבר הסיבה הוא חלק מהמעבדה.

מקור בטיחות: NIST: Additive manufacturing (https://www.nist.gov/additive-manufacturing)

מעבדה A: תושבת פרמטרית ב-Onshape

שבוע 9

מטרה: למדל תושבת L המונעת על ידי משתנים, ואז לשנות משתנה אחד ולראות את המודל ואת מסתו מתעדכנים.

$$m = \rho V$$

m=ρ V

מסה מתוך נפח

מהלך הניסוי

1. צרו חשבון Onshape חינמי (תוכנית Free) או השתמשו ב-FreeCAD.
2. הגדירו משתנים: לוח 100 × 60 mm, עובי t = 5 mm, חור Ø6, מרחק החור מהשפה 10 mm.
3. שרטטו סקיצה, שלפו, הוסיפו ארבעה חורים בתבנית חוזרת, וקבעו את החומר לאלומיניום (2.70 g/cm³).
4. רשמו את המסה. שנו את t ל-4 mm ורשמו שוב.

טבלת נתונים

עובי t (mm)	נפח (mm³)	מסה (g)
5	29,434	79.5
4	23,548	63.6
3	17,661	47.7

ערכים מחושבים ללוח השטוח עם ארבעה חורי Ø6; התושבת המלאה שלכם תהיה שונה.

חישוב לדוגמה

1. $V = (100 \times 60 - 4\pi \times 3^2) \times t = 5{,}886.9 \times t$ mm³.
2. מסה $= V \times 2.70$ g/cm³ := 79.5 g ב-5 mm. כל מילימטר עובי עולה 15.9 g.

בטיחות

- אין, מעבר לשימוש רגיל במחשב.

חלופה ביתית או וירטואלית

- רץ בדפדפן.

Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/) · Onshape Free plan (https://www.onshape.com/en/products/free)

הקשר לכדור הארץ: מחקרי עובי פרמטריים הם הדרך המהירה ביותר למצוא את החלק הקל ביותר שעדיין עובד. 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: הרכבה ושרטוט ב-FreeCAD

שבוע 11

מטרה: להרכיב מנגנון ארבע חוליות, לבדוק את תנועתו ואת ניידותו, ולהפיק שרטוט עם טבלת כותרת ורשימת חלקים.

$$M = 3(n-1) - 2j_1$$

```
M=3(n-1)-2j_1
```

משוואת גרובלר

מהלך הניסוי

1. מדלו חוליית קרקע (100 mm), ארכובה (40 mm), מצמד (120 mm) ונדנד (80 mm), כל אחד ברוחב 10 mm עם חורי Ø6 בקצוות.
2. הרכיבו במפרקי ציר (סיבוביים) והניעו את הארכובה.
3. בדקו אם הארכובה מסתובבת סיבוב מלא (גרסהוף: הקצרה + הארוכה ≥ סכום שתי האחרות).
4. הכינו שרטוט: מבטים, מידות, טבלת כותרת, רשימת חלקים ובלונים.

טבלת נתונים

בדיקה	ערך
ניידות M	1
הקצרה + הארוכה (mm)	160
שתי האחרות (mm)	180
האם הארכובה יכולה להסתובב סיבוב מלא?	Yes

ערכים מחושבים לאורכי החוליות הנתונים.

חישוב לדוגמה

1. $M = 3(4-1) - 2\times 4 = 1$.
2. גרסהוף: $40 + 120 = 160 \le 100 + 80 = 180$, והחוליה הקצרה ביותר היא הארכובה, ולכן היא יכולה להסתובב סיבוב מלא.

בטיחות

- אין, מעבר לשימוש רגיל במחשב.

חלופה ביתית או וירטואלית

- FreeCAD חינמי ל-Windows, ל-Mac ול-Linux.

FreeCAD (חינמי, קוד פתוח) (https://www.freecad.org/) · FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started)

הקשר לכדור הארץ: שרטוטים עם רשימות חלקים ברורות הופכים מוצרים לקלים יותר לתיקון ולתחזוקה. EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics)

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

מעבדה C: הדפיסו אותו (או העריכו)

שבוע 13

מטרה: לפרוס קוביית כיול של 20 mm בהגדרות מילוי שונות, להשוות מסה וזמן, להדפיס אחת אם אפשר, ולמדוד אותה.

$$\ell = \frac{m}{\rho \pi r^2}$$

`=(m)/(ρπ r^2)`

אורך פילמנט

מהלך הניסוי

1. ייצאו את הקובייה כ-STL ופתחו אותה בתוכנת פריסה חינמית.
2. רשמו את המסה והזמן מתוכנת הפריסה במילוי של 20% ,100% ו-10%.
3. הדפיסו קובייה אחת אם יש לכם גישה; מדדו אותה בקליבר ב-x, ב-y וב-z.
4. חשבו את שגיאת המידות ואת אורך הפילמנט.

טבלת נתונים

ציר נמדד	נומינלי (mm)	נמדד (mm)
x	20.00	20.12
y	20.00	20.08
z	20.00	19.90

מדידות דוגמה לתרגול, לא הדפסה אמיתית.

חישוב לדוגמה

1. שגיאות: 0.12+, 0.08+ ו-0.10 mm−, כלומר 0.6%+, 0.4%+ ו-0.5%−.
2. קובייה מלאה שוקלת 3.32 m ≈ 9.9 g של פילמנט בקוטר 1.75 mm; ערכי תוכנת הפריסה במילוי נמוך יהיו נמוכים בהרבה.

בטיחות

- פיות ומשטחי מדפסות חמים (לרוב 200 °C+ ו-60 °C): אל תיגעו בהם במהלך ההדפסה או מיד אחריה.
- הדפיסו בחדר מאוורר ופעלו לפי כללי המדפסת והמייקרספייס.

חלופה ביתית או וירטואלית

- מדפסת בספרייה או במייקרספייס מתאימה; או השלימו רק את חלק תוכנת הפריסה.

NIST: Additive manufacturing (https://www.nist.gov/additive-manufacturing)

הקשר לכדור הארץ: מילוי נמוך וכיוון טוב מפחיתים שימוש בפלסטיק והדפסות כושלות. EPA: Plastics, material-specific data (https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data)

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

מעבדה D: מחקר הפחתת משקל

שבוע 14

מטרה: להשוות חתכי קורה לפי מסה וקשיחות ב-CAD וביד, ואז להעריך כמה שווה הפחתת משקל במכונית.

$$I_{tube} = \frac{B^4 - b^4}{12}$$

```
I_tube=(B^4-b^4)/(12)
```

מומנט שטח שני של צינור מרובע

מהלך הניסוי

1. מדלו קורות של 500 mm: מוט מלא של 20 × 20 mm וצינורות של 25 × 25 mm עם דפנות של 2 mm ו-1.5 mm.
2. קראו ב-CAD את המסה של כל קורה (פלדה, 7.85 g/cm³) ואת תכונות החתך.
3. חשבו את I ביד והשוו.
4. השתמשו בכלל 6–8% של ה-DOE ובנתון ה-CO_2 של ה-EPA כדי להעריך את החיסכון השנתי למכונית מיחידה 9.

טבלת נתונים

חתך	שטח (mm²)	I (mm⁴)	מסה, פלדה (g) 500 mm
מלא 20 × 20	400	13,333	1,570
צינור 2 × 25 × 25	184	16,345	722
צינור 1.5 × 25 × 25	141	13,031	553

ערכים מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. הצינור עם דופן 1.5 mm נמצא בטווח של כ-2% מקשיחות המוט המלא (13031 לעומת 13333 mm⁴) ב-35% מהמסה.
2. מסה = שטח × 500 mm × 7.85 g/cm³: 400 mm² → 1570 g.

בטיחות

- אין, מעבר לשימוש רגיל במחשב.

חלופה ביתית או וירטואלית

- גיליון אלקטרוני ו-CAD מספיקים.

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

הקשר לכדור הארץ: DOE: רכב קל ב-10% יכול להשיג צריכת דלק טובה ב-6–8%. U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks) · EPA: Greenhouse gas emissions from

a typical passenger vehicle (https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle)

☐ **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. בקנה מידה 1:5, מה אורכה על הנייר של קורה באורך 1200 mm?

   1. 1,200/5.

תשובה: 240 mm.

2. מצאו את האורך האמיתי של מקצוע מ-(0, 0, 0) ל-(20, 20, 10).

   1. √(400 + 400 + 100).

תשובה: 30 mm.

3. חור סוטה ב-0.04 ב-x וב-0.03 ב-y. מה שגיאת המיקום?

   1. √(0.0016 + 0.0009)2.

תשובה: Ø0.10.

4. חור 25.000–25.021, ציר 24.980–24.993. מה טווח המרווח?

   1. 25.021 − 24.993; 25.000 − 24.980.

תשובה: 0.007–0.041 mm.

5. שרשרת 10 ± 0.05, 30 ± 0.10, 20 ± 0.20: מקרה גרוע ו-RSS?

   1. 0.20; √0.015.

תשובה: ± 0.20 ו-± 0.12 mm.

מערך תרגול מסכם (כל היחידות)

1. מסה של לוח אלומיניום 5 mm × 60 × 100 עם ארבעה חורי Ø6?

   1. V = 29,434.5 mm³; × 2.70 g/cm³.

תשובה: ≈ 79.5 g.

2. ניידות של מנגנון מישורי עם 5 חוליות ו-5 מפרקי ציר?

   .3(4) − 10 .1

תשובה: 2.

3. אורך פילמנט להדפסת PLA של (1.75 mm) 10 g?

   .10 × 33.5 cm .1

תשובה: ≈ 3.35 m.

4. השוו את I של מוט מלא 20 × 20 ושל צינור 2 × 25 × 25.

   .13,333 vs 16,345 mm⁴ .1

תשובה: הצינור קשיח ב-23% יותר עם 54% פחות חומר.

5. מכונית חוסכת 72 L בנזין בשנה. כמה CO_2 נחסך?

   .72 × 2.35 .1

תשובה: ≈ 169 kg.

דף נוסחאות

$$\text{scale} = \text{drawing} / \text{real}$$

$$k_{iso} = \sqrt{2/3} \approx 0.816$$

$$L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

$$A_{true} = A_{proj} / \cos\theta$$

$$\varnothing_{pos} = 2\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

$$t_{allowed} = t_{MMC} + |d - d_{MMC}|$$

$$c_{\min} = H_{\min} - s_{\max},\ c_{\max} = H_{\max} - s_{\min}$$

$$T_{wc} = \sum t_i,\ T_{RSS} = \sqrt{\sum t_i^2}$$

$$m = \rho V$$

$$V = 2\pi \bar{r} A$$

$$M = 3(n-1) - 2j_1 - j_2$$

$$\ell = m / (\rho \pi r^2)$$

$$t \approx V / (whv)$$

$$I = bh^3/12$$

$$I_{tube} = (B^4 - b^4)/12$$

$$\text{CO}_2 \approx 2.35 \text{ kg per L gasoline}$$

קבועים

קבוע	ערך
קיצור איזומטרי	√(2/3) ≈ 0.816
זוויות הצירים האיזומטריים	מרוחקים °120 זה מזה (°30 מהאופק)
יחס הגיליונות בסדרה A של ISO	√2 ≈ 1.414
גיליון A4	210 × 297 mm
צפיפות PLA (טיפוסית)	1.24 g/cm³
קוטר פילמנט נפוץ	1.75 mm
טולרנס IT7, מידות 18–30 mm	21 µm
טולרנס IT6, מידות 18–30 mm	13 µm

מקור: ISO 286-1: ISO code system for tolerances and fits (https://www.iso.org/standard/45975.html)

כלים ומקורות חינמיים

השתמשו בכלים החינמיים האלה לצד הקורס.

- CAD: Onshape Free plan (https://www.onshape.com/en/products/free) מקצועי בדפדפן, חינמי לפרויקטים ציבוריים לא מסחריים.
- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): קורסי Onshape חינמיים בקצב שלכם.
- FreeCAD (חינמי, קוד פתוח) (https://www.freecad.org/): CAD פרמטרי חינמי בקוד פתוח ל-Windows, ל-Mac ול-Linux.
- FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started): המדריך הרשמי של FreeCAD למתחילים.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): קורס התכן והייצור של MIT.

מילון מונחים

מבט עזר
מבט המוטל במקביל למשטח משופע.

רשימת חלקים
רשימת החלקים והכמויות בהרכבה.

התאמת מרווח
התאמה שתמיד משאירה רווח.

מישור ייחוס
מאפיין ייחוס מדויק למדידה.

תכן להרכבה
תכנון חלקים כך שיהיה קל להרכיב אותם.

כוונת תכן

איך מודל צריך להתנהג כשמשנים אותו.

מסגרת בקרת מאפיין

מסגרת בקרה של GD&T.

GD&T

מתן מידות וטולרנסים גאומטריים.

מילוי

אחוז המילוי הפנימי של הדפסת 3D.

התאמת הידוק

התאמה עם חפיפה מובטחת.

איזומטרי

מבט ציורי עם צירים מרוחקים 120° זה מזה.

הפחתת משקל

הקטנת מסה תוך שמירה על התפקוד.

MMC

מצב חומר מרבי.

היטל אורתוגרפי

שרטוט רב-מבטי עם קרני היטל ניצבות.

מודל פרמטרי

מודל CAD המונע על ידי מידות ופיצ׳רים ניתנים לעריכה.

שרשרת RSS

סכום טולרנסים סטטיסטי √Σt².

מומנט שטח שני

התכונה הגאומטרית I שקובעת את קשיחות הכפיפה.

מבט חתך

מבט של חיתוך דמיוני.

היטל בזווית שלישית

המוסכמה האמריקאית: מבט על מעל החזית.

טבלת כותרת

אזור המידע של השרטוט.

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	השרטוטים והמודלים שלמים, חד-משמעיים ולוכדים את כוונת התכן; הבחירות מנומקות במספרים.

רמה	איך זה נראה
3 · מיומן	עבודה נכונה עם השמטות מזדמנות.
2 · מתפתח	עוקב אחרי מדריכים אבל השרטוטים חסרים או שהמודלים נשברים בעריכה.
1 · מתחיל	מבטים לא מיושרים או מידות חסרות; חזרו על היחידה.

שקלול מוצע אם רוצים ציון

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

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

קורסים קשורים

- מבוא להנדסת אווירונאוטיקה וחלל AERO 101
- מבוא לתכנות ENGR 130
- כימיה כללית + 1 מעבדה CHEM 110 + CHEM 110L
- כל הקורסים