



החומר מערכת וכוחות או:

מה קורה כאשר פיל
עולה על גלגש?

חלק ב': מושגי יסוד
בסטטיקה

ב8: חיכוך או: מה קורה
במגלשות



פיתוח כתיבה ועריכה: דר' ירון דופלט – מפמ"ר מגמת הנדסת מכונות
מהדורת תשפ"ו – נובמבר 2025

מה גורם לגלגש להיעצר?

בואו ונשאל שוב את השאלה: "מדוע אין הגלגש נכנס לקרקע או עף לירח?" אז הסברנו תופעה זו בכך, שפועל על הגלגש כוח תגובה (N) מהקרקע, ולכן הגלגש נשאר בשיווי משקל. נתאר כעת מצב, שבו ניתן מכה קטנה לגלגש בכיוון ציר x.

הגלגש נע בכיוון שדחפנו אותו. האם לדעתך הגלגש, ינוע בכיוון זה הרבה זמן? כן / לא

מדוע הגלגש נעצר?

מה גרם לגלגש לעצור בסוף התנועה? (זוכרים גוף משנה את מצבו ממנוחה לתנועה או מתנועה לנוחה כי כוח גרם לכך).

מה גורם לתנועה קווית?

מכל מה שלמדנו בפרקים הקודמים אנחנו מכירים רק גורם אחד, היכול להשפיע על תנועה קווית^(*) של גוף. התוכל לשער מהו גורם זה?

^(*) - **תנועה** – מצב בו הגוף אינו נמצא במנוחה. כלומר מהירותו שונה מאפס. תנועה קווית היא תנועה לאורך קו ישר. על תנועה סיבובית נדבר בפרק הבא.

ניזכר בפרק הדין בכוחות. ראינו כי שיווי-משקל של כוחות מתקיים רק **כשסכום הכוחות בכיוון מסוים שווה לאפס**. במקרה הנדון הופעל כוח בכיוון ציר x לכן סכום הכוחות **אינו אפס**, ולכן **אין שיווי משקל** בכיוון התנועה (ציר x). זוהי הסיבה מדוע גלגשנו שינה את מהירותו ממהירות אפס (מצב מנוחה) למהירות מסוימת בכיוון המכה. אבל לאחר שהפסקנו את הדחיפה, שוב אין כוחות פועלים על הגלגש, ולכן הוא צריך להיות שוב בשיווי משקל של כוחות (סכום הכוחות שווה אפס) ולהמשיך את תנועתו ללא הפרעה. אבל אם הגלגש נבלם וחוזר למנוחה, אזי כנראה שטעינו בניתוח התופעה.

ובכן, נראה שהגלגש אינו נמצא במצב של שיווי משקל של כוחות, לאחר שהפסקנו את הדחיפה. יתרה מזאת – ודאי שהגלגש לא נעצר מעצמו, אלא היה "משהו" שגרם לגלגש להיעצר. כמו שראינו בפרק הכוחות יש רק גורם אחד כזה. למרבה הפלא, זהו כוח!

במילים אחרות, על מערכת הגלגש, המתגלגלת לה בעליזות, פועל כוח. איננו רואים כוח זה, ואיננו רואים מי מפעיל אותו. אנחנו מנחשים (או מסיקים – כדי להישמע מלומדים) את קיומו מעצם העובדה, שהגלגש נעצר לנגד עינינו ללא פעולת כוחות ידועים. אין מה להתבייש בצורת גילוי כזו של כוחות: גם ניוטון גילה את כוח המשיכה מעצם העובדה, שהוא ראה תופעה מתרחשת לנגד עיניו - התפוח נפל על ראשו.

האם לכוח מסתורי זה יש כיוון פעולה מסוים? או שהוא פועל בכמה כיוונים שונים? איך אפשר לקבוע את כיוון פעולתו של כוח זה?

נעשה ניסוי קטן: נדחף את הגלגש בכיוון כלשהו (בעדינות, שלא יברח לנו ולא נצטרך לרדוף אחריו הרבה). הגלגש ינוע בקו ישר ולאט לאט תקטן מהירותו עד שהוא ייעצר לחלוטין.

מה גרם לגלגש לנוע? כמובן - הדחיפה ההתחלתית שלנו!

ומה קבע את כיוון תנועת הגלגש? גם כן – כיוון הדחיפה ההתחלתית!

אבל מה גרם לגלגש להיעצר? כנראה אותו כוח מסתורי, שאנחנו תוהים על קנקנו. כדי לתהות בצורה יעילה, הבה נעשה סדר בדברים שאנחנו מדברים עליהם ונבדוק מה קרה למהירות התנועה? ומה קרה לכיוון התנועה?

ואיזו דרך טובה יותר לבדיקה מסודרת מאשר טבלה?

	מהירות התנועה	כיוון התנועה
מה קבע את הערך ההתחלתי	עוצמת הדחיפה	כיוון הדחיפה
מה קרה במשך התהליך?	הלכה וקטנה, הואטה	נשאר בכיוון המקורי
מה גרם לתופעה במהלך האטה?	עוצמת הכוח המסתורי	כיוון הכוח המסתורי

והמסקנה:

הכוח המסתורי פועל לאורך קו פעולת הכוח המקורי (הכוח החיצוני שהפעלנו ויצר את תנועת הגלגש), ובמקרה זה – לאורך קו התנועה. הכוח המסתורי מבטל לאט לאט, את ההשפעה של פעולת הכוח המקורי. כלומר, הכוח המסתורי פועל אומנם לאורך אותו קו פעולה – אולם בכיוון הפוך!

זוכר/ת כוח אחר שמתנגד לפעולה מסוימת? כאשר הנחנו ספר על השולחן, היה כוח ששאף למשוך את הספר לתוך השולחן (הוא כוח המשיכה G), והיה כוח אחר (הוא הכוח הנורמלי N), שייצר משטח השולחן שהתנגד לכוח המשיכה.

זוכר/ת מה היה כיוונו של הכוח המתנגד?

למרבה הפלא, הכוח הנורמלי (המתנגד) פעל נגד נטיית הספר לחדור דרך השולחן. ובכן כשאנחנו אומרים שאותו כוח מסתורי מתנגד לתנועה, בעצם אמרנו שפעולתו היא נגד כיוון התנועה.

עד כאן דיברנו על כיוון פעולת הכוח המסתורי ועל עוצמתו שגורמת להקטנת מהירות התנועה של גלגשנו עד לעצירה המוחלטת של הגלגש. אבל מי ומה הוא?

כוח החיכוך והגורמים המשפיעים עליו

אכן הגיע הזמן לקרוא לכוח המסתורי בשמו. כוח זה, המתנגד לתנועתו של גוף, נקרא בשם "חיכוך". הכוח נובע מחיכוך או משפשוף, בין הגוף הנע לבין המשטח שעליו מתבצעת התנועה. כוח החיכוך פועל בכיוון הפוך לכיוון תנועת הגוף על המשטח.



תופעת החיכוך והכוח המתפתח מתופעה זו קורים משום ששני המשטחים אינם חלקים לגמרי, אלא קיימים בהם שקעים ובלוטות (בדרך כלל קטנים למדי) המתנגשים זה בזה ומונעים החלקה "שלווה" בין שני המשטחים.

ומי קובע את עוצמתו?

עוצמתו של כוח החיכוך, כמו כיוונו, דומה אף היא לעוצמת הכוח המתנגד לכוח המשיכה – אבל בהבדל אחד: עוצמה זו תלוי **גם** בסוג החומר ממנו מורכבים המשטחים המתחככים זה בזה. מקובל לקרוא למידת התלות בסוג החומר בשם: **מקדם כוח החיכוך**, ולסמנו באות היוונית μ (מיו). מלבד מקדם החיכוך, עוצמת כוח החיכוך, המתפתח בין שני משטחים, תלויה גם בכוח המהדק שני משטחים אלו זה לזה. כמובן כוח זה מוכר לנו מזמן, (מתחילת פרק הכוחות בערך...). זהו לא אחר מאשר הכוח הנורמלי N (מדוע?). למעשה, אנחנו מדברים על זוג כוחות הגורם להצמדת המשטחים ולהידוקם אחד כנגד השני. צמד כוחות זה הוא הכוח הנורמלי וכוח המשיכה הפועלים בכיוונים מנוגדים וגורמים להצמדת הגלגש לריצפה וליצירת חיכוך בין הגלגלים לריצפה.

מקדם כוח החיכוך, או בקיצור **מקדם החיכוך**, תלוי אך ורק בסוג החומר, והוא חסר יחידות פיסיקליות.

כיצד מוצאים את מקדם החיכוך?

מבצעים ניסוי:

מחברים לקוביה של חומר גלם כלשהו (עץ, חמרן – אלומיניום, פלדה, ברזל יצוק, נחושת, ברונזה, ניקל, טפלון, פלסטיק או כל חומר אחר) מד כוח המחובר בחוט לקוביה. מושכים את הקוביה בעזרת מד הכוח ורושמים את הקריאה שמד הכוח יראה לנו באותו חלקיק שנייה שהגוף התחיל לנוע. קריאה זאת היא הכוח הנדרש להעביר את הגוף ממצב של מנוחה למצב של תנועה. שוקלים את הקוביה במד משקל. המכפלה של מקדם החיכוך בכוח הנורמלי (הכוח שמצמיד יחד עם כוח המשיכה כזוג כוחות את הקוביה אל המשטח) שווה לכוח החיכוך שמדדנו.

$$f_s = \mu_s \cdot N \quad \text{וממילים לאותיות:}$$

סימנו את מקדם החיכוך באות μ_s (האות s – מתייחסת למילה Static כלומר במנוחה).

למה שווה הכוח הנורמלי? אם המשטח ישר אז אנחנו כבר יודעים שהכוח הנורמלי שווה בדיוק למשקל

$$N = G \quad N = m \cdot g \quad \text{הגוף. כלומר למכפלה של המסה בתאוצת הכובד.}$$

בניסויים נוספים התגלה שהשיויון הזה משתנה לאחר שהגוף מתחיל בתנועה. ברוב המקרים, כלומר עבור רוב סוגי החומרים מקדם החיכוך משתנה (ולמעשה קטן) כאשר החלה כבר תנועה. כלומר, קשה יותר לגרום לחפץ להתחיל תנועה מאשר לשמור עליו במצב תנועה לאחר שהוא כבר החל בתנועתו. לכן,

$$f_k = \mu_k \cdot N \quad \text{מתקבל שיויון דומה אך מסומן באותיות שונות:}$$

בשיויון זה סימנו את מקדם החיכוך באות μ_k (כאשר האות k מתייחסת למילה Kinetic – תנועה). הניסויים בתחום של חיכוך החלו בתקופת יוון הקדומה 350 שנה לפני הספירה (לפני כ- 2500 שנה) ונמשכו באופן מפתיע (לפחות אותי) עד תקופתו של ריינולדס בשנת 1886 שניסח גם את חוקי החיכוך של שכבות בזרימה.



להלן טבלה המפרטת מספר מקדמי חיכוך לחומרים שונים.

החומר	מקדם חיכוך סטטי μ_s	מקדם חיכוך קינטי μ_k
חמרן על חמרן	1.15	0.5
ברזל יצוק על ברזל יצוק	1.10	0.15
נחושת על ברזל יצוק	1.05	0.29
זכוכית על זכוכית	0.95	0.40
גומי על אספלט	0.90	0.65
אבץ על ברזל יצוק	0.85	0.21
ניקל על ניקל	0.85	0.53
ניקל על זכוכית	0.78	0.56
נחושת על זכוכית	0.68	0.53
פלדה על פלדה	0.65	0.42
עץ על עץ (סיבים מקבילים)	0.62	0.48
פלדה על חמרן	0.61	0.47
עור על ברזל יצוק	0.60	0.56
עץ על עץ (סיבים מצטלבים)	0.54	0.32
פלדה על נחושת	0.53	0.36
פליז על פלדה	0.51	0.44
קרח על קרח (-12°)	0.30	0.04
עץ מצופה וקס על שלג רטוב	0.14	0.1
קרח על קרח (0°)	0.1	0.02
טפולון על טפולון	0.04	0.04

כדי לגלות מקדמי חיכוך של חומרים שלא מופיעים בטבלה כאן, אתה גם יכול לבצע ניסוי. בקש מהמורה משקולת של לגו (ישן, כי זו משקולת העשויה פלסטיק מבחוץ ובפנים מצויה תיבת פלדה, ומה שמשפיע על החיכוך הוא המשקל וסוג המשטח החיצוני של המשקולת שבא במגע עם המשטח). כמו כן, בקש מהמורה מד כוח, כפי שהראנו בפרקים קודמים כזה, שבתוכו יש

קפיץ המסייע למדוד את עוצמת המשיכה. הנח את המשקולת על מישור כלשהו למשל שולחן בית הספר. בעזרת מד הכוח הפעל כוח משיכה על המשקולת. רשום את התוצאה שמראה מד הכוח בשנייה שהקובייה מתחילה לזוז. והצב את המספר שקיבלת ואת הערך של משקל הקובייה בנוסחת כוח החיכוך:

$$f_s = \mu_s \cdot N = \mu_s \cdot m \cdot g \quad g = 9.81 \frac{m}{sec^2}$$

הערה: יש כאלו שמעגלים את המספר של תאוצת הכובד, אולם אנחנו לא ממליצים לעשות זאת. הסיבה היא שממילא אנחנו נצטרך להזין מספרים למחשבון ולהשתמש בפונקציות טריגונומטריות שמוציאות ערכים לא שלמים. ולכן התוצאה הסופית ברוב המקרים לא תהיה מספר שלם. לכן נגדיר כלל הנדסי חשוב מאוד שמהנדסים משתמשים בו:

את התוצאה הסופית של חישובי כוחות (או דברים אחרים שנלמד לחשב) נעגל ל-2 ספרות אחרי הנקודה. כיצד מעגלים?

למשל: אם יצא לנו בחישוב תוצאה של 15.65539 אז נרשום 15.66 אולם אם תצא לנו תוצאה של 15.64439 (שימו לב לסיפורה השלישית אחרי הנקודה אותה הדגשנו) אז נרשום 15.64. כל פעם שספרה זו תהיה גדולה או שווה לחמש נעגל את הסיפורה השנייה אחרי הנקודה כלפי מעלה וכל פעם שהסיפורה השלישית אחרי הנקודה תהיה קטנה מחמש נעגל את הספרה השנייה כלפי מטה).

האם החיכוך הוא תופעה שמפריעה לנו בתחומי הנדסה? איזה יופי, בהנדסה התשובות הם לא תמיד תשובות של כן או לא. במקרה של חיכוך התשובה היא כן וגם לא. אנחנו מנסים תמיד לתכנן מערכות כך שכוח החיכוך הנוצר יהיה קטן ככל האפשר. משתמשים בשיטות ייצור שונות כדי לייצר חומרים חלקים מאוד כדי שיוכלו לנוע מבלי לגרום לחיכוך גדול מדי. חיכוך בעצם גורם להפסד אנרגיה. הפסד אנרגיה? האמנם? האם יש דבר כזה הפסד אנרגיה? כיצד אנחנו יודעים זאת? ניסוי פשוט... שפשפו את הידים שלכם אחת כנגד השנייה במהירות ובמשך זמן רב. אל דאגה, אחרי זמן מאוד קצר תאלצו להפסיק כי החום שייוצר יהיה כה גדול שיתחיל לכאוב לכם. מה רצינו להכאיב לכם? ממש לא. הניסוי הפשוט הזה ממחיש שהחיכוך גורם להיווצרות אנרגיה שמומרת לחום. וכידוע החום עולה למעלה "ומחמם את האטמוספירה".

מצד שני, בואו ננסה ניסוי פשוט ביותר, השוו בבקשה את יכולת ההליכה שלכם על קרקע לעומת יכולת ההליכה שלכם על קרח. החיכוך שיש לנעליים שלכם עם הקרקע מאפשר לכם ללכת ואפילו לרוץ די מהר. לעומת זאת אם תנסו לרוץ על קרח..... מסקנה: החיכוך יכול לפעמים להועיל.

נסכם:

הכוח F גורם לתנועה, ואילו כוח החיכוך הסטטי f_s (ולמעשה גם כוח החיכוך הקינטי f_k) מתנגד לתנועה. אם השקול שווה לאפס, נובעת המסקנה הבאה:

במילים אחרות: כאשר יש חיכוך, יש לספק כוח קבוע F רק כדי לקיים תנועה בשיווי-משקל. ומה בדבר התחלת תנועה? ובכן, כדי להתחיל תנועה צריך לשנות את מצבו של הגוף ממצב של מנוחה למצב של תנועה. אותו דבר (רק הפוך) קורה כאשר רוצים לעצור תנועה.

$$F < f_s \quad \text{אחרי התחלת תנועה:} \quad F > f_s \quad \text{לפני התחלת תנועה:}$$

מצבים של עצירת תנועה ותחילת תנועה אינם מצבים של שיווי-משקל, משום שכוח אחד גדול מהכוח האחר. אולם אם הכוח שאנחנו משמרים לאחר התחלת התנועה יהיה קבוע התנועה תהיה במהירות קבועה.

תנועה של גוף במהירות קבועה נקראת "תנועה קצובה". במהלך תנועה זו, שקול הכוחות הפועלים על הגוף שווה לאפס. ולכן הגוף ממשיך בתנועתו בקו ישר ובאותו כיוון.

בתנועה קצובה, התאוצה (מידת שינוי המהירות של הגוף כתלות בזמן) שווה אפס. תנועה זו, המתבצעת בסביבה בה יש חיכוך, היא דווקא כן תנועה בשיווי משקל, למרות שנראה לנו שקיים רק כוח אחד דוחף (או מושך), ואנחנו יודעים שכוח יחיד אינו יכול להיות בשיווי-משקל (כי תמיד נדרש זוג – צמד – של כוחות כדי שיהיה שיווי משקל). ומיהו בן-הזוג של הכוח שמשמר את התנועה? כמובן, כבר דיברנו על כך. זהו בדיוק כוח החיכוך הקינטי f_k .

אם כך, ראוי לנו להיזהר בבואנו לקבוע אם מערכת מסוימת נמצאת בשיווי-משקל – או לא!

אם תנועת מערכת היא במהירות קבועה אז
המערכת נמצאת בשיווי משקל

עד עתה דיברנו על חיכוך הנוצר בין גופים הנעים בתנועה קווית על מישור אופקי. אבל הכי כיף זה לנסוע עם הגלגש בירידה, כלומר על מישור משופע, ולפעמים גם אנחנו צריכים להשקיע כוח רב כדי לנסוע עם הגלגש בעליה (שוב מישור משופע).

בואו ננסה לנתח את התופעה של גלגש בעליה. אך לפני שנעשה זאת, שימו לב, שגלגלי הגלגש הם אלו שבאים במגע עם הקרקע. איזו תנועה מבצעים הגלגלים לעומת הקרקע? התנועה שהגלגלים עושים על הקרקע היא תנועה סיבובית ולא תנועה קווית, עליה דיברנו בכל הפרק האחרון. לכן נאלץ לחכות בסבלנות לפרק הבא בו נדבר על תנועה סיבובית והכוחות הפועלים בתנועה כזאת.

ובכל זאת, אנחנו מאוד מתעניינים בתנועה במישור משופע כי אנחנו גם אוהבים להשתמש ב-.... אוקיי, אז נפרק את הגלגלים מהגלגש שלנו ונניח את הבסיס של הגלגש על מישור משופע כאילו שבכוונתנו, להפכו ל- Snow-Board ולהחליק עליו.



בסיס ה-Skate-Board הופך ל-Snow-Board

אנחנו נתמקד בדוגמא שאתם כבר מכירים.

והפעם גם נגדיר נתונים ונשאל את השאלה מהי זווית השיפוע כדי שיתקיים שיווי משקל בכיוון ציר X. כלומר, שהבסיס שלנו לא יחליק במורד המישור המשופע (כביש עם שיפוע). כלומר, שכוח החיכוך ימנע את החלקתו של הבסיס על הכביש היורד מההר הירוק (מיהו ההר הירוק...).

נתונים:

$$m=70\text{kg}$$

$$\mu=0.90 \text{ – גומי על אספלט}$$

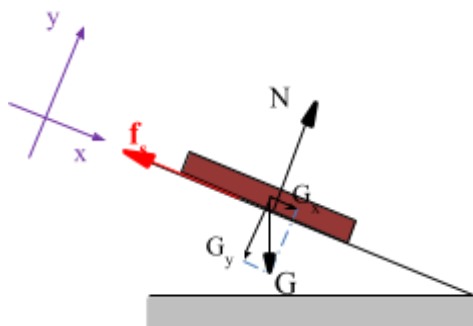
$$\mu=0.14 \text{ – עץ על שלג רטוב}$$

בחרנו את החומרים הכי קרובים לבסיס הגלגש או לגלשן שלג.

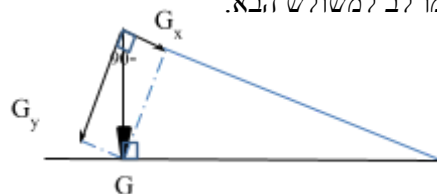
צ"ל:

$$\alpha=?$$

פתרון:



שימו לב למשולש הבא:



סימנו בריבוע כחול את הזווית בנות 90° . מגיאומטריה אנחנו יכולים לחשב שהזווית בין G ל- G_y היא α .

כעת נרשום את משוואות שיווי המשקל (בכל כיוון):

$$(1) \Sigma F_x=0 \Rightarrow G_x - f_s = 0 \Rightarrow G \cdot \sin \alpha - \mu \cdot N = 0$$

$$(2) \Sigma F_y=0 \Rightarrow N - G_y = 0 \Rightarrow N - G \cdot \cos \alpha = 0 \Rightarrow N = G \cdot \cos \alpha$$

נציב את N במשוואה 1:

$$G \cdot \sin \alpha - \mu \cdot N = 0 \Rightarrow G \cdot \sin \alpha - \mu \cdot G \cdot \cos \alpha = 0 \Rightarrow \mu \cdot \cos \alpha = \sin \alpha$$

למזלנו המתמטיקה מאפשרת לנו לרשום את הביטוי שקיבלנו גם כך:

$$= \frac{\sin}{\cos} = \tan$$

כעת נוכל להציב את מקדמי החיכוך ובאמצעות המחשבון לחשב את זווית המישור המשופע α :

$$\tan \alpha = 0.90 \Rightarrow \alpha = \arctan(0.9) = 42^\circ \quad \tan \alpha = 0.14 \Rightarrow \alpha = \arctan(0.14) = 8^\circ$$

כלומר, אם שיפוע הכביש יהיה בזווית גדולה מ- 42° נוכל להחליק עם הבסיס של הגלגש על הכביש בדחיפה קלה ביותר. ואם נחליט להתגלש עם בסיס הגלגש (העשוי מעץ מצופה) על שלג רטוב מספיק מדרון ששיפועו 10° כדי שנוכל להתגלש בקלילות. בפרק הבא ננתח מה קורה לגלגש כאשר הוא מחליק באותו שיפוע אבל הפעם עם הגלגלים מורכבים עליו.

הערה:

הפונקציה ההפוכה של $\tan$ נקראת $\arctan$ ובקיצור $\arctan$.

במחשבון לוחצים על $\tan$ או $\tan + \text{Shift}$ כדי למצוא את ערך הזווית כאשר ידוע ערך הטנגנס שלה.

זוכרים את הנוסחה שמצאנו בעמוד הקודם? ($\mu_s = \tan(\alpha)$)

אנחנו חושבים שזאת נוסחה קסומה...

למעשה אנחנו יכולים למצוא את מקדם החיכוך של כל חומר באמצעות ניסוי בשני אופנים:

ניסוי א': מישור (ניסוי עם מד הכוח) וניסוי ב': מישור משופע (עם מד זווית).

קחו משקולת כלשהי (אריח, מרצפה, משקולת לגו או כל משקולת אחרת, רצוי שתהיה כבדה יחסית).

ניסוי א':

חברו מד כוח למשקולת. הפעילו כוח משיכה על המשקולת ובקשו מחבר שלכם לרשום את התוצאה שמראה מד הכוח בחלקיק השנייה שהמשקולת החלה לנוע על שולחן תלמיד רגיל.

זוכרים את משוואת שיווי המשקל?

$$\Sigma F_x = 0 \quad \Rightarrow \quad F - f_s = 0 \quad \Rightarrow \quad F = f_s \quad \Rightarrow \quad F = \mu_s \cdot N \quad \Rightarrow \quad F = \mu_s \cdot m \cdot g$$

אז למה שווה מקדם החיכוך בניסוי הזה?

$$\mu_s = \frac{F}{m \cdot g}$$

נניח שמסת המשקולת היא 5 ק"ג והכוח שמראה מד הכוח הוא 25 ניוטון אז למה יהיה שווה כוח החיכוך?

$$\mu_s = \frac{25}{5 \cdot 9.81} = 0.51$$

ניסוי ב:

שים את אותה משקולת על השולחן והרם את השולחן בצידו האחד עד שהמשקולת מתחילה לנוע. בדיוק בחלקיק השנייה הזו שהמשקולת מתחיל לנוע מדוד את הזווית שהשולחן יצר יחסית לרצפה.

נניח שמדידת הזווית הראתה 27° מה יהיה מקדם החיכוך?

$$\mu_s = \tan(\alpha) = \tan(27^\circ) = 0.51$$

אם יצאו לך תוצאות דומות אז:

1. אכן ניתן למצוא את מקדם החיכוך בשתי דרכים שונות, אחת כתלות בכוחות שפועלים והשנייה כתלות בגיאומטריה של מישור משופע שגורם למשקולת לעבור ממצב של מנוחה למצב של תנועה.
2. אתה יכול למצוא מקדמי חיכוך של חומרים שלא הופיעו בטבלה (למשל חומרים מורכבים).
3. אתה יכול למצוא את הזווית שכדאי לתכנן מתקן שיקטין עד כמה שאפשר את הכוח הנדרש כדי להתחיל תנועה.

דרך אגב, מדידת הכוח באמצעות מד כוח היא מדידה עדינה, צריך מאוד לדייק במדידה כדי לקבוע את התוצאות האמיתיות. מהנדסים נוטים לבצע ניסוי כדי לבדוק את המתקנים שלהם. כל ניסוי מומלץ לבצע לפחות שלוש פעמים. התוצאה הממוצעת של תוצאות שלושת הניסויים היא התוצאה הנכונה, בתנאי שכל התוצאות יצאו קרובות מספיק האחת לשנייה. אם אחת מהתוצאות יצאה שונה מאוד, מהאחרות, נדרש לחזור פעם רביעית ואפילו חמישית על הניסוי.

גם מדידת הזווית צריכה להיות מדויקת. למזלנו יש אמצעי פשוט שנקרא מד זווית שמאפשר למדוד את הזווית של השולחן יחסית למשטח אופקי המקביל לרצפה. האמת, שכאשר תלמד יותר על הנדסת מכונות תוכל לבנות מתקן מבוקר שמרים את השולחן בעדינות בצידו האחד ומודד בדיוק רב את הזווית בשנייה שהמשקולת החלה לנוע על השולחן. תכנת Lav-VIEW מאפשרת לך לבנות ממשק משתמש בקלות שיקבל כערך קלט את המסה של המשקולת. התכנה שתכין, תבקר על מהירות הרמת השולחן, תבקר את מיקום הקוביה על השולחן ותמדוד את זווית השיפוע שנוצרת בין השולחן לקרקע בעת הרמת השולחן. בחלקיק השנייה שהקוביה תתחיל לנוע התוכנה תתריע על כך וגם תתעד את ערך הזווית שהתקבל מחיישן הזווית של שיפוע השולחן.

שאלת דוגמא:

הערה:

מערכת צירים בה אנחנו משתמשים בדוגמאות הקודמות וגם בדוגמא הבאה נקראת "מערכת צירים ימנית" כי הכיוון החיובי של ציר x מכוון לצד ימין והכיוון החיובי של ציר y בניצב למישור המשופע כלפי מעלה.

תרגיל דוגמא:

בציור מתואר גוף שמשקלו $G=20,000\text{N}$. מקדם החיכוך בין משטח הגוף לכביש הוא $\mu_s=0.3$.

א. חשב את כוח החיכוך, שפועל כנגד תנועת הגוף במעלה הכביש.

ב. מצא מהו הכוח המינימלי (מזערי) הדרוש להפעיל כדי למשוך את הגוף במעלה המדרון.

פתרון:

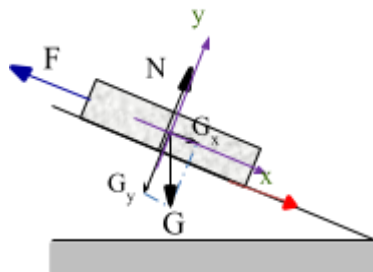
1. ראשית נרשום את הנתונים ונתאר את המצב

2. באמצעות דג"ח:

נתונים:

$$G=20,000\text{N}$$

$$\alpha=30^\circ ; \mu_s=0.3$$



בדג"ח בחרנו מערכת צירים צמודת שיפוע וגם כבר פירקנו את הכוח G לרכיביו ישרי הזווית בהתאם למערכת הצירים שבחרנו.

נרשום כעת את משוואות שיווי המשקל:

$$(1) \Sigma F_x=0 \Rightarrow -F + f_s + G_x = 0 \Rightarrow F = f_s + G \cdot \sin\alpha$$

$$(2) \Sigma F_y=0 \Rightarrow N - G_y = 0 \Rightarrow N - G \cdot \cos\alpha = 0$$

$$N = 20,000 \cdot \cos 30^\circ \Rightarrow N=17,320.51\text{N}$$

זוכרים את נוסחת כוח החיכוך שתלוי רק ב- N וב- μ_s :

$$f_s = \mu_s \cdot N = 0.3 \cdot 17320.51 = \mathbf{5196.15N}$$



נציב את הנתונים ואת תוצאת כוח החיכוך לביטוי שקיבלנו ממשוואה 1:

$$F = f_s + G \cdot \sin \alpha = 5196.15 + 20,000 \cdot \sin 30^\circ = 15,196.15 \text{ N}$$

אם נבטל את הכוח F מה צריכה להיות הזווית α כדי שהגוף לא יחליק במורד המישור המשופע?

זוכרים? אמרנו שמקדם החיכוך גם שווה לטנגנס הזווית של השיפוע: $\mu_s = \tan \alpha$

כלומר: אם $\mu_s = 0.3$ וגם $\mu_s = \tan \alpha$ אז: $\tan \alpha = 0.3$.

המחשבון יסייע לנו באמצעות הפונקציה ההפוכה של $\tan$, למצוא את הזווית α – והיא תצא לנו:

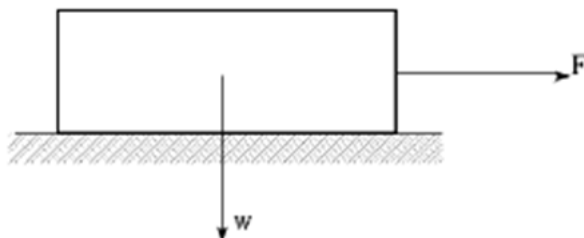
$$\alpha = \arctan(0.3) = 17^\circ$$

כלומר אם נקטין את זווית השיפוע ל- 17° הגוף לא יחליק במדרון ויישאר בשיווי משקל (במנוחה).

תרגילי סיכום

תרגיל 1

מזחלת עמוסה בציוד שוקלת $W=25,000 \text{ N}$. מקדם החיכוך שבין המזחלת לקרח הוא $\mu=0.25$.



צ"ל:

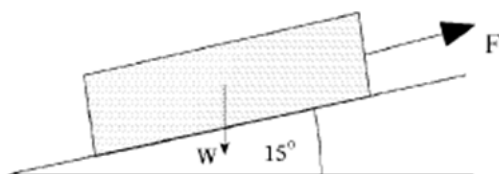
1. חשב את כוח החיכוך, שנוצר בין

מגלשי המזחלת לקרח?

2. מהו הכוח F הדרוש להזזת המזחלת

כנגד כוח החיכוך?

תרגיל 2



מזחלת נמצאת על מדרון משופע בעל זווית שיפוע של

15° . משקל המזחלת הוא $W=25,000 \text{ N}$. מקדם החיכוך

בין המזחלת למשטח המדרון הוא $\mu=0.25$. על

המזחלת פועל כוח שערכו $F=15,000 \text{ N}$ כמתואר

בציור.

צ"ל:

1. תאר בעזרת דג"ח את הכוחות הפועלים על המזחלת.

2. חשב את כוח החיכוך שנוצר בין המזחלת למדרון.

3. האם המזחלת תידרדר – או תעלה במעלה המדרון? נמק!

