מסה (m), נמדדת בקילו-גרמים (kg), המסה היא סקלר (יש לה גודל אבל לא כיוון)

בשומענו את המושג "מסה", רובנו חשים שאנו יודעים במה מדובר, אך עם זאת קשה לנו להגדירו. ברור לנו שלכל גוף ישנה מסה, ושלגוף מאסיבי יותר יש "משקל" רב יותר, אך כיצד נגדיר מהי מסה? קרוב לוודאי שלאחר מחשבה יגיע רובנו להגדרה מעין זו: מסתו של גוף היא "כמות החומר" שישנה בו. ניוטון התחבט רבות בסוגיה זו, ולבסוף התפשר על ההגדרה הבאה: "מסתו של גוף היא המידה בה הוא מתנגד לשינוי מהירותו". גוף מאסיבי יותר הוא גם אינרציאלי יותר, ז"א בעל נטייה חזקה יותר להתמיד במצבו התנועתי. בהיותו מדען והוגה דעות גדול שבגדולים, חש ניוטון שהגדרה זו איננה שלמה, אך לא מצא טובה ממנה. האם תכונה זו של החומר, הקרויה בפינו "מסה", היא מחויבת המציאות? מהו הדבר שמעניק אותה לחומר? האם בדומה לפיגמנט של צבע, ישנו גם מעין "פיגמנט" של מסה? "המודל הסטנדארטי" של פיזיקת החלקיקים מניח זה 50 שנה שקיים "שדה היגס שובר סימטריה" במרחב שסביבנו, והוא זה שמעניק לחומר את אותה תכונה "מובנת מאליה" שאנו מכנים "מסה". אנו, על כל פנים, נדבק בהגדרתו של ניוטון מהמאה ה-17: מסתו של גוף היא המידה שבה הוא מתנגד להאצתו.

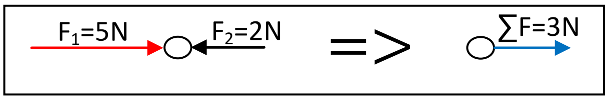
כוח ($\vec{F}$), נמדד בניוטונים (N), הכוח הוא ווקטור (יש לו גודל וגם כיוון)

כוח, בהקשר הפיזיקאלי, הוא דחיפה או משיכה של עצם כתוצאה מאינטראקציה עם עצם אחר. ללא אינטראקציה, לא קיים כוח. כוח קשור ביכולת לבצע עבודה או לגרום לשינוי פיזיקאלי במצבו של העצם עליו הוא פועל. הוא נמדד ב"ניוטונים" או ב"קג"כים", כאשר הניוטון מוגדר ככוח שיאיץ מסה בת 1 ק"ג בתאוצה של $1m/s^2$, ואילו הקג"כ (קילוגרם-כוח kgF) מוגדר ככוח שיפעל על מסה בת 1 ק"ג באם תימצא בשדה כבידה השווה בעוצמתו לזה שבקרבת כדה"א. $1kgF \approx 10N$

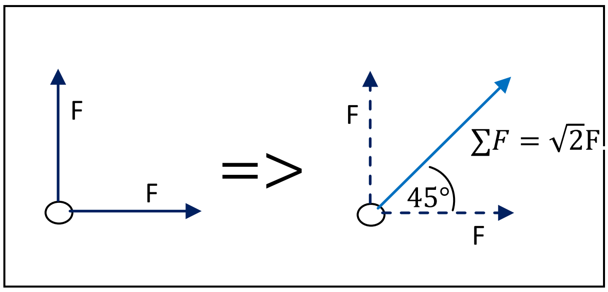
את הכוחות שבטבע מקובל לחלק לשתי קבוצות עיקריות: "כוחות מגע" ו"כוחות פעולה מרחוק". כוחות מגע הם אלה הנובעים מאינטראקציה בין גופים הנוגעים פיזית זה בזה (או לפחות נתפשים בעינינו ככאלה), בעוד כוחות פעולה מרחוק הם אלה הנובעים מאינטראקציה בין גופים שאינם נוגעים זה בזה, כדוגמת כוח המשיכה שבין הארץ והירח.

כוח שקול ($\sum\vec{F}$)

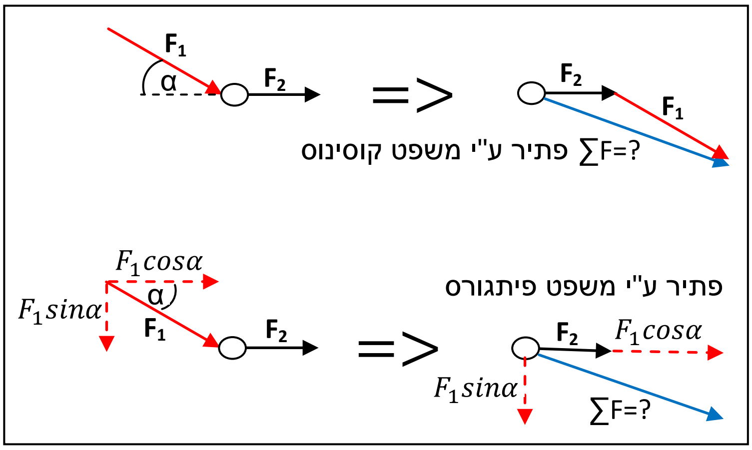
כאשר על גוף פועלים מספר כוחות, ניתן להחליפם בכוח אחד שקול להם ודבר לא ישתנה מבחינת הגוף.
וקטור הכוח השקול הינו תוצאת **חיבורם הווקטורי** של כל וקטורי הכוחות הפועלים על הגוף.
נתבונן בשלוש הדוגמאות הבאות:



א



ב



ג

דוגמה א' היא טריוויאלית ומיותר להכביר עליה מילים, זולת אולי ציון העובדה **שחיסור גדלי הכוחות** שבוצע כאן ברמה האינטואיטיבית הוא בעצם **חיבור של הכוחות כווקטורים**: $\vec{F_1} + \vec{F_2} = F_1 - F_2$

דוגמה ב' מציגה "קיצור דרך" עבור המקרה השכיח שבו שני ווקטורי כוח זהים בגודלם פועלים במאונך זה לזה.
וקטור הכוח השקול ארוך פי $\sqrt{2}$ מאותם שני וקטורים, וחוצה את הזווית הישרה שביניהם.

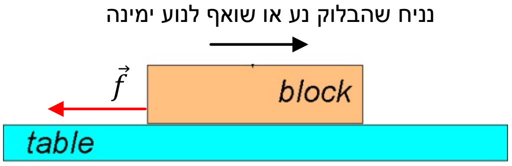
דוגמה ג' מציגה מקרה כללי בו שני וקטורי כוח פועלים על גוף, ומציעה שתי דרכים למציאת וקטור הכוח השקול, האחת באמצעות חיבורם הווקטורי של שני וקטורי הכוח **כפשוטו** ואז שימוש במשפט הקוסינוס, והשנייה באמצעות פירוקו של אחד הוקטורים לשני רכיבים מאונכים זה לזה (תוך הקפדה על כך שאחד מהם יקביל לוקטור הכוח השני וכך יוכל "להתווסף" לו) ואז שימוש במשפט פיתגורס.

משקל ($\vec{W}$), נמדד בניוטונים (N)

משקל הוא כוח הכובד הפועל על גוף באם הוא שרוי בשדה כבידה. לגוף אשר אינו שרוי בשדה כבידה אין משקל.
בהיותו כוח, נמדד המשקל בניוטונים או בקג"כים. משקלו של גוף גדול יותר אם מסתו גדולה יותר. קשר זה שבין משקל ומסה אינו מובן מאליו כלל, למרות שלרוב האנשים הוא נראה טבעי. כה טבעי, עד שבטעות הם מציינים את משקלם של גופים בק"ג במקום בקג"כ, ז"א ביחידות של מסה במקום ביחידות של כוח. מתמטית מנוסח הקשר שבין משקל ומסה כך: $\vec{W} = m \cdot \vec{I}$
כש- m היא מסתו של הגוף ו- $\vec{I}$ היא עוצמתו של שדה הכבידה בו הוא שרוי. ניתן להראות כי $\vec{I} = \vec{g}$, ולכן $\vec{W} = m \cdot \vec{g}$.
שימו לב לכך שמסתו של גוף היא תכונה שלו, ולכן אינה תלויה בסביבה שבה הוא נמצא. לעומת זאת, משקלו של גוף **אינו** מהווה תכונה שלו. הוא קיים רק אם הגוף נמצא בשדה כבידה. המשקל הינו "כוח פעולה מרחוק" (ראה סעיף לעיל הדן בכוח).

חיכוך ($\vec{f}$), נמדד בניוטונים (N)

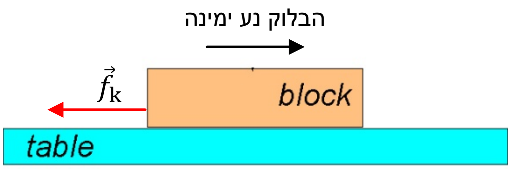
חיכוך הוא כוח המתנגד להחלקתם של משטחים זה כנגד זה. הוא נובע מאינטראקציה בין גופים אשר נמצאים במגע פיזי זה עם זה, ולכן מסווג כ"כוח מגע".



אנו נדון כאן רק ב"חיכוך יבש", היינו, חיכוך בין משטחים מוצקים.
בהיותו כוח **המתנגד** להחלקתם של משטחים זה כנגד זה, החיכוך הוא:
1) פועל על כל משטח **כנגד הכיוון** שבו הוא מחליק או שואף להחליק.
2) לאטראלי, ז"א פועל במקביל למשטחים.

חיכוך קינטי ($\vec{f}_k$)

חיכוך קינטי מתקיים כאשר המשטחים נמצאים **בתנועה** זה יחסית לזה. אינטואיטיבית ברור, שאם יגדל הכוח בו לחוצים המשטחים זה לזה יגדל גם החיכוך ביניהם.



כוח זה שבו לחוצים המשטחים זה לזה מכונה "הכוח הנורמאלי" (**N**).
ברור גם שככל שמשטחים מחוספסים יותר גדל החיכוך ביניהם.
החספוס מכונה "מקדם החיכוך" (μ).
בהקשר הקינטי נכנה אותו "מקדם החיכוך הקינטי" (**μ_k**).

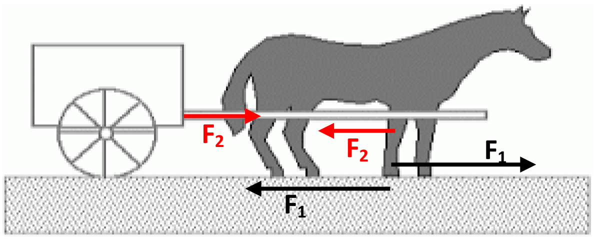
$$\boxed{f_k = \mu_k \cdot N}$$

חוקי ניוטון

בשנת 1687 פרסם ניוטון את יצירתו הגדולה "עקרונות מתמטיים של הטבע", אשר בה הניח את היסודות לפיזיקה הקלאסית. בבסיסה של יצירתו שלושה "חוקי טבע", שעליהם מושתת פרק זה של לימודינו הקרוי "דינאמיקה":
חוק 1: חוק ההתמדה: כל גוף שואף להתמיד במצבו אם לא פועל עליו כוח חיצוני (ז"א אם $\boldsymbol{\Sigma\vec{F}}$ עליו שווה לאפס).
חוק 2: $\boldsymbol{\Sigma\vec{F}} = \mathbf{m\vec{a}}$ הכוח השקול הפועל על גוף שווה למכפלת מסתו בתאוצתו. **כיוון התאוצה זהה תמיד לכיוון הכוח השקול.**
חוק 3: פעולה ותגובה. כשגוף א' מפעיל כוח על גוף ב', מגיב גוף ב' בהפעלת כוח שווה בגודלו והפוך בכיוונו על גוף א'.

החוק הראשון אומר שגוף אשר נע במרחב בלא שפועל עליו כוח חיצוני שקול, יתמיד בתנועתו כפי שהיא כעת.
החוק השני אומר, שתאוצתו של גוף עומדת ביחס ישר לכוח השקול הפועל עליו. כוח שקול חזק משמעו תאוצה גבוהה.
החוק השלישי משמעו, שבשני האיורים לעיל **הבלוק מפעיל על השולחן** כוח חיכוך ימינה כתגובה לכוח החיכוך שהשולחן מפעיל עליו שמאלה. הבלוק "מנסה" להאיץ את השולחן ימינה כתגובה לכך שהשולחן מאיץ שמאלה (מאט את מהירותו ימינה).

כיצד מצליח הסוס להאיץ את העגלה? הרי לפי חוק מס' 3 היא מושכת אותו אחורה באותו הכוח שבו הוא מושך אותה קדימה!

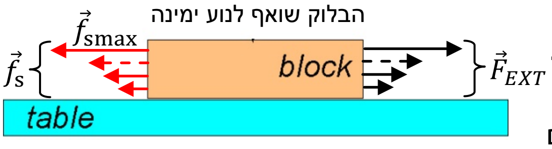


תשובה: הסוס דוחף את הרצפה **אחורה** בכוח שגודלו F_1.
בתגובה דוחפת הרצפה את הסוס **קדימה** בכוח שגודלו F_1.
הסוס מושך את העגלה **קדימה** בכוח שגודלו F_2.
בתגובה מושכת העגלה את הסוס **אחורה** בכוח שגודלו F_2.
$\mathbf{F_2 < F_1}$, ז"א הכוח השקול הפועל על הסוס הוא **F_1-F_2 קדימה**.
הסוס מואץ **קדימה** לפיכך, ע"פ החוק השני.
הכוח השקול הפועל על העגלה הוא F_2 **קדימה**, כך שהעגלה מואצת אף היא **קדימה** והכול מסתדר במקומו.
בשאלה הנ"ל ישנו כשל לוגי, והוא נעוץ בכך שהיא דנה **בשני גופים שונים** (סוס ועגלה) המפעילים זה על זה כוחות שווים בכיוונים הפוכים, ולא **בגוף אחד** שעליו פועלים שני כוחות שווים בכיוונים הפוכים.

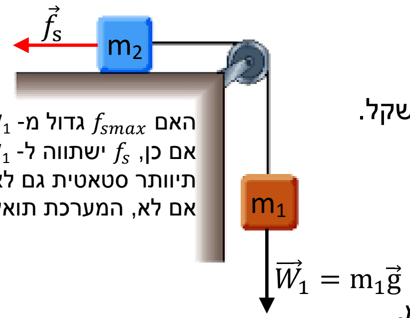
<u>חיכוך סטטי ($\vec{f}_s$)</u>

$$\boxed{f_{smax} = \mu_s \cdot N}$$

כעת, משהתוודענו לשלושת חוקיו של ניוטון, אנו בשלים לדיון בסוגיית החיכוך הסטטי.
חיכוך סטטי מתקיים כאשר המשטחים נמצאים **במנוחה** זה יחסית לזה, אך **שואפים** לנוע.
נניח שהבלוק שואף לנוע ימינה עקב כוח חיצוני ($\vec{F}_{EXT}$) הפועל עליו ימינה.



ע"פ החוק השני (וגם הראשון) חייב להתקיים על הבלוק $\Sigma\vec{F} = 0$ כל עוד הוא אינו מואץ, ז"א חייב לפעול עליו כוח נגדי שמאלה השווה בגודלו לכוח החיצוני.
כוח נגדי זה קרוי "חיכוך סטטי" ($\vec{f}_s$).
כעת נגדיל במעט את הכוח החיצוני ימינה, ואם הבלוק עדיין במנוחה הרי שגם החיכוך הסטטי גדל בהתאמה שמאלה, כך שמשתמר $\Sigma\vec{F} = 0$ על הבלוק. נמשיך להגדיל בהדרגה את הכוח החיצוני ימינה, והחיכוך הסטטי ימשיך לגדול בהדרגה שמאלה כדי לקזזו. תהליך זה יימשך עד לשלב בו החיכוך הסטטי יגיע לערכו המרבי האפשרי - f_{smax}. כש- $\vec{f}_s$ נדרש ליותר מכך הוא הופך ל-$\vec{f}_k$. בד"כ $f_k < f_{smax}$ משמעותית, ולכן הבלוק נע **מיד** בתאוצה גבוהה.
ערכו המרבי האפשרי של $\vec{f}_s$ מתקבל מהנוסחה: $f_{smax} = \mu_s \cdot N$. מקדם החיכוך הסטטי μ_s מייצג את "החספוס הסטטי".
שימו לב לכך שאין נוסחה לחישובו של $\vec{f}_s$ **כלשהו**, אלא רק לחישובו של f_{smax}. כדי לחשב $\vec{f}_s$ **כלשהו**, יש לשאול מהו הכוח שישמור את המערכת בשיווי משקל (ז"א יאפס את $\Sigma\vec{F}$). התשובה לשאלה זו היא $\vec{f}_s$.



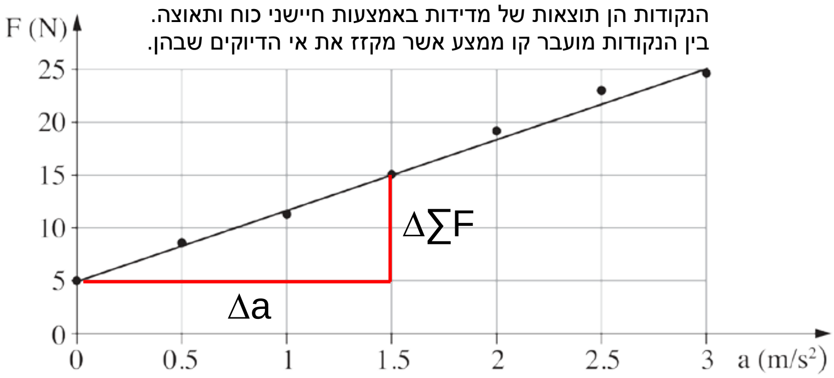
האם f_{smax} גדול מ- W_1 ?
אם כן, f_s ישתווה ל- W_1 והמערכת תיוותר סטטית גם לאחר שחרורה.
אם לא, המערכת תואץ ימינה.

המערכת שבאיור משמאל משוחררת ממנוחה. האם תישאר במנוחה?
אם השולחן חלק אז ברור שלא, אבל אם הוא מחוספס אז אולי.
כדי לברר זאת יש לחשב את f_{smax} , ואז לבדוק אם הוא גדול מ- $\vec{f}_s$ הנדרש לשיווי משקל.
אם כן, המערכת תישאר במנוחה ולא תואץ.
נניח m_1=1kg, m_2=2kg, μ_s=0.6
החיכוך הסטטי **המרבי האפשרי** הוא: $f_{smax} = \mu_s \cdot N = \mu_s \cdot m_2 \cdot g = 0.6 \cdot 2 \cdot 10 = 12N$
החיכוך הסטטי הנדרש לשיווי משקל הוא: $f_s = W_1 = m_1 \cdot g = 10N$
המערכת תישאר במנוחה כי החיכוך הסטטי מסוגל להגיע לערך הנדרש ממנו לש"מ.
כעת נניח שולחן פחות מחוספס, μ_s=0.4 נאמר. הפעם $f_{smax} = \mu_s \cdot m_2 \cdot g = 0.4 \cdot 2 \cdot 10 = 8N$, בעוד החיכוך הסטאטי הנדרש לש"מ נותר $f_s = W_1 = 10N$ כמקודם. המערכת תואץ במקרה זה, כי החיכוך הסטאטי **אינו** מסוגל להגיע לערך הנדרש ממנו לש"מ.

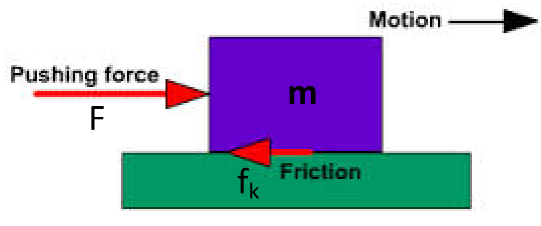
<u>התבוננות גראפית בתופעת החיכוך</u>

כוח חיצוני F אשר דוחף בלוק ימינה גדל בהדרגה. השולחן מפעיל על הבלוק חיכוך סטטי f_s שמאלה אשר גדל אף הוא בהדרגה, כך שבכל רגע הוא משתווה לכוח החיצוני ומקזזו. תהליך זה נמשך כל עוד החיכוך הסטאטי אינו חורג מערכו המרבי האפשרי f_{smax}. כשהחיכוך הסטאטי מגיע לערכו המרבי האפשרי, הבלוק על סף תנועה.

הנקודות הן תוצאות של מדידות באמצעות חיישני כוח ותאוצה.
בין הנקודות מועבר קו ממצע אשר מקזז את אי הדיוקים שבהן.



באיור מתואר הבלוק כשהוא כבר בתנועה



בגרף מתואר הקשר שבין תאוצת הבלוק לבין הכוח החיצוני הדוחף אותו. כל עוד הכוח הדוחף קטן מחמישה ניוטון הבלוק לא זז והחיכוך הינו סטטי. כשהכוח הדוחף שווה לחמישה ניוטון הבלוק על סף תנועה, ולכן f_{smax}=5N. כשהכוח הדוחף גדול **טיפה** מחמישה ניוטון הבלוק נמצא כבר בתנועה (בחיים האמיתיים בתאוצה "גבוהה" מפני שהחיכוך הקינטי f_k קטן תמיד מהחיכוך הסטטי המרבי f_{smax}). כאן אנו מניחים f_k=f_{smax}, אחרת הייתה מופיעה אי רציפות בגרף היכן שהבלוק נכנס לתנועה.
מה מייצג שיפוע הגרף? **את מסת הבלוק**. הדבר נובע מהחוק השני של ניוטון: $\frac{F - f_{smax}}{\Delta a} = m \;=>\; \frac{F - f_k}{\Delta a} = m \;=>\; \frac{\Delta\Sigma F}{\Delta a} = m$