



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב  
הפקולטה למדעי ההנדסה  
המחלקה להנדסת מכונות

דו"ח התקדמות סמיסטרילי

# בדיקת היתכנות של מערכת רובוטית לחיסכון במקומות חנייה

מספר פרויקט: 20-28

מנחה הפרויקט: סורין ארדץ, מהנדס ראשי ודירקטור בחברת חניה אורבנית – Urban Parking Israel

שמות הסטודנטים: לידור כהן 203119052

לטם ראובני 205674815

תאריך הגשה: 18.06.2020

חתימת המנחה: \_\_\_\_\_

## תקציר

גידול האוכלוסייה בעולם והעלייה בכמות הרכבים הפרטיים הובילו לבעיה גלובלית שכולנו מכירים מקרוב- "בעיית החנייה". החל משנות ה-90 פועלות בארץ ובעולם חברות שונות שמספקות פתרונות חנייה מכאניים, אוטומטיים וחצי-אוטומטיים שנועדו לספק יותר מקומות חנייה באותו השטח. המשותף לכל הפתרונות שקיימים בשוק כיום הוא שהם מבוססים על יצירת מפלסים נוספים (לגובה או לעומק) שמאפשרים חנייה בקומות. פתרונות אלו אומנם מאפשרים ניצול יעיל מאוד של השטח (כלומר מספקים כמות גדולה של חניות על אותו השטח), אך הם בעלי שני חסרונות מרכזיים: עלות גבוהה וזמן הקמה ארוך.

בפרויקט שלנו אנחנו מציעים ובוחנים פתרון חנייה אחר ומקורי שמבוסס על ביטול השטח המוקצה לתנועת רכבים בחניון וצמצום גודל החניות, מבלי להוסיף מפלסים נוספים. השאיפה היא ליצור פתרון עם זמן הקמה קצר ועלות נמוכה שיגדיל משמעותית את מספר החניות בחניון. הפתרון אומנם לא ישתווה בנצילותו לפתרונות מבוססי הקומות שקיימים בשוק, אך יהיה זול ומהיר מהם.

במסגרת הפרויקט ניסחנו דרישות עבור המערכת לחיסכון במקומות חנייה, בחרנו את החניון עבורו ייושם הפתרון, הצענו חלופות, דנו בהן ולבסוף בחרנו את חלופה הטובה ביותר. עבור חלופה זו תיכננו ובנינו דגם תלת-מימדי של המערכת הכולל את: המכשיר שתפקידו להכניס ולהוציא רכבים מהחניון, המסילה עליה הוא נע והמעמד עליו מונחים הרכבים. מכיוון שבחניון צפויים להיות מאות מעמדים (כתפוסת החניון)- הדגש בפרויקט הושם על תיכנון המעמדים, שהינם הרכיב היקר ביותר בפתרון שלנו. המעמד נבנה על בסיס חישובי חוזק אנליטיים וסימולצית חוזק, תוך שאיפה לחוזק מקסימלי ומחיר מינימלי.

עבור המערכת הוכנו סימולציות בשני נושאים: אופן פעולת החניון ואופן פעולת מכשיר ההרמה, אשר הועלו ליוטיוב. הצפייה בסרטונים חשובה מאוד להבנת אופן פעולת המערכת בשלמותה.

לבסוף, נבדקה הכדאיות הכלכלית של פתרון החנייה שלנו על ידי השוואתו לפתרון אחר שקיים בשוק (עבור השטח הנבחר). נמצא כי עלות התשתית של הפתרון שלנו, שכוללת את המעמדים, הרכיב היקר ביותר בפתרון שלנו, והמסילות, הינה כ-11% מעלות הפתרון הקיים. מניתוח זה ניתן להסיק כי המערכת שלנו צפויה להיות ריווחית מאוד בהשוואה למערכות הקיימות בשוק כיום, ולכן המשך הפיתוח שלה כדאי.

## תוכן עניינים

1	מבוא	1
1	1.1 תיאור הפרויקט	1
1	1.1.1 פרטי השטח הנבחר מהחניון	1
2	1.1.2 ישום המערכת על השטח הנבחר	2
3	1.1.3 אופן פעולת החניון	3
4	1.2 מבנה העבודה	4
4	1.3 מטרות וגבולות הפרויקט	4
4	1.4 חשיבות הפרויקט	4
4	1.5 ויזואליות להבנת הפרויקט	4
5	1.5.1 אופן פעולת החניון	5
6	1.5.2 אופן פעולת מכשיר ההרמה	6
6	2. רקע	6
10	3. מפרט דרישות מערכת	10
14	4. הגדרת פונקציות התכן העיקריות והצעת אלטרנטיבות לפיתרון	14
15	4.1 התייחסות לדרישה מס' 7 : מקור אנרגיה נייד	15
15	4.2 התייחסות לדרישה מס' 1 : הרמה והורדה רכבים בטווח משקלים מוגדר	15
20	4.3 התייחסות לדרישה מס' 2 : הנעת מערכת הכוללת רכב מורם	20
20	4.4 התייחסות לדרישה מס' 8 : חיבור מנגנונים מיטבי	20
24	4.5 התייחסות לדרישה מס' 3 : התאמה לגדלים גיאומטריים שונים של רכבים יעודיים למכשיר	24
24	4.6 התייחסות לדרישה מס' 9 : רוחב מקסימלי בין שורות	24
27	4.7 התייחסות לדרישה מס' 5 : בטיחות	27
27	4.8 התייחסות לדרישה מס' 4 : זמן פעולת המערכת או זמן המתנת הלקוח	27
28	4.9 התייחסות לדרישה מס' 6 : תשתית	28
34	4.10 התייחסות לדרישה מס' 10 : חישוב כלכלי – כדאיות כלכלית	34
38	5. תכן רעיוני מפורט של המערכת	38
40	6. אנליזת חוזק	40
40	6.1 הגדרת הבעיה	40
50	6.2 חילוק המשקל בין הקורות	50
52	6.3 נקודות קריטיות	52

52	6.4. חישוב מאמצים
52	6.4.1. מאמצי כפיפה
54	6.4.2. מאמצי גזירה
56	6.4.3. מאמצי גזירה מפיתול
58	6.5. חישוב מאמץ מקסימלי מותר לפי קריטריון כשל
65	6.6. סימולצית חוזק
73	7. הערכה כלכלית
73	8. סיכום
75	9. נספח א' – גיאומטריית רכבים הרלוונטים לחניון
75	9.1. גיאומטריית רכב רלוונטית לניסוי
75	9.2. נתוני רכבים נבחרים
76	10. נספח ב' – בחירת חניון מתאים למערכת
76	10.1. מצוקת החניה
77	10.2. בחירת שטח עבור הפרוייקט
79	10.3. אופן פעולת החניון המתוכנן
81	10.4. זמן המתנת הלקוח
83	11. נספח ג' – בטיחות המערכת
86	12. נספח ד' – שרטוט מעמד לרכב
87	13. נספח ה' – גאנט
88	14. רשימת מקורות

## רשימת סימנים

בפרק זה יובאו כל הסימנים אשר שימשו לכתיבת דוח זה, יחידותיהם ותיאורם.

תיאור	יחידות	סימן
מסת רכב	$[kg]$	$m$
תאוצת כדוה"א	$[m/s^2]$	$g$
משקל רכב	$[N]$	$W$
ריאקציה בגלגל	$[N]$	$R$
ריאקציה בקורה	$[N]$	$r$
כוח גזירה	$[N]$	$V$
שטח החתך שנגזר	$[mm^2]$	$A_p$
מרכז שטח החתך שנגזר	$[mm]$	$C_y$
מומנט כפיפה	$[N \cdot m]$	$M$
מומנט פיתול	$[N \cdot m]$	$T$
מרחק אופקי בין מרכז המסה של הרכב לגלגלים הקידמיים	$[m]$	$a$
מרחק אופקי בין מרכז המסה של הרכב לגלגלים האחוריים	$[m]$	$b$
אורך מרכזים של הרכב	$[m]$	$length$
רוחב רכב	$[m]$	$width$
גובה קורה	$[mm]$	$a_1$
רוחב קורה	$[mm]$	$b_1$
עובי קורה	$[mm]$	$t$
רדיוס פנימי של הקורה	$[mm]$	$r_i$

רדיוס חיצוני של הקורה	$[mm]$	$r_o$
שטח חתך קורה	$[mm^2]$	$A$
מרחק בין נקי' חיבור המוט לצמיג	$[m]$	$L_1$
מרחק בין קורות	$[m]$	$L_2$
רוחב המוט הנוגע בצמיג	$[m]$	$L_3$
שטח מגע בין צמיג לקורה	$[mm^2]$	$St$
מומנט אינרציה	$[mm^4]$	$I$
מומנט אינרציה במערכת צירים מסובבת	$[mm^4]$	$I'$
מומנט סטטי	$[mm^3]$	$Q$
הזווית בה פועל כוח הכפיפה	$[rad]$	$\varphi$
הזווית בה פועל כוח הגזירה מפיתול	$[rad]$	$\theta$
מאמץ כניעה	$[MPa]$	$\sigma_y$
מאמץ מקסימאלי בקורה	$[MPa]$	$\sigma_{max}$
מאמץ כפיפה	$[MPa]$	$\sigma_{xx}$
מאמץ גזירה	$[MPa]$	$\sigma_{xy}$
מאמץ גזירה מפיתול	$[MPa]$	$\tau$
מאמץ לפי von-mises	$[MPa]$	$\sigma_v$
מקדם ביטחון	–	$FoS$

---

## רשימת איורים

בפרק זה תופיע רשימה של כל האיורים שמופיעים בדוח זה עם תיאורם והעמוד בו הם מופיעים. מספר האיורים הוא בסדר רץ עבור כל פרק בנפרד: משמאל לנקודה- מספר הפרק בו נמצא האיור, מימין לנקודה- מספר האיור.

עמוד	מספר	תיאור
1	איור 1.1:	צילום אווירי של השטח הנבחר לפרויקט.
2	איור 1.2:	ממדי תא חניה קיים בחניון נתב"ג.
2	איור 1.3:	ממדי שטח החניון הנבחר.
3	איור 1.4:	ממדי תא חניה מתוכנן עבור המערכת החדשה.
3	איור 1.5:	המחשת אופן פעולת החניון ממבט על.
7	איור 2.1:	מחירי חנויות בתל אביב.
7	איור 2.2:	מספר כלי הרכב שעולים מידי שנה לכבישים בישראל.
8	איור 2.3:	מכפילי חנייה של חברת PARKOLAY.
9	איור 2.4:	פאזל של חברת PARKOLAY.
9	איור 2.5:	הדגמה כיצד מוציאים רכב מהפאזל.
10	איור 2.6:	חנייה אוטומטית עם מסוע של חברת SHIN WOO KOREA.
14	איור 3.1:	תיאור מרווח בין שורות.
15	איור 4.1:	מיקום נקודות הג'יק בתחתית הרכב.
16	איור 4.2:	מכשיר POST LIFT-2 אוחז ברכב בנקודות הג'יק.
17	איור 4.3:	ימין – המשטח מתמקם מתחת לרכב. שמאל – הצוותות "נאחזות" בצמיגי הרכב.
17	איור 4.4:	רכב על מוטות "מזלג".
18	איור 4.5:	סימון תא כניסה בחניון.
18	איור 4.6:	רכב, רמפה ומשטח הרמה.
19	איור 4.7:	דוגמא למשטח הרמה בחניון.
19	איור 4.8:	חיבור מכשיר הרמה לרמפה.
20	איור 4.9:	מסילות רכבת להמחשה.
21	איור 4.10:	חלופה 1 - מסילות + מזלג.
22	איור 4.11:	חלופה 1 – תא כניסה.

---

23	איור 4.12 : חלופה 2 – גלגלים + צוותות.
24	איור 4.13 : מרווח ביטחון לרוחב/אורך רכבים שונה.
25	איור 4.14 : הגדרת גודל תא חניה.
25	איור 4.15 : אופן סידור החניון.
26	איור 4.16 : חלופה 1 – מרווח בין שורות.
26	איור 4.17 : פריסת חניות.
27	איור 4.18 : חלופה 2 – מרווח בין שורות.
28	איור 4.19 : מעמדי הרכבים במערכת החניה האוטומטית של MAOYUAN.
28	איור 4.20 : דגם של המעמד.
29	איור 4.21 : גדלים גיאומטרים רלוונטים.
31	איור 4.22 : עורגן שער סטנדרטי של עד 5 טון.
33	איור 4.23 : שרטוט חתך של המסילה.
38	איור 4.24 : חשיבות המענה לדרישות מרכזיות שונות.
38	איור 5.1 : תרשים התכן הרעיוני של הפרויקט.
40	איור 6.1 : מיקום מרכז הכובד.
41	איור 6.2 : קביעת מערכת צירים.
41	איור 6.3 : כוחות ריאקציה במגע בין צמיג לכביש/ציר לגלגלים.
42	איור 6.4 : כוח ריאקציה עבור כל גלגל.
43	איור 6.5 : מיקום מרכז המסה לאורך הרכב.
44	איור 6.6 : מידול המערכת והתשתית.
44	איור 6.7 : פרמטרים רלוונטים לתכנון קורה.
45	איור 6.8 : תיאור נוסף לפרמטרים רלוונטים בתכנון קורה.
45	איור 6.9 : תיאור הפעלת מומנט במצב שיווי משקל לא יציב.
46	איור 6.10 : תיאור שיווי משקל יציב.
47	איור 6.11 : תיאור הפעלת מומנט במצב שיווי משקל יציב.
47	איור 6.12 : כוח נורמל מתפרס לאורך שפת הקורה.
48	איור 6.13 : כוח נורמל מרוכז על שפת הקורה.
48	איור 6.14 : דג"ח עם מערכת צירים (מבט איזומטרי).
49	איור 6.15 : חתך הקורה לחישוב מומנט אינרציה.

---



---

51	איור 6.16 : תיאור המגע בין הצמיגים לקורות המעמד בקידמת הרכב.
51	איור 6.17 : תיאור המגע בין הצמיגים לקורות המעמד באחורי הרכב.
52	איור 6.18 : נקודות קריטיות להתפתחות מאמצים מקסימליים.
53	איור 6.19 : דג"ח על קורה בודדת – התפתחות מאמצי כפיפה.
54	איור 6.20 : קו גובה – אמצע הקורה להתפתחות מאמצי גזירה מקסימליים.
55	איור 6.21 : גובה מקסימלי בו מתפתחים מאמצי גזירה עבור עובי דק.
56	איור 6.22 : מאמצי פיתול כאשר מיקום הכוח המרוכז אינו במרכז.
57	איור 6.23 : התפתחות מומנט בקורה.
60	איור 6.24 : זווית בין מאמצי גזירה ופיתול.
63	איור 6.25 : גרף של מאמץ שקול מקסימלי אל מול שטח חתך.
63	איור 6.26 : פרופיל קורה נבחר.
65	איור 6.27 : גדלים גאומטריים של רכב הרלוונטים לתכן.
65	איור 6.28 : התאמת המעמד למידות הרכבים.
66	איור 6.29 : סוגי המוטות במעמד.
67	איור 6.30 : חתך מוט RHS.
67	איור 6.31 : דגם המדמה רכב לצורך סימולציה.
68	איור 6.32 : צמיג רכב לצורך הסימולציה.
68	איור 6.33 : מעמד לרכב- תכן סופי.
68	איור 6.34 : הרכבה של המעמד והרכב לצורך הסימולציה.
69	איור 6.35 : חצי הרכבה עבורה בוצעה הסימולציה.
70	איור 6.36 : חיבורים, ריתומים ועומסים חיצוניים שהוגדרו לצורך ביצוע הסימולציה.
70	איור 6.37 : רישות (MESH) לצורך ביצוע הסימולציה.
71	איור 6.38 : תוצאות הסימולציה- מאמצים.
75	איור 9.1 : תיאור גדלים גאומטריים של רכב.
76	איור 10.1 : תנועת נוסעים בטיסות בינלאומיות בנתב"ג במשך השנים.
77	איור 10.2 : גדילת השטח של חניון ארוך הטווח בנתב"ג – תצלומים אוויריים.
77	איור 10.3 : בחירת שטח נבחר מחניון נתב"ג – תצלום אווירי.
78	איור 10.4 : ממדי תא חניה הקיים בחניון נתב"ג.
78	איור 10.5 : ממדי שטח החניון הנבחר.

---

---

78	איור 10.6 : סימוני כבישי גישה על שטח חניה נבחר – צילום אווירי.
79	איור 10.7 : ממדי תא חניה מתוכנן עבור המערכת החדשה.
79	איור 10.8 : תכנון אופן פעולת החניון במבט על.
80	איור 10.9 : תיאור המרחקים בין שורות – אופציה א'.
80	איור 10.10 : תיאור החניון עם תאי החניה בממדים החדשים.
81	איור 10.11 : תיאור המרחקים בין שורות – אופציה ב'.
82	איור 10.12 : מיקום רכבים עם אותו זמן יציאה.
82	איור 10.13 : קידום רכבים בנחיתת מטוס.
82	איור 10.14 : קידום רכבים שלקוחותיהם עלו על שאטל וצפויים להגיע ב-10 דקות הקרובות.
83	איור 11.1 : גידור המערכת.
83	איור 11.2 : מכשירי הפעלה – מסומנים במלבן סגול.
84	איור 11.3 : צילום מסך מסרטון הדרכה לשימוש בחניון חכם.
84	איור 11.4 : הוספת שביל גישה בתאי היציאה.
85	איור 11.5 : מיקום תחנות איסוף והורדה להסעות לנתב"ג.

---

## רשימת טבלאות

בפרק זה תופיע רשימה של כל הטבלאות שמופיעות בדוח זה עם תיאורן והעמוד בו הן מופיעות. מספור הטבלאות זהה למספור האיורים: משמאל לנקודה- מספר הפרק בו נמצאת הטבלה, מימין לנקודה- מספר הטבלה.

מספר	תיאור	עמוד
2	טבלה 1.1: גדלים גיאומטריים של רכבים עבור הפרויקט.	
29	טבלה 4.1: תכונות פלדת ST37-2.	
30	טבלה 4.2: פרופילי מוטות RHS.	
30	טבלה 4.3: פרופילי המוטות.	
32	טבלה 4.4: פרטים טכניים של עורגני שער אירופיים סטנדרטים.	
32	טבלה 4.5: חלוקת המסילות לקבוצות משקל לפי הסטנדרט הסיני.	
33	טבלה 4.6: פרטי המסילה שנבחרה.	
34	טבלה 4.7: סיכום הערכת עלות התשתית בפתרון המסילות.	
37	טבלה 4.8: מספר החניות בשטח הנבחר שמספקות החלופות השונות.	
50	טבלה 6.1: מומנטי אינרציה לפיתול של פרופילי חתך שונים.	
58	טבלה 6.2: חישוב המאמצים בנקודות הקריטיות של הקורות האחוריות.	
59	טבלה 6.3: חישוב המאמצים בנקודות הקריטיות של הקורות הקידמיות-חיזוניות.	
62	טבלה 6.4: מאמץ שקול מקסימלי לפי וון מיזס עבור פרופילי חתך שונים.	
64	טבלה 6.5: המאמצים בפרופיל הנבחר עבור זוג קורות אחוריות.	
64	טבלה 6.6: המאמצים בפרופיל הנבחר עבור זוג קורות חיזוניות-קידמיות.	
65	טבלה 6.7: הגדלים הגיאומטריים הרלוונטיים של KIA SPORTAGE.	
66	טבלה 6.8: מוטות RHS בגדלים שנבחרו עם עוביי דופן שונים.	
71	טבלה 6.9: הנתונים שהוזנו לסימולציה והמאמץ המקסימאלי שהתקבל.	
72	טבלה 6.10: מקדמי ביטחון עבור מקרי תכן שונים.	
75	טבלה 9.1: גדלי עשרת דגמי הרכבים הנמכרים בישראל בשנת 2018.	

## 1. מבוא

### 1.1. תיאור הפרויקט

כפי שהוזכר קודם לכן בתקציר, למצוקת החנייה קיימים פתרונות שונים המבוססים על מספר מפלסים (קומות). פתרונות אלו מצריכים תכנון מורכב, עלות גבוהה, זמן הקמה ארוך ובמקומות מסויימים אף לא מתאפשרים. מכאן עלה הצורך לבדוק פתרון אחר שמנצל רק את השטח הקיים (מפלס אחד), ולא דורש חפירה באדמה או בנייה לגובה.

החניון הייעודי שנבחר לצורך בדיקת הפתרון הוא החניון לטווח ארוך בנמל תעופה בן-גוריון (נתב"ג) בגלל שטחו הגדול ותנועת הרכבים (הנכנסים והיוצאים מהחניון) היחסית נמוכה בו. הסיבה לכך היא שהמערכת מבוססת על מכשיר שמכניס ומוציא את הרכבים, ולכן הוא אינו מתאים לחניונים עם תחלופת רכבים מהירה. בנוסף, מבחינה כלכלית הפתרון אינו כדאי לחניונים קטנים.

הוחלט להשאיר חלק מהחניון כקונוונציונלי וליישם את הפתרון רק בחלקו. החלטה זו נבעה משתי סיבות:

1) הנצילות הגבוהה ביותר של הפתרון (מקסימום חניות במינימום שטח) מתקבלת כאשר הוא מופעל על שטח בצורת מלבן (כפי שיתבהר בהמשך).

2) על ידי השארת חלק מהחניון כקונוונציונלי ניתן לייעד את פתרון החנייה לגדלי הרכבים הנפוצים יותר בשוק ועדיין לאפשר לחניון לתת מענה לכל סוגי הרכבים (הרכבים שאינם מתאימים לפתרון יחנו בחניות הלא-קונוונציונליות). חלוקה זו תביא לחיסכון בעלויות של המכשיר ותאפשר לספק יותר מקומות חנייה בשטח הנבחר.

#### 1.1.1 פרטי השטח הנבחר מהחניון

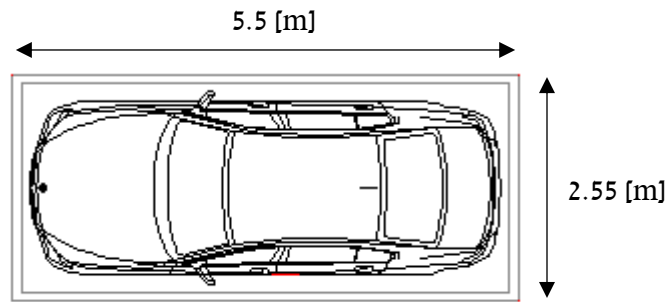
באיור 1.1 ניתן לראות צילום אווירי של השטח הנבחר, המהווה כמחצית מהחניון טווח ארוך בנתב"ג.



איור 1.1: צילום אווירי של השטח הנבחר לפרויקט.

מספר חניות בשטח הנבחר: 1184 (148 חניות לאורך, 8 חניות לרוחב).

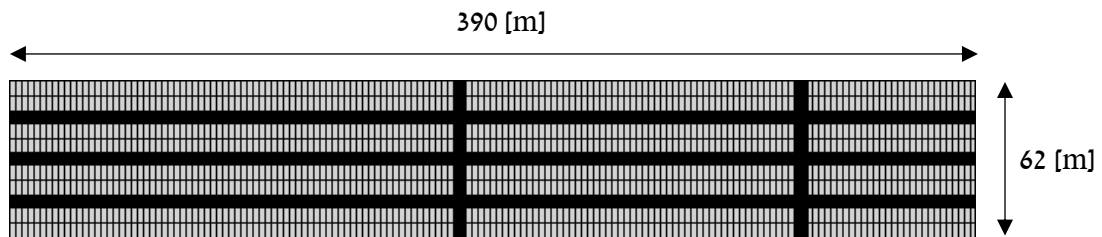
גודל תא חניה :



איור 1.2: ממדי תא חניה קיים בחניון נתב"ג.

רוחב כביש גישה : 6 מטר – שטח מבוזבז שאותו נרצה לנצל לטובת הוספת מקומות חניה.

גודל השטח הנבחר :



איור 1.3: ממדי שטח החניון הנבחר.

### 1.1.2 יסוּם המערכת על השטח הנבחר

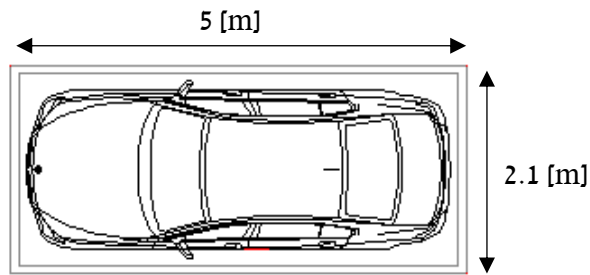
פרטים על בחירת סוגי רכבים עבורם החניון משמש מפורטים בהרחבה בנספח א': "גיאומטריית רכבים הרלוונטים לחניון". להלן טבלת גדלים גיאומטריים של הרכבים שנבחרו עבור הפרויקט:

טבלה 1.1: גדלים גיאומטריים של רכבים עבור הפרויקט.

מימד	ממוצע [mm]	Max [mm]	Min [mm]
גובה	1546	1680	1445
רוחב	1770	1855	1595
אורך כללי	4287	4670	3595
אורך מרכזים	2602	2700	2385
רוחב צמיג	204	245	175
קוטר צמיג	650	705	583

משקל הרכבים נע בין 952 [kg] לבין 1631 [kg].

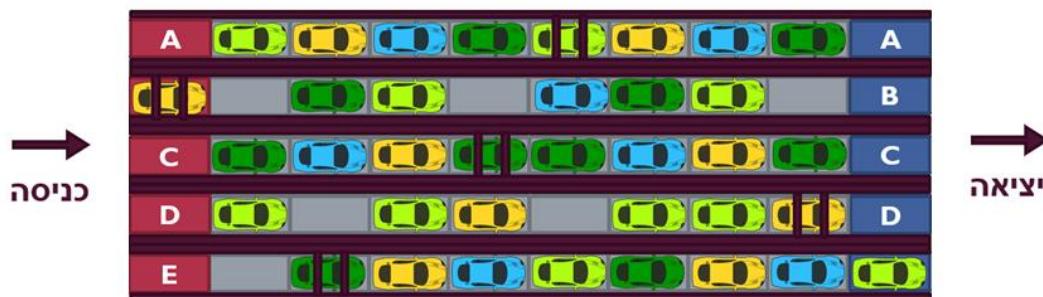
בהתבסס על נתוני רוחב ואורך כללי מקסימליים, נגדיר את גודל תא חניה המיועד לפעילות המכשיר להיות:



איור 1.4: ממדי תא חניה מתוכנן עבור המערכת החדשה.

### 1.1.3. אופן פעולת החניון

בשטח הנבחר נתכנן חניון הפועל באופן הבא:



איור 1.5: המחשת אופן פעולת החניון ממבט על.

באיור קיימים 3 סוגים של תאי חנייה:

- (1) באדום- תאי כניסה. בתאים אלו הלקוחות משאירים את רכבם. לאחר שהלקוח יוצא מהרכב מכשיר ייעודי מחנה אותו בתא פנוי באותה שורה בה הלקוח השאיר אותו (A,B,C וכו').
- (2) בכחול- תאי יציאה. מתאים אלו הלקוחות לוקחים את רכבם. כאשר הלקוח מגיע לחניון על מנת להוציא את רכבו מכשיר ייעודי מזיז את הרכב לתא זה. השורה בה יימצא הרכב היא השורה בה הלקוח השאיר אותו בעת הכניסה.
- (3) באפור- תאי חנייה. התאים בהם ממוקמים הרכבים החונים. התנועה אל ומן תאים אלו נעשית על ידי המכשיר הייעודי.

המכשירים הייעודיים מסומנים באיור כשני קווים מקבילים. ניתן לראות כי קיים מכשיר ייעודי אחד בכל שורה. למכשיר הייעודי שני תפקידים:

- (1) הכנסת הרכב- הרמת הרכב מתא הכניסה, הזזה שלו לאורך השורה מעל הרכבים החונים האחרים עד לתא החנייה הפנוי והורדתו בתא זה.

2) הוצאת הרכב - הרמת הרכב מתא החנייה בו הוא נמצא, הזזה שלו לאורך השורה מעל הרכבים החונים האחרים עד לתא היציאה והורדתו בתא זה.

פרטים על בחירת חניון עבור הפרויקט מפורטים בהרחבה בנספח ב': "בחירת חניון מתאים למערכת".

### **1.2. מבנה העבודה**

תחילה הוגדרה בעיה כללית - מחסור במקומות חניה. לאחר מכן הוגדרה בעיה ספציפית - מחסור במקומות חניה בחניון לטווח ארוך בנתב"ג. בפרויקט ננסה לבדוק היתכנות פתרון לבעיה הספציפית. ננסח את דרישות התכן לפתרון, נציע חלופות, נפרט כיצד הן עונות על דרישות התכן, ומשקלול הדרישות - נבחר את החלופה המתאימה ביותר. בדוח זה נציג את חלופה זו ואת בדיקת ההיתכנות עבור קיומה, שכוללת חישובי חוזק ואנליזת חוזק עבור מרכיבה היקר ביותר - מעמד הרכב, מציאת כמות החומר הדרושה עבורו (בהתאם לחישובי החוזק) והערכת עלויות בהתאם לכמות החומר.

### **1.3. מטרת וגבולות הפרויקט**

מטרת הפרויקט הכללית הינה לבדוק את כדאיות המערכת המוצגת בפרויקט להוספת מקומות חניה, כאשר היחודיות של שיטה זו היא הגדלת מספר מקומות החנייה בשטח מסוים ללא בניית קומות נוספות. הפרויקט יכול: הצגת חלופות לבעיה, בחירת החלופה המתאימה ביותר, ובדיקת היתכנות עבור חלופה זו, אשר במסגרתה יבוצעו חישובי חוזק עבור המעמד לרכב, שהינו הגורם העיקרי להתייקרות המערכת.

### **1.4. חשיבות הפרויקט**

באופן כללי הפרויקט מתעסק בנושא בעל חשיבות רבה בחיי היום-יום כבר בימים אלו ואף יותר בעתיד (עם גידול האוכלוסייה ועלייה במספר כלי הרכב הפרטיים). בנוסף, הפרויקט מתוכנן באופן ספציפי עבור חניון לטווח ארוך בנתב"ג, שהשנה הוצע למכרז לחברות שמתעסקות בפתרונות חנייה. בתחילת הפרוייקט קיוונו להציע את הרעיון במכרז החברות עבור הנהלת נתב"ג, אך נודענו שהדרישה היא עבור פתרון קיים, ולא עבור פתרון בשלבי פיתוח.

### **1.5. ויזואליות להבנת הפרוייקט**

במטרה להציג את הפרוייקט לבוחנים/בכנס הפרוייקטים, הוכנו סימולציות בשני נושאים: אופן פעולת החניון אופן פעולת מכשיר ההרמה. בגלל משבר הקורונה לא נוכל להציג את הסימולציות, לכן הועלו סרטונים אלו ליוטיוב לנוחות קורא הדוח. מומלץ מאוד לצפות בסרטונים אלו להבנת הרעיון שעומד מאחורי החניון והמערכת עצמה. במידה ואחד הקישורים לא עובד - ניתן לחפש את RoboLift TLV airport באתר YouTube.

## 1.5.1. אופן פעולת החניון

הוכנו 4 סימולציה בתוכנת AnyLogic (תוכנה לשימוש לוגיסטיקה במפעלים ותחבורה):

### • RoboLift TLV airport: Car Enter, Ped go to bus station (BGU)

מומלץ להתחיל בסרטון הזה. בתחילת הסרטון ניתן לראות את החניון במבט על ובזוויות שונות ואת הרכבים שחונים בו (בשחור). הקווים שבין הרכבים מייצגים את המסילות. לאחר מכן, רכב אדום מגיע לתאי הכניסה, הנהג מחנה את רכבו וחוצה את הכביש אל תחנת האוטובוס (הסרטון מואץ עד הגעתו של אוטובוס השאטל).

קישור:

<https://youtu.be/F0uNqUNYhUg>

### • RoboLift TLV airport: Lift – Enter Car (BGU)

סרטון זה מתייחס לרכב האדום שהלקוח השאיר בתא הכניסה בסרטון הקודם (לאחר שיצא ממנו). המערכת מרימה את הרכב, משנעת אותו עד למקום חנייה פנוי ומורידה אותו. המערכת עצמה לא נראת בסרטון, המטרה היא להבין עיקרון פעולתה.

קישור:

<https://youtu.be/kbX1NmSJnhI>

### • RoboLift TLV airport: Lift – Exit Car (BGU)

סרטון זה מציג הוצאה של רכב מהחנייה, כאשר הלקוח מבקש להוציא את רכבו. ניתן לראות את הרכב האדום מורם ממקום החנייה ומונע עד לתא היציאה, שם המערכת מורידה אותו.

קישור:

<https://youtu.be/LabJoWNywmY>

### • RoboLift TLV airport: Multifunctions (BGU)

סרטון זה מדמה את הפעולות שמתבצעות בחניון בו-זמנית. בסרטון ניתן לראות רכב אדום נכנס לתא כניסה ומורם, רכבים צהובים ואדומים מתקדמים לכיוון תאי היציאה, רכבים כחולים שנמצאים בדרכם לתאי הכניסה, ולקראת סוף הסרטון- רכב צהוב שמגיע לתא היציאה.

קישור:

<https://youtu.be/OKT6pdett5s>



## 1.5.2. אופן פעולת מכשיר ההרמה

הוכנו 4 סימולציה בתוכנת SolidWorks :

- RoboLift TLV airport: Components one by one - Model (BGU)

סרטון זה מציג את מרכיבי המערכת על פי הסדר הבא : מעמדי הרכב שתוכננו, המסילות ומנגנון ההרמה. בסיום הסרטון צץ רכב על מנגנון ההרמה.

קישור :

[https://youtu.be/WL2J2J\\_KPcM](https://youtu.be/WL2J2J_KPcM)

- RoboLift TLV airport: Arms under the stand - Model (BGU)

סרטון זה מציג כיצד הזרועות נעות מתחת לתשתית כדי להגיע לרכב.

קישור :

<https://youtu.be/jihClijJOpE>

- RoboLift TLV airport: Arms through the stand - Model (BGU)

סרטון זה מציג כיצד הזרועות מורמות בין מוטות המעמד (שיטת מזלג).

קישור :

<https://youtu.be/j1PxBu8703w>

- RoboLift TLV airport: Model – Full Function (BGU)

סרטון זה מציג את כלל פעולות המכשיר : הגעה לתחתית רכב, הרמתו, שינועו למקום הרצוי והורדתו.

קישור :

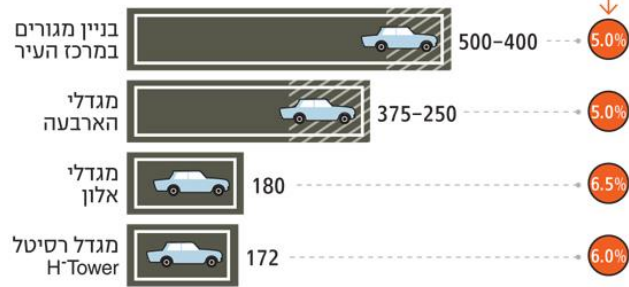
<https://youtu.be/SGfRIFUpavM>

## 2. רקע

הצפיפות אשר הולכת וגוברת במרכזי הערים הגדולות הפכה את זמינות חניית הרכבים למצרך יקר. הביקוש לחניות עולה על ההיצע וגורר עליית מחירים דרסטית. בתל אביב לדוגמה, אשר ממוקמת בראש הערים שסובלות ממצוקת החנייה, ניתן למצוא חניות שמחירן מאמיר למאות אלפי שקלים עבור חנייה בודדת, כפי שניתן לראות באיור 2.1. [1]

## כמה עולה מקום חנייה בתל אביב מחיר באלפי שקלים

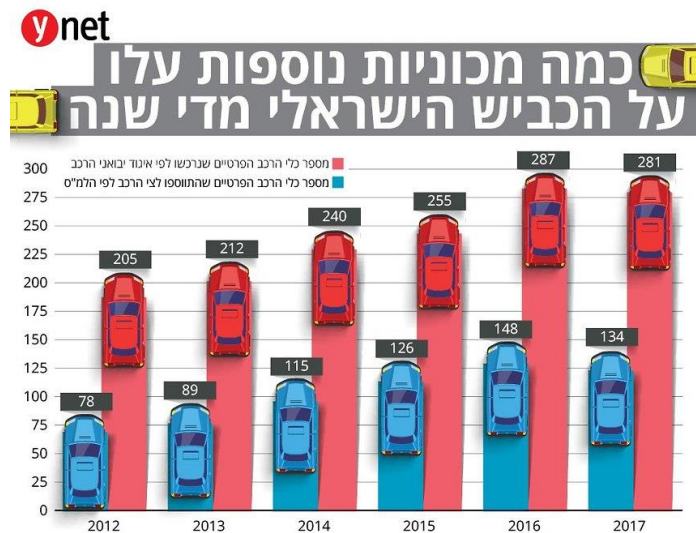
תשואה שנתית מהשכרת המקום\*



\*חישוב התשואה: משרד אהוד המאירי ושות', שמאי מקרקעין

### איור 2.1: מחירי חנויות בתל אביב.

מצוקת החנייה לא מאפיינת את תל אביב בלבד. גם בערים נוספות, כגון: ירושלים, חיפה ורמת גן, קיימת בעיה דומה. אז למה זה קורה? קיימים שני "מנועים" מרכזיים להגדלת בעיות החנייה בישראל לאורך זמן. האחד הוא גידול אוכלוסיית ישראל והשני הוא גידול בכמות ההחזקה והשימוש במכוניות לנפש. מספר כלי הרכב החדשים שנמכרים מדי שנה נע בעשור האחרון בין 200 לכמעט 300 אלף (ראה איור 2.2) [2]. באיור ניתן לראות את מספר כלי הרכב הפרטיים שנרכשו בארץ מידי שנה בין שנים 2012 עד 2017 (באדום) ואת מספר כלי הרכב שהתווספו לצי הרכב בשנים אלו (בכחול). בהתווספו לצי הכוונה היא לתוספת נטו לאחר שמורידים את כלי הרכב שיצאו משימוש בשנים אלו, כלומר- אלו שנרכשו פחות אלו שיצאו מכלל שימוש.



### איור 2.2: מספר כלי הרכב שעולים מידי שנה לכבישים בישראל.

לפי הלמ"ס מגמה זו נמשכה גם במהלך שנת 2018, בה נוספו למצבת כלי הרכב כ-361 אלף כלי רכב, מהם כ-301 אלף כלי רכב חדשים. בתקופה זו נגרעו מהמצבה כ-239 אלף כלי רכב, כך שהתוספת נטו למצבת כלי הרכב הסתכמה בכ-122 אלף כלי רכב.

מתוך הבנה והכרה כי השטח הפנוי להסדרת מגרשי חניה הולך ומצטמצם ומצוקת החניה רק הולכת וגוברת, קמו חברות שונות בארץ ובעולם שמציעות פתרונות חנייה מכאניים, אוטומטיים וחצי-אוטומטיים שנועדו

לספק יותר מקומות חנייה באותו השטח. מגוון הפתרונות הוא רחב מאוד. בסקירה זו נביא דוגמה לפתרון אחד מכל קטגורייה.

(1) פתרון מכאני – מכפיל חנייה: אחד מפתרונות החניה שצוברים תאוצה ופופולריות בשנים האחרונות בארץ ובעולם. מכפילי החניה מציעים פיתרון של תוספת מקומות חניה ע"י שימוש בצמיחה לגובה (או לעומק). מדובר במתקני חניה הידראולים אותם ניתן לשלב במבחר מקומות, ביניהם חניונים פתוחים, חניונים סגורים, חניות של בניינים ואף חצרות של בתים פרטיים במקרים מסויימים. באיור 2.3 מופיעים שני מכפילי חנייה של חברת Parkolay, עם זוג (מימין) או שני זוגות (משמאל) של רכבים טמונים. [3]

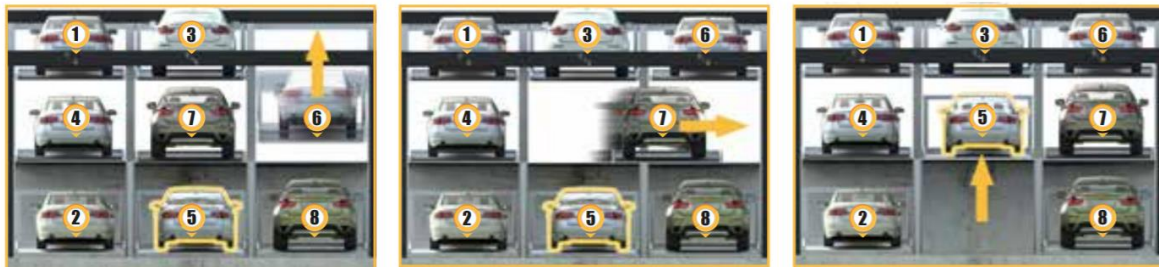


איור 2.3: מכפילי חנייה של חברת Parkolay.

(2) פתרון חצי אוטומטי – פאזל: מדובר במתקן חניה המיועד לסביבה צפופה ומהווה פתרון ביניים בין מכפילי חנייה לבין חניות רובוטיות (אוטומטיות). בנוסף לתנועה מעלה-מטה, לפאזל יש גם מנגנון תנועה לצדדים המאפשר חניה בגובה/בעומק ללא צורך בהזזת הרכב התחתון/העליון. באיור 2.4 מופיע פאזל של חברת Parkolay ובאיור 2.5 מודגם כיצד מוציאים רכב מהפאזל. ההדגמה היא משמאל לימין והרכב אותו מעוניינים להוציא הוא רכב מס' 5. [3]



איור 2.4: פאזל של חברת Parkolay.



איור 2.5: הדגמה כיצד מוציאים רכב מהפאזל.

(3) פתרון אוטומטי – חנייה עם מסוע: חנייה זו מהווה את הפתרון אולטימטיבי לצפיפות העירונית ומחליפה את החניונים הקונבציונאליים עקב היתרון הבולט שלה – ניצול מיטבי של השטח. לאחר עשרות שנות ניסיון בתחום, ערים מרכזיות בעולם כגון ניו יורק, טוקיו וסיאול אימצו את החניון האוטומטי כמענה לבעיית החניה. חניה רובוטית עם מסוע מהווה פתרון מיטבי לפרויקטי בנייה חדשים ולהתחדשות עירונית. הנהג משאיר את רכבו במעלית ייעודית ומשם כל פעולת החנייה היא אוטומטית לחלוטין. המעלית מורידה/מעלה את הרכב למפלס המתאים ומשם מסוע לוקח אותו לחנייה פנויה. כאשר הנהג רוצה להוציא את רכבו מתרחש תהליך הפוך- המסוע אוסף את הרכב מהחנייה ומכניס אותו למעלית שלוקחת אותו עד לנהג. באיור 2.6 מופיעה חנייה אוטומטית עם מסוע של חברת Shin Woo Korea [3].



איור 2.6: חנייה אוטומטית עם מסוע של חברת Shin Woo Korea.

ניתן לראות שהמשותף לכל הפתרונות שסקרנו עד כה הוא שהם יוצרים עוד מקומות חנייה בעזרת יצירת מפלסים נוספים (לגובה או לעומק). ניתן לדרג את הפתרונות לפי רמת המורכבות שלהם. הפתרונות הפשוטים ביותר הם המכאניים, לאחר מכן החצי-אוטומטיים, ולבסוף האוטומטיים. ככל שעולה רמת המורכבות כך עולה היעילות והנוחות לשימוש, אך גם העלות וזמן ההקמה. בפרויקט שלנו אנחנו רוצים להציע ולבחון פתרון חנייה מקורי שיתן אלטרנטיבה לפתרונות הקיימים. פתרון זה יהיה מבוסס על ביטול השטח המוקצה לתנועת רכבים בחניון וצמצום רוחב החניות, ובשונה מהפתרונות הקיימים - לא יעשה זאת על ידי הוספת מפלסים נוספים שמצריכה זמן הקמה ארוך, מעלה את העלויות ולעיתים אף לא מתאפשרת. נצילות הפתרון אומנם לא תשתווה לנצילות הפתרונות מבוססי הקומות, אך הוא יהיה זול ומהיר מהם.

### 3. מפרט דרישות מערכת

בפרק זה נציג את דרישות המערכת. להלן רשימת דרישות המערכת, ואחריה הסבר ודרכי בדיקה עבור כל דרישה.

1. הרמת והורדת רכבים בטווח משקלים מוגדר
2. הנעת מערכת הכוללת רכב מורם
3. התאמה לגדלים גיאומטריים שונים של רכבים יעודים למכשיר
4. זמן פעולת המערכת או זמן המתנת הלקוח
5. בטיחות – למנוע מהמערכת לעבוד בסביבת נהגים (תאי כניסה ותאי יציאה)
6. תשתית
7. מקור אנרגיה נייד – ללא חיבור לקו חשמל
8. חיבור מנגנונים מיטבי
9. רוחב מקסימלי בין שורות
10. חישוב כלכלי – כדאיות כלכלית

### 3.1. הרמת והורדת רכבים בטווח משקלים מוגדר

#### פירוט הדרישה

אחת משתי הפעולות העיקריות שעל המערכת לבצע הינה הרמת והורדת רכבים. נבחר להתייחס לפעולות ההרמה וההורדה כאל אותה דרישה בגלל הדמיון בין שתי הפעולות והמנגנון שמבצע אותן. נבחר ברכב בעל משקל מקסימלי מטווח המשקלים שהתקבל בנספח א' – "גיאומטריית רכבים הרלוונטים לחניון", שהינו 1700 [kg]. למשקל זה נוסיף 500 [kg] כדי לכסות מקרה בו הרכב מכיל מטען כבד, ונתכנן מגנון הרמה והורדה שיעמוד במשקל של 2.3 [ton]. חישוב מדויק יינתן בפרק 6 – "אנליזת חוזק".

#### דרכי בדיקה

בפרק 6 נבצע חישובי חוזק כדי לוודא שהמערכת מסוגלת לעמוד במשקלים כבדים.

### 3.2. הנעת מערכת הכוללת רכב מורם

#### פירוט הדרישה

אחת משתי הפעולות העיקריות שעל המערכת לבצע הינה הנעת הרכב עם המכשיר שמחזיק אותו. על המערכת להניע: רכב, מנגנון הרמה (הכולל מנוע הרמה ותמסורת), שלדה ומנועי הנעה. בנספח א' ניתן לראות את מפרט הרכבים שהמערכת מיועדת להם, כאשר משקל הרכב המקסימאלי הוא 1700 [kg]. למשקל זה נוסיף 800 [kg] שהינו המשקל הכולל המוערך של מנגנון ההרמה/הורדה שמצוין בדרישה מספר 3 ושל שאר המערכת שכוללת שלדה ומנועים, ו-500 [kg] כדי לכסות מקרה בו הרכב מכיל מטען כבד, ונעריך שעל המערכת להניע משקל השווה ל-3 [ton].

#### דרכי בדיקה

כפי שצויין במטרות הפרויקט, לא נתכנן את מנגנון ההנעה במסגרת הפרויקט.

### 3.3. התאמה לגדלים גיאומטריים שונים של רכבים יעודים למכשיר

#### פירוט הדרישה

בטבלה 1.1 במבוא מוצגים טווחי הגדלים הגיאומטריים של הרכבים שהמערכת צריכה להיות מותאמת אליהם.

#### דרכי בדיקה

שרטוטי התכנן של המעמד יראו כי אכן יש התאמה לטווח הגדלים הגיאומטריים המצוין, פרט לגובה הרכבים שלא יבדק במסגרת הפרויקט.

### 3.4. זמן פעולת המערכת או זמן המתנת הלקוח

#### פירוט הדרישה

תפקיד המערכת הינו לשרת לקוח שמעוניין להחנות את רכבו. פרמטר חשוב מאוד הינו זמן ההמתנה של הלקוח עד שהוא מכניס את רכבו לתא הכניסה או עד שהוא מוציא את רכבו מתא היציאה. זמני ההמתנה של הלקוח נגזרים ממספר פרמטרים הקשורים לתכן המכאני של המערכת: מהירות הרמה/הורדה ומהירות הנעת המערכת. בנוסף, קיימים פרמטרים שישפיעו על זמן המתנת הלקוח שמפורטים בנספח ב' – "בחירת חניון מתאים למערכת". פתרונות שונים לחניונים חכמים בדר"כ מספקים ללקוח את רכבו תוך זמן מירבי של עד 2 דקות. ניתן למצוא מידע נוסף על פתרונות חנייה שונים ברקע של דו"ח זה.

#### דרכי בדיקה

ניסינו לקבל מנתב"ג נתוני כניסות ויציאות של רכבים לחניון לטווח ארוך. מנתונים אלו תיכננו לבחון מקרי קיצון (שעות עומס) ולבצע עבורם הערכת זמנים לקבלת הרכב. לא קיבלנו מנתב"ג נתונים אלו ולכן זמן פעולת המערכת לא נבדק.

### 3.5. בטיחות – מניעת המערכת מלפעול בסביבת נהגים (תאי כניסה ותאי יציאה)

#### פירוט הדרישה

בטיחות המערכת זאת דרישה הכרחית. הנעה והורדת הרכב ללא אמצעי בטיחות מתאימים עלולה לגרום לנפגעים רבים. חשוב למנוע מהולכי רגל להימצא באזור הפעולה של המערכת. פרטים נוספים על הפרדה בין הולכי רגל למערכת ניתן נמצא בנספח ג' – "בטיחות המערכת".

#### דרכי בדיקה

יש לוודא בתכנון החניון שיש התייחסות למניעת כניסה של הולכי רגל לאזור הפעולה של המערכת על ידי גדרות ושערים נפתחים אוטומטית. בנוסף לכך, יש לוודא הימצאות של מפעיל (או מספר מפעילים) שאחראי על תפעול המערכת לאורך כל שעות היממה. חישוב השכר של המפעיל או המפעילים יחושב בחישוב הכלכלי בסוף הפרויקט.

### 3.6. תשתית

#### פירוט הדרישה

בפרק 4 מוצגות חלופות שונות העונות על דרישות המערכת. אחת מהחלופות כוללת תשתית של מסילות ומעמדים לרכבים. כמו שמוסבר בפרק 4, עלות התשתית מהווה חלק משמעותי ממחיר המערכת, ולכן הקטנת כמות החומר עבור התשתית תוזיל את עלות המערכת משמעותית. מנגד, הקטנת כמות החומר תקטין את חוזק המערכת. בפרק 6 – "אנליזת חוזק" יפורטו הפרמטרים השונים שמשפיעים על חוזק המערכת אל מול עלות הייצור.

### דרכי בדיקה

יצירת גרפים המייצגים את חוזק המערכת אל מול שטח חתך (=מחיר) עבור גדלים גיאומטריים שונים.

### **3.7. מקור אנרגיה נייד – ללא חיבור לקו חשמל**

#### פירוט הדרישה

הפרויקט יהווה בדיקת היתכנות מכאנית עבור המערכת ולא יתייחס למקורות אנרגיה. נושא מקורות האנרגיה לא יפורט בדוח.

### דרכי בדיקה

נושא מקורות האנרגיה לא יכלל במסגרת הפרוייקט.

### **3.8. חיבור מנגנונים מיטבי**

#### פירוט הדרישה

המערכת כוללת 2 מנגנונים עיקריים:

1. מנגנון הרמה והורדה העונה על דרישה מספר 1.
2. מנגנון הנעה העונה על דרישה מספר 2.

בפרק 4 מוצגים מנגנונים שונים. יש לבחור בחיבור מיטבי בין שני מנגנונים כך שיענה על דרישות המערכת.

### דרכי בדיקה

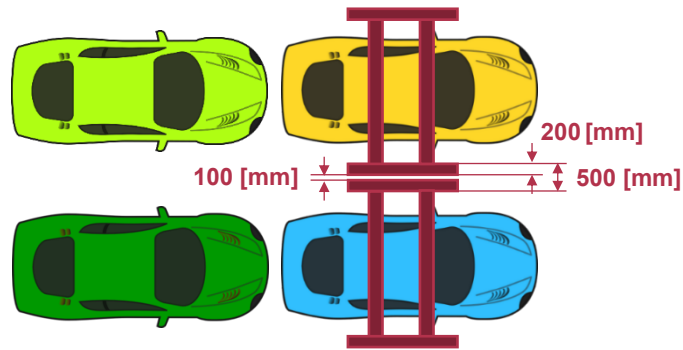
בחירת החלופה בה ישנו מענה מיטבי לשני המנגנונים הנ"ל.

### **3.9. רוחב מקסימלי בין שורות**

#### פירוט הדרישה

ככל שנצליח לבנות מנגנון הנעה דק יותר, כך יתאפשר ניצול יעיל יותר של שטח החניון (מספר גדול יותר של חניות באותו שטח). המטרה שהצבנו לעצמנו היא רווח של  $0.5[m]$  בין שני פסי חנייה סמוכים, כפי שניתן לראות באיור הבא:





איור 3.1: תיאור מרווח בין שורות.

נדרוש שיהיה רווח של 100[mm] בין מתקנים סמוכים. מכאן מתקבל שהרוחב המקסימאלי של מנגנון ההנעה צריך להיות 200[mm] מכל צד.

#### דרכי בדיקה

מנגנון הנעה לא תוכנן במסגרת הפרויקט, אך דרישה זו השפיעה על בחירת חלופה מיטבית למערכת.

### 3.10. חישוב כלכלי – כדאיות כלכלית

#### פירוט הדרישה

קיימות מערכות שונות שמטרתן להוסיף מקומות חניה בחניון קיים או חדש. לכל מערכת יש את היתרונות והחסרונות שלה ביחס למגבלות החניון. הנושא החשוב ביותר שיש לבחון הוא האם למערכת שלנו יש יתרון כלכלי על פני המערכות השונות שקיימות כיום בשוק.

#### דרכי בדיקה

חברת UPI – Urban Parking Israel תציע מערכת (קיימת) מומלצת עבור התקנה בחניון נתב"ג לטווח ארוך ותפרט את הנתונים הכלכליים עבור התקנת המערכת (רכישת המערכת, התקנה בשטח, דמי אחזקה, הוצאות נלוות אל מול רווח). נבצע חישוב כלכלי מוערך עבור המערכת שלנו ונבצע השוואת עלויות אל מול עלות המערכת שחברת UPI הציעה.

## 4. הגדרת פונקציות התכן העיקריות והצעת אלטרנטיבות לפיתרון

בפרק זה נתייחס לכל דרישה מהמערכת שרשומה בפרק 3 וכיצד היא ניתנת לפתרון. לחלק מהדרישות נציע מספר חלופות. הדיון בחלופות על פי דרישות המערכת מוצג ומסוכם בפרק זה.

#### 4.1. התייחסות לדרישה מס' 7: מקור אנרגיה נייד

מנגנון הידראולי: מומלץ לדמות את המערכת למכשיר דומה שקיים בשוק. הרמה של מטענים כבדים נעשית על ידי עגורנים שרובם משתמשים במנגנון הידראולי. בנוסף לכך, גם המכשיר המיועד להרים רכבים במוסכים - 2 post lift (ראה איור 4.2) פועל במנגנון הידראולי. עם זאת, מנגנון הידראולי דורש מיכל שמן ומשאבת שמן שיוסיפו נפח ומשקל למערכת. מכיוון שהמערכת שאנחנו מתכננים צריכה להיות ניידת - משקל ונפח הם פרמטרים שנעדיף להקטין.

מנגנון חשמלי: אם נדמה את פעולת ההרמה של המערכת למעלית נראה כי קיים דמיון בין השתיים ולכן בחירה במנוע חשמלי היא גם אופציה טובה. מעלית נעזרת במשקולת ועושה שימוש במקור אנרגיה ניח - דברים שלא מתאימים למערכת שלנו, וגם המומנט שמסופק בה קטן ממה שהמערכת שלנו דורשת. לכן, בחירת המנוע החשמלי לא תתבסס על מעליות, אלא על מכשיר אחר שיותר דומה למערכת שלנו - עגורן חשמלי נייד. מכשיר זה משמש להרמה של מטענים כבדים, בדומה למערכת שלנו, ומקור האנרגיה שלו הוא סוללות - דבר שמאפשר ניידות. לכן, הבחירה במנוע חשמלי תתבסס על מכשיר זה.

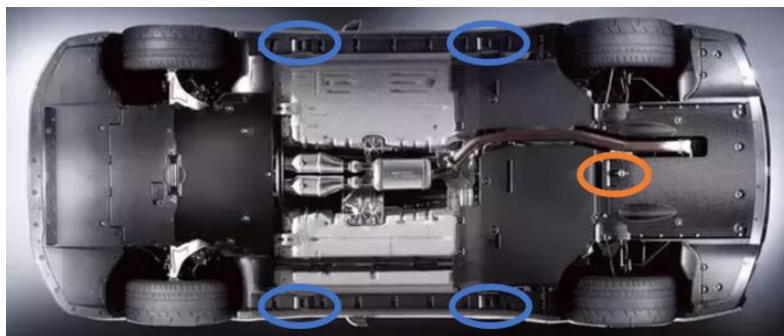
בהשוואת 2 המנגנונים נעדיף לבחור במנגנון חשמלי בגלל הניידות שלו וגודלו הקטן יחסית בהשוואה למנגנון ההידראולי.

#### 4.2. התייחסות לדרישה מס' 1: הרמה והורדה רכבים בטווח משקלים מוגדר

נציג שלוש אפשרויות אחיזה שונות להרמה והורדת רכב:

##### אופציה א': הרמה מ-jack points

נקודות הג'ק הינם אזורים בתחתית הרכב שהיצרן ממליץ לבוא איתם במגע כאשר רוצים להרים את הרכב (בהחלפת צמיג, טיפול במוסך או כל סיבה אחרת). אין מיקום מדויק עבור נקודות אלו הנכון לכל סוגי הרכב, אך ברוב הרכבים ישנם 4 נקודות הנמצאות בין הגלגלים הקדמיים והאחוריים לכיוון קצה הרכב (מסומן בכחול באיור 4.1). ברוב הרכבים קיימת נקודה נוספת במרכז החלק האחורי של הרכב (מסומן בכתום באיור 4.1).



איור 4.1: מיקום נקודות הג'ק בתחתית הרכב.

הבטיחות בשימוש בנקודות הג'יק עבור המערכת מהווה יתרון, בגלל חוזק החומר שהיצרן תיכנן כך שיעמוד בהרמה והורדה של הרכב. בנוסף, מכיוון שכבר קיים בכל מוסך מכשיר שמרים ומוריד את רכב מנקודות אלו- קיים יתרון גדול בשימוש בהן מבחינת פשטות התכנון. דוגמא למכשיר הרמה נפוץ שעושה שימוש בנקודות הג'יק הוא ה-2-Post Lift (ראה איור 4.2). המוטות באיור (בצהוב) מכוונים מתחת לנקודות האחיזה (נקודות הג'יק) באופן ידני.



איור 4.2: מכשיר 2-post lift אוחז ברכב בנקודות הג'יק.

ממחקר שנעשה לגבי תנאי השימוש במכשיר כזה או דומה לו עולה כי המוטות חייבים להיות ישרים כדי למנוע החלקה של הרכב. במוסכים, לפני התקנת המכשיר, בודקים שהבטון יציב ומישורי. אם תנאי זה לא מתקיים - לא בטיחותי להרים ולהוריד רכבים. המערכת שלנו מתוכננת לנוע לאחר הרמת רכב. לכן, לא ניתן להבטיח שמשטח הפעולה (כביש או מסילות) יהיה מישורי באופן מדויק, ויתכן מצב של חוסר איזון שעלול להוביל לנפילת הרכב מהמכשיר. לפיכך, נשלול את אופצית אחיזה אי בגלל אי-עמידתה בתנאי בטיחות.

#### אופציה ב': הרמה מהצמיגים

האופציה השנייה הינה הרמה מהצמיגים. המסקנה שהגענו אליה מהמחקר שעשינו על הרמה מנקודות הג'יק היא שיש צורך באחיזה יציבה שתבטיח שהרכב לא יפול במהלך תזוזת המכשיר. בגלל שהצמיג עגול, אחיזה בשני צדדיו של הצמיג תקנה בטיחות גדולה יותר.

קיים קושי בהרמה מהצמיגים שיגרום למורכבות טכנולוגית של המכשיר, מכיוון שהצמיגים באים במגע עם הקרקע ולא ניתן למקם זרועות הרמה ישירות מתחת לרכב. נציג שיטות שונות להתגברות על קושי זה:

### אופציה ב'1: הרמה ישירה מהמשטח ("צוותות")

החברה הגרמנית "LODIGE INDUSTRIES" פיתחה לאחרונה רעיון חדש לתחום החניות החכמות - משטח "רב-פעמי" שמתמקם מתחת לרכב ונאחז בצמיגים כפי שמוצג באיור 4.3. מימין- המשטח בדרכו להתמקם מתחת לרכב, משמאל- המשטח "נפתח" וכך מרים מעט את הרכב ומאפשר לנייד אותו.



איור 4.3: ימין – המשטח מתמקם מתחת לרכב. שמאל – הצוותות "נאחזות" בצמיגי הרכב.

ניתן לשלב את מנגנון אחיזה זה עם מכשיר ההרמה 2-post lift שהוצג באופציה א'. שילוב זה יאפשר יציבות של הרכב המורם ויקל על הפיתוח, שכן יש פה הסתמכות על שני מוצרים שכבר קיימים בשוק.

### אופציה ב'2: שילוב מוטות "מזלג"

הרבה מנגנוני חנייה אוטומטית מסתמכים על השיטה הזו, בעיקר עבור ניווד הרכבים בחניון אוטומטי. בשונה מאופציה ב'1, הרמה על ידי שילוב מוטות "מזלג" מצריכה תשתית (הרכבים צריכים להיות מונחים על מעמדים), והמנגנון הוא לא נייד. לפי אופציה זו, כל רכב ימוקם על תשלובות מסוימת של מוטות, כפי שניתן לראות באיור 4.4.



איור 4.4: רכב על מוטות "מזלג".

ההרמה נעשית על ידי מוטות מזלג אחרים שמגיעים מלמטה, חולפים על פני מוטות אלו, אוזנים ברכב ומרימים אותו כלפי מעלה. ההרמה בשיטה זו נוחה ובטוחה.

להלן קישור לסרטון של מערכת דומה להמחשה:

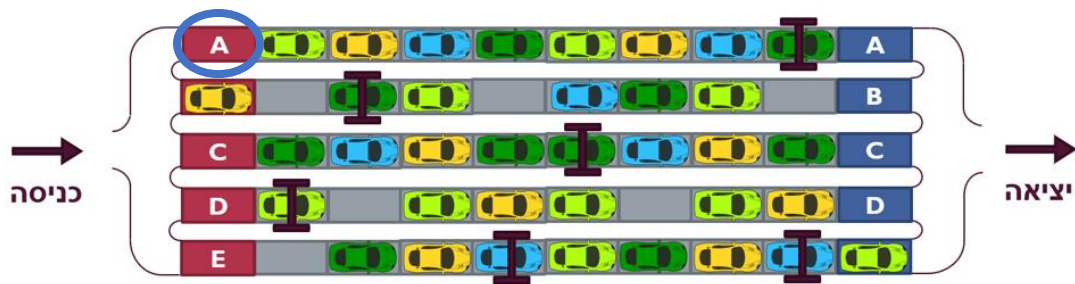
<https://www.youtube.com/watch?v=vBDEiIAUuMo>

### אופציה ג': משטחי הרמה

תהליך ההרמה על ידי משטחים יתבצע בשלושה שלבים:

1. הנהג יחנה את רכבו על משטח

החנייה תתבצע על משטח באחד מתאי הכניסה (לדוגמא, תא A באיור 4.5), בעזרת רמפה שתמצא בתחילת החנייה (ראה איור 4.6).



איור 4.5: סימון תא כניסה בחניון.



איור 4.6: רכב, רמפה ומשטח הרמה.

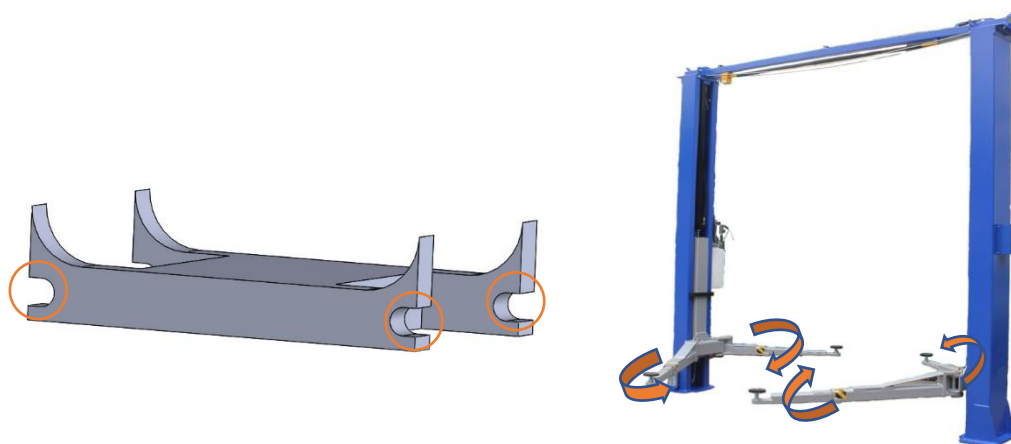
באיור הבא ניתן לראות דוגמה למשטח הרמה בחניון.



איור 4.7: דוגמא למשטח הרמה בחניון.

2. המערכת תתחבר ותרים את המשטח

החיבור יתבצע כמו במערכת הרמה 2-post lift – שני מוטות יגיעו מהצד עד לקצוות המשטח ויתפסו אותו, ממצב פתוח לסגור.



איור 4.8: חיבור מכשיר הרמה לרמפה.

3. המערכת תסיע את המשטח למקום החנייה הפנוי

המערכת מיועדת לחניון גדול (עם מאות רכבים), כך שיהיה צורך לייצר כמות גדולה של משטחי הרמה, דבר שייקר מאוד את המוצר. בנוסף, קיים סרבול בניהול חניון עם כמות גדולה של משטחים. הסרבול יכול לנבוע מהחזרת המגשים מסוף החניון, כאשר רכב יוצא מהחניון, לתחילת החניון, כאשר רכב חדש מגיע.

## סיכום אפשרויות האחיזה:

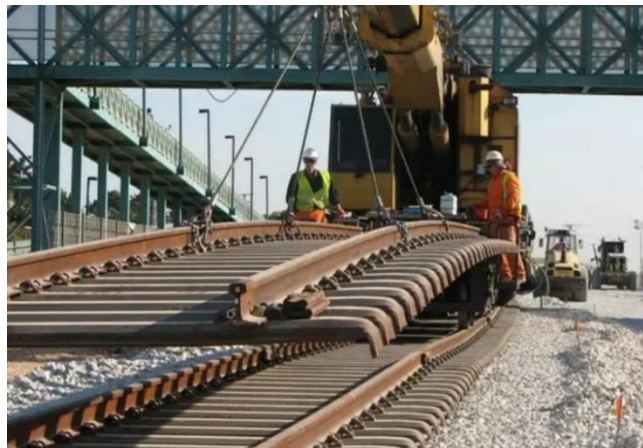
מהצגה וניתוח 3 האופציות לנקודות אחיזה עבור הרמה והורדה נבחר באופציה ב' בגלל פשטות הביצוע בהשוואה לאופציה ג' ומטעמי בטיחות האחיזה בהשוואה לאופציה א'.

### **4.3. התייחסות לדרישה מס' 2: הנעת מערכת הכוללת רכב מורם**

נבחנו שתי אפשרויות לצורת הנעה: מסילות או גלגלים.

#### מסילות:

רישות החניון בטורי מסילות, כאשר לכל טור קיימת מסילה מתחילתו עד סופו. שימוש במסילות הינו פתרון נייח מכיוון שיש לרשת את החניון לפני התקנת המערכת. עם זאת, נראה שפתרון זה יותר בטיחותי ויותר פשוט לתכנון.



איור 4.9: מסילות רכבת להמחשה.

#### גלגלים:

הנעת המערכת על ידי גלגלים תהווה פתרון נייד, כלומר, לא יהיה צורך בתשתית לפעולת המערכת. עם זאת, הנעה על ידי גלגלים תצריך בקרה מסוימת למניעת סטייה של המערכת מהמסלול.

### **4.4. התייחסות לדרישה מס' 8: חיבור מנגנונים מיטבי**

המטרה של דרישה זו היא לחבר את מנגנון ההרמה עם מנגנון ההנעה – שתי הפעולות העיקריות שעל המערכת לבצע. כל חיבור בין 2 מנגנונים אלו (הרמה והנעה) יגדיר חלופה עבור המערכת.

לאחר דיון בנקודות אחיזה שונות נבחרו 2 אופציות מתאימות :

✓ הרמה ישירה מהמשטח - "צוותות" (אופציה ב'1)

✓ שילוב מוטות "מזלג" (אופציה ב'2)

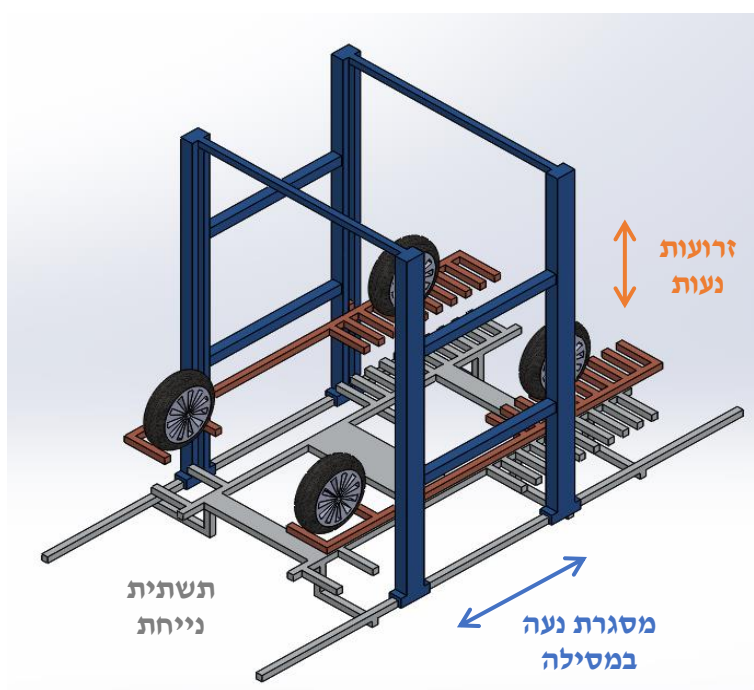
והוצגו 2 אופציות מתאימות להנעת המערכת :

✓ מסילות

✓ גלגלים

חלופה 1 : מסילות + מזלג

להלן איור המציג תא חניה בחלופה זו :



איור 4.10 : חלופה 1 - מסילות + מזלג.

ניתן לראות כי המערכת בנויה מ-3 חלקים :

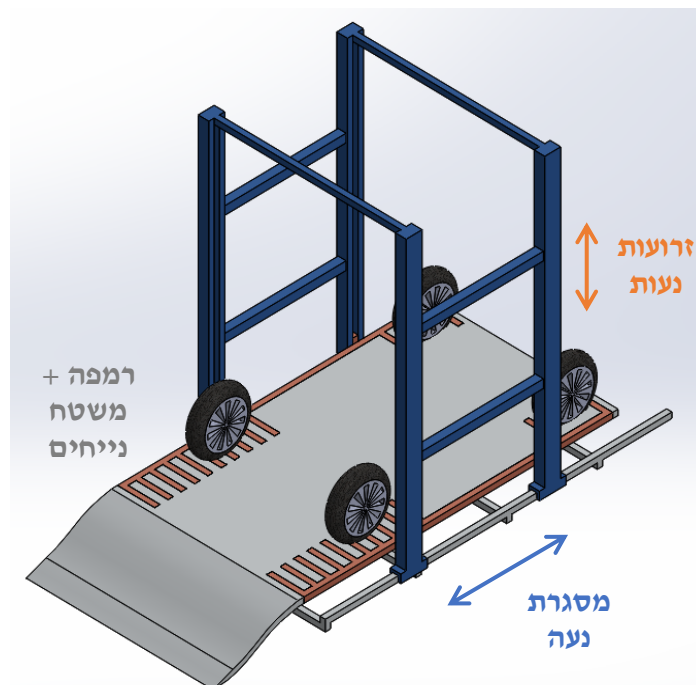
1. באפור- תשתית ניידת. התשתית מורכבת ממעמד לרכב ומסילה בשני הצדדים.
2. בכחול- מסגרת נעה. המסגרת מחוברת למסילה ונעה לאורכה בתנועה קווית.
3. בכתום- זרועות נעות. הזרועות מחוברות למסילה ומבצעות תנועה מעלה-מטה.

במצב ההתחלתי הרכב נמצא על המעמד והזרועות נמצאות מתחתיו. במצב זה המסגרת ביחד עם הזרועות יכולים לנוע לאורך המסילה באופן חופשי. על מנת להרים את הרכב מהמעמד המסגרת מתמקמת בסמוך



אליו והזרועות מתחילות לעלות. כאשר הזרועות והמעמד באותו מישור שני המוטות הקדמיים של הזרועות "עוטפים" את המוטות של המעמד והמוטות האחוריים של הזרועות נכנסים בין המוטות האחוריים של המעמד. הזרועות ממשיכות לעלות, "אוספות" את הרכב מהמעמד ועוצרות שהרכב מגיע לגובה הרצוי. במצב זה הרכב מוחזק על ידי המכשיר בגובה והמסגרת יכולה לנוע ביחד איתו לאורך המסילה כאשר הרכב המוחזק עובר מעל הרכבים החונים האחרים באותה שורה. על מנת להוריד את הרכב אל מעמד מתבצע תהליך דומה: המסגרת מתמקמת בסמוך למעמד הרצוי והזרועות יורדות ו-"מורידות" את הרכב על המעמד.

מכיוון שהמעמדים נמצאים מעל הקרקע, תאי הכניסה והיציאה צריכים להיות שונים משאר תאי החניה ולכלול רמפה שתאפשר לרכב להגיע לגובה הרצוי. להלן איור המציג את תאי הכניסה בחלופה זו:

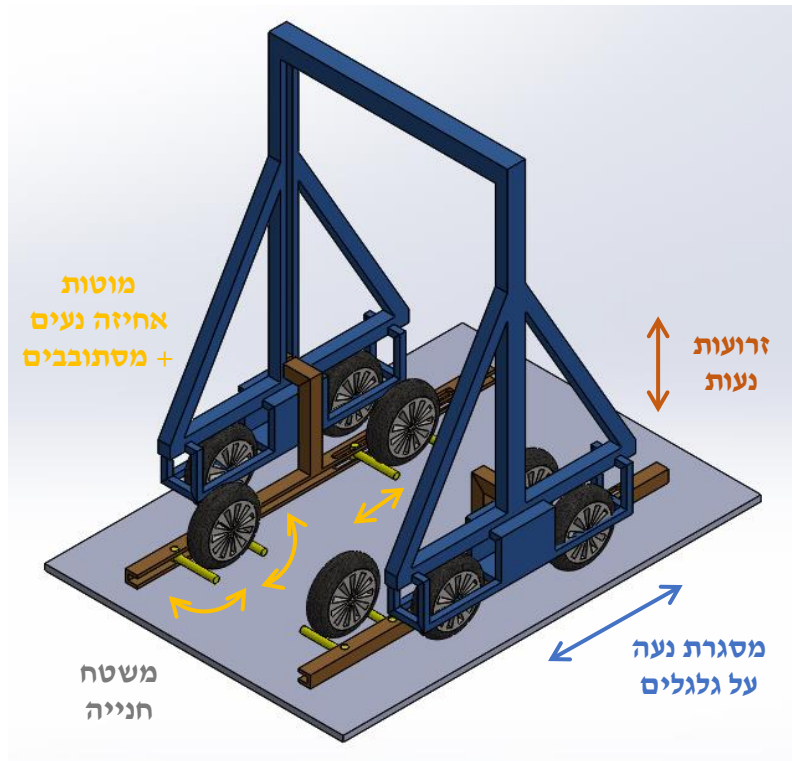


איור 4.11: חלופה 1 – תא כניסה.

תאי היציאה יהיו בנויים באופן דומה רק עם רמפה בצד השני.

שני היתרונות המרכזיים של חלופה זו הינם: פשטות אחיזת הרכב ושטח תפעול קטן. פשטות אחיזת הרכב – בזכות המבנה של הייחודי של הזרועות והמעמד ההרמה וההורדה של הרכב מתבצעים באמצעות תנועה קווית של הזרועות בלבד. בחלופה השנייה שתוצג מנגנון האחיזה יהיה מורכב הרבה יותר. שטח תפעול קטן – כפי שהוצג בחלק הקודם, המסילות מאפשרות למקם את שורות החניה במרחק 0.5[m] אחת מהשנייה – מרחק קטן יחסית. שטח זה נקרא שטח תפעול – שטח המוקדש לתפעול המערכת ואינו משמש לחניית רכבים. ככל ששטח התפעול קטן יותר כך ניתן לספק יותר חניות והנצילות גדלה. שטח התפעול של חלופה זו שווה למחצית שטח התפעול של החלופה השנייה.

להלן איור המציג תא חניה בחלופה זו :



איור 4.12: חלופה 2 – גלגלים + צוותות.

ניתן לראות כי המכשיר בנוי מ-3 חלקים :

1. בכחול- מסגרת נעה. מסגרת הנעה על גלגלים ומבצעת תנועה קווית.
2. בחום- זרועות נעות. זרועות המחוברות למסגרת ומבצעות תנועה מעלה-מטה.
3. בצהוב- מוטות אחיזה. קיימים 4 מוטות בכל זרוע : 2 קדמיים ו-2 אחוריים. המוטות הקדמיים מבצעים תנועה סיבובית בלבד והמוטות האחוריים מבצעים גם תנועה קווית וגם תנועה סיבובית. הסיבה לכך שנדרשת תנועה קווית היא שהמרחק בין הגלגלים הקדמיים לאחוריים משתנה בין סוגי רכבים שונים.

במצב ההתחלתי הרכב מונח על הקרקע, הזרועות למטה וכל המוטות "מקופלים" לתוך הזרועות (במקביל לרכב). במצב זה המכשיר יכול לנוע לאורך שורת החניות באופן חופשי. על מנת להרים רכב המכשיר מתמקם תחילה בסמוך אליו. לאחר מכן המוטות הקדמיים מסתובבים ו-"תופסים" את הגלגלים הקדמיים והמוטות האחוריים נעים קדימה/אחורה עד שמאתרים את הגלגלים האחוריים ואז מסתובבים ו-"תופסים" אותם. לאחר שהתבצעה אחיזה הזרועות עולות עד שהרכב מגיע לגובה רצוי. מכאן, בדומה לחלופה הקודמת, המכשיר יכול לנוע ביחד עם הרכב לאורך שורת החניות מעל הרכבים החונים האחרים. תהליך הורדת הרכב דומה לתהליך ההרמה : המכשיר מתמקם בחניה הרצויה, הזרועות יורדות ואיתן הרכב, המוטות הקדמיים מסתובבים ו-"משחררים" את הגלגלים הקדמיים והמוטות האחוריים מסתובבים ו-"משחררים" את הגלגלים האחוריים.

היתרון המרכזי של חלופה זו הוא היעדר הצורך בתשתית. מדובר בפתרון נייד שאינו מצריך לבנות מסילות ומעמדים לרכבים.

#### **4.5. התייחסות לדרישה מס' 3: התאמה לגדלים גיאומטריים שונים של רכבים יעודיים למכשיר**

על מנת לענות על דרישה מספר 3, על המערכת להתאים לכל סוגי הרכבים המיועדים לה. הגדלים הגאומטריים של הרכבים המיועדים מופיעים בטבלה 1.1 במבוא.

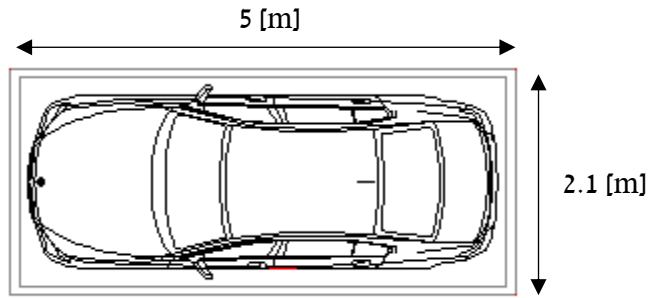
הגבהים השונים של הרכבים לא משפיע על נקודות האחיזה, לכן אין העדפה בין החלופות, אך יש לתכנן את המערכת לגובה רכב מקסימלי –  $1.68 [m]$  ולהוסיף מרווח בטחון (בחלק מהרכבים מותקנת אנטנה על הגג). לגבי שאר ההבדלים בגדלים הגיאומטריים: (רוחב, אורך כללי, אורך מרכזים, קוטר צמיג ורוחב צמיג), שימוש בהרמה על ידי צוותות, השייך לחלופת גלגלים, יכול להתאים לגדלים שונים של רכבים על ידי שימוש בבקרים מתאימים. עבור פתרון אחיזה "מזלג", השייך לחלופת המסילות, יש לתכנן את התשתית והמערכת כך שתתאים לכל הרכבים המיועדים למערכת. באיור 4.13 ניתן לראות שהמעמד (בצהוב) מתאים לרכבים באורך ורוחב שונה (המרחקים מסומנים בקווים ירוקים).



איור 4.13: מרווח ביטחון לרוחב/אורך רכבים שונה.

#### **4.6. התייחסות לדרישה מס' 9: רוחב מקסימלי בין שורות**

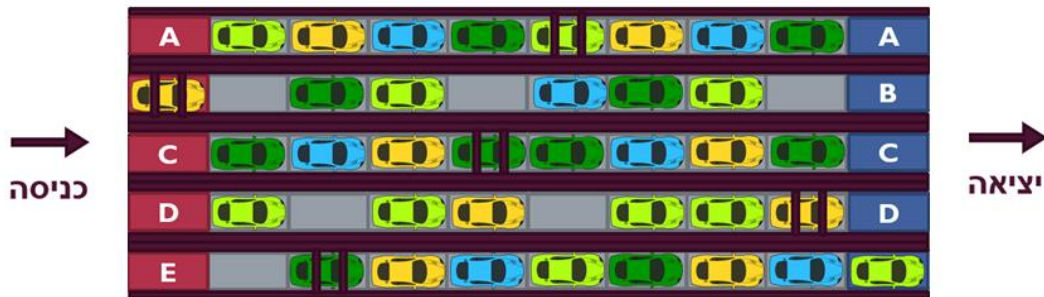
בהתבסס על הגדלים הגיאומטריים של הרכבים, נגדיר את גודל תא החניה המיועד לפעילות המכשיר להיות:



איור 4.14: הגדרת גודל תא חניה.

גודל זה ייתן מענה לרוב הרכבים הפרטיים בשוק.

בשטח הנבחר נבנה חנייה הבנויה באופן הבא:



איור 4.15: אופן סידור החניון.

באיור ניתן לראות 3 סוגים של תאי חנייה:

(4) באדום- תאי כניסה. בתאים אלו הלקוחות משאירים את רכבם. לאחר שהלקוח יוצא מהרכב מכשיר ייעודי מחנה אותו בתא פנוי באותה שורה בה הלקוח השאיר אותו (A,B,C וכו').

(5) בכחול- תאי יציאה. מתאים אלו הלקוחות לוקחים את רכבם. כאשר הלקוח מגיע לחניון על מנת להוציא את רכבו מכשיר ייעודי מזיז את הרכב לתא זה. השורה בה יימצא הרכב היא השורה בה הלקוח השאיר אותו בעת הכניסה.

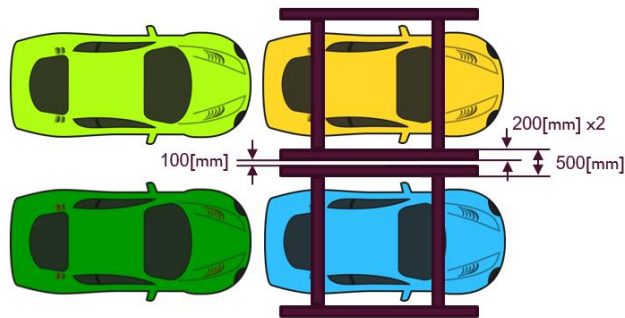
(6) באפור- תאי חנייה. התאים בהם ממוקמים הרכבים החונים. התנועה אל ומן תאים אלו נעשית על ידי המכשיר הייעודי.

המכשירים הייעודיים מסומנים באיור כשני קווים מקבילים. ניתן לראות כי קיים מכשיר ייעודי אחד בכל שורה. למכשיר הייעודי שני תפקידים:

(4) הכנסת הרכב- הרמת הרכב מתא הכניסה, הזזה שלו לאורך השורה מעל הרכבים החונים האחרים עד לתא החנייה הפנוי והורדתו בתא זה.

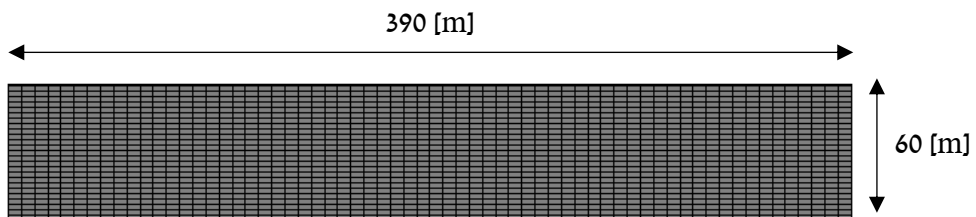
5) הוצאת הרכב - הרמת הרכב מתא החנייה בו הוא נמצא, הזזה שלו לאורך השורה מעל הרכבים החונים האחרים עד לתא היציאה והורדתו בתא זה.

ניתן לראות כי קיימת חשיבות רבה לרוחב שהמכשיר תופס משני צידי החנייה - ככל שהמכשיר צר יותר כך ניתן להכניס יותר שורות באותו שטח ומסי' החניות גדל. קיימות 2 אופציות למנגנון ההנעה של המכשיר: הנעה באמצעות גלגלים והנעה באמצעות מסילות. ההנעה באמצעות מסילות מאפשרת ניצול יעיל יותר של השטח. השאיפה שלנו היא שבאמצעות מנגנון הנעה זה המכשיר יתפוס 0.2[m] מכל צד. לצורכי בטיחות נקצה מרחק של 0.1[m] בין מכשירים סמוכים. במקרה הזה המרחק הכולל בין שתי שורות חנייה סמוכות יהיה 0.5[m] כפי שניתן לראות באיור הבא:



איור 4.16: חלופה 1 – מרווח בין שורות.

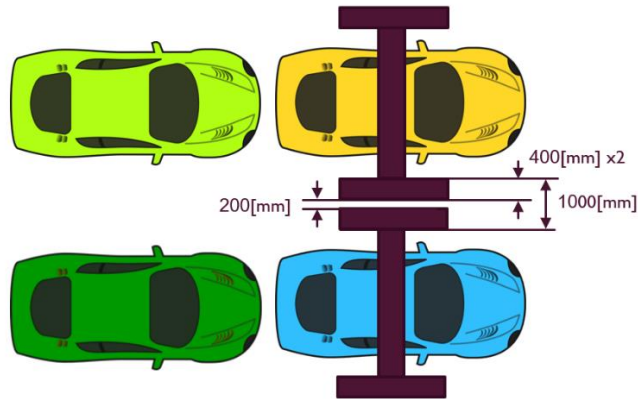
והחניות יפרסו בשטח החניה הנבחר (הרחבה בנספח ב' – "בחירת חניון מתאים למערכת") באופן הבא:



איור 4.17: פריסת חניות.

מספר חניות יהיה: 1748 (76 חניות לאורך – שניים נוספות בכל טור למטרת כניסה ויציאה, 23 חניות לרוחב).

ניתן לראות כי בפריסה החדשה יתקבלו 564 חניות יותר, כלומר מספר החניות באותו השטח יגדל ב-147%. במידה ונבחר במנגנון ההנעה השני, הנעה באמצעות גלגלים, המכשיר יתפוס 0.4[m] מכל צד. לצורכי בטיחות נקצה מרחק של 0.2[m] בין מכשירים סמוכים. במקרה הזה המרחק הכולל בין שתי שורות חנייה סמוכות יהיה 1[m] כפי שניתן לראות באיור הבא:



איור 4.18: חלופה 2 – מרווח בין שורות.

במקרה הזה מספר החניות יהיה 1520 (76 חניות לאורך – שניים נוספות בכל טור למטרת כניסה ויציאה, 20 חניות לרוחב), יתקבלו 336 חניות יותר ומספר החניות באותו השטח יגדל ב-128%.

מלבד נתינת מענה למספר רב יותר של לקוחות, להגדלת מספר החניות יש גם היבט כלכלי. התעריף לחנייה ארוכת טווח בנתב"ג הוא 40 ₪ ליממה. נכפיל את זה ב-365 ימים בשנה ונקבל שחנייה בודדת בחניון ארוך טווח מכניסה לנתב"ג 14,600 ₪ בשנה. בפריסה שמנגנון ההנעה הוא מסילות סיפקנו 564 מקומות חנייה נוספים. מחישוב מתקבל שמקומות אלו יגדילו את הכנסת נתב"ג מחניון ארוך הטווח ב-8,234,400 ₪ בשנה מבלי להגדיל את שטחו! בפריסה שמנגנון ההנעה הוא גלגלים נספק אומנם פחות מקומות חנייה נוספים, 336 בסה"כ, אך עדיין נגדיל את ההכנסה ב-4,905,600 ₪.

#### 4.7. התייחסות לדרישה מס' 5: בטיחות

המטרה של דרישה זו היא למנוע פגיעה ברכבים או עוברי אורח בזמן פעולת המערכת. ניתן לראות בנספח ג' - "בטיחות המערכת" התייחסות לנושא זה בהרחבה. נבחן את הבדל בין החלופות השונות לנושא הבטיחות. חלופת המסילות מציעה פתרון "בטוח" יותר מכיוון שהמערכת מחוייבת לנוע בכיוון אחד ללא סטיות (קדימה ואחורה) בגלל תשתית המסילות. מנגד, בחלופת הגלגלים המערכת תנוע בכיוון אחד ללא סטיות רק בעזרת בקרים. בנוסף, בפתרון המסילות יש למקם רמפות (משטחים משופעים) בתאי הכניסה והיציאה מהחניון כדי שהרכבים יתרוממו לגובה הרצוי, ולכן יש למקם שילוט מתאים כדי למנוע תאונות באזורים אלו.

#### 4.8. התייחסות לדרישה מס' 4: זמן פעולת המערכת או זמן המתנת הלקוח

לא קיים שוני משמעותי בין החלופות במענה על דרישה זו. בשתי החלופות יש שימוש במנוע הרמה (זהה) ובמנוע הנעה (בעל ביצועי זמן דומים). נשים לב שבפתרון הגלגלים קיימת פעולה נוספת שיש לבצע בנוסף להרמה והנעה - מיקום את המוטות ("צוותות") מתחת לגלגלים בבטחה, פעולה שיש לקחת בחשבון בחישוב הזמנים. מהסתכלות במכשיר שמבצע את פעולה זו נראה שאורכה הוא כ-10 שניות.

#### 4.9. התייחסות לדרישה מס' 6: תשתית

פתרון המסילות נותן מענה טוב יותר עבור רוב הדרישות שהתייחסנו אליהם. דרישה מספר 6: תשתית - תקפה רק לחלופת המסילות. עבור חלופת הגלגלים אין צורך בתשתית.

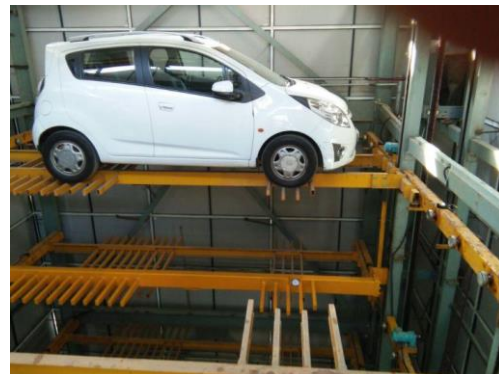
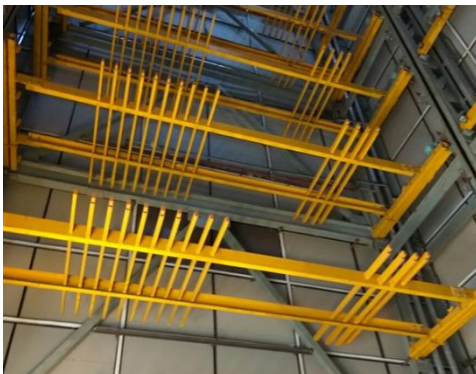
הצורך בתשתית הוא החסרון המרכזי של חלופת המסילות מסיבות שונות:

- (1) התשתית הופכת את הפתרון לנייח - מתאים רק לחניון ספיציפי.
- (2) התקנת התשתית לוקחת זמן, וזה יתבטא ברווחים (כפי שיפורט בפרק 7 – הערכה כלכלית).
- (3) עלות התשתית צפויה להיות גדולה מעלות המערכת כולה.

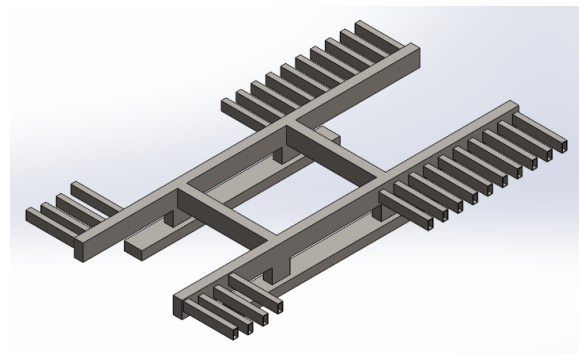
התשתית עבור חלופת המסילות כוללת מסילות ומעמדים. נפרט על כל רכיב בנפרד.

#### מעמדים לרכבים:

על מנת להעריך את העלות של המעמד בנינו דגם שלו ב-SolidWorks על בסיס מעמדי הרכבים במערכת החנייה האוטומטית של החברה הסינית Maoyuan, כפי שניתן לראות באיורים הבאים:



איור 4.19: מעמדי הרכבים במערכת החנייה האוטומטית של Maoyuan.



איור 4.20: דגם של המעמד.

בניית הדגם נעשתה תוך שימוש בגדלים הרלוונטיים לתכנון מעמד הרכב: רוחב, אורך מרכזים – מתייחס למרחק בין מרכזי הגלגלים, רוחב צמיג וקוטר צמיג.



איור 4.21: גדלים גיאומטרים רלוונטיים.

על מנת לענות על דרישה מספר 3- על המערכת להתאים לכל סוגי הרכבים המיועדים לה. גדלים אלו מופיעים בטבלה 1.1 שנמצאת במבוא.

הדגם בנוי מפלדת פחמן מסוג ST37-2 (שמות מקבילים: S235JR, Q235B, 1.0037), שהינה פלדה דלת פחמן בעלת מאמץ מותר של 37 ק"ג לממ"ר, אשר השימוש בה נפוץ במוטות בעלי פרופיל מלבני חלול הנקראים RHS (Rectangular Hollow Sections) המשמשים לרוב בקונסטרוקציות פלדה לבניה. הטבלה הבאה מרכזת את התכונות של פלדת ה-ST37-2:

טבלה 4.1: תכונות פלדת ST37-2.

יחידות	ערך	תכונה
MPa	235	מאמץ כניעה
MPa	360	מאמץ מירבי
Kg/m <sup>3</sup>	7800	צפיפות
GPa	210	מודול אלסטיות
-	0.28	מקדם פואסון

הטבלה 4.2 לקוחה מאתר האינטרנט של חברת "איסכור" ומרכזת את המידות הנפוצות של מוטות RHS. מטבלה זו נלקחו 2 פרופילים:

**באדום:** פרופיל 3 x 40 x 60 מ"מ אשר ישמש למוטות שמחזיקים את גלגלי הרכב.

**בירוק:** פרופיל 5 x 50 x 100 מ"מ אשר ישמש למוטות שמרכיבים את שלדת המעמד.

פרופילים אלו מופיעים בטבלה 4.3.

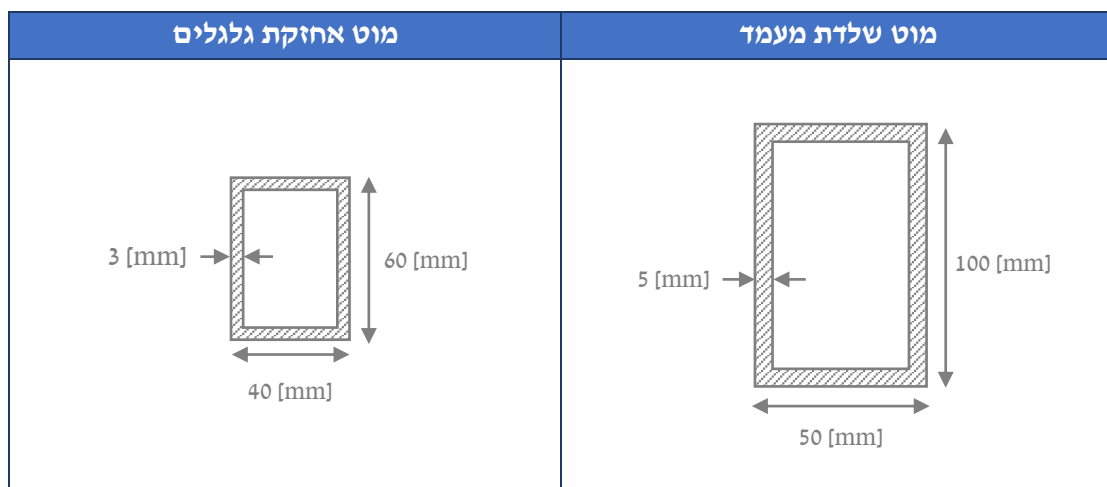


טבלה 4.2 : פרופילי מוטות RHS.

## RHS

מידות D x B mm	עובי t mm	משקל מטר M kg/m	שטח חתך A cm <sup>2</sup>	מומנט אנרגיה I		רדיוס אנרגיה r		מומנט התנגדות אלסטי Z		מומנט התנגדות פלסטי S		סקרמי מיתול		שטח פנים למטר אורך m <sup>2</sup>	כמות מטר לטון m
				x-x cm <sup>4</sup>	y-y cm <sup>4</sup>	x-x cm	y-y cm	x-x cm <sup>3</sup>	y-y cm <sup>3</sup>	x-x cm <sup>3</sup>	y-y cm <sup>3</sup>	מומנט אנרגיה למיתול cm <sup>4</sup>	מומנט התנגדות לפיתול cm <sup>3</sup>		
50 x 25	2.5*	2.72	3.47	10.5	3.44	1.75	1.00	4.25	2.75	5.41	3.25	8.41	4.62	0.145	368
	3.0*	3.22	4.10	12.2	3.89	1.73	0.98	4.88	3.11	6.30	3.77	9.64	5.21	0.144	311
	3.2*	3.41	4.34	12.8	4.05	1.72	0.97	5.11	3.24	6.64	3.96	10.1	5.42	0.143	294
50 x 30	2.5*	2.92	3.72	12.0	5.30	1.80	1.19	4.81	3.53	6.01	4.16	11.7	5.74	0.155	343
	3.0*	3.45	4.40	13.9	6.04	1.78	1.17	5.54	4.03	7.01	4.83	13.5	6.52	0.154	290
	3.2	3.66	4.66	14.5	6.31	1.77	1.16	5.82	4.21	7.39	5.08	14.2	6.81	0.153	274
	4.0*	4.46	5.68	17.0	7.25	1.73	1.13	6.80	4.83	8.81	6.01	16.6	7.79	0.151	224
	5.0*	5.40	6.88	19.5	8.13	1.68	1.09	7.79	5.42	10.4	6.98	19.0	8.71	0.149	185
60 x 40	2.5*	3.71	4.72	23.1	12.2	2.21	1.61	7.71	6.10	9.43	7.09	25.0	9.74	0.195	270
	3.0*	4.39	5.60	26.9	14.1	2.19	1.59	8.96	7.04	11.1	8.29	29.2	11.2	0.194	228
	3.2*	4.66	5.94	28.3	14.8	2.18	1.58	9.44	7.39	11.7	8.75	30.8	11.8	0.193	215
	4.0	5.72	7.28	33.6	17.3	2.15	1.54	11.2	8.67	14.1	10.5	36.6	13.7	0.191	175
	5.0*	6.97	8.88	39.2	20.0	2.10	1.50	13.1	10.0	16.8	12.4	43.0	15.8	0.189	143
	6.3*	8.49	10.8	45.1	22.6	2.04	1.45	15.0	11.3	19.9	14.6	49.7	17.7	0.186	118
80 x 40	3.0*	5.34	6.80	55.0	18.2	2.85	1.64	13.8	9.10	17.3	10.5	43.7	15.3	0.234	188
	3.2	5.67	7.22	58.1	19.1	2.84	1.63	14.5	9.56	18.3	11.1	46.1	16.1	0.233	177
	4.0	6.97	8.88	69.6	22.6	2.80	1.59	17.4	11.3	22.2	13.4	55.1	18.9	0.231	144
	5.0*	8.54	10.9	82.4	26.2	2.75	1.55	20.6	13.1	26.7	15.9	65.0	21.9	0.229	117
	6.3*	10.5	13.3	96.5	29.8	2.69	1.50	24.1	14.9	31.9	18.8	75.8	24.9	0.226	95.2
	8.0	12.8	16.3	111	33.1	2.61	1.42	27.7	16.6	37.8	21.8	86.3	27.6	0.223	78.1
90 x 50	3.0*	6.28	8.00	85.4	33.8	3.27	2.05	19.0	13.5	23.4	15.5	76.4	22.4	0.274	160
	3.6	7.48	9.50	99.8	39.1	3.24	2.03	22.2	15.6	27.6	18.1	89.3	25.9	0.272	135
	5.0	10.1	12.9	130	50.0	3.18	1.97	28.9	20.0	36.6	23.9	116	32.9	0.269	99.1
	6.3*	12.5	15.9	154	58.1	3.12	1.91	34.2	23.3	44.2	28.5	138	38.2	0.266	80.0
	8.0*	15.3	19.5	180	66.3	3.04	1.84	40.0	26.5	53.0	33.7	161	43.4	0.263	65.4
100 x 50	3.0*	6.75	8.60	111	37.1	3.59	2.08	22.2	14.8	27.6	16.9	88.3	25.0	0.294	149
	3.2	7.18	9.14	117	39.1	3.58	2.07	23.5	15.6	29.2	17.9	93.3	26.4	0.293	140
	4.0	8.88	11.3	142	46.7	3.55	2.03	28.4	18.7	35.7	21.7	113	31.4	0.291	113
	5.0	10.9	13.9	170	55.1	3.50	1.99	34.0	22.0	43.3	26.1	135	37.0	0.289	91.8
	6.3*	13.4	17.1	202	64.2	3.44	1.94	40.5	25.7	52.5	31.3	160	43.0	0.286	74.7
8.0*	16.6	21.1	238	73.5	3.36	1.86	47.6	29.4	63.1	37.1	187	49.1	0.283	60.2	

טבלה 4.3 : פרופילי המוטות.



כל מעמד שוקל [kg] 325. בפתרון מסילות קיימים 1794 מעמדים בחניון (כולל תאי הכניסה והיציאה). נכפיל ונקבל שמשקל המוטות הדרוש לכלל המעמדים בחניון הוא [ton] 583.

לפי Tianjin Boer King ו- Tangshan yuxuan, Liaocheng Huajian, שנחשבים לספקים אמינים מסין, עלות [ton] 1 מוטות RHS היא כ- [\$/ton] 500. לפיכך, מתקבל שהעלות בסה"כ של החומר עבור המעמדים היא \$291,500 - כ-0.3 מיליון דולר.

בנוסף, יש לבצע חיתוכים כדי לקבל את הגדלים הדרושים לבניית המעמדים ולאחר מכן יש לבצע ריתוכים ליצירת השלדה ולחיבור המוטות שמחזיקים את הגלגלים אליה.

נעריך שהעלות הכוללת של כל תהליך הבנייה היא כ-0.1 מיליון דולר נוספים ונקבל שעלות המעמדים היא כ-0.4 מיליון דולר.

### מסילות:

ישנם פרופילים וגדלים שונים של מסילות לצורך מגוון רחב של שימושים. הנחנו שהפרופיל שהכי מתאים למכשיר שלנו הוא הפרופיל בו נעשה שימוש במסילות ערגוני השער (gantry crane) - סוג של מנוף המשמש להובלה ושינוע חוץ מפעלית על גבי מסילות מעוגנות לרצפה. ערגוני שער שונים משמשים להרמת משקלים שונים. מסילות המכשיר שלנו נדרשות להרים משקל של עד [ton] 5, ולכן נסתכל על ערגון שער המיועד להרים משקל זה. בתמונה הבאה מופיע עורגן המיועד להרים משקל של עד [ton] 5.



איור 4.22: עורגן שער סטנדרטי של עד 5 טון.

טבלה 4.4 : פרטים טכניים של עורגני שער אירופיים סטנדרטים.

Technical Parameter of European Standard Gantry Crane

Capacity	t	3.2	5	10	16	20
Span	S(m)	12~30	12~30	12~30	12~30	12~30
Lifting height	m	6~12	6~12	6~12	6~12	6~12
Lifting speed	m/min	0.8/5	0.8/5	0.8/5	0.6/4	0.6/4
Trolley speed	m/min	2~20	2~20	2~20	2~20	2~20
Crane speed	m/min	3~30	3~30	3~30	3~30	3~30
Work duty		A4~A5	A4~A5	A4~A5	A4~A5	A4~A5
Track type		P24 P38	P24 P38	P38 P43	P38 P43	P43

הטור שמסומן באדום שייך לעורגן של ה- 5 [ton]. ניתן לראות שעבור עורגן המסילות המתאימות הן P24 ו- P38. הגדלים של המסילות נקבעים לפי יחס של קילוגרם למטר. P24 ו-P38 הן מסילות במשקלים של 24 ו- 38 ק"ג/מטר בהתאמה. בסין נהוג לחלק את המסילות הסטנדרטיות ל-3 קבוצות עיקריות לפי המשקל: Light Rail, Heavy Rail ו-Crane Rail, כפי שניתן לראות בטבלה הבאה :

טבלה 4.5 : חלוקת המסילות לקבוצות משקל לפי הסטנדרט הסיני.

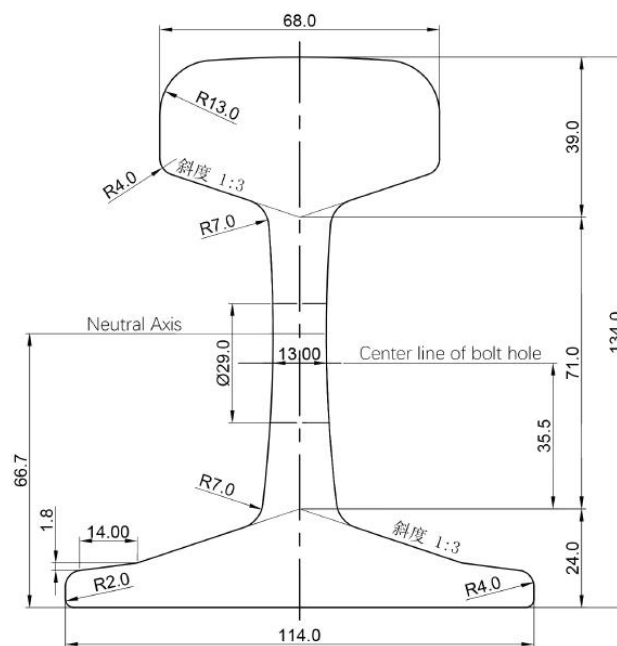
Name of Commodity	Specificaton	Materials	Theory Weight
Light Rail	4kg/m	Q235	4kg/m
	8kg/m	Q235	8.42kg/m
	12kg/m	Q235	12.2kg/m
	15kg/m	Q235/55Q/50Q	15.2kg/m
	18kg/m	Q235/55Q/50Q	18.02kg/m
	22kg/m	Q235/55Q/50Q	22.3kg/m
	24kg/m	Q235/55Q/50Q	24.46kg/m
Heavy Rail	30kg/m	Q235/55Q/50Q	30.1kg/m
	38kg/m	U71Mn/U71/45Mn	38.733
	43kg/m	U71Mn/U71/45Mn	44.653
Crane Rail	50kg/m	U71Mn/U71/45Mn	51.514
	QU70	U71Mn	52.8kg/m
	QU80		63.69kg/m
	QU100		88.96kg/m
QU120	118.1kg/m		

באופן כללי- ככל שהמסילה כבדה יותר כך היא מסוגלת לשאת משקלים גדולים יותר ובמהירות גבוהה יותר. אולם, היות ומסילות עשויות מפלדה איכותית לצורך עמידה בלחצים גבוהים, מדובר בהבדלי עלויות משמעותיים. על מנת לקבוע מהי המסילה האופטימאלית לפתרון החניה שלנו יש לבנות תחילה את המכשיר ולבצע חישובים מתאימים. לכן, בשלב זה נניח כי מדובר במסילת 38 ק"ג/מטר מקבוצת ה-Heavy Rail שמשמשת גם את עורגן השער שמרים משקל של עד 16 טון. להלן פרטי המסילה שנבחרה ושרטוט חתך שלה :

טבלה 4.6 : פרטי המסילה שנבחרה.

Parameters			
type	weight (kg/m)	material	length (m)
38kg	38.733	50Mn/U71Mn	12/12.5m
rail height (mm)	bottom width (mm)	head width (mm)	web thickness (mm)
134	114	68	13

	Size	Rail Height	Bottom Width	Head Width	Web Thickness	Weightkg/m
Heavy Steel Rail	38kg	134	114	68	13	38.733
	43kg	140	114	70	14.5	44.653
	50kg	152	132	70	15.5	51.514
	60kg	176	150	73	16.5	60.8
	75kg	192	150	75	20	74.64



איור 4.23 : שרטוט חתך של המסילה.

עבור כל שורה בחניון נצטרך 2 מסילות (משני צידי המעמדים לרכבים). אורך שורה בחניון הוא [m] 390. מהמפרט עולה כי המסילה שוקלת [kg/m] 38.733. מכאן שהמשקל של 2 המסילות לשורה הוא [kg] 30212. בחניון ישנן 23 שורות. נכפיל ונקבל כי כמות הפלדה הנדרשת למסילות היא: [ton] 695. לפי Shanghai Yueqi Industrial ו-Changsha Mining Equipment, שנחשבים לשני ספקים אמינים מסין, עלות [ton] 1 מסילת P38 היא [\$/ton] 700. לפיכך, מתקבל שהעלות בסה"כ של החומר עבור המסילות היא \$486,500 - כחצי מיליון דולר. המסילות מגיעות באורך של [m] 12 ליחידה. לאחר הנחתן במקום הרצוי יש לחבר אותן בעזרת ריתוך/הברגה. נעריך שהעלות הכוללת של כל תהליך הבנייה היא כ-0.1 מיליון דולר נוספים ונקבל שעלות המסילות היא כ-0.6 מיליון דולר.

#### סיכום תשתית:

הטבלה הבאה מסכמת את ההערכה הכללית של עלות התשתית בפתרון המסילות:

טבלה 4.7: סיכום הערכת עלות התשתית בפתרון המסילות.

תשתית	סוג חומר	כמות חומר [ton]	עלות חומר [מיליוני \$]	עלות בנייה [מיליוני \$]	עלות כוללת [מיליוני \$]
מעמדים	פלדת ST37-2	583	0.3	0.1	0.4
מסילות	פלדת U71Mn	695	0.5	0.1	0.6
סה"כ					1

קיבלנו שעלות התשתית הכוללת (מעמדים ומסילות) היא כ-מיליון דולר.

#### 4.10. התייחסות לדרישה מס' 10: חישוב כלכלי – כדאיות כלכלית

הדרישה החשובה ביותר הינה כדאיות כלכלית. סיכמנו עד כה 2 חלופות: מסילות וגלגלים.

עבור כל אחת מהן נעריך:

- הוצאות במהלך 20 שנות מוצר ראשונות (LCC): עלות מערכת, עלות התקנה, זמן התקנה ועלות אחזקה.
- הכנסות: כל פתרון מוסיף כמות שונה של חניות לאותו שטח חניון. נחשב את ההכנסות ממחיר חניות אלו.

הערות:

❖ פרק זה דן בהבדל העלויות בין שתי החלופות, ולכן עלויות שתקפות לשתי החלופות לא יחושבו בפרק זה אלא בפרק 7 - "הערכה כלכלית".

❖ החישובים יתבצעו/יומרו לדולר אמריקאי לשם השוואה שתבצע בהמשך עם פתרונות קיימים בשוק.

#### הוצאות במהלך 20 שנות מוצר ראשונות (LCC):

##### 1. עלות מערכת

לא קיים שוני משמעותי בעלות המערכת עצמה בין שתי החלופות, כלומר, השלדה, המנועים והגלגלים (גלגלי כביש או גלגלי מסילות) לא משנים את התקציב באופן משמעותי. לעומת זאת, לחלופת המסילות יש להוסיף עלות משמעותית נוספת – התקנת תשתית שכוללת מעמדים ומסילות, אשר פורטה בהרחבה בפרק הקודם. העלות המוערכת של תשתית זו היא כ- 1,000,000 US Dollars.

##### 2. עלות התקנה

התקנת חלופת הגלגלים דורשת זמן עבודה קצר שמוערך בכ-3 חודשים ומעט פועלים. לעומת זאת, חלופת המסילות דורשת התקנת תשתית, זמן העבודה המוערך הוא כ-6 חודשים, ונדרשים פועלים/חברה שמוסמכים להתקין מסילות. ההבדל בין עלויות ההתקנה מוערך בכ- 200,000 US Dollars יותר עבור חלופת המסילות.

##### 3. זמן התקנה

בזמן התקנת המערכת החניון לא יהיה פעיל, החניות לא יהיו בשימוש, הכנסת החניון תפגע, וייתכן והנהלת נתב"ג תצטרך להפעיל חניון חלופי זמני. התקנת התשתית תשבית גם את החניות המיועדות לחניון החדש וגם את החניות באזור לידם. נעריך שפתרון המסילות ישבית את 1,184 החניות המיועדות לפרוייקט ועוד 400 חניות באזור. ניקח בחשבון שזמן ההתקנה עבור חלופת מסילות הוא 6 חודשי עבודה, לעומת חלופת גלגלים שדורשת 3 חודשי עבודה. מחישוב זה מתקבל כי ההוצאה עבור חלופת המסילות מוערכת ב- 3,282,848 US Dollars, לעומת ההוצאה עבור חלופת הגלגלים שמוערכת ב- 1,226,923 US Dollars. לכן, עבור חלופת המסילות ההוצאה גדולה ב- 2,055,925 US Dollars.

##### 4. עלות אחזקה

מכיוון שאנו מבצעים חישוב לטווח של 20 שנה יש לחשב את עלויות האחזקה. נהוג להעריך שעלות האחזקה השנתית היא כ- 6% מעלות המערכת. עלות פתרון המסילות גדול ב- 1,000,000 US Dollars מעלות פתרון הגלגלים. לכן, ההבדל בעלויות האחזקה בין שני הפתרונות במשך 20 שנה הוא: 1,200,000 US Dollars. לא נחשב את העלות שנובעת מתשלום למפעילי החניון מכיוון שכמות המפעילים שדרושים לשתי החלופות זהה.

#### הכנסות:

נחשב את ההכנסות במשך 20 שנה. חלופת המסילות מוסיפה לחניון 564 חניות, בעוד שחלופת הגלגלים מוסיפה 336 חניות בלבד. כיום, עלות השימוש בחנייה הינה 40 ש"ח ליממה (עלייה במחיר, שעלולה לקרות במשך השנים, תטיב עם חלפות המסילות). חניון נתב"ג לטווח ארוך פועל בתפוסות גבוהות מאוד, ולכן נעריך ממוצע תפוסה שנתי של 90%. ההכנסה שתקבל מחלופת המסילות במשך 20 שנה היא: 42,694,096 US Dollars, לעומת ההכנסה מחלופת הגלגלים שתעמוד על: 25,434,780 US Dollars. הפרש ההכנסה בין שתי החלופות הינו: 17,259,316 US Dollars.

#### רווחיות:

כדי להעריך את הבדל הרווחים בין שתי החלופות במשך 20 שנה נסכם את ההוצאות וההכנסות. עבור חלופת המסילות, ההוצאות מוערכות ב- 4,255,925 US Dollars יותר מחלופת גלגלים. לעומת זאת, הכנסות חלופת המסילות גדולות ב- 17,259,316 US Dollars מאלו של חלופת הגלגלים. לכן, מחישוב כלכלי נובע שחלופת המסילות ריווחית יותר ב- 13,003,391 US Dollars למשך 20 שנה. במידה ומחיר החנייה עבור לקוח יעלה, חלופת מסילות תיהיה ריווחית אפילו יותר בהשוואה לחלופת הגלגלים.

### **4.11 סיכום דיון בחלופות**

כלל החלופות למערכת הצטמצמו לשתיים, שכל חלופה עונה על הדרישות בצורה שונה. נרצה לסכם את השוני בין שתי החלופות לצורך בחירת החלופה המתאימה ביותר לדרישות המערכת.

הדרישות הבאות הגדירו את החלופות:

- ✓ דרישה מס' 1: הרמה והורדה של רכבים בטווח משקלים מוגדר
- ✓ דרישה מס' 2: הנעת מערכת הכוללת רכב מורם
- ✓ דרישה מס' 3: התאמה לגדלים גיאומטריים שונים של רכבים יעודים למכשיר
- ✓ דרישה מס' 7: מקור אנרגיה נייד – ללא חיבור לקו חשמל
- ✓ דרישה מס' 8: חיבור מנגנונים מיטבי

קיים שוני שולי במענה של החלופות לדרישות הבאות:

- ✓ דרישה מס' 4: זמן פעולת המערכת או זמן המתנת הלקוח
- ✓ דרישה מס' 5: בטיחות – למנוע מהמערכת לעבוד בסביבת נהגים

קיים שוני משמעותי בדרישות שקשורות לתחום הכלכלי, אשר מסתכמות בדרישה מספר 10:

- ✓ דרישה מס' 6: תשתית
- ✓ דרישה מס' 9: רוחב מקסימלי בין טורים
- ✓ דרישה מס' 10: חישוב כלכלי – כדאיות כלכלית

אחד מהפרמטרים המרכזיים שמשפיעים על הכדאיות הכלכלית של החלופה הוא מספר מקומות החנייה שהיא מספקת. החישוב המלא של מספר מקומות החנייה שמספקת כל חלופה בשטח הנבחר מחניון ארוך הטווח בנתב"ג מופיע בפרק זה. טבלה 4.8 מציגה את מספר מקומות החנייה שהתקבלו עבור כל אחת מהחלופות ביחד עם המצב הקיים (מספר מקומות החנייה בשטח הנבחר כיום). ההבדל בין החלופות נובע מהמרווח השונה בין שורות החנייה- המסילות מצריך שטח תפעול קטן יותר ולכן ניתן להקצות מרווח קטן יותר בין שורות החנייה.

טבלה 4.8 : מספר החניות בשטח הנבחר שמספקות החלופות השונות.

הנעה	מרווח בין שורות חנייה	מס' חניות	מס' חנויות שנוספו	אחוז גידול החניות
ללא	-	1184	-	-
גלגלים	1 [m]	1520	336	28%
מסילות	0.5 [m]	1748	564	47%

בטבלה 4.8 ניתן לראות ששתי החלופות מגדילות את מספר החניות בצורה משמעותית לעומת המצב הקיים. מלבד נתינת מענה למספר רב יותר של לקוחות, להגדלת מספר החניות יש גם היבט כלכלי. התעריף לחנייה ארוכת טווח בנתב"ג הוא 40 ₪ ליממה. נכפיל את זה ב-365 ימים בשנה ונקבל שחנייה בודדת בחניון ארוך טווח מכניסה לנתב"ג 14,600 ₪ בשנה. בפריסה שמנגנון ההנעה הוא מסילות סיפקנו 564 מקומות חנייה נוספים. מחישוב מתקבל שמקומות אלו יגדילו את הכנסות נתב"ג מחניון ארוך הטווח ב- 8,234,400 ₪ בשנה מבלי להגדיל את שטחו! בפריסה שמנגנון ההנעה הוא גלגלים נספק אומנם פחות מקומות חנייה נוספים, 336 בסה"כ, אך עדיין נגדיל את ההכנסה ב- 4,905,600 ₪.

בשלב זה נראה כי החלופה של המסילות מנצחת ניצחון מוחץ מבחינת הכדאיות כלכלית, אך חשוב לזכור שפתרון זה, בשונה מפתרון הגלגלים, מצריך תשתית (מעמדים ומסילות) שמייקרת אותו מאוד. חישוב כלכלי מפורט מופיע תת פרק 4.10 - בחישוב זה נלקחו בחשבון ההכנסות וההוצאות של כל אחת מהחלופות במהלך 20 שנות המוצר הראשונות (LCC) ועל ידי חיסור בין השניים התקבלה הריווחיות. נמצא כי הריווחיות של חלופת המסילות למשך 20 שנה גדולה יותר מהריווחיות של חלופת הגלגלים ב- 13,003,391 US Dollars.

ננסה לכמת את חשיבות המענה ל-3 הדרישות המרכזיות: כדאיות כלכלית, זמן המתנת לקוח ובטיחות המשקלים יהיו כדלקמן:

- כדאיות כלכלית: 50%
- זמן המתנת הלקוח: 30%
- בטיחות: 20%





איור 4.24: חשיבות המענה לדרישות מרכזיות שונות.

באיור 4.24 ניתן לראות כי חלופת המסילות עונה בצורה טובה יותר על 3 הדרישות המרכזיות: היא ריווחית יותר, מספקת זמן המתנה קצר יותר ובטיחותית יותר. לכן, נבחר בחלופה זו.

## 5. תכן רעיוני מפורט של המערכת

באיור 5.1 ניתן לראות תרשים המתאר את התכן הרעיוני של פתרון החנייה, הכולל 6 שלבים מרכזיים. במסגרת הפרוייקט (בדיקת היתכנות) נבצע תכן למרכיב המייקר את המערכת והוא השלב הראשון בתכן – תכנון מעמד חנייה לרכב. משלב זה ניתן להעריך בצורה טובה את עלות המערכת.



איור 5.1: תרשים התכן הרעיוני של הפרוייקט.

להלן פירוט של 6 שלבים התכן המרכזיים :

1. תכנון מעמד חניה לרכב- תכנון זה מבוסס על עמידה במשקל רכב מקסימאלי (מטווח הרכבים שמיועדים למכשיר) עם מקדם ביטחון מתאים, תוך שימוש בכמות חומר מינימאלית על מנת להוזיל עלויות. שלב זה בוצע. החישובים שהתבצעו לצורך תכנון המעמד הם חישובי חוזק סטטים : אנליטיים וסימולציה, על מנת להגיע לתוצאות אמינות ככל הניתן. בנוסף, התבצעה התאמה של המעמד לכל טווח הרכבים המיועדים למכשיר (לרוחבם, לאורכם, לקוטר ועובי הצמיגים שלהם וכו').
2. תכנון מעמדי כניסה ויציאה- תכנון זה הוא המשך ישיר של תכנון מעמד החניה. פרופילי המוטות שירכיבו את מעמד החניה ישמשו גם עבור תכנון מעמדים אלו. התוספת בתכנון זה היא רמפה שתאפשר לרכב לעלות למעמד (במעמד כניסה) או לרדת ממנו (במעמד יציאה). מעמדי הכניסה והיציאה יהיו זהים זה לזה למעט הרמפה שבכל מקרה תהיה בכיוון שונה : בכניסה- מאחורה, ביציאה : מקדימה. בתכנון הרמפה יתבצעו חישובי חוזק, אנליטיים וסימולציה, על מנת לוודא שהיא עומדת במשקל הרכב המקסימאלי. כמו כן, שיפוע הרמפה יצטרך לעמוד בתקן הקיים.
3. תכנון צבתות אחיזה- גם תכנון זה מתבסס על תכנון מעמד החניה. פרופיל מוטות האחיזה של הצבתות והרווח בין המוטות יהיו זהים לאלו שקיימים במעמד החניה. אורך מוטות האחיזה יקבע לפי רוחב הצמיגים של הרכבים המיועדים. עבור תכנון זה יתבצעו שתי סימולציות חוזק דינמית. הסימולציה הראשונה היא עבור ההרמה וההורדה של הרכב. ההערכה היא שתוצאות סימולציה זו לא יהיו שונות בהרבה מאלו שהתקבלו עבור הסימולציה הסטטית, מכיוון שתהליך ההורדה וההרמה של הרכבים הוא איטי (מטעמי בטיחות) והתאוצות הן נמוכות. הסימולציה השנייה שתבצע היא עבור התנועה הקווית של המכשיר כאשר מונח עליו רכב. ייתכן שבעקבות סימולציה זו נצטרך לשנות מעט את מיקומי מוטות האחיזה של הגלגלים הקידמיים של הרכב על מנת למנוע החלקה שלו.
4. תכנון מנגנון הרמה/הורדה- תכנון זה, ביחד עם תכנון מנגנון ההנעה, הם התכנונים המורכבים ביותר במערכת. תכנון זה יכלול תמסורת שמורכבת מגלגלי שיניים ורצועות שתפקידה להעביר את המומנט מהמנוע החשמלי (או המנועים במידת הצורך) לתנועה קווית של צבתות האחיזה (כלפי מעלה ומטה). התכנון יתבסס על מנגנון ההרמה הקיים של פתרון החניה שנקרא מכפיל (ראה פרק 2), אך צפויים להתבצע שינויים היות ובמכפיל התמסורת היא ניחת ואילו המכשיר שלנו נמצא בתנועה.
5. תכנון מנגנון הנעה- תכנון זה יכלול תמסורת נוספת שתפקידה להעביר את המומנט מהמנוע לגלגלים שינועו על מסילה, ויתבסס על מנגנון ההנעה הקיים בעגורן שער (ראה איור 4.22). בנוסף, יש לבצע חישובי חוזק שבאמצעותם נבחר את סוג המסילה וסוג הגלגלים המתאימים.
6. חיבור המנגנונים ובניית השלדה- שלב זה מגיע לאחר שהושלם התכנון המכאני של שני המנגנונים (ההרמה/הורדה וההנעה). בשלב זה יתבצע חיבור של המנגנונים ויתבצעו שינויים במידת הצורך. לאחר שהחיבור יושלם יתבצע תכנון של שלדת המכשיר תוך ביצוע חישובי החוזק הרלוונטים.

כמו שצויין במטרות הפרוייקט, במסגרת פרוייקט זה נבצע רק את השלב הראשון בתכן, שהינו השלב החשוב ביותר לקבלת הערכה כלכלית של המערכת. כדי לבצע את שישה שלבי התכן יש להשקיע כמות שעות החורגת מכמות השעות שהקצנו לפרוייקט על פי דרישת האוני'. משיחות עם המנחה עלתה אופציה כי סטודנטים אחרים ימשיכו את פיתוח הרעיון המקורי שלנו במסגרת פרוייקט גמר בשנים הבאות.

## 6. אנליזת חוזק

### 6.1. הגדרת הבעיה

כדי לענות על דרישת החוזק מהמערכת, יש לתכנן את אותה כך שתעמוד בעומסים הסטטיים שיפעלו עליה. העומסים המקסימליים יתקבלו על הקורות במעמדים (חלק מהתשתית), כפי שניתן יהיה לראות בסימולציית החוזק בהמשך.

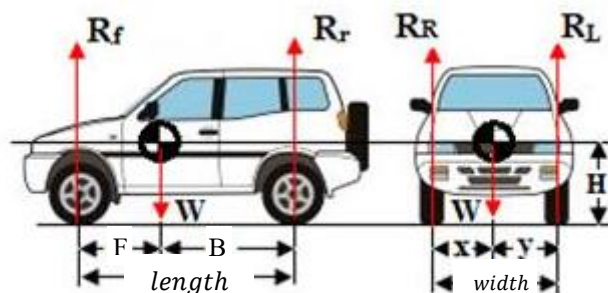
על המערכת מועמסים משקלים שונים של רכבים, במשך כל שעות היום. נבחר ברכב בעל משקל מקסימלי מטווח המשקלים שהתקבל בנספח אי' – "גיאומטריית רכבים הרלוונטים לחניון", שהינו  $1700 [kg]$ .

$$W = mg = 1700 \cdot 9.81 = 16.667 [kN] \quad (6.1)$$

בנוסף, מאותו הפרק נבחר גם את אורך המרכזים ורוחב הרכב המקסימליים לקבלת מקרה קיצון.

- רוחב =  $1.854 [m]$  יסומן בשם width.
- אורך מרכזים =  $2.7 [m]$  יסומן בשם length.

בכל הרכבים מרכז הכובד נמצא במרכז קו הרוחב של הרכב, אך לא בהכרח במרכז קו האורך של הרכב.



איור 6.1: מיקום מרכז הכובד.

$$x = y \quad (6.2)$$

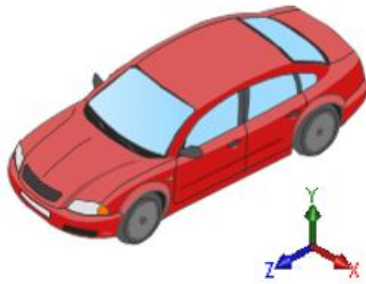
$$F \neq B \quad (F + B = length) \quad (6.3)$$

○ בחלק זה לא נתייחס לגובה מרכז הכובד.

### הגדרת מערכת צירים

נגדיר את כיווני הצירים כך:

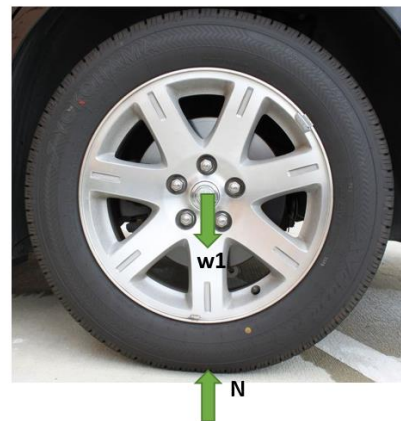
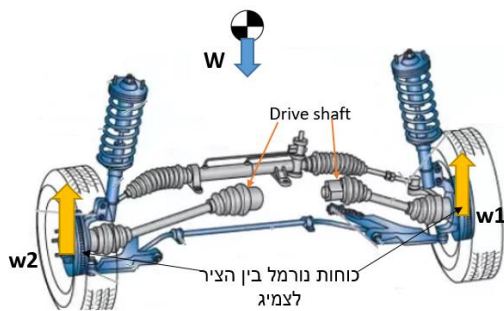
- ציר  $x$  – לכיוון רוחבו של הרכב.
- ציר  $y$  – לכיוון גובהו של הרכב.
- ציר  $z$  – לכיוון אורכו של הרכב.



איור 6.2: קביעת מערכת צירים.

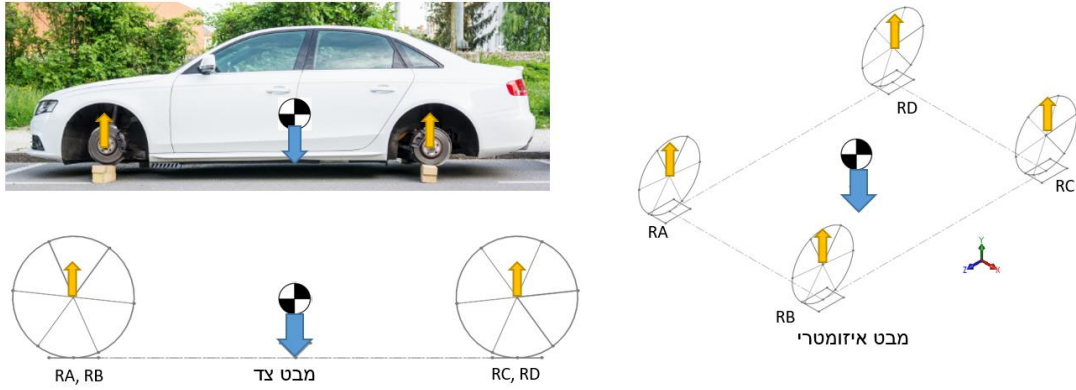
### פילוג כוחות בין משטחי המגע

לצורך החישוב, נציג את הרכב כשני גופים: גלגלים וגוף הרכב. כל גלגל (צמיג) נמצא במגע עם משטח ונוצר כוח ריאקציה שהמשטח מפעיל על הגלגל. באיור מצד ימין ניתן לראות את שיוויון הכוחות בגלגל:  $N=w_1$ . הגלגל מחובר לרכב בחיבור לא קשיח, כך שהוא נושא במעמסי הכוחות, אך באפשרותו להסתובב (חיבור ל-drive shaft). באיור בצד שמאל ניתן לראות את אותו  $w_1$  בגוף הרכב, ומשוויון כוחות על גוף הרכב ניתן לחשב את  $w_1, w_2, w_3, w_4$  (לא נראים באיור) שבחיבורם שווים למשקל הרכב  $W$ .



איור 6.3: כוחות ריאקציה במגע בין צמיג לכביש/ציר לגלגלים.

באיור 6.4 ניתן לראות את מיקום מרכז הכובד (מסומן בעיגול עם חץ כלפי מטה). המשטחים שמתחת לגלגלים נמצאים במגע עם גלגלי הרכב. באיור זה מיקום מרכז הכובד נמצא בדיוק במרכז ארבעת הגלגלים, אך במציאות מרכז הכובד בדרך כלל נוטה מעט לכיוון קידמת הרכב.



איור 6.4: כוח ריאקציה עבור כל גלגל.

מסימטריה סביב ציר  $z$ , נסיק כי כוחות הריאקציה בין צידי הרכב שווים.

$$RA = RB, RD = RC \quad (6.4)$$

○ נבחר לפתור את כוחות הריאקציה בסמכים  $D, A$ .

ניקח בחשבון רק מצב סטטי. נשתמש בחוק השני של ניוטון בכיוון ציר  $Y$  כאשר התאוצה שווה ל-0:

$$\Sigma Y = 0 \quad (6.5)$$

$$RA + RD = 0.5W \quad (6.6)$$

הגלגל יכול להסתובב חופשי סביב ציר  $x$  בלי להפעיל מומנט על הרכב בגלל חיבור לציר הגלגלים. לכן, סמכי הריאקציה לא "יחזיקו" מומנט סביב ציר  $x$ .

$$\Sigma M_{RA} = \Sigma M_{RD} = 0 \quad (6.7)$$

$$length \cdot RD = 0.5a \cdot W \quad (6.8)$$

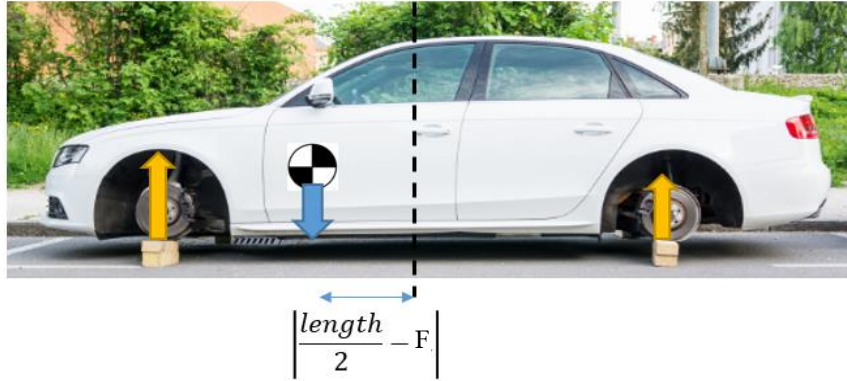
מחיבור המשוואות:

$$RD = RC = 0.5 \frac{F}{length} \cdot W \quad (6.9)$$

$$RA = RB = 0.5W - 0.5 \frac{F}{length} \cdot W = 0.5W \left(1 - \frac{F}{length}\right) \quad (6.10)$$

### כוח ריאקציה מקסימלי

כוח ריאקציה מקסימלי יתקבל כאשר הביטוי המתאר את מרחק מרכז הכובד האמצע המרחק בין מרכזי גלגלי הרכב יהיה מקסימלי.



איור 6.5: מיקום מרכז המסה לאורך הרכב.

נבחר מקרה נפוץ בו מרכז השטח לא נמצא על קו האמצע. יגרום לכוח ריאקציה גדול יותר. נניח:

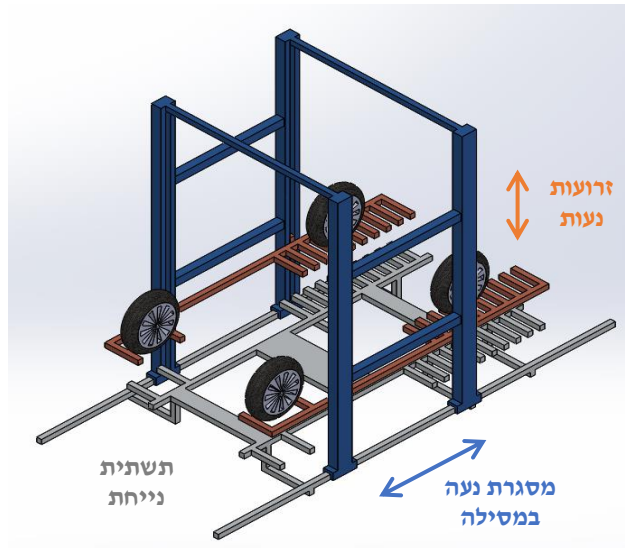
$$\frac{F}{length} = 0.25 \quad (6.11)$$

כוח ריאקציה מקסימלי יתקבל כאשר 75% ממשקל הרכב יתחלק בין שני כוחות הריאקציה בקדמת הרכב.

$$R_{max} = R_A = R_B = 0.5W \left( 1 - \frac{F}{length} \right) = 6.25 [kN] \quad (6.12)$$

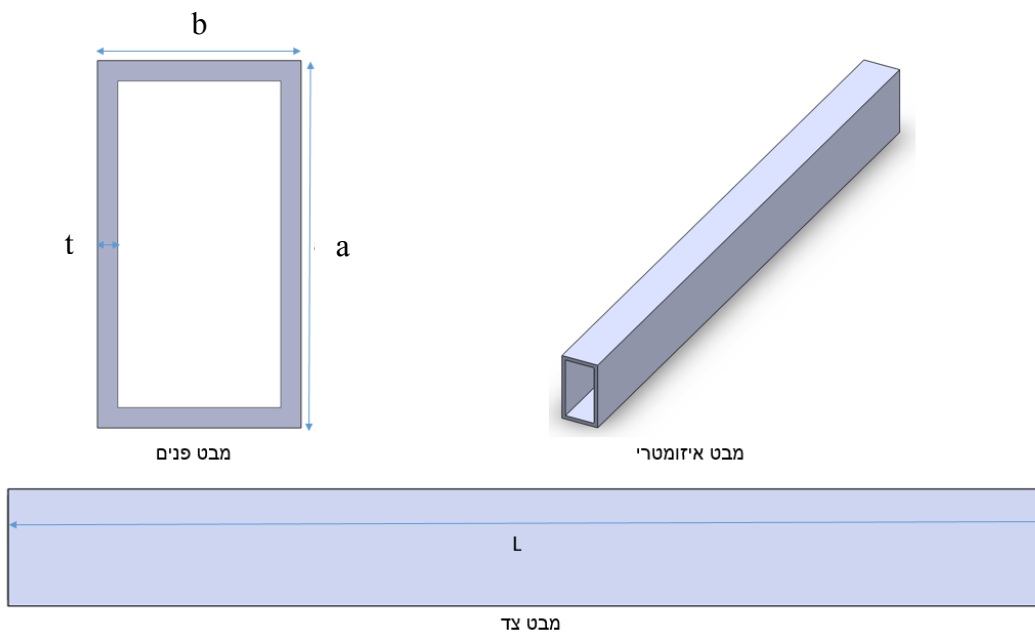
### צורת המוטות

כפי שניתן לראות במידול המערכת (איור 6.6), כאשר הרכב מונח על המעמד הוא מוחזק על ידי מוטות המעמד (חלק אפור), וכאשר הוא בתהליך הרמה/הורדה – הוא מוחזק על ידי הזרועות הנעות (חלק חום).



איור 6.6: מידול המערכת והתשתית.

באיור הבא ניתן לראות תיאור של קורה בודדת:



איור 6.7: פרמטרים רלוונטים לתכנון קורה.

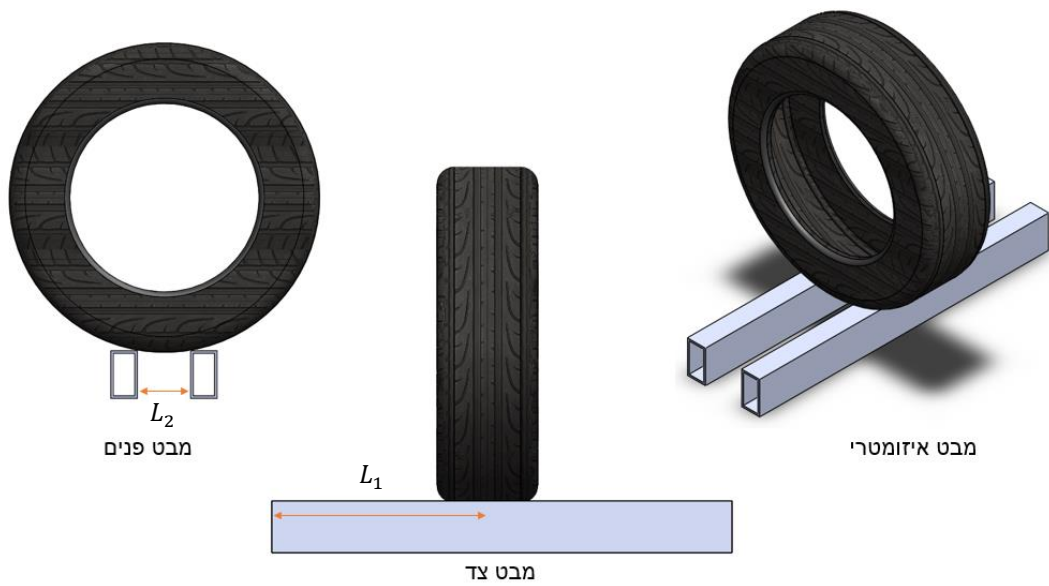
פרמטרים:

a – גובה הקורה.

b – רוחב הקורה.

t – עובי הקורה.

כל גלגל (צמיג) בא במגע עם 2 קורות צמודות, כפי שניתן לראות באיור הבא:

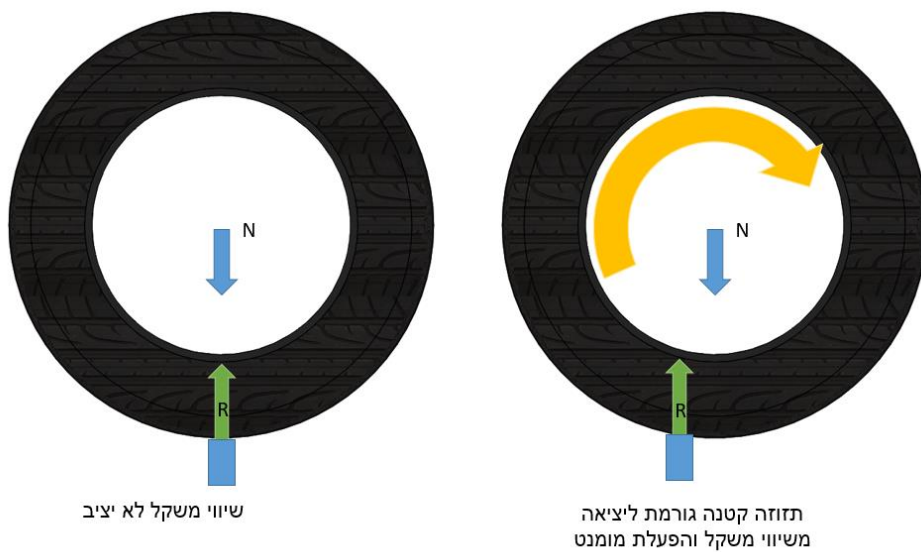


איור 6.8: תיאור נוסף לפרמטרים רלוונטים בתכנון קורה.

פרמטרים:

- $L_1$  – האורך מנקודת החיבור למרכז הצמיג.
- $L_{2f}/L_{2b}$  – המרווח בין קורות (לא בין מרכזי הקורות). המרווח בין זוג קורות קידמי שונה מאחורי.

חשיבות המרחק בין הקורות



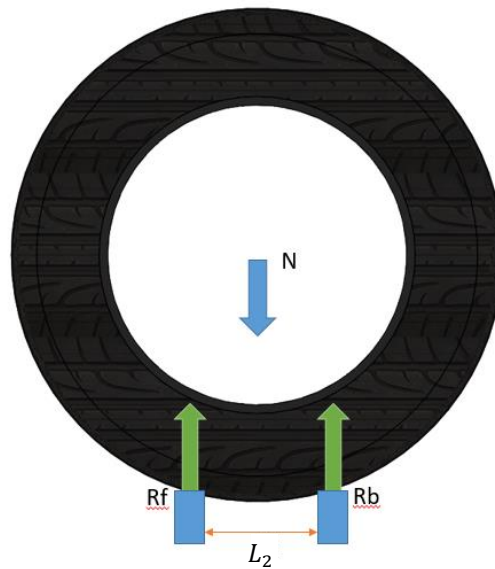
איור 6.9: תיאור הפעלת מומנט במצב שיווי משקל לא יציב.



חלק ממשקל הרכב מופעל ממרכז הגלגל כלפי מטה. כוח ריאקציה שפועל כנגד כיוון המשקל ועל אותו ציר פעולה יוצר שיווי משקל לא יציב בין שני הגופים, הנגרם כתוצאה מצורתו העגולה של הצמיג. ברגע הפעלת כוח נוסף/תנועה בכיוון ציר  $z$  - הגלגל יצא משיווי משקל.

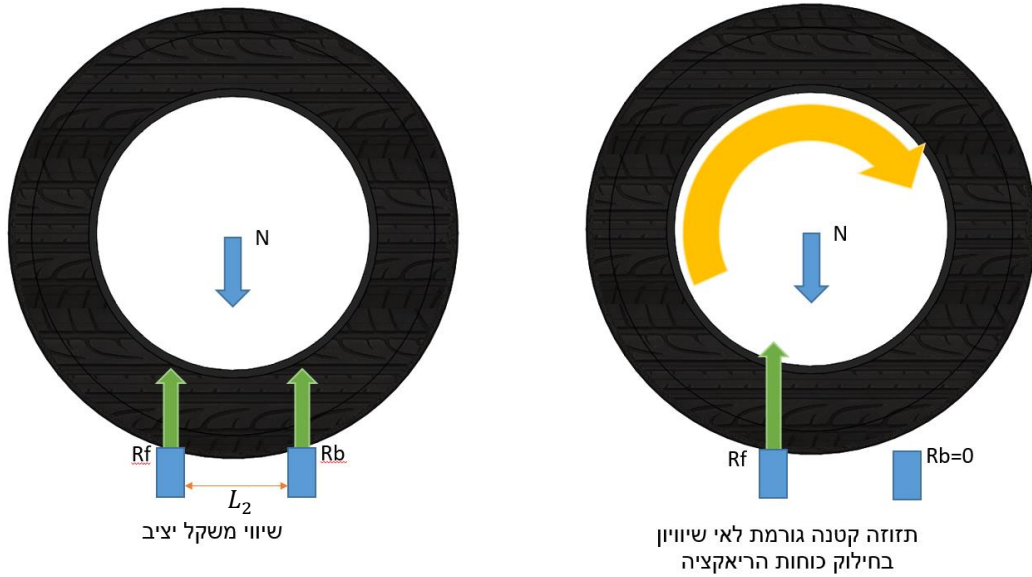
- הערה: הצמיג משנה את צורתו במגע עם משטח (מפורט מהמשך) לכן כן קיים כוח חיכוך בכיוון ציר  $z$ . לא נתחשב בכוח חיכוך זה.

כדי לגרום למערכת להיות יציבה נתכנן ריאקציה מ-2 קורות צמודות, כפי שניתן לראות באיור הבא:



איור 6.10: תיאור שיווי משקל יציב.

נתכנן את הקורות במרחק שווה ממרכז הגלגל כך שלא יפעל מומנט על מרכז הגלגל במצב שיווי משקל. ברגע תזוזה של הגלגל בכיוון  $z$  (כתוצאה מהפעלת כוח/תאוצת המכשיר) כוח הריאקציה יגדל על אחד מהמוטות ויקטן באחר. ברגע זה יופעל מומנט שיגרום לגלגל לחזור למקומו המקורי, כפי שניתן לראות באיור 6.11 (כאשר המומנט הוא החץ הצהוב).



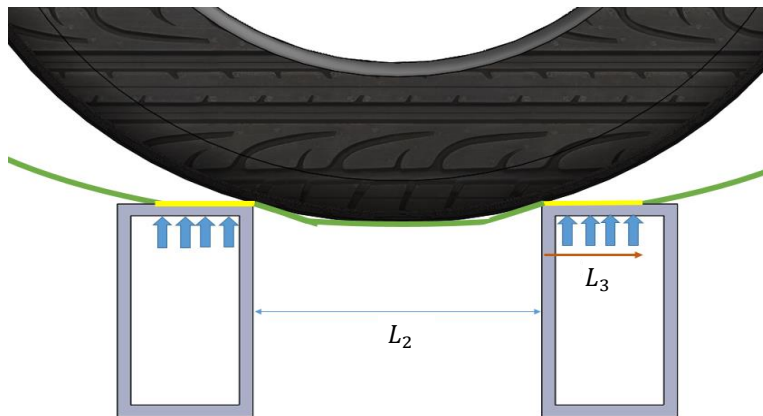
איור 6.11: תיאור הפעלת מומנט במצב שיווי משקל יציב.

התפלגות כוחות הריאקציה

צורתו של הצמיג משתנה בגלל גמישותו ברגע שהוא בא במגע עם משטח. הקו הירוק באיור 6.12 מדמה את צורתו של הצמיג לאחר המגע עם הקורות. הקו הצהוב באותו איור מסמל את שטח המגע בין הצמיג לקורות. בשטח זה יפעלו כוחות ריאקציה. נניח שכוחות אלו מתפלגים באופן אחיד ונסמן את שטח המגע בסימן  $St$ . ערכו של שטח המגע הוא:

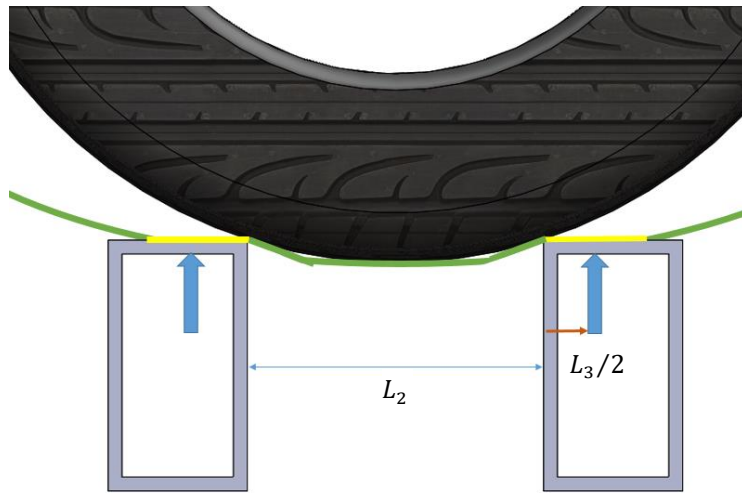
$$St = \text{רוחב צמיג} \cdot L_3 \tag{6.13}$$

לכלל החישובים נבחר ברוחב צמיג ממוצע (הלקוח מטבלה 1.1 במבוא – גדלים גיאומטריים של רכבים עבור הפרויקט):  $203 \text{ [mm]}$ .



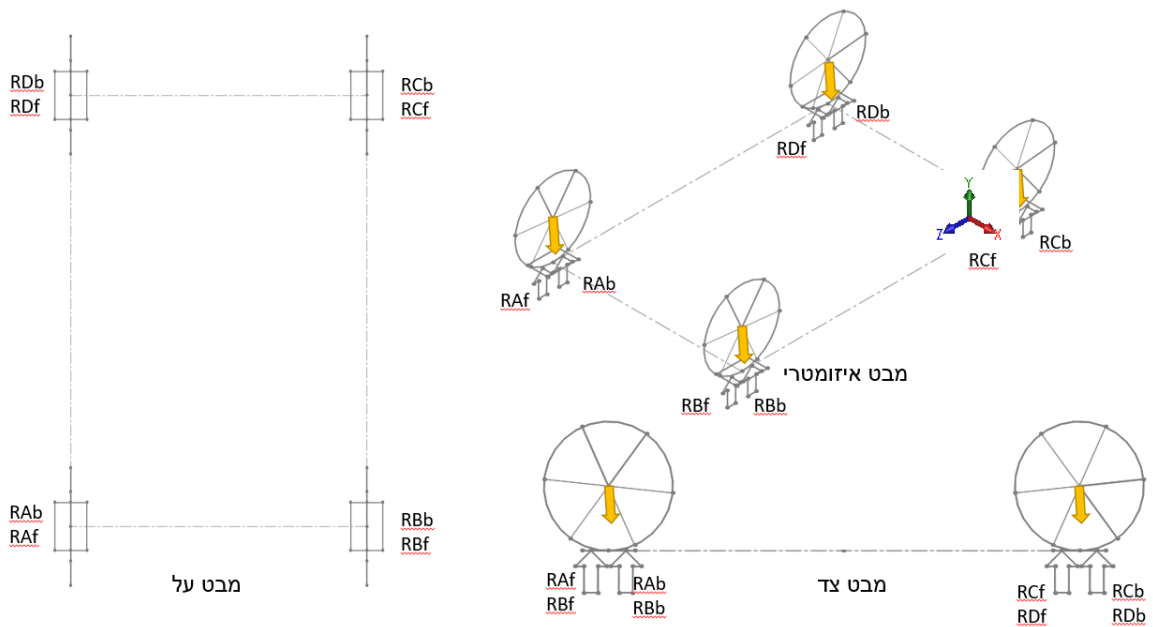
איור 6.12: כוח נורמל מתפרס לאורך שפת הקורה.

בשביל לחשב דיאגרמת גוף חופשי – נחשב את הכוח המרוכז במשטחי המגע.



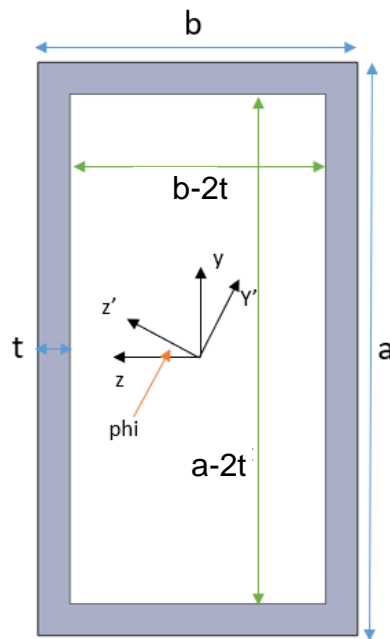
איור 6.13: כוח נורמל מרוכז על שפת הקורה.

נציג דיאגרמת גוף חופשי עם מערכת צירים:



איור 6.14: דג"ח עם מערכת צירים (מבט איזומטרי).

חישוב מומנטי אינרציה של הקורה



איור 6.15: חתך הקורה לחישוב מומנט אינרציה.

נחשב את מומנט האינרציה סביב ציר z על ידי סופרפוזיציה של שני מלבנים:

$$I_{zz} = \frac{b \cdot a^3}{12} - \frac{(b - 2t) \cdot (a - 2t)^3}{12} \quad (6.14)$$

במקרה שהכוח שגורם לכפיפה אינו מאונך לציר z - יש לסובב את המערכת. נניח שהכוח פועל במאונך לציר z', ונחשב את  $I_{yy}$ ,  $I_{yz}$  על מנת לחשב את  $I_{z'z'}$ .

$$I_{yy} = \frac{a \cdot b^3}{12} - \frac{(a - 2t) \cdot (b - 2t)^3}{12} \quad (6.15)$$

$$I_{yz} = I_{zy} = 0 \quad (6.16)$$

סיבוב מערכת צירים:

$$I_{z'z'} = I_{zz} \cdot (\cos\varphi)^2 + I_{yy} \cdot (\sin\varphi)^2 - I_{yz} \cdot 2 \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi \quad (6.17)$$

וכאשר:  $I_{yz} = I_{zy} = 0$

$$I_{z'z'} = I_{zz} \cdot (\cos\varphi)^2 + I_{yy} \cdot (\sin\varphi)^2 \quad (6.18)$$

חישוב מומנט אנרציה לפיתול של הקורה :

בחתך לא עגול מומנט האנרציה לפיתול שונה מהמומנט הפלורי. לכן, נשתמש בטבלה 6.1 המציגה פרופילי חתך שקיימים בשוק עם מומנטי האינרציה לפיתול שלהם (מסומן בכתום).

טבלה 6.1 : מומנטי אינרציה לפיתול של פרופילי חתך שונים.

RHS															
מידות D x B mm	עובי t mm	משקל מטר M kg/m	שטח חתך A cm <sup>2</sup>	מומנט אנרציה I		רדיוס אנרציה r		מומנט התנגדות אלסטי Z		מומנט התנגדות פלסטי S		מקדמי פיתול		שטח מיוס למטר אורך m <sup>2</sup>	כמות מטר לסוק m
				x-x cm <sup>4</sup>	y-y cm <sup>4</sup>	x-x cm	y-y cm	x-x cm <sup>3</sup>	y-y cm <sup>3</sup>	x-x cm <sup>3</sup>	y-y cm <sup>3</sup>	מומנט אנרציה לפיתול cm <sup>4</sup>	מומנט התנגדות לפיתול cm <sup>3</sup>		
50 x 25	2.5*	2.72	3.47	10.5	3.44	1.75	1.00	4.25	2.75	5.41	3.25	8.41	4.62	0.145	368
	3.0*	3.22	4.10	12.2	3.89	1.73	0.98	4.88	3.11	6.30	3.77	9.64	5.21	0.144	311
	3.2*	3.41	4.34	12.8	4.05	1.72	0.97	5.11	3.24	6.64	3.96	10.1	5.42	0.143	294
50 x 30	2.5*	2.92	3.72	12.0	5.30	1.80	1.19	4.81	3.53	6.01	4.16	11.7	5.74	0.155	343
	3.0*	3.45	4.40	13.9	6.04	1.78	1.17	5.54	4.03	7.01	4.83	13.5	6.52	0.154	290
	3.2	3.66	4.66	14.5	6.31	1.77	1.16	5.82	4.21	7.39	5.08	14.2	6.81	0.153	274
	4.0*	4.46	5.68	17.0	7.25	1.73	1.13	6.80	4.83	8.81	6.01	16.6	7.79	0.151	224
60 x 40	5.0*	5.40	6.88	19.5	8.13	1.68	1.09	7.79	5.42	10.4	6.98	19.0	8.71	0.149	185
	2.5*	3.71	4.72	23.1	12.2	2.21	1.61	7.71	6.10	9.43	7.09	25.0	9.74	0.195	270
	3.0*	4.39	5.60	26.9	14.1	2.19	1.59	8.96	7.04	11.1	8.29	29.2	11.2	0.194	228
	3.2*	4.66	5.94	28.3	14.8	2.18	1.58	9.44	7.39	11.7	8.75	30.8	11.8	0.193	215
	4.0	5.72	7.28	33.6	17.3	2.15	1.54	11.2	8.67	14.1	10.5	36.6	13.7	0.191	175
	5.0*	6.97	8.88	39.2	20.0	2.10	1.50	13.1	10.0	16.8	12.4	43.0	15.8	0.189	143
80 x 40	6.3*	8.49	10.8	45.1	22.6	2.04	1.45	15.0	11.3	19.9	14.6	49.7	17.7	0.186	118
	3.0*	5.34	6.80	55.0	18.2	2.85	1.64	13.8	9.10	17.3	10.5	43.7	15.3	0.234	188
	3.2	5.67	7.22	58.1	19.1	2.84	1.63	14.5	9.56	18.3	11.1	46.1	16.1	0.233	177
	4.0	6.97	8.88	69.6	22.6	2.80	1.59	17.4	11.3	22.2	13.4	55.1	18.9	0.231	144
	5.0*	8.54	10.9	82.4	26.2	2.75	1.55	20.6	13.1	26.7	15.9	65.0	21.9	0.229	117
	6.3*	10.5	13.3	96.5	29.8	2.69	1.50	24.1	14.9	31.9	18.8	75.8	24.9	0.226	95.2
8.0	12.8	16.3	111	33.1	2.61	1.42	27.7	16.6	37.8	21.8	86.3	27.6	0.223	78.1	

## 6.2. חילוק המשקל בין הקורות

גלגלים קדמיים

נדרוש מזוג הקורות במרכז לעמוד בפני משקל הרכב ללא התחשבות בזוג הקורות הרחוקות. ז"א שעל כל קורה לשאת בחצי מכוח הריאקציה.

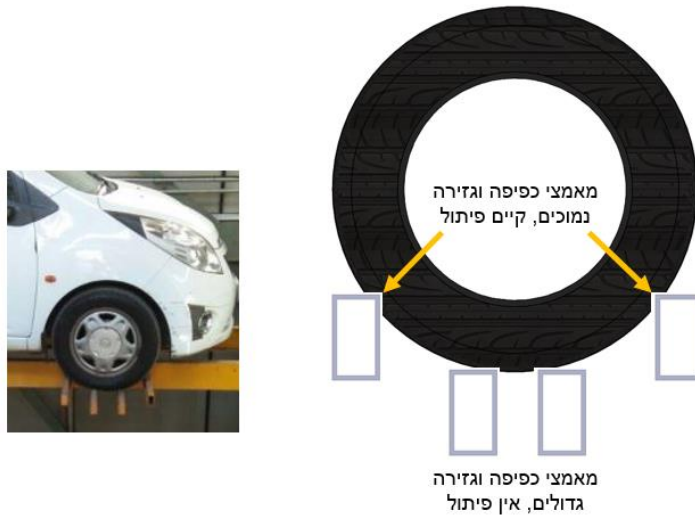
$$r_1 = R/2 = 3.12[kN] \quad (6.19)$$

נניח שכוח זה פועל במרכז של כל קורה – ז"א  $\frac{L_3}{2} = b/2$ , לכן לא פועל עליהן פיתול.

מזוג הקורות הרחוקות נדרוש שיעמדו בחלק מכוח הריאקציה (נבחר רבע) אשר פועל לא במרכז הקורה ולכן

$$\frac{L_3}{2} = b/4 \text{ - נניח. גורם לפיתול הקורה.}$$

$$r_2 = R/4 = 1.56[kN] \quad (6.20)$$

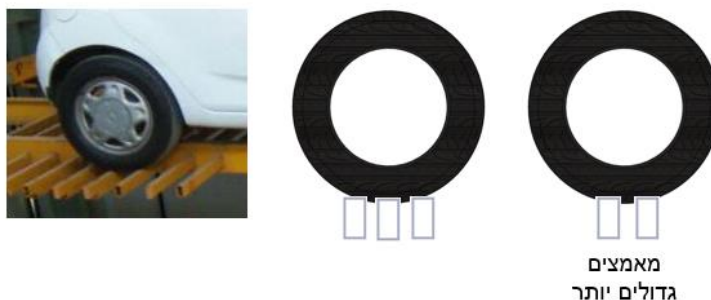


איור 6.16: תיאור המגע בין הצמיגים לקורות המעמד בקידמת הרכב.

### גלגלים אחוריים

הקורות בגלגלים האחוריים הינן זהות וממוקמות באותו גובה, ולכן לא נתייחס למאמצי הפיתול בקורות אלו. נניח כי כוח הריאקציה מתחלק בין 2 או 3 קורות. חישובי חוזק מתבצעים עבור מאמצים מקסימליים, ולכן ניקח את מקרה הקיצוני בו הכוח מתחלק בין 2 קורות בלבד. חישובי החוזק זהים לקורות הקידמיות הפנימיות.

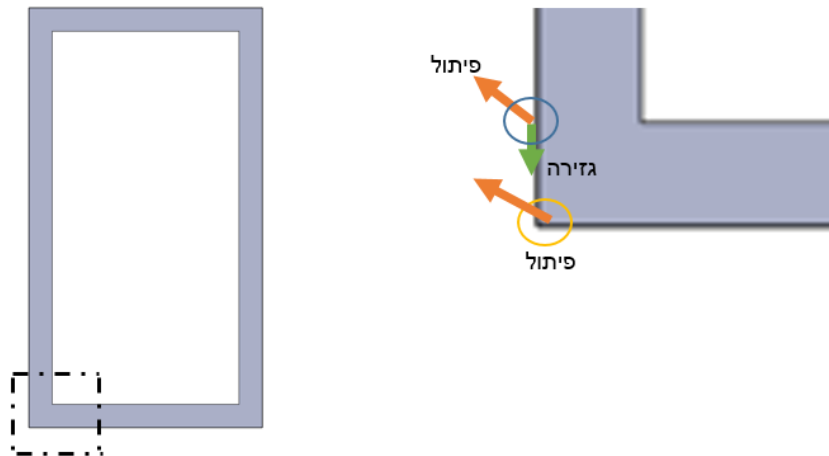
$$r_1 = R/2 = 3.12[kN] \quad (6.21)$$



איור 6.17: תיאור המגע בין הצמיגים לקורות המעמד באחורי הרכב.

### 6.3. נקודות קריטיות

נקודה קריטית הינה נקודה אשר מועמדת להיות הנקודה בה יתקבלו המאמצים המקסימליים ובה יתרחש הכשל. בנקודות הקריטיות פועלים מאמצים שונים, אשר כל אחד מהם בנפרד הוא לא בהכרח המקסימלי, אך יש לבדוק אם שקלול המאמצים הוא מקסימלי. באיור 6.18 ניתן לראות שתי נקודות קריטיות (מסומנות בעיגולים). בעיגול הצהוב – נקודה עם מאמצי הכפיפה והפיתול מקסימליים, אך לא קיימים מאמצי גזירה. בעיגול הכחול – נקודה עם מאמצי הכפיפה והפיתול כמעט מקסימליים וקיימים גם מאמצי גזירה. נקודה קריטית נוספת נמצאת במרכז הקורה, שם מתקבלים מאמצי גזירה מקסימליים.



איור 6.18: נקודות קריטיות להתפתחות מאמצים מקסימליים.

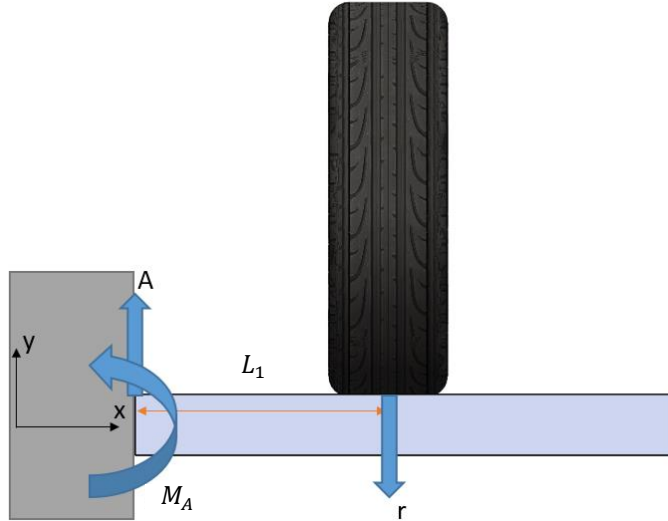
נצפה מהנקודה התחתונה להמצא קרוב יותר למרכז הקורה מכיוון שקיימת העגלה לפינות הקורה שלא נלקחת בחשבון בפרק זה, אך בסימולציה כן.

### 6.4. חישוב מאמצים

#### 6.4.1. מאמצי כפיפה

המאמצים המקסימליים יתפתחו בחתך חיבור/ריתום הקורה למעמד. מתיחה (יסומן כמאמץ חיובי) מקסימלית תתקבל בשפה העליונה של הקורה וכפיפה (יסומן כמאמץ שלילי) מקסימלית תתקבל בשפה התחתונה של הקורה. חישוב המאמץ המקסימלי ממאמצי כפיפה יחושב על פי:

$$\sigma_{xx} = -\frac{M \cdot b/2}{I_{zz}} \quad (6.22)$$



איור 6.19: דג"ח על קורה בודדת – התפתחות מאמצי כפיפה.

חישוב כוחות ריאקציה:

$$M_A = L_1 \cdot r \quad (6.23)$$

$$A = r \quad (6.24)$$

○ עבור תכן ראשוני נבחר  $L_1=0.25[m]$  מתוך השוואה למערכות דומות.

לחיצה מקסימלית:

לחיצה מקסימלית תתקבל בשפה התחתונה של הקורה.

$$\sigma_{xx} = -\frac{r \cdot L_1 \cdot b/2}{I_{zz}} \quad (6.25)$$

מתיחה מקסימלית:

מתיחה מקסימלית תתקבל בשפה העליונה של הקורה.

$$\sigma_{xx} = \frac{r \cdot L_1 \cdot b/2}{I_{zz}} \quad (6.26)$$

מרכז הקורה:

במרכז הקורה לא קיימים מאמצי כפיפה מסימטריה.



### 6.4.2. מאמצי גזירה

מאמצי הגזירה פועלים לאורך אזור המאמצים (בין הגלגל לחיבור) באופן שווה.

$$\sigma_{xy} = \frac{V(x) \cdot Q(y)}{b(y) \cdot I_{zz}} \quad (6.27)$$

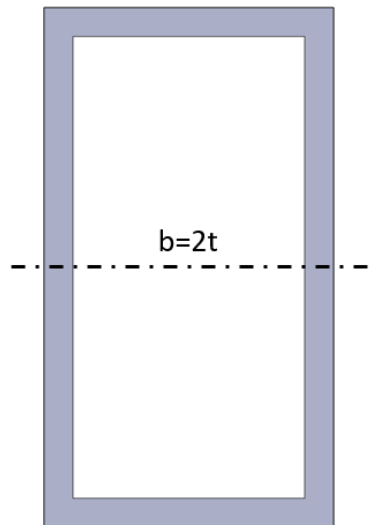
כוח הגזירה שווה לאורך הקורה והחתך לא משתנה לאורך הקורה, ולכן אין משמעות לבחירת חתך ספציפי לחישוב.

$$V(x) = r \quad (6.28)$$

מאמץ הגזירה המקסימלי יתקבל בנקודה בה היחס  $\frac{Q(y)}{b(y)}$  יהיה מקסימלי.  $t$  – עובי הקורה הינו קטן מאוד

יחסית ל-  $a$  ו-  $b$ , ולכן מאמץ הגזירה המקסימלי יתקבל בנקודה  $b(y = 0) = 2t$ .

מאמצי גזירה מקסימליים במרכז הקורה:



איור 6.20: קו גובה – אמצע הקורה להתפתחות מאמצי גזירה מקסימליים.

חישוב מומנט אינרציה מסדר ראשון:

$$Q(y) = C_y \cdot A_p \quad (6.29)$$

נחשב ע"י סופרפוזיציה של קורה מלאה וקורה חסרה.

$$Q_{y=0} = \left(\frac{a}{2} \cdot b\right) \cdot \frac{a}{4} - \left(\frac{a-2t}{2}\right) \cdot (b-2t) \cdot \left(\frac{a-2t}{4}\right) \quad (6.30)$$

$$Q_{y=0} = \frac{1}{8} \cdot (4abt - 4bt^2 + 2a^2t - 8at^2 + 8t^3) \quad (6.31)$$

נצמצם מכפלות ב-  $t^2, t^3$  - מכיוון שעובי הקורה קטן מאוד ביחס לגובה ורוחב הקורה  $t \ll b, t \ll a$ .

$$Q_{y=0} = \left(\frac{ab}{2} + \frac{a^2}{4}\right)t \quad (6.32)$$

נשים לב כי לא קיימים מאמצי כפיפה במרכז בחתך.

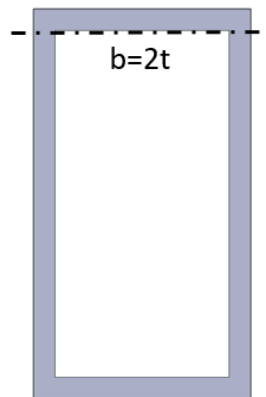
$$\sigma_{xy(y=0)} = \frac{r \cdot \left(\frac{ab}{2} + \frac{a^2}{4}\right)t}{2t \cdot \left(\frac{b \cdot a^3}{12} - \frac{(b-2t) \cdot (a-2t)^3}{12}\right)} \quad (6.33)$$

בנקודה הקריטית הצהובה – לא קיימים מאמצי גזירה:

בשפה העליונה לא קיים מומנט אינרציה מסדר ראשון -  $Q_{y=a/2} = 0$ , מכיוון שאינטגרל של כל השטח ביחס למרכז שווה לאפס.

בנקודה הקריטית הכחולה:

ערכו של  $b(y)$  קטן יחסית ושווה ל- $2t$ .



איור 6.21: גובה מקסימלי בו מתפתחים מאמצי גזירה עבור עובי דק.

חישוב מומנט אינרציה מסדר ראשון :

$$Q(y) = C_y \cdot A_p \quad (6.34)$$

$$Q_{y=\frac{a}{2}-t} = (b \cdot t) \cdot \left(\frac{a-t}{2}\right) = \frac{1}{2} \cdot (a \cdot b \cdot t - b \cdot t^2) \quad (6.35)$$

נצמצם מכפלות ב  $t^2$  - מכיוון שעובי הקורה קטן מאוד ביחס לגובה ורוחב הקורה  $t \ll b, t \ll a$ .

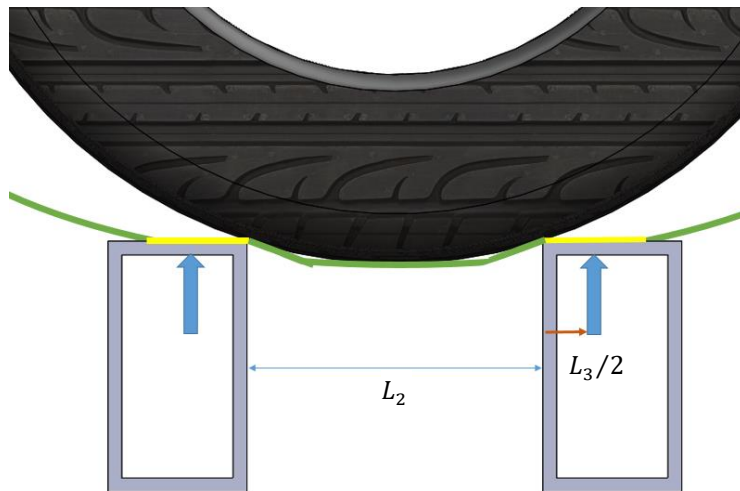
$$Q_{y=\frac{a}{2}-t} = \frac{1}{2} \cdot (a \cdot b \cdot t) \quad (6.36)$$

$$\sigma_{xy-p} = \frac{r \cdot \frac{1}{2} \cdot (a \cdot b \cdot t)}{2t \cdot \left(\frac{b \cdot a^3}{12} - \frac{(b-2t) \cdot (a-2t)^3}{12}\right)} \quad (6.37)$$

○ הערה : מאמצי הגזירה פותחו במצב בו כוח (משקל הרכב) פועל בכיוון אנכי לקורה. ההשפעה של שינוי כיוון הפעולה על מאמצי הגזירה לא נלקחה בחשבון מכיוון שמאמצים אלו נמוכים ביחס למאמצי הכפיפה.

### 6.4.3 מאמצי גזירה מפיתול

מומנט הפיתול מושפע מ-  $L_3/2$ . ככל שמרכז פעולת הכוח רחוק יותר ממרכז הקורה כך מומנט הפיתול גדול יותר.

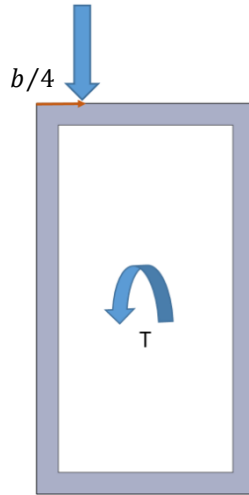


איור 6.22: מאמצי פיתול כאשר מיקום הכוח המרוכז אינו במרכז.

נחשב את מומנט הפיתול שפועל על הקורה, כאשר הוגדר הקשר -  $\frac{L_3}{2} = b/4$

חישוב מומנט הפיתול:

$$T = \left(\frac{b}{2} - \frac{L_3}{2}\right) \cdot r = \frac{b}{4} \cdot r \quad (6.38)$$



איור 6.23: התפתחות מומנט בקורה.

מאמץ הגזירה המתקבל מפיתול יחושב על פי:

$$\tau_p = \frac{T \cdot r}{I_{Torsion}} \quad (6.39)$$

נקודה קריטית צהובה:

$$\tau_p = \frac{T \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}}{I_{Torsion}} \quad (6.40)$$

מרכז הקורה:




$$\tau_{y=0} = \frac{T \cdot \frac{b}{2}}{I_{Torsion}} \quad (6.41)$$

## 6.5. חישוב מאמץ מקסימלי מותר לפי קריטריון כשל

### מאמצים בקורות האחוריות

עבור הקורות האחוריות חושבו המאמצים ב-2 נקודות קריטיות: מרכז הקורה ופינת הקורה, כפי שניתן לראות בטבלה 6.2. הנקודה הקריטית שמסומנת בעיגול כחול באיור 6.18 נפסלה מכיוון שהמאמצים שהתפתחו בה היו קטנים מאלו בפינת הקורה (הנקודה שמסומנת באותו איור בעיגול צהוב).



טבלה 6.2: חישוב המאמצים בנקודות הקריטיות של הקורות האחוריות.

	
$\sigma_{xx} = 0$	<b>מאמצי כפיפה:</b> (6.42)
	
$\sigma_{xy(y=0)} = \frac{r_1 \cdot \left( \frac{a \cdot b}{2} + \frac{a^2}{4} \right) t}{2t \cdot \left( \frac{b \cdot a^3}{12} - \frac{(b-2t) \cdot (a-2t)^3}{12} \right)}$	<b>מאמצי גזירה:</b> (6.43)
	
$\sigma_{xx-p} = \frac{r_1 \cdot L_1 \cdot b/2}{I_{zz}'}$	<b>מאמצי כפיפה:</b> (6.44)
$\sigma_{xy-p} = 0$	<b>מאמצי גזירה:</b> (6.45)

### מאמצים בקורות הקידמיות-חיצוניות

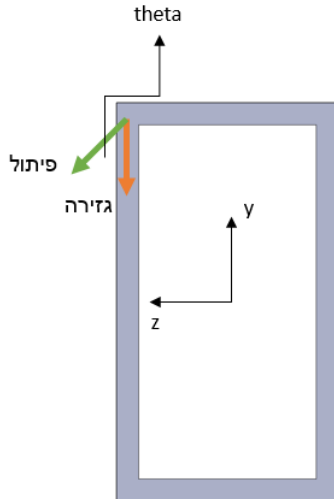
גם עבור הקורות הקידמיות-חיצוניות חושבו המאמצים באותן 2 נקודות קריטיות: מרכז הקורה ופינת הקורה, כפי שניתן לראות בטבלה הבאה:

טבלה 6.3 : חישוב המאמצים בנקודות הקריטיות של הקורות הקידמיות-חיצוניות.

 <b>מרכז הקורה</b>	
$\sigma_{xx} = 0$	<b>מאמצי כפיפה :</b> (6.46)
$\sigma_{xy(y=0)} = \frac{r_2 \cdot \left( \frac{a \cdot b}{2} + \frac{a^2}{4} \right) t}{2t \cdot \left( \frac{b \cdot a^3}{12} - \frac{(b-2t) \cdot (a-2t)^3}{12} \right)}$	<b>מאמצי גזירה :</b> (6.47)
$\tau_{y=0} = \frac{T \cdot b}{I_{Torsion}}$	<b>מאמצי גזירה מפיתול :</b> (6.48)
 <b>פינת הקורה</b>	
$\sigma_{xx-p} = \frac{r_2 \cdot L_1 \cdot b/2}{I_{zz}'}$	<b>מאמצי כפיפה :</b> (6.49)
$\sigma_{xy-p} = 0$	<b>מאמצי גזירה :</b> (6.50)
$\tau_p = \frac{T \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}}{I_{Torsion}}$	<b>מאמצי גזירה מפיתול :</b> (6.51)

מערכת צירים וכיוון פעולת המאמצים

על מנת להשתמש בקריטריון von-mises יש להציג את מאמצי הגזירה המתקבלים מפיתול (במקרה של כוח אנכי) במערכת צירים xyz.



איור 6.24: זווית בין מאמצי גזירה ופיתול.

○ עבור פינה זו מאמצי הגזירה מקסימליים בחיבור עם מאמצי גזירה המתקבלים מפיתול.

מאמץ הגזירה המתקבל מפיתול אינו מתלכד עם הצירים. הזווית בינו לבין ציר y:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (6.52)$$

כך שטנזור המאמצים יהיה:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} + \tau \cdot \cos \theta & \tau \cdot \sin \theta \\ \sigma_{xy} + \tau \cdot \cos \theta & 0 & 0 \\ \tau \cdot \sin \theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.53)$$

### קרטריון כשל

נבחן את המערכת על פי קריטריון von-mises – כפי שנהוג להשתמש עבור מתכות.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{yy})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)]} \quad (6.54)$$

במקרה שלנו:

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_{xx})^2 + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2)} \quad (6.55)$$

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_{xx})^2 + 3((\sigma_{xy} + \tau \cdot \cos \theta)^2 + (\tau \cdot \sin \theta)^2)} \quad (6.56)$$

#### טווח מקדמי בטחון (FoS)

מקדם הביטחון מציג פי כמה המערכת חזקה מהמינימום שנדרש ממנה. לשימושים וחומרים שונים קיים מקדם ביטחון שונה, שנקבע בועדת תקנים. לפי מידע ברשת, נהוג להשתמש במקדם ביטחון בין 3-4 עבור מכשירים המיועדים להרמת משקלים כבדים [11].

$$\text{Factor of Safety} = \frac{\text{yield stress}}{\text{working stress}} \quad (6.57)$$

בפרק 4.9 המתייחס לתשתית המערכת, נמצא פירוט על בחירת החומר המתאים למעמדים – פלדת ST37-2 בעלת מאמץ כניעה  $\sigma_{yield} = 235 \text{ MPa}$ . חישוב מאמץ מותר:

$$\sigma_v - LCL = \frac{\text{yield stress}}{\text{Factor of Safety}} = \frac{235 \text{ MPa}}{4} = 58.75 \text{ MPa} \quad (6.58)$$

$$\sigma_v - UCL = \frac{\text{yield stress}}{\text{Factor of Safety}} = \frac{235 \text{ MPa}}{3} = 78.33 \text{ MPa} \quad (6.59)$$

#### פרופילי קורה נבחרים

ניתן למצוא מאמצים מותרים שונים התלויים ב-3 פרמטרים:  $t, a, b$ . נרצה ליצור קורה בעלת שטח חתך קטן ככל האפשר.

$$A = a \cdot b - (a - 2t) \cdot (b - 2t) = 4t \cdot (a + b) - 4t^2 \quad (6.60)$$

הקורות שהתקבלו הן קורות צרות וגבוהות בעלות מומנט אינרציה  $I_{zz}$  גבוה, שגורם לכך שמאמצי הכפיפה, שהם המאמצים העיקריים במערכת, יהיו קטנים.

$$\sigma_{xx} = \frac{r1 \cdot L1 \cdot \left(\frac{b}{2} \downarrow\right)}{(I_{zz} \uparrow)} \quad (6.61)$$



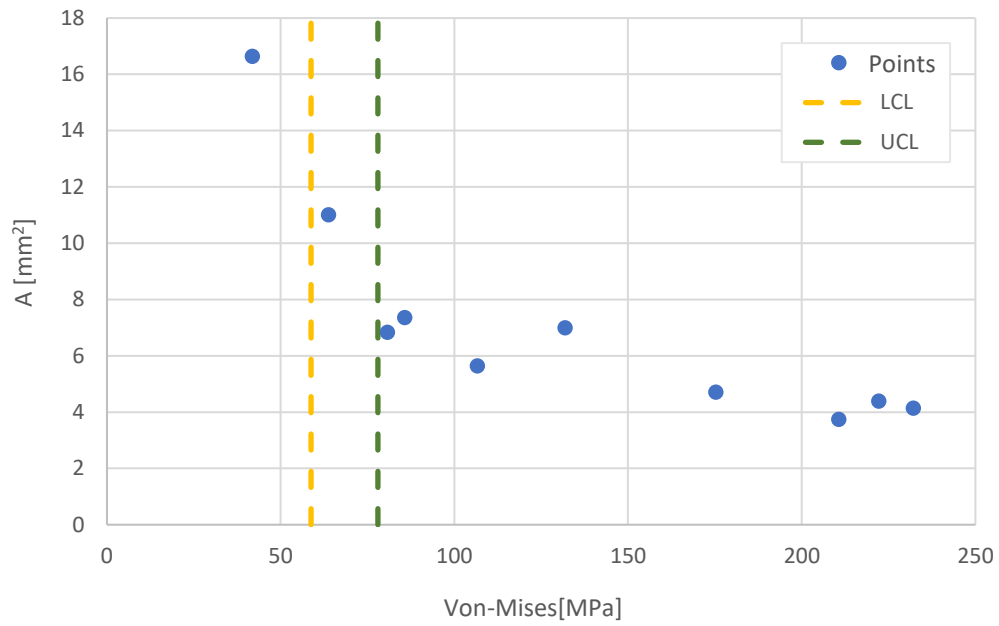
### המאמץ השקול המקסימלי כנגד שטח החתך

כפי שנראה במפורש בהמשך, הקורות שחו את המאמצים המקסימליים הינם הקורות האחוריות שבהן העומס התחלק בין 2 קורות בלבד, בשונה מקדמת הרכב שם יותר קורות התחלקו בעומס. הנקודה הקריטית בה התקבלו המאמצים המקסימלים היא פינת הקורה. בטבלה הבאה ניתן לראות פרופילי חתך שונים עם חישוב המאמץ השקול המקסימלי בנקודה זו על פי קריטריון וון מיזס.

טבלה 6.4 : מאמץ שקול מקסימלי לפי וון מיזס עבור פרופילי חתך שונים.

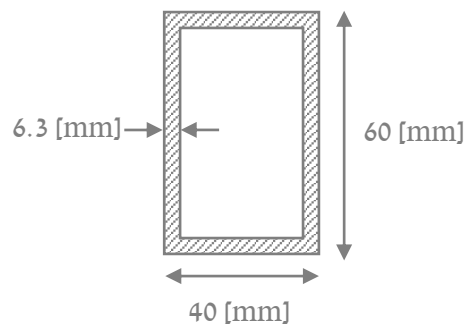
A [mm <sup>2</sup> ]	a [cm]	b [cm]	t [mm]	Von-Mises [MPa]
4.14	5.0	2.5	3.0	232.19
4.39	5.0	2.5	3.2	222.24
3.75	5.0	3.0	2.5	210.65
4.71	5.0	3.0	3.2	175.26
7.00	5.0	3.0	5.0	131.93
5.64	6.0	4.0	3.0	106.67
7.36	6.0	4.0	4.0	85.72
11.01	6.0	4.0	6.3	63.83
6.84	8.0	4.0	3.0	80.75
16.64	8.0	4.0	8.0	41.86

הגרף באיור 6.25 מציג את המאמץ השקול המקסימלי שהתקבל על פי קריטריון הכשל (וון-מיזס) כנגד שטח הקורה (פרמטר לעלות). פרופילי הקורות נבחרו מטבלה 4.2. בגרף קיימים 2 גבולות לפי מקדם הבטחון: Upper Control Limit (UCL) ו-Lower Control Limit (LCL).



איור 6.25: גרף של מאמץ שקול מקסימלי אל מול שטח חתך.



ניתן לראות כי רק נקודה אחת נמצאת בגבולות הבטחון שהצבנו. פרופיל הקורה של נקודה זו:



איור 6.26: פרופיל קורה נבחר.


בטבלה 6.5 ניתן לראות את כל המאמצים שהתקבלו על פרופיל זה עבור זוג קורות אחוריות:

טבלה 6.5 : המאמצים בפרופיל הנבחר עבור זוג קורות אחוריות.

	מאמצי כפיפה [MPa]	מאמצי גזירה [MPa]	מאמצי גזירה מפיתול [MPa]	וון-מיזס [MPa]
מרכז הקורה 	0.00	0.01	0.00	0.14
פינת הקורה 	63.83	0.00	0.00	63.83

בטבלה 6.6 ניתן לראות את כל המאמצים שהתקבלו על פרופיל זה עבור זוג קורות חיצוניות-קידמיות.

טבלה 6.6 : המאמצים בפרופיל הנבחר עבור זוג קורות חיצוניות-קידמיות.

	מאמצי כפיפה [MPa]	מאמצי גזירה [MPa]	מאמצי גזירה מפיתול [MPa]	וון-מיזס [MPa]
מרכז הקורה 	0.00	00.0~	0.00	0.00~
פינת הקורה 	31.91	0.00	0.00	31.91

ניתן לראות כי המאמץ המתפתח בקורות החיצוניות-קידמיות קטן פי 2 מזה שמתפתח בקורות האחוריות, ולכן ההנחה שיש לבחור את פרופילי הקורה לפי העומס שמתפתח על הקורות האחוריות היה נכון.

## 6.6. סימולצית חוזק

הרכב בו נעשה שימוש בחישובי החוזק האנליטיים ובסימולציות חוזק הוא Kia Sportage, הרכב הכבד ביותר מבין הרכבים המיועדים (ראה טבלה 1.1 במבוא). להלן הנתונים שלו, שמופיעים גם בנספח א' – "גיאומטריית רכבים הרלוונטים לחניון":

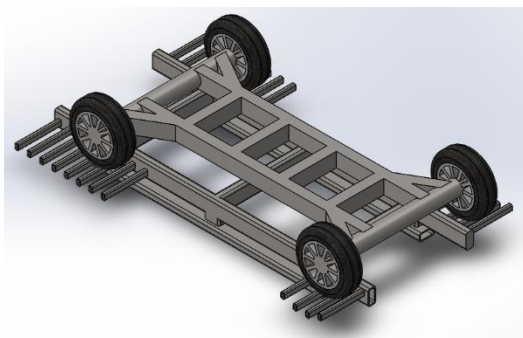


איור 6.27: גדלים גאומטריים של רכב הרלוונטים לתכנן.

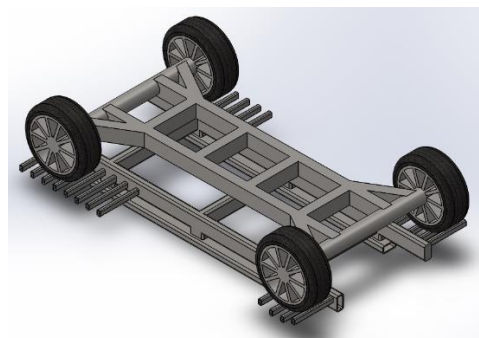
טבלה 6.7: הגדלים הגיאומטריים הרלוונטים של Kia Sportage.

משקל [kg]	קוטר צמיג [mm]	רוחב צמיג [mm]	אורך מרכזים [mm]	אורך כללי [mm]	רוחב [mm]	גובה [mm]	דגם
1631	702	225	2670	4490	1855	1636	Kia Sportage

המעמד עצמו תוכנן כך שהוא מתאים לכל טווח הרכבים המיועדים. מידות הרכבים מופיעות בטבלה 1.1 במבוא. באיור 6.28 ניתן לראות כיצד המעמד מתאים למידות המקסימאליות ולמינימליות של הרכבים אשר מרוכזות בטבלה 6.7: (א) לרכב במידות המקסימליות, (ב) לרכב במידות המינימליות. בנוסף, ניתן לראות כי הוקצו מרווחי ביטחון שנועדו לכך שהמעמד יתאים גם לרכבים החורגים במקצת מטווח הרכבים המיועדים.



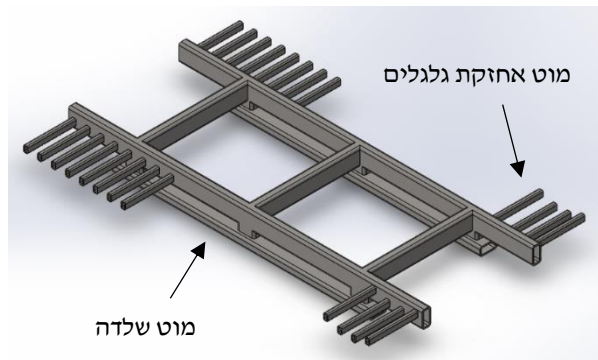
(ב) המעמד עם רכב במידות המינימליות.



(א) המעמד עם רכב במידות המקסימליות.

איור 6.28: התאמת המעמד למידות הרכבים.

המעמד תוכנן על בסיס מעמדי הרכבים במערכת החנייה האוטומטית של החברה הסינית Maoyuan. הדגם בנוי ממוטות בעלי פרופיל מלבני חלול הנקראים RHS (Rectangular Hollow Sections) המשמשים לרוב לקונסטרוקציות פלדה לבניה. הפלדה שנבחרה היא פלדת פחמן מסוג ST37-2 - פלדה דלת פחמן בעלת שימוש רחב במוטות RHS. פלדה זו היא בעלת מאמץ כניעה של  $235 \text{ [MPa]}$ . המעמד בנוי משני גדלים שונים של מוטות RHS: האחד לשלדה והשני לאחזקת הגללים, כפי שניתן לראות באיור הבא:



איור 6.29: סוגי המוטות במעמד.

מוטות RHS ניתן להזמין במידות שונות ובעובי דופן שונים. באתר האינטרנט של חברת "איסכור" ישנה טבלה המרכזת את המידות הנפוצות של מוטות RHS ביחד עם נתונים רלוונטיים לתכן [7]. מטבלה זו נבחרו 2 גדלים (במ"מ):  $60 \times 40$  ו- $160 \times 80$  עם עובי דופן  $6.3$  ו- $12.5$ . בהתאמה, על סמך החישובים האנליטיים שנעשו טרם התיכנון (ראה פרק 6.3). הפרופילים שנבחרו מסומנים בצבעים בטבלה 6.8 כאשר:

**באדום:** פרופיל  $60 \times 40 \times 6.3$  מ"מ – הפרופיל שנבחר למוטות שמחזיקים את הגללי הרכב.

**בירוק:** פרופיל  $160 \times 80 \times 12.5$  מ"מ – הפרופיל שנבחר למוטות שמרכיבים את שלדת המעמד.

טבלה 6.8: מוטות RHS בגדלים שנבחרו עם עובי דופן שונים.

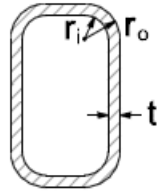
RHS															
מידות D x B mm	עובי t mm	משקל מסר M kg/m	שטח חתך A cm <sup>2</sup>	מומנט אנרגיה I		רדיוס אנרגיה r		מומנט התנגדות אלסטי Z		מומנט התנגדות פלסטי S		מקומי פיתול		שטח מיסר למטר אורך m <sup>2</sup>	כמות מטר לטון m
				x-x cm <sup>4</sup>	y-y cm <sup>4</sup>	x-x cm	y-y cm	x-x cm <sup>3</sup>	y-y cm <sup>3</sup>	x-x cm <sup>3</sup>	y-y cm <sup>3</sup>	מומנט אנרגיה לייזל cm <sup>4</sup>	מומנט התנגדות לייזל cm <sup>3</sup>		
60 x 40	2.5*	3.71	4.72	23.1	12.2	2.21	1.61	7.71	6.10	9.43	7.09	25.0	9.74	0.195	270
	3.0*	4.39	5.60	26.9	14.1	2.19	1.59	8.96	7.04	11.1	8.29	29.2	11.2	0.194	228
	3.2*	4.66	5.94	28.3	14.8	2.18	1.58	9.44	7.39	11.7	8.75	30.8	11.8	0.193	215
	4.0	5.72	7.28	33.6	17.3	2.15	1.54	11.2	8.67	14.1	10.5	36.6	13.7	0.191	175
	5.0*	6.97	8.88	39.2	20.0	2.10	1.50	13.1	10.0	16.8	12.4	43.0	15.8	0.189	143
6.3*	8.49	10.8	45.1	22.6	2.04	1.45	15.0	11.3	19.9	14.6	49.7	17.7	0.186	118	
160 x 80	5.0	18.0	22.9	753	251	5.74	3.31	94.1	62.8	117	71.7	599	106	0.469	55.6
	6.3	22.3	28.5	917	302	5.68	3.26	115	75.6	144	87.7	729	127	0.466	44.9
	8.0	27.9	35.5	1113	361	5.60	3.19	139	90.2	177	107	882	151	0.463	35.9
	10.0	34.2	43.5	1318	419	5.50	3.10	165	105	213	127	1041	175	0.459	29.3
	12.5*	41.6	53.0	1536	476	5.38	3.00	192	119	254	150	1206	199	0.453	24.0

מוטות RHS שעברו תהליך של ערגול בחום הרדיוס הפנימי והחיצוני מוגדרים באופן הבא [12]:

$$r_o = 1.5t \quad (6.62)$$

$$r_i = 1.0t \quad (6.63)$$

כאשר  $r_o$  הוא הרדיוס הפנימי,  $r_i$  הוא הרדיוס החיצוני ו- $t$  היא עובי הדופן, כפי שניתן לראות באיור הבא:

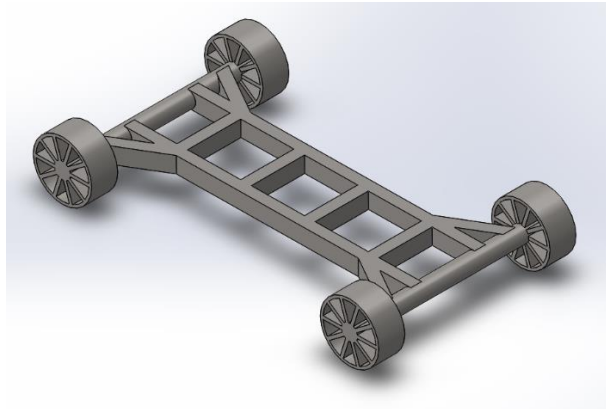


איור 6.30: חתך מוט RHS.

רדיוסים אלו נלקחו בחשבון בסימולציה, אך הוזנחו בחישוב האנליטי לצורך פישוט החישובים.

השלבים שקדמו לסימולציית החוזק הם:

- 1) בניית דגם שנועד לדמות את הרכב שיונח על המעמד. דגם זה (ראה איור 6.31) נבנה על פי המידות של Kia Sportage - הרכב הכבד ביותר מבין הרכבים המיועדים. החומר שהוגדר עבור הדגם הוא פלדה.



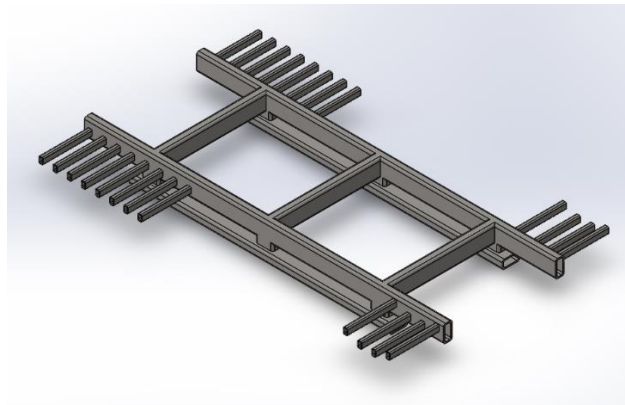
איור 6.31: דגם המדמה רכב לצורך סימולציה.

- 2) בניית הצמיג של Kia Sportage (ראה איור 6.32) לפי המידות שמופיעות בטבלה 6.8. החומר שהוגדר עבור הצמיג הוא גומי.



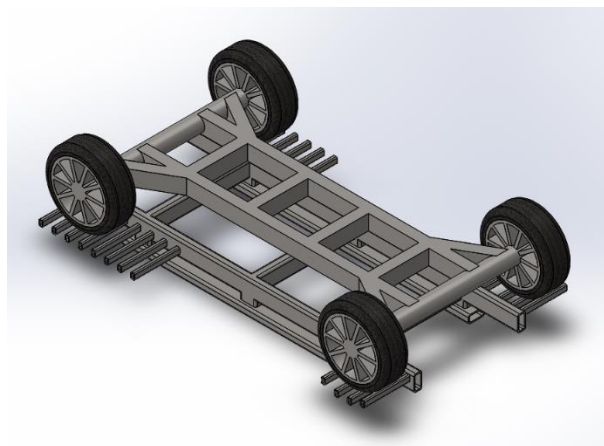
איור 6.32: צמיג רכב לצורך הסימולציה.

3) בניית המעמד (ראה איור 6.33) לפי הפרופילים והחומר שנבחרו: פרופיל  $6.3 \times 40 \times 60$  מ"מ למוטות שמחזיקים את גלגלי הרכב, פרופיל  $12.5 \times 80 \times 160$  מ"מ למוטות שמרכיבים את שלדת המעמד והגדרת החומר ST37-2.



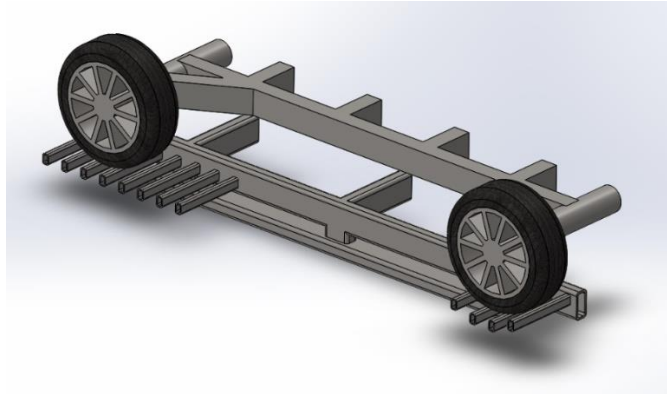
איור 6.33: מעמד לרכב- תכנן סופי.

4) יצירת הרכבה של המעמד והרכב, כפי שניתן לראות באיור הבא:



איור 6.34: הרכבה של המעמד והרכב לצורך הסימולציה.

5) חיתוך ההרכבה ל-2 לצורך הקטנת זמן הריצה של הסימולציה. מכיוון שלהרכבה מישור סימטריה- מיותר לבצע את הסימולציה עבור כל ההרכבה. עבור תנאי שפה מתאימים ניתן לבצע את הסימולציה רק עבור חצי הרכבה. להלן חצי ההרכבה עליה בוצעה הסימולציה:



איור 6.35: חצי הרכבה עבורה בוצעה הסימולציה.

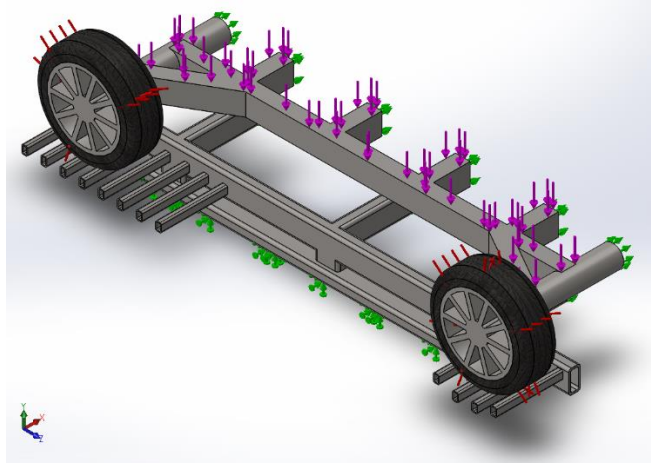
6) הגדרת חיבורים (Connections), ריתומים (Fixtures) ועומסים חיצוניים (External Loads). החיבורים שהוגדרו הם: אי-חדירה (No Penetration) בין הצמיגים למעמד והדבקה (Bonded) בין הצמיגים לרכב. הריתומים שהוגדרו (ראה חצים ירוקים באיור 6.36) הם: ריתום מוחלט (ב-3 הצירים  $x, y, z$ ) של הפאה התחתונה של המוט התחתון (שבה במגע עם לקרקע) וריתום בציר  $x$  של הפאות שמתלכדות עם מישור הסימטריה. העומסים החיצוניים שהוגדרו הם: משקל הרכב ולחץ בגלגלים. משקל הרכב הוגדר ככוח המפולג באופן אחיד על הפאה העליונה של שלדת דגם הרכב (ראה חצים סגולים באיור 6.36) וחושב לפי:

$$W = mg = 1700 \times 9.81 = 16,677[N] \quad (6.64)$$

כאשר  $m$  מציינת את משקל הרכב המקסימאלי ו- $g$  את תאוצת כדה"א. משקל הרכב Kia Sportage (הרכב הכבד ביותר מבין הרכבים המיועדים) הוא  $1631 [kg]$ . לצורכי ביטחון החלטנו לעגל כלפי מעלה ולבצע את סימולציית החוזק עבור משקל של  $1700 [kg]$ .

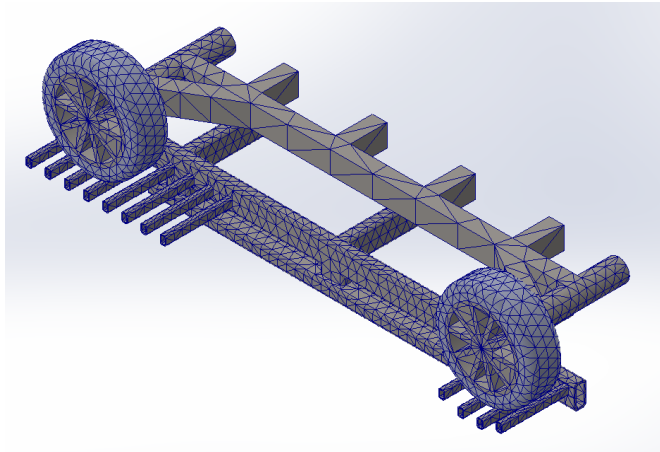
הלחץ בגלגלים הוגדר על הפאות הפנימיות של הצמיג ועל הפאה החיצונית של שלדת הגלגל (ראה חצים אדומים באיור 6.36). לחץ זה נועד לדמות את לחץ האוויר בגלגלי הרכב. עבור Kia Sportage לחץ האוויר בגלגלים הוא  $240 [kPa]$ . במציאות ישנו גם לחץ אטמוספרי של  $100 [kPa]$  שמופעל על הצמיג מבחוץ ולא מוגדר בסימולציה. לכן, הלחץ שהוגדר לצורך הסימולציה הוא ההפרש ביניהם -  $140 [kPa]$ . מדובר בלחץ יחסי = לחץ ביחס ללחץ האטמוספרי (Gauge Pressure).





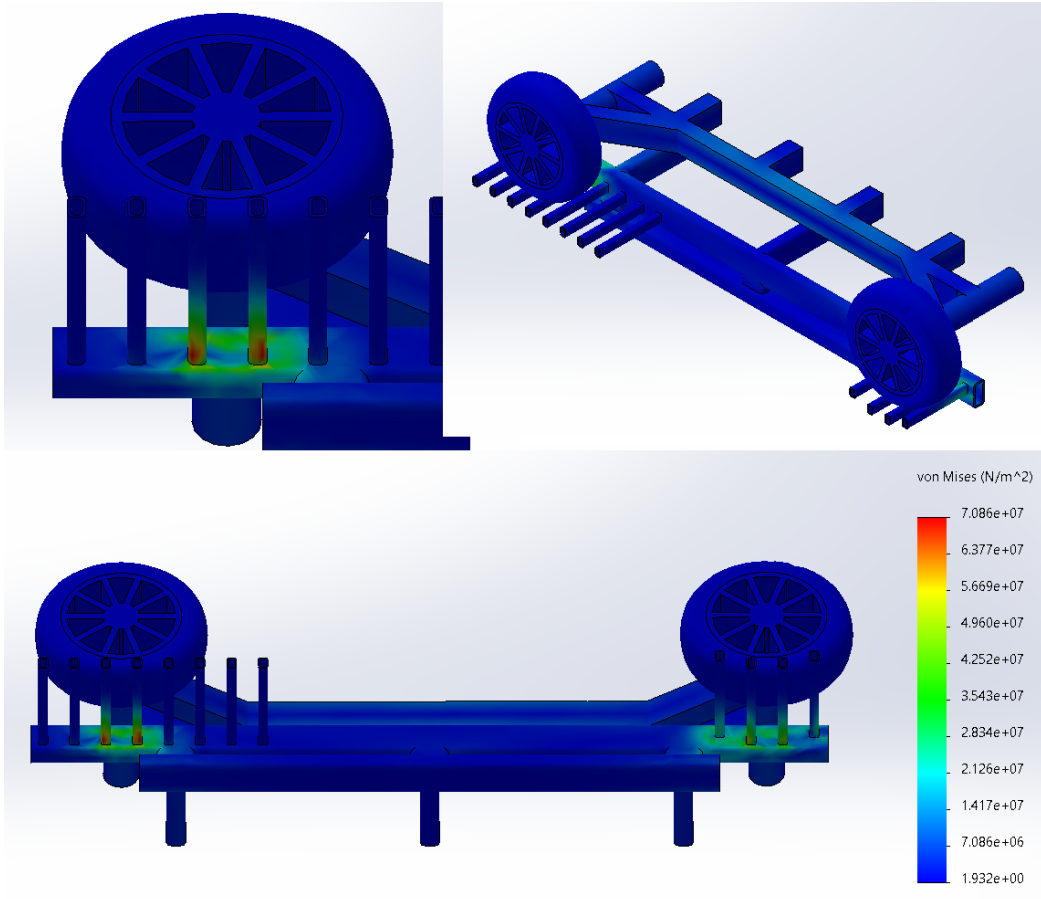
איור 6.36: חיבורים, ריתומים ועומסים חיצוניים שהוגדרו לצורך ביצוע הסימולציה.

(7) רישות ההרכבה (Mesh), כפי שניתן לראות באיור הבא :



איור 6.37: רישות (Mesh) לצורך ביצוע הסימולציה.

לאחר שבוצעו כל 6 השלבים הנ"ל הורצה הסימולציה והתקבלו המאמצים והמעוותים בכל אחד מחלקי ההרכבה. אותנו עניין המעמד. הפרמטר עליו הסתכלנו היה המאמץ המקסימאלי שהתקבל במעמד. בוצעו מס' סימולציות עבור מרחקים שונים בין מוטות אחזקת הרכב. המאמץ המקסימאלי בכולן התקבל באותו מקום. מתוך המרחקים עבורם בוצעה הסימולציה נמצא כי עבור מרחק של  $130 \text{ [mm]}$  בין המוטות מתקבל המאמץ המקסימאלי הקטן ביותר-  $71 \text{ [MPa]}$ , כפי שניתן לראות באיור הבא :



איור 6.38: תוצאות הסימולציה - מאמצים.

הטבלה הבאה מרכזת את הנתונים עבורם בוצעה הסימולציה:

טבלה 6.9: הנתונים שהוזנו לסימולציה והמאמץ המקסימאלי שהתקבל.

מאמץ מקסימאלי	מרחק בין המוטות	פרופיל מוט אחזקת גלגלים [mm]	פרופיל מוט שלדת מעמד [mm]	לחץ בגלגלים	עומס
71 [MPa]	130 [mm]			140 $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$	16,677 [N]

מקדם הביטחון (FoS- Factor of Safety) חושב לפי :

$$FoS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} \quad (6.65)$$

כאשר  $\sigma_y$  הוא מאמץ הכניעה של החומר ו- $\sigma_{max}$  הוא המאמץ המקסימאלי בחומר.

המעמד עשוי מפלדת פחמן ST37-2 בעלת מאמץ כניעה של [MPa] 235. המאמץ שהתקבל המקסימאלי שהתקבל בסימולציה הוא [MPa] 71. לכן-

$$FoS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} = \frac{235}{71} = 3.3 \quad (6.66)$$

טבלה 6.10 מרכזת את מקדמי הביטחון שנהוג לתת במקרים שונים [11]. המקרה שלנו מופיע בשורה האחרונה (מסומנת באדום) אחרי המילה or - שימוש בחומרים אמינים תחת תנאי סביבה קשים. הפלדה בה אנחנו עושים שימוש נחשבת לחומר אמין, אך המעמד צריך לשרוד בתנאי סביבה קשים.

טבלה 6.10 : מקדמי ביטחון עבור מקרי תכן שונים.

Applications	Factor of Safety - FOS -
For use with highly reliable materials where loading and environmental conditions are not severe and where weight is an important consideration	1.3 - 1.5
For use with reliable materials where loading and environmental conditions are not severe	1.5 - 2
For use with ordinary materials where loading and environmental conditions are not severe	2 - 2.5
For use with less tried and for brittle materials where loading and environmental conditions are not severe	2.5 - 3
For use with materials where properties are not reliable and where loading and environmental conditions are not severe, or where reliable materials are used under difficult and environmental conditions	3 - 4

ניתן לראות שמקדם הביטחון שקיבלנו (3.3) אכן נמצא בתוך הטווח הרצוי (3-4).

❖ שרטוט המעמד מופיע בנספח ד'.

## 7. הערכה כלכלית

נסכם עלויות כלכליות שנדרשו עבור הפרויקט עד כה. לא נדרשו הוצאות על ציוד עבור ניסויים. כל סטודנט השקיע כ-500 שעות עבודה (בערך 50 שעות עבודה חודשיות במשך 10 חודשים). ריווחיות המערכת במשך 20 שנה מוערכת ב- 13,003,391 דולר. שכר עבודה עבור 1,000 שעות מהנדס מוערך ב- 21,240 דולר.

בפרק 4 בחרנו בחלופה היקרה יותר שהיא גם הרווחית יותר (מוסיפה יותר מקומות חנייה). מחישוב מפורט שנעשה בפרק זה הגענו למסקנה כי תשתית המערכת תקבע את ריווחיות המערכת ולכן בחרנו להתעמק בתיכנון שלה. לשם כך בחרנו בפרופילי מוטות ממוצר דומה: פרופיל קורות אחיזת צמיגים [mm] 60x30x3, ופרופיל קורות תמיכה [mm] 100x50x5. לאחר חישובי חוזק התברר כי על המערכת להשתמש בקורות אחיזה עבים יותר ב- [mm] 3.3 וקורות תמיכה בעלי פרופיל [mm] 160x80x12.5. משקל המעמד שהתקבל הוא [kg] 681, כאשר ההערכה הייתה [kg] 325. לאחר הכפלה ב-1794 המעמדים בחניון מתקבל שמשקל המוטות הדרוש לכלל המעמדים בחניון הוא [ton] 1222. עלות [ton] 1 מוטות RHS היא כ- [\$/ton] 500, ומכאן שהעלות בסה"כ של החומר עבור המעמדים היא \$611,000 - כ-0.6 מיליון דולר. לעלות זו יש להוסיף את עלות תהליך הבנייה המוערכת בכ-0.1 מיליון דולר נוספים ומתקבל **שעלות** המעמדים הכוללת היא כ-0.7 מיליון דולר, חריגה של כ-0.3 מיליון דולר מההערכה הראשונית בפרק דיון בחלופות.

חברת Urban Parking Israel בחרה במערכת חלופית המתאימה לחניון נתב"ג לטווח ארוך לצורך השוואת **עלויות** בין מערכת זו לבין המערכת שהצגנו בפרויקט. עבור הוספת כמות חניות זהה לחלופה שהצגנו (564 מקומות חנייה נוספים) העלות המוערכת של מערכת זו היא כ-12 מיליון דולר. עלות המעמדים במערכת שלנו, שכוללות: שכר עבודה למהנדסים, עלות חומר להתקנה והרכבת מעמדים והערכת עלות התקנתם, עומדת על \$732,240. לעלות זו נוסף את עלות המסילות שמוערכת ב-0.6 מיליון דולר, ונקבל כי עלות תשתית המערכת שלנו מוערכת בכ-1.3 מיליון דולר. עלות זו לא כוללת את שאר מרכיבי המערכת שלא נכללים במסגרת הפרויקט, אך עלותם צפויה להיות נמוכה מזו של התשתית ולכן מניתוח זה ניתן להסיק כי המשך הפיתוח של מערכת זו צפוי להיות ריווחי מאוד בהשוואה למערכות שונות הקיימות כיום בשוק.

## 8. סיכום

להלן רשימה המסכמת של הנעשה בפרויקט:

- חשיפה לבעיית החנייה בארץ ובעולם והיכרות עם פתרונות החנייה הקיימים בשוק.
- ניסוח דרישות ראשוניות מהמכשיר.
- העלאת חלופות.
- בחירת חניון המתאים לפתרון שלנו וישמש בעתיד להשוואת הפתרון שלנו לפתרונות הקיימים בשוק.
- עדכון הדרישות מהמכשיר.
- סקירת גדלי הרכבים הנפוצים ביותר בשוק והגדרת טווח רכבים ייעודי עבור המכשיר.
- הערכה כלכלית של החלופות.
- ניסוח הקריטריונים החשובות להשוואה בין החלופות. הגדרת המשקל של כל קריטריון וקריטריון.

- דיון מעמיק בחלופות ובחירת חלופה.
- תכנון המעמדים לרכבים תוך ביצוע חישובי חוזק אנליטיים וסימולציית חוזק.
- השוואת כדאיות כלכלית של המערכת אל מול חלופה קיימת בשוק החניונים האוטומטיים.
- הצגת סימולציות לדימוי אופן פעולת החניון ואופן פעולת מכשיר ההרמה.

המסקנות העיקריות מהפרויקט עד כה הן :

- בהקשר לחלופות - שלב הדיון בחלופות ובחירת חלופה הוא שלב קריטי. בחירה של חלופה לא נכונה עלולה להרוס פרויקט. במקרים בהם אין חלופה הטובה בצורה משמעותית יותר מהאחרות עדיף להשקיע יותר זמן, גם אם זה בא על חשבון חריגה מהזמן שהוקצה לבחירת החלופה, ולבצע דיון מעמיק בחלופות. חריגה זו כנראה תתבטא בהגדלת עלות הפרויקט, אך במידה ותבחר חלופה לא נכונה וזה יתגלה רק בשלב מאוחר של הפרויקט - הכסף שיבוזבז יהיה גבוה הרבה יותר. בנוסף, אין לפסול חלופות לפני שהתבצע דיון מעמיק בכולן. חלופה שבשלב הראשוני נראת פחות מוצלחת מאחרות יכולה בהמשך להתגלות כטובה מכולן.
- בהקשר למידול בתיב"ם - עדיף להשקיע יותר זמן ולמדל את החלקים בצורה חכמה. מידול "מהיר" אומנם חוסך זמן ונותן את התוצאה הרצויה, אך צריך לקחת בחשבון שבתכן תמיד יש שינויים. שינויים אלו יכולים להתרחש בעקבות חישובי החוזק שמאלצים שינוי של גדלים, לאחר הרכבה בין חלקים שמתגלה חוסר תאימות ביניהם, בעקבות רצון לצמצם עלויות וכו'. מידול חכם יאפשר לבצע את השינויים בקלות ומהירות, בעוד שבמידול "לא חכם" כל שינוי יצריך עבודה רבה ולא תמיד יתקבלו התוצאות הרצויות (לדוגמה - במקרה שאותה מידה מופיעה פעמיים והשינוי מתבצע רק עבור אחת מהן).
- בהקשר לסימולציות - אם קיים בחלק או בהרכבה מישור סימטריה חשוב לזהות אותו, להגדיר תנאי שפה בהתאם ולבצע את הסימולציה רק עבור חצי דגם. לגודל החלק או ההרכבה יש השלכה מיידית על זמן הריצה של הסימולציה וחבל להאריך אותו סתם. (סימולציות מורכבות יכולות לרוץ במשך מס' שעות ועל ידי סימטריה ניתן לעיתים לקצר את זמן הריצה בחצי!).
- בהקשר לכדאיות הכלכלית - כפי שפורט בפרק 7, למרות שהפרויקט הכיל רק את תכנון תשתית המערכת (הערכת עלות עבור בחירת מסילות ותכנון מעמיק עבור מעמדי הרכבים) התוצאות מראות כי המערכת צפויה להיות כדאית לפיתוח, וזאת מכיוון שניתחנו את המרכיב המייקר ביותר שלה.

ארבע המסקנות הראשונות הן מסקנות שהסקנו בעקבות לקחים מהפרויקט. ראשית, מיהרנו לפסול חלופות שאומנם לא בחרנו בהן בסוף, אך לאחר דיון מעמיק הן התגלו כבעלות יתרונות רבים. שנית, המידול הראשוני בתיב"ם היה מידול "מהיר" ו-"לא חכם". תוך כדי ביצוע חישובי החוזק והסימולציות נדרשנו לשנות גדלים רבים ושינויים אלו ערכו זמן רב. לאחר מספר סימולציות החלטנו שעדיף להשקיע מעט זמן בלהפוך את המידול ל-"חכם" על מנת לחסוך הרבה זמן בעתיד. החלטה זו התגלתה כמוצלחת מאוד. בנוסף, בסימולציות הראשונות לא ייחסנו חשיבות לסימטריה שקיימת בהרכבה והרצנו את הסימולציה עבור ההרכבה המלאה. זמן הריצה של הסימולציה היה ארוך מאוד - בין חצי שעה לשעה. על מנת להגיע לביצועים מיטביים הרצנו סימולציות רבות וזמן ההמתנה הפך לבלתי נסבל. לאחר שעלינו על עניין הסימטריה והתחלנו להריץ את הסימולציה עבור חצי הרכבה בלבד - זמן הריצה ירד משמעותית (כמעט בחצי!).

## 9. נספח א' – גיאומטריית רכבים הרלוונטים לחניון

שוק הרכבים הינו רחב מאוד, וקיימים סוגי רכב שונים לצרכים לקוחות שונים. מערכת הפרויקט מיועדת ככלל עבור מגרשי חניה עבור מרכזי קניות, אזורי תעשייה ומרכזים דומים למינהם, וכפרט נבחן עבור מערך החניונים של רשות התעופה בנמל תעופה בן-גוריון.

נבחר להתמקד בעשרת הדגמים הנמכרים ביותר בישראל ונתכנן את המערכת שתתאים לשוני בגדליהם הגיאומטריים.

### 9.1. גיאומטריית רכב רלוונטית לניסוי

גדלים רלוונטים בשימוש הרמה מהגלגלים: גובה, רוחב, אורך מרכזים – מתייחס למרחק בין מרכזי הגלגלים, אורך כללי, קוטר צמיג ורוחב צמיג.



איור 9.1: תיאור גדלים גיאומטריים של רכב.

### 9.2. נתוני רכבים נבחרים

טבלה 9.1 מציגה את הגדלים הרלוונטיים לתכנון המעמד של עשרת הדגמים הנמכרים ביותר בישראל בשנת 2018. [4]

טבלה 9.1: גדלי עשרת דגמי הרכבים הנמכרים בישראל בשנת 2018.

משקל [kg]	קוטר צמיג [mm]	רוחב צמיג [mm]	אורך מרכזים [mm]	אורך כללי [mm]	רוחב [mm]	גובה [mm]	דגם
1285	635	195	2700	4651	1820	1445	Hyundai Ioniq
1631	702	225	2670	4490	1855	1636	Kia Sportage
959	585	185	2400	3595	1595	1485	Kia Picanto
1015	609	175	2510	3950	1695	1520	Toyota Yaris

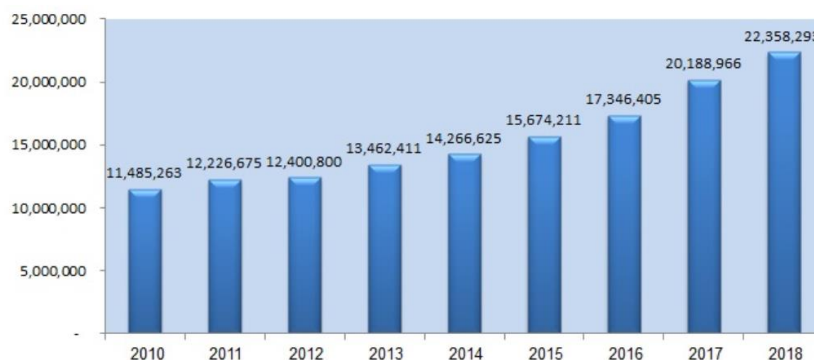
1508	703	245	2670	4475	1850	1651	Hyundai Tucson
1409	652	205	2700	4360	1805	1534	Kia Niro
952	583	175	2385	3660	1660	1500	Hyundai i10
1269	635	195	2680	4670	1814	1461	Skoda Octavia
1450	705	225	2670	4655	1810	1680	Mitsubishi Outlander
1380	690	215	2640	4360	1795	1550	Toyota C-HR

עבור גדלים אלו חושבו: ערכי המקסימום, המינימום והממוצע. ערכים אלו שימשו אותנו לאורך כל הפרויקט ומופיעים בטבלה 1.1: "גדלים גיאומטריים של רכבים עבור הפרויקט".

## 10. נספח ב' – בחירת חניון מתאים למערכת

### 10.1. מצוקת החניה

מצוקת החנייה באה לידי ביטוי גם בחניוני נמל התעופה בן גוריון. בשנים האחרונות חלה עליה חדה במספר הנוסעים בטיסות בינלאומיות בנתב"ג, כפי שניתן לראות באיור 10.1. [5]



איור 10.1: תנועת נוסעים בטיסות בינלאומיות בנתב"ג במשך השנים.

העלייה בכמות הנוסעים בנתב"ג גורמת לעליית הביקוש למקומות חנייה בחניונים השונים הקיימים במתחם, ביניהם החניון לטווח ארוך. על מנת להתמודד עם העלייה בביקוש ולהקצות מקומות חנייה נוספים הגדילו את חניון זה במעל 150% ב-5 שנים האחרונות, כפי שניתן לראות בתמונות הבאות שנלקחו מ-Google Earth:



8/8/2014



7/9/2016



19/9/2019

איור 10.2: גדילת השטח של חניון ארוך הטווח בנתב"ג – תצלומים אוויריים.

על סמך הנתונים שהוצגו קודם לכן ניתן להניח כי מגמת העלייה בתנועת הנוסעים תימשך, וכי בקרוב ידרשו מקומות חנייה נוספים. השטחים שהחניון יכול להתפרס עליהם הולכים ואוזלים. את בעיה זו המערכת שלנו מיועדת לפתור. האתגר איתו נתמודד הוא לספק יותר מקומות חנייה בשטח הנתון, כאשר הפתרון יתבסס על ביטול השטח המוקצה לתנועת רכבים בחניון (כבישי הגישה) וצמצום רוחב החניות.

## 10.2. בחירת שטח עבור הפרוייקט

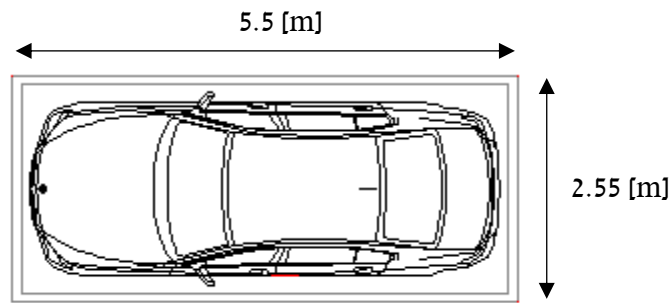
נבחר שטח חנייה מתוך החניון הנתון, כפי שניתן לראות בתמונה הבאה:



איור 10.3: בחירת שטח נבחר מחניון נתב"ג – תצלום אווירי.

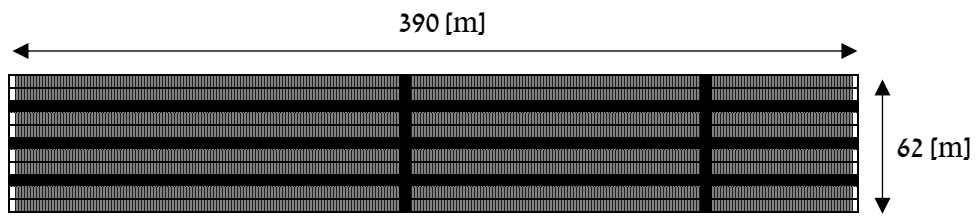


מספר החניות בשטח וגודליהן נמדדו וכך גם רוחבו של כביש הגישה. הגדלים שהתקבלו הם : מספר חניות : 1184 (148 חניות לאורך, 8 חניות לרוחב).



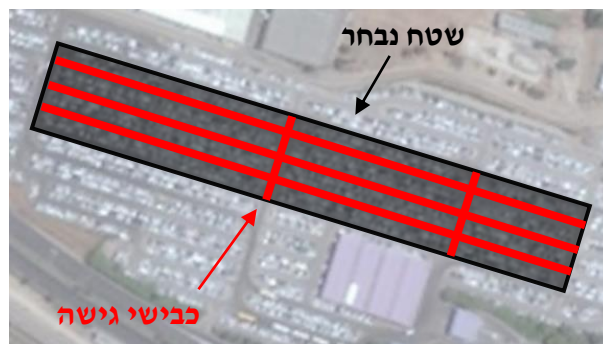
איור 10.4: ממדי תא חניה הקיים בחניון נתב"ג.

רוחב כביש גישה : 6 מטר



איור 10.5: ממדי שטח החניון הנבחר.

באיור הבא סומנו בצבע אדום כבישי הגישה בשטח הנבחר. ניתן לראות כי כבישי הגישה תופסים שטח רב. מחישוב מתקבל כי השטח שכבישי הגישה תופסים הינו 31% מהשטח כולו. נתון זה מראה את הפוטנציאל הרב שיש לפתרון חניה שאינו מצריך כבישי גישה.



איור 10.6: סימוני כבישי גישה על שטח חניה נבחר – צילום אווירי.

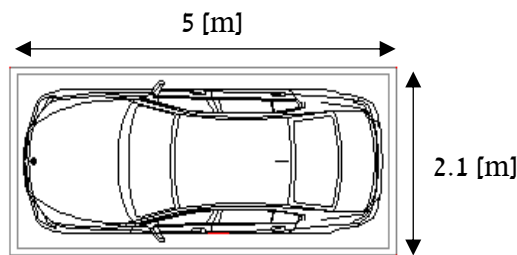
בנוסף, רוחב תא החנייה בחניון פתוח לוקח בחשבון את תמרון הרכב (אל ומן תא החנייה). לפיכך, במגרש חניה שהלקוח משאיר את הרכב במקום ייעודי ומכשיר מחנה את הרכב במקום המתאים, מתאפשר לבנות תאי חניה צרים יותר.

כמו כן, היות ובפתרון אנחנו משאירים תאי חנייה קונבנציונליים בצדדים, אפשר לייעד את השטח הנבחר לתת מענה לחניית הרכבים הפופולאריים בשוק בישראל ושהרכבים המעטים הגדולים מהסטנדרט יחנו בתאי החנייה הקונבנציונליים. בטבלה 9.1 ניתן לראות את עשרת הדגמים הנמכרים ביותר בישראל בשנת 2018 עם מידותיהם, ובטבלה 1.1 ניתן לראות את סיכום מדיותיהם. מטבלאות אלו נסיק כי הגדלים המקסימליים עבור אורך כללי ורוחב הינם:

רוחב מקסימלי:  $1855 \text{ [mm]} = 1.855 \text{ [m]}$

אורך מקסימלי:  $4670 \text{ [mm]} = 4.670 \text{ [m]}$

בהתבסס על נתונים אלו נגדיר את גודל תא חניה המיועד לפעילות המכשיר להיות:



איור 10.7: ממדי תא חניה מתוכנן עבור המערכת החדשה.

גודל זה ייתן מענה לרוב הרכבים הפרטיים בשוק. ובנוסף מקנה מרווח ביטחון גדול מספיק (מעל 10 ס"מ לכל כיוון).

### 10.3. אופן פעולת החניון המתוכנן

בשטח הנבחר נתכנן חניון הבנוי באופן הבא:



איור 10.8: תכנון אופן פעולת החניון במבט על.

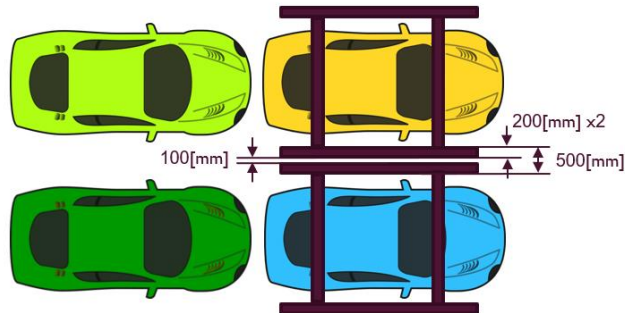
באיור ניתן לראות 3 סוגים של תאי חנייה :

- (7) באדום- תאי כניסה. בתאים אלו הלקוחות משאירים את רכבם. לאחר שהלקוח יוצא מהרכב מכשיר ייעודי מחנה אותו בתא פנוי באותה שורה בה הלקוח השאיר אותו (A,B,C וכו').
- (8) בכחול- תאי יציאה. מתאים אלו הלקוחות לוקחים את רכבם. כאשר הלקוח מגיע לחניון על מנת להוציא את רכבו מכשיר ייעודי מזיז את הרכב לתא זה. השורה בה יימצא הרכב היא השורה בה הלקוח השאיר אותו בעת הכניסה.
- (9) באפור- תאי חנייה. התאים בהם ממוקמים הרכבים החונים. התנועה אל ומן תאים אלו נעשית על ידי המכשיר הייעודי.

המכשירים הייעודיים מסומנים באיור כשני קווים מקבילים. ניתן לראות כי קיים מכשיר ייעודי אחד בכל שורה. למכשיר הייעודי שני תפקידים :

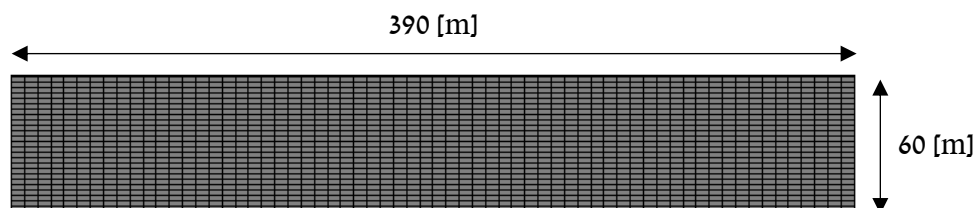
- (6) הכנסת הרכב- הרמת הרכב מתא הכניסה, הזזה שלו לאורך השורה מעל הרכבים החונים האחרים עד לתא החנייה הפנוי והורדתו בתא זה.
- (7) הוצאת הרכב- הרמת הרכב מתא החנייה בו הוא נמצא, הזזה שלו לאורך השורה מעל הרכבים החונים האחרים עד לתא היציאה והורדתו בתא זה.

ניתן לראות כי קיימת חשיבות רבה לרוחב שהמכשיר דורש משני צידי החניה- ככל שהמכשיר צר יותר כך ניתן להכניס יותר שורות באותו שטח ומסי' החניות גדל. נניח שמנגנון מתאים ידרוש מרווח של  $0.2 [m]$  מכל צד. לצורכי בטיחות נקצה מרחק של  $0.1 [m]$  בין מכשירים סמוכים. במקרה הזה המרחק הכולל בין שתי שורות חניה סמוכות יהיה  $0.5 [m]$ .



איור 10.9: תיאור המרחקים בין שורות – אופציה א'.

במקרה זה, החניות יתפרסו בשטח החניה הנבחר באופן הבא :

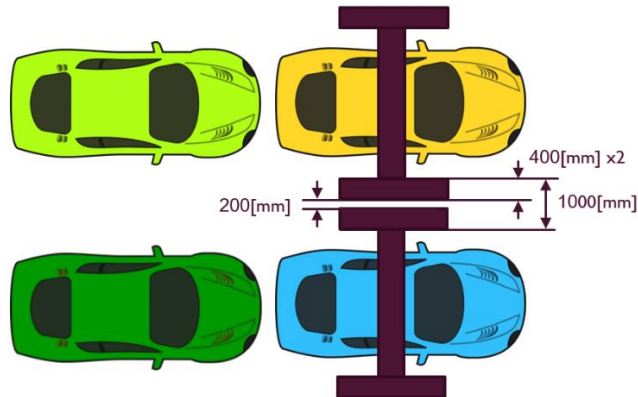


איור 10.10: תיאור החניון עם תאי החניה בממדים החדשים.

מספר חניות יהיה : 1748 , 78 חניות לאורך , 23 חניות לרוחב, ללא חישוב של תאי כניסה ויציאה.

ניתן לראות כי בפריסה החדשה יתקבלו 564 חניות יותר, כלומר מספר החניות באותו השטח יגדל ב-147.6%.

דוגמא נוספת, במידה ונבחר במנגנון הנעה שונה שבו המכשיר יתפוס 0.4 [m] מכל צד. לצורכי בטיחות נקצה מרחק של 0.2 [m] בין מכשירים סמוכים. במקרה הזה המרחק הכולל בין שתי שורות חנייה סמוכות יהיה 1 [m] כפי שניתן לראות באיור הבא :



איור 10.11: תיאור המרחקים בין שורות – אופציה ב'.

במקרה הזה מספר החניות יהיה 1520 (78 חניות לאורך, 20 חניות לרוחב), יתקבלו 336 חניות יותר ומספר החניות באותו השטח יגדל ב-128.3%.

פירוט על מנגנונים שונים ותרומתם להגדלת מקומות החנייה מפורט בהרחבה בפרק 4.4.

אם הפתרון יתברר כמוצלח, השאיפה היא להרחיב את השימוש במכשיר לשדות תעופה נוספים ברחבי עולם, ואף לחניונים אחרים כגון : חניונים של מרכזים מסחריים, חניוני רכבת וכו'.

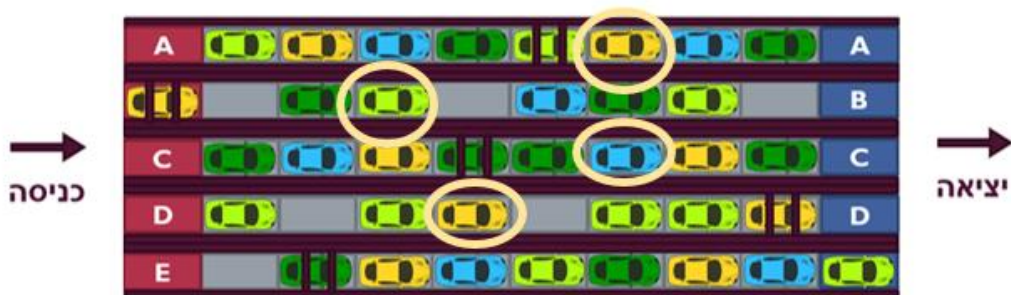
## 10.4. זמן המתנת הלקוח

קריטריון חשוב עבור פתרון חניה הינו זמן המתנת הלקוח לרכב. זמן המתנה ממוצע עבור מתקנים דומים הינו עד 2 דקות. המערכת שאנחנו מציעים לא יכולה לעמוד ביעד זה בכל סוג חניון, אך בנתב"ג אפשר לעמוד במגבלה זו מכיוון שידוע מראש מתי לקוחות ידרשו את רכבם בחזרה. דרישת הזמן תפתר ב-2 דרכים :

### 1. צפי חזרת הלקוח

כדי שהמערכת המתוכננת תעמוד ביעד זה נדרוש מהלקוחות להזין למערכת את פרטי טיסת החזור שלהם. באופן זה המערכת תוכל לזהות רכבים אשר בעליהם אמורים לחזור לארץ באותו הזמן ותמנע מלמקם אותם באותה שורה.

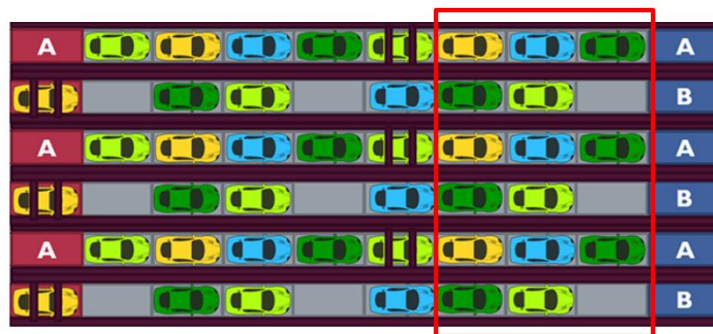
באיור הבא מסומנים להמחשה רכבים שידוע שידרשו בתאריך מסויים באותה שעה. המערכת מיקמה אותם בשורות שונות.



איור 10.12: מיקום רכבים עם אותו זמן יציאה.

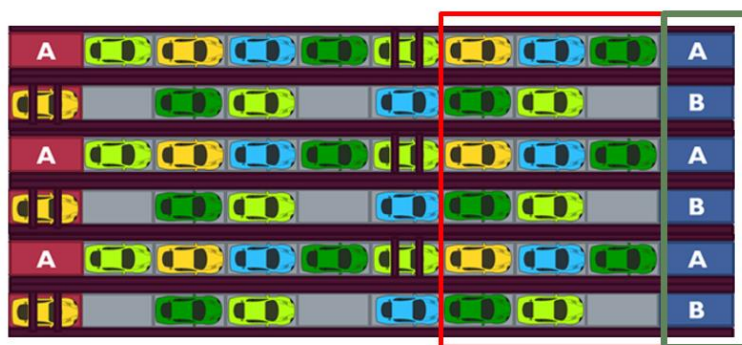
2. קידום הרכב לקדמת השורה

המערכת תתן העדפה להוצאת רכבים על פני הכנסת רכבים. ברגע שטיסה של לקוח תנחת בנתב"ג, רכבו יקודם לקידמת השורה, בערך עד 3 מקומות לפני תא היציאה (מסומן במלבן אדום).



איור 10.13: קידום רכבים בנחיתת מטוס.

הדרך היחידה של הלקוחות להגיע לחניון טווח ארוך (גם היום) היא דרך הסעות שאטל שיוצאות מנתב"ג, שיוצאות בתדירות בין 10 ל-20 דקות. לפני העלייה להסעה נמצאות עמדות תשלום, ברגע התשלום המערכת תקדם את הלקוח לתא היציאה עוד לפני שהשאטל יגיע לחניון (זמן נסיעה משוער 10 דקות).



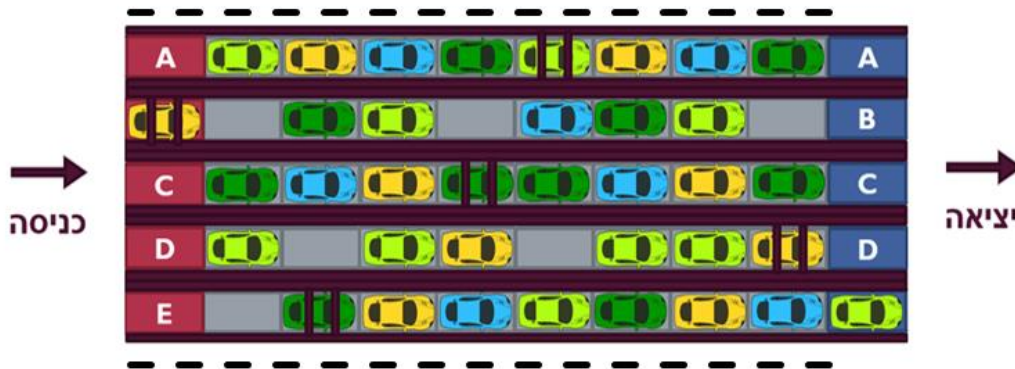
איור 10.14: קידום רכבים שלקוחותיהם עלו על שאטל וצפויים להגיע ב-10 דקות הקרובות.

## 11. נספח ג' – בטיחות המערכת

המערכת משלבת מנגנונים של הרמה והורדה של משקלים כבדים והסעתם בסביבת הולכי רגל. נרצה לתכנן את החניון בצורה שימנע מפגש בין בני אדם למכוונות.

### 1. גידור המערכת

נגדר את המערכת בצידיה (ללא תאי היציאה) כמו שמוצג באיור הבא:

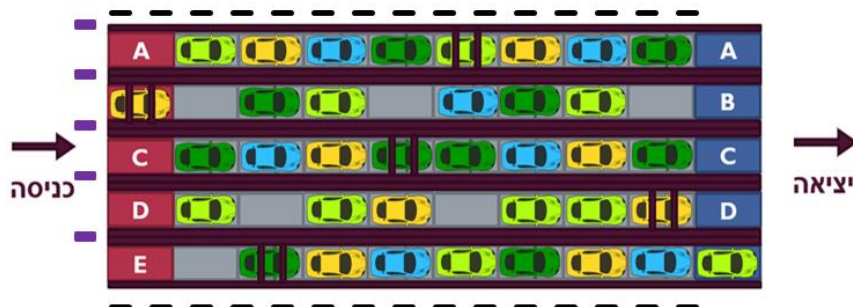


איור 11.1: גידור המערכת.

הקו המקווקו מסמן את גידור המערכת מצידיה. כך נמנע מכניסת הולכי רגל לאזור החניון או לתאי הכניסה מהצד. האזורים הבעייתיים שיש לפתור הינם תאי הכניסה ותאי היציאה שיש לאפשר כניסה של הולכי רגל להחנות את הרכב או לקבלו.

### 2. תאי כניסה

נהגים שיחנו את רכבם בתאי הכניסה יצאו מרכבם ויפעילו מכשיר שנמצא מחוץ לחניון.



איור 11.2: מכשירי הפעלה – מסומנים במלבן סגול.

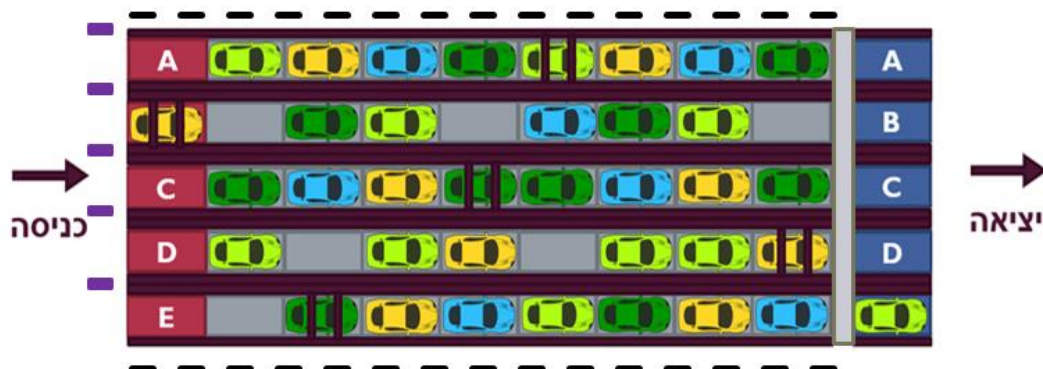
רק ברגע שהנהגים יאשרו שהם (או אדם אחר) לא נמצא ברכבם אז יסגר שער (בצורת תריס) ויפריד בין המערכת ללקוחות. לאחר הסגירה המערכת תגיע להרים את הרכב. מכשירי חניות חכמות משתמשים באותו עקרון הפרדה בין נהגים לרכבים בתאי כניסה. דוגמא באיור מסרטון הדרכה של חברת ParkOlay:



איור 11.3: צילום מסך מסרטון הדרכה לשימוש בחניון חכם.

### 3. תאי יציאה

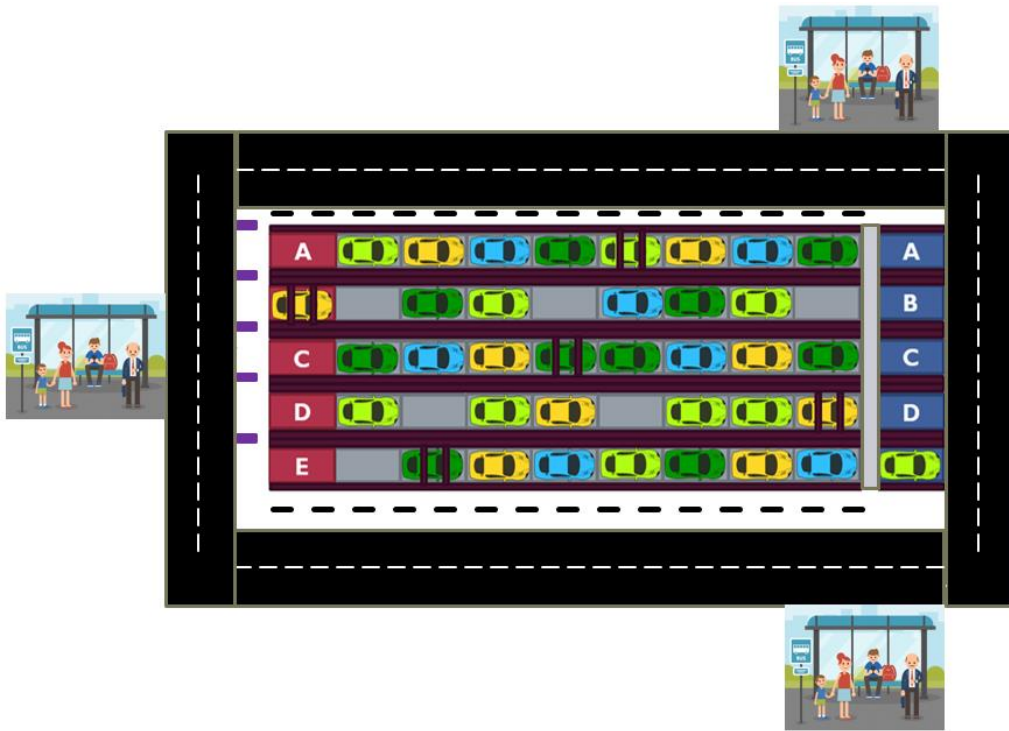
נתכנן מרווח בין קו החניות האחרון לתאי היציאה. מרווח זה ישמש כשביל גישה ללקוחות להגיע לרכבם ושימוש בתא המטען עבור המזוודות שהלקוחות מגיעים איתם. באיור הבא ניתן לראות את שביל הגישה בצבע אפור:



איור 11.4: הוספת שביל גישה בתאי היציאה.

### 4. תחנות להסעות שאטלים

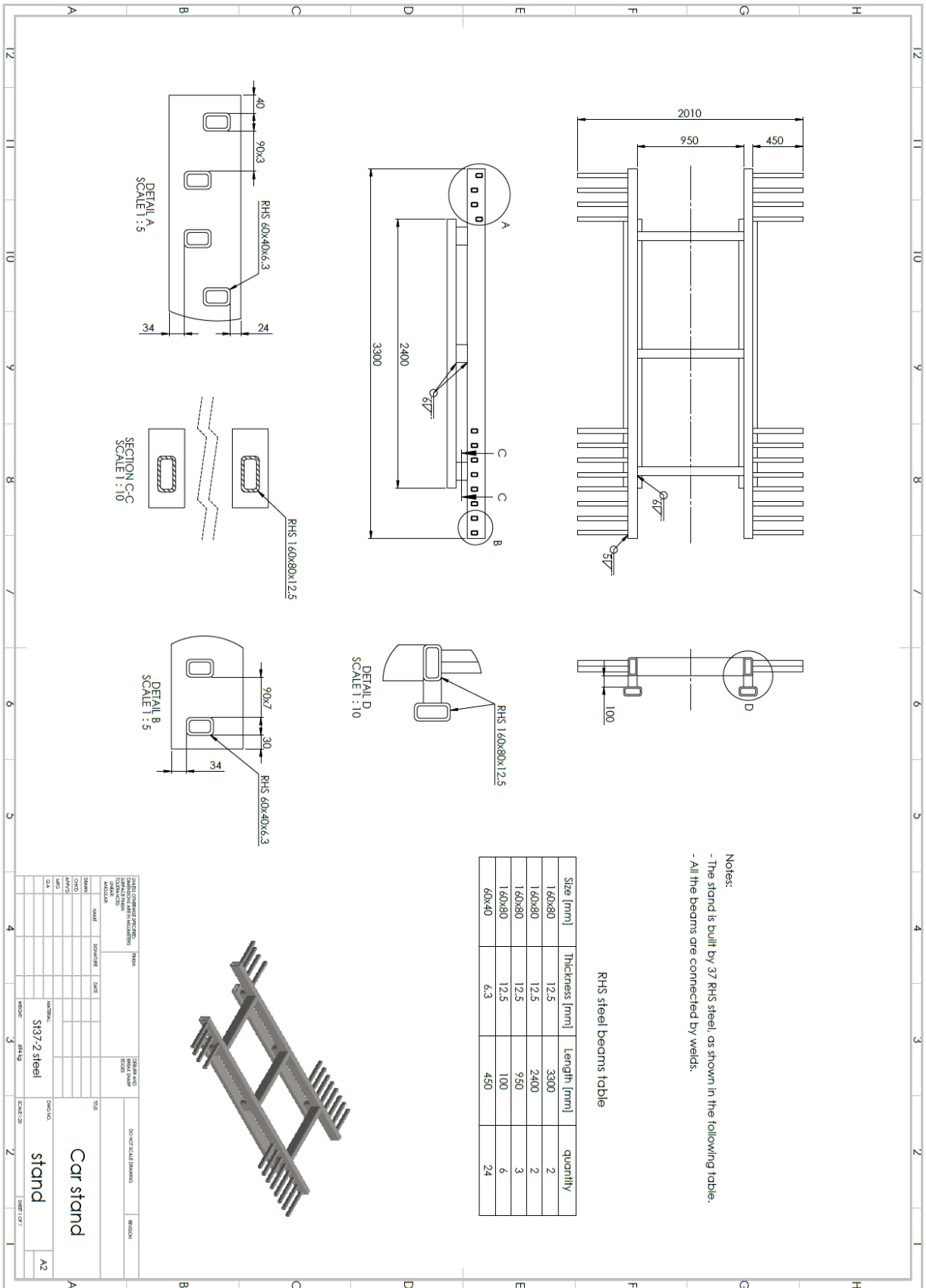
לקוחות שמגיעים לחניון משתמשים בהסעות (שאטל) בכניסה לחניון או ביציאה ממנו. נציע את מיקומם של תחנות עבור שירותי השאטל כך שיתנו מענה נוח ובטיחותי ללקוחות המשתמשים בחניון.



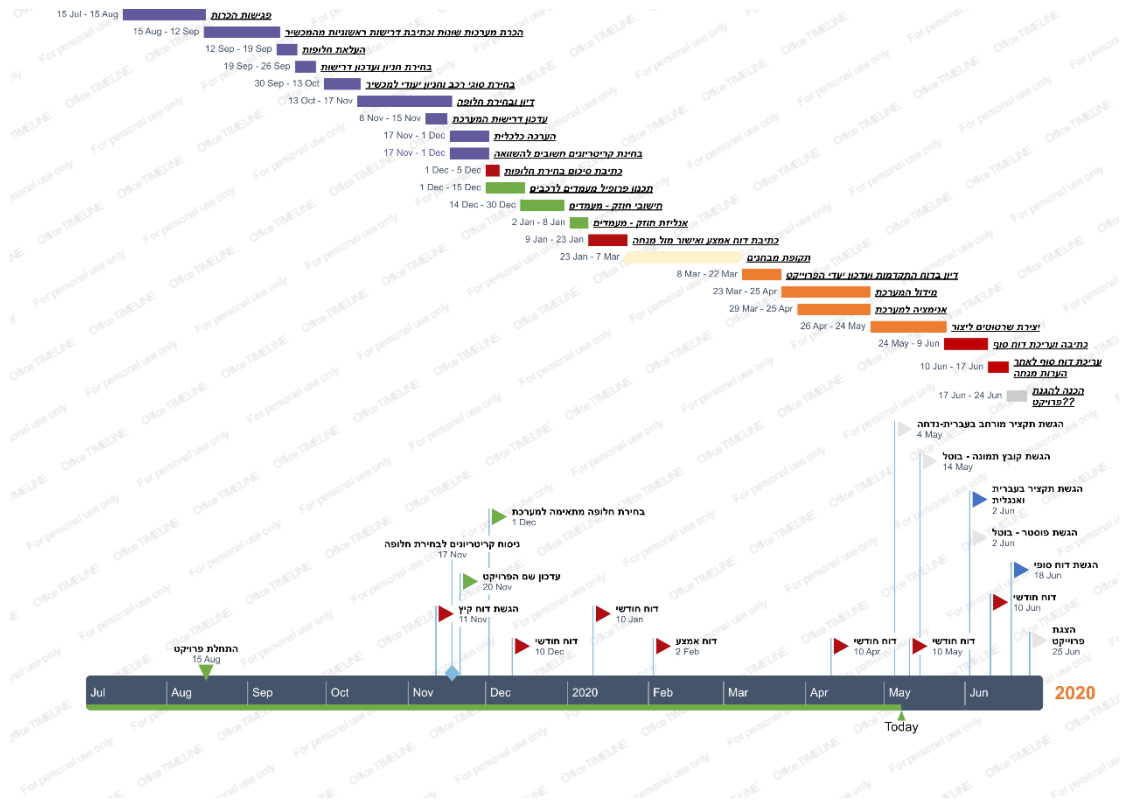
איור 11.5: מיקום תחנות איסוף והורדה להסעות לנתב"ג.



## 12. נספח ד' – שרטוט מעמד לרכב



# 13. נספח ה' – גאנט



## 14. רשימת מקורות

- [1] ע. דניאלי, "חלומות כחוללבן: מחירי החניות בתל אביב קפצו", כלכליסט, 08.02.2018, [https://www.calcalist.co.il/real\\_estate/articles/0,7340,L-3731396,00.html](https://www.calcalist.co.il/real_estate/articles/0,7340,L-3731396,00.html)
- [2] ה. פוסק, "דחוס לכם על הכביש? קבלו נתוני אמת", ynet, 06.08.2018, <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-5323521,00.html>
- [3] ס. ארדץ, חניה אורבנית, <https://www.urbanparking.co.il>
- [4] א. שטיינברג, "כלי הרכב הנמכרים ביותר בישראל ב-2018 – לפי קטגוריות", אוטו, 11.01.2019, <https://www.auto.co.il/article/131522-industry>
- [5] "נוסעים ומטוסים- נמל התעופה בן גוריון", רשות שדות התעופה בישראל, <https://www.iaa.gov.il/he-IL/airports/BenGurion/Pages/Statistics.aspx>
- [6] The World Material, <https://www.theworldmaterial.com/1-0037-material-st37-steel-din-17100>
- [7] "פרופילים מרובעים ומלבניים", איסכור מתכות ופלדות בע"מ, <http://iskooreng.webdna.co.il/Pipes-And-Steel-Profiles/Square-and-rectangular-profiles>
- [8] AICRANE, 5-ton-gantry-crane, <https://aicranemachine.com/5-ton-gantry-crane>
- [9] Changsha Mining Equipment Ltd, <https://changshamining.en.made-in-china.com/product/ejExSbOHwXVw/China-38kg-M-Heavy-Rail-Steel-Rail.html>
- [10] Ltd Shanghai Yueqi Industrial, <https://www.railwayrail.com/products/p38-chinese-standard-heavy-railway-steel-rail>
- [11] Engineering ToolBox, [https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d\\_1624.html](https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d_1624.html)
- [12] Smartbuild Engineering Ltd, <https://www.smartbuild.uk.com/post/rectangular-and-square-hollow-section-shs-rhs-corner-radius-dimensions>