

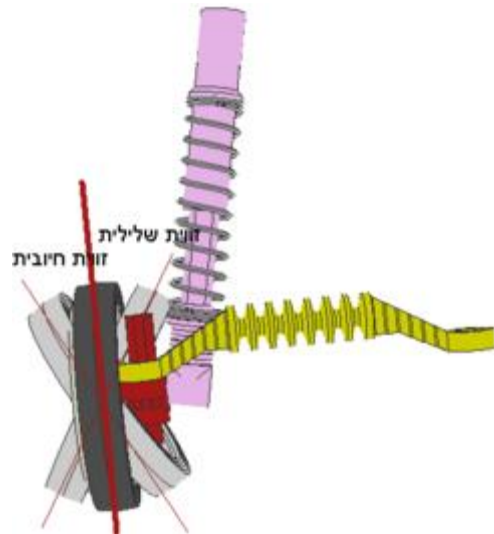
# גאומטריית היגוי

גאומטריית היגוי ברכב היא הגאומטריה שלפיה ממוקמים ההגה, המנוע והגלגלים זה ביחס לזה, בזוויות שונות שנועדו למספר תפקידים שונים. בניגוד למחשבה המקובלת, גלגלי הרכב אינם מקבילים זה לזה.

## זווית שפיעה (Camber)

זווית שפיעה חיובית וזווית שפיעה שלילית

אם מסתכלים על המכונית מלפנים, רואים שהגלגלים אינם מקבילים זה לזה. אם המרחק בין החלק העליון של הגלגלים גדול מהמרחק שבין החלק התחתון של הגלגלים – השפיעה חיובית. דבר זה מאריך את חיי המסבים, מפחית כשלים פתאומיים ובנוסף לכך, מקל את ההיגוי. אם המרחק בין החלק העליון של הגלגלים קטן מהמרחק שבין החלק התחתון של הגלגלים – השפיעה שלילית. דבר זה מחזק את יכולת



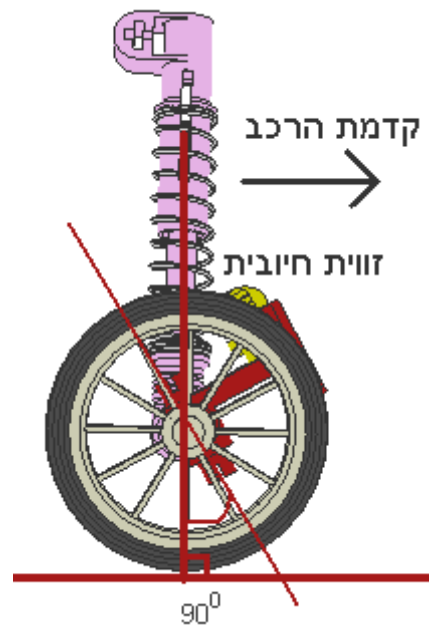
השליטה ברכב, מעניק יציבות בפניות מבלי לקצר בצורה משמעותית את חיי הצמיג) כי בפנייה, פועל כוח צידי על הגלגל החיצוני וגורם לו לשנות את זווית השפיעה לחיובית, אם מלכתחילה זווית השפיעה היא שלילית זה מפצה על כך, ומעניק שטח מגע גדול בין הצמיג לכביש – כי שהצמיג מונח מעט בזווית, שטח החיכוך שלו גדל).

במקרה של זווית שפיעה לא מכוונת יישחקו חריצי הצמיג. למשל, בזווית חיובית גבוהה מדי יישחק החלק החיצוני. בנוסף לכך, זווית שפיעה מוגזמת תגרום לבלאי מהיר של חלקי המתלה, כגון: המסבים. אם זווית השפיעה שונה בשני הצדדים – הרכב "ימשוך" לצד שבו הזווית חיובית יותר. בכלי רכב רבים, בעלי הנעה קדמית בעיקר, זווית השפיעה היא קבועה. לכן, אם הזווית אינה מכוונת הרי הרכב שחוק או עקום, אולי כתוצאה מתאונה – דבר המחייב החלפה או תיקון. בכלי רכב רבים משתנה הזווית במהירויות שונות, כתוצאה מכוחות אווירודינמיים המשנים את גובה הרכב (ודרך כך את הזווית). לכן, כיוון הזווית נעשה כך שבנסיעה מהירה תהיה שחיקה מעטה של הצמיגים. בעבר הייתה המגמה הרווחת לכונן את הזווית כך שתהיה אפס או חיובית מעט, על מנת לקזז את המשקל שיועמס על הרכב. המגמה הרווחת כיום היא כיוון זווית שלילית, על מנת להעניק לרכב יציבות נוספת (שטח המגע של הצמיג גדל בפניה).

## Caster – גלגילון) קדם אופן

קדם אופן חיובי דרך טובה לראות את ההשפעה של קדם האופן היא באמצעות עגלת קניות. במקרה זה אין זווית אבל הציר נמצא לפני מרכז הגלגל. הזווית במקרה זה היא חיובית. אם מנסים לשים את הגלגל לפני הציר, הוא ינסה לחזור למקומו אחורה – וימנע נסיעה בקו ישר. זה בדיוק מה שקורה ברכב עם קדם אופן שלילי מדי.

ציר ההיגוי של הגלגלים אינו ניצב לקרקע אלא מוטה באלכסון. אם החלק העליון של הציר מופנה לאחור, אז קדם האופן הוא חיובי. הדבר מסייע בשמירת כיוון הנסיעה בקו ישר. משום שציר ההיגוי חותך את הקרקע לפני הגלגל (בדומה לעגלת קניות), כך שהגלגל מאולץ לנוע מאחורי הציר ועל ידי כך לשמור על הכיוון. זווית חיובית מנסה ליישר את הגלגלים, וזו אחת

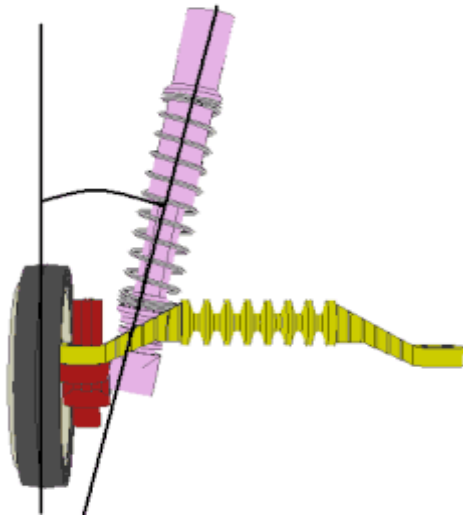


- הסיבות שההגה חוזר מעצמו למקומו לאחר פנייה. אם החלק העליון של הציר מופנה לפנים, אז קדם האופן הוא שלילי, מה שמעניק לנהג היגוי רך יותר. כיום מתכננים את קדם האופן שיהיה חיובי. אם הרכב נוסע לאחור, אז קדם האופן הוא שלילי (כי כיוון הנסיעה התהפך). במקרה זה מורגש היגוי רך יותר, אך ההגה לא מתיישר לבד כמו בנסיעה קדימה.
- אם קדם האופן לא מכוון עלול להיווצר קושי בשמירה על נסיעה בקו ישר.
- אם קדם האופן לא שווה בשני הצדדים – הרכב "ימשוך" לצד שבו קדם האופן פחות חיובי.
- אם קדם האופן שווה אבל שלילי מדי, ההגה יהיה רך, והרכב עלול לסטות ממסלולו. כי יהיה קשה לשמור על קו ישר. ככל שקדם האופן גדול יותר (וחיובי) גדל המרחק האופקי בין שני ה**כוחות** (נקודה עליונה ותחתונה של הציר), דבר המגדיל את שטח המגע של הצמיג. אם קדם האופן חיובי אך גדול מדי יהיה ההיגוי קשה (בגלל הגדלת שטח המגע של הצמיג עם הקרקע). בנוסף, תגרם רגישות יתר בצמיג לפגמים קטנים בכביש. במקרה של קדם אופן נייטרלי לא תהיה המכונית יציבה, כי כל הכוח מופעל על נקודה אחת.
- בדומה לזווית שפיעה, בכלי רכב רבים בעלי הנעה קדמית לא ניתן לכוון את קדם האופן. לכן, אם אינו מכוון, משהו ברכב שחוק או עקום, אולי כתוצאה מתאונה, דבר המחייב החלפה או תיקון.
- לפני שנת 1975 נהגו לתכנן מכוניות עם קדם אופן שלילי, משתי סיבות: הייתה דרישה מקרב הנהגים להגה רך. הגה כוח לא היה בנמצא, כך ששינוי קדם האופן היה פתרון אפשרי.

- הצמיגים לא היו רדיאליים (צורת מבנה הצמיג), ולכן הם היו מתעוותים בזמן נסיעה מהירה, ורוב הצמיג היה נסרח מאחורי הציר (ושטח המגע היה מאחורי הציר), כך שקדם האופן האפקטיבי היה חיובי. אם רוצים להרכיב צמיגים רדיאליים בכלי רכב יש לשנות את קדם האופן לחיובי, כדי שהרכב יוכל לשמור על מסלולו במהירות גבוהה. לקדם האופן השפעה מעטה על שחיקת הצמיגים.

## סטיית ציר ההיגוי (Steering Axis Inclination)

### נטיית ציר ההיגוי

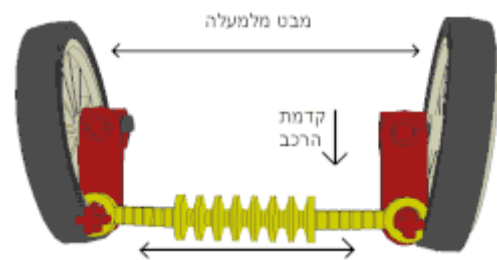


כאשר מסתכלים על המתלה מלפנים, רואים את הזווית הנוצרת בין המתלה לבין הצמיג. הזווית הזו בתוספת זווית השפיעה (יחד הן נקראות **הזווית הכוללת**, **Included Angle** - גורמת להרמה קלה של הרכב כאשר הגלגלים אינם במרכז. דבר זה גורם ליישור הגלגלים על ידי משקל הרכב, לאחר ביצוע פנייה (בנוסף לקדם האופן).

## כינוס גלגלים והתבדרות (Toe-in, Toe-out)

### כינוס גלגלים

כאשר מסתכלים על הרכב מלמעלה, רואים שהגלגלים אינם מקבילים זה לזה. מצב בו המרחק בין החלק הקדמי של הגלגלים קטן מהמרחק שבין חלקיהם האחוריים נקרא כינוס (Toe-in). דבר זה מונע מהגלגלים לנטות החוצה ב**האצות** חזקות או במהירויות גבוהות (אז



מקבילים הגלגלים זה לזה).

מצב בו המרחק בין החלק הקדמי של הגלגלים גדול מהמרחק שבין חלקיהם האחוריים נקרא התבדרות (Toe-out). דבר זה מונע מהגלגלים לנטות פנימה בפניות המתבצעות במהירות.

אם ה-**Toe** אינו מכוון עלולה להיות שחיקה מהירה ושווה בשני הצמיגים. **Toe** מתכוון תמיד בזוג הגלגלים הקדמיים (גם בכלי רכב בעלי **הנעה קדמית**).

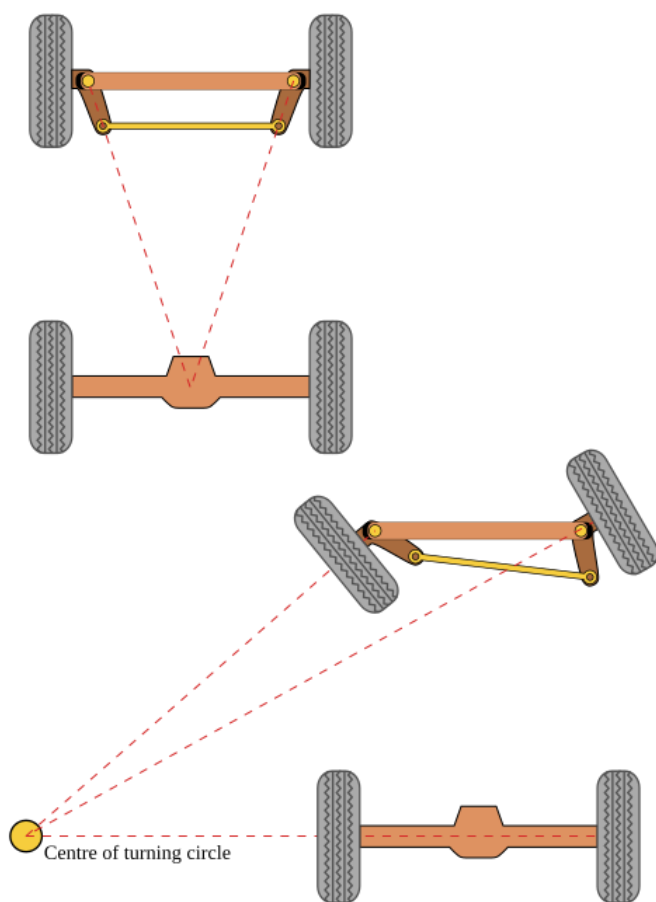
(ובכלי רכב מסוימים אף בגלגלים האחוריים. כמו זווית השפיעה, גם ה-**Toe** משתנה במהירויות שונות, כתוצאה מכוחות אווירודינמיים המשנים את גובה המרכז) ועל ידי כך את ה-**Toe** - בהתאם למוטות ההיגוי ולמערכת המתלים. ה-**Toe** מכוון כך שבמהירות גבוהה הוא אפס, כדי להגיע לשחיקת צמיגים מינימלית.

## זווית אקרמן (Ackerman Steering Principle)

זווית אקרמן, הגלגל

הפנימי פונה בזווית

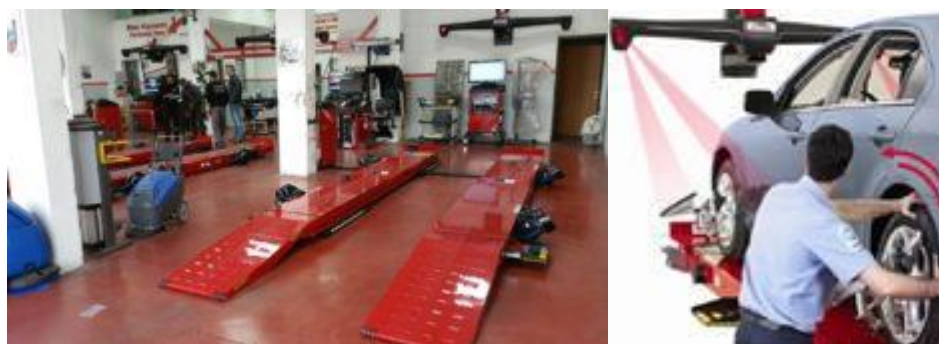
גדולה יותר



כאשר הגלגלים מופנים יש הבדל בין הזוויות שלהם: הגלגל הפנימי הוא בעל זווית גדולה יותר, מכיוון שהגלגל הפנימי פונה ברדיוס קטן יותר מהגלגל החיצוני (בנוסף, הגלגל הפנימי עובר פחות מרחק). לכן, הגלגל הפנימי פונה בזווית גדולה יותר. מתן זוויות שונות מתבצע על ידי זרועות ההיגוי. אילו הייתה לגלגל הפנימי זווית זהה לשל הגלגל החיצוני, היה מחליק ומשתפשף והדבר היה גורם לחימום הצמיג ולשחיקתו.

## תהליך בדיקת זוויות ההיגוי – ובטיחות הנסיעה

אחד התפקידים החשובים ביותר של מערכת הבדיקה הממוחשבת היא לאתר בעיה זוויות ההיגוי של הגלגלים. סטייה מהנחיות היצרן יכולה לסכן את בטיחות הנסיעה ולגרום להוצאות גבוהות לחברת התובלה.



לזוויות ההיגוי של גלגלי הרכב יש חשיבות מכרעת באשר לבטיחות הנסיעה. המשמעות היא שלא מספיק שכל מערכות הרכב עובדות ומתפקדות היטב בכדי להבטיח שהרכב יהיה בטוח לנסיעה על הכביש. צמיגים חדשים ואיכותיים יכולים לעזור, אולם גם הם לא יועילו אם הצמיג אינו 'יושב' כהלכה על הכביש. זוויות

ההיגוי של הרכב מורכבות מפרמטרים רבים, שמרביתם מתוכננים ונקבעים ע"י יצרן הרכב. הזוויות הזאת מתייחסת בראש ובראשונה לשלושת הממדים הפיזיקליים: כלומר זוויות ההטיה האנכית (כפי שהיא נראית במבט אל חזית הצמיג), זווית ההטיה הקדמית של ציר ההיגוי (כפי שהיא מתקבלת במבט צידי) וכן זווית ההתכנסות של האופנים. בנוסף לכך, כל אחת מהזוויות הללו מורכבת ממספר זוויות נוספות המשמשות לצורך בדיקה ואבחנה. חשוב להדגיש שלא מספיק שכל זוויות ההיגוי של כל הגלגלים תהיינה תקינות. הסיבה היא שברכב יש 4 גלגלים וחייבת להיות גם התאמה בין כל הגלגלים על מנת שהרכב ייסע, יבלום, יאיץ וכמובן שגם יבצע סיבוב כהלכה. מכיוון שכך, חשובה מאוד גם ההקבלה שבין הגלגלים, וזאת בטווח שקובע יצרן הרכב. השורה התחתונה היא פשוטה. לא מספיק שהצמיגים יהיו חדשים, יש צורך גם שכיוון הגלגלים יעשה בהתאם להנחיות היצרן. כיוון לא תקין ישפיע במישורן הן על בטיחות הנסיעה, הן על משך חיי הצמיג והן על תצרוכת הדלק. הפירוש המעשי הוא שבנקודה זו אין טעם לחסוך. לרוב מספיק ביקור אחד במוסך מקצועי המתמחה בכיוון זוויות היגוי על מנת לכוון את הגלגלים כהלכה, וכך לחסוך בהוצאות עתידיות גבוהות.



### בדיקות שחייבים לבצע לפני בדיקת הלייזר הממוחשבת

לפני ביצוע עבודות כיוון האופנים יש לבדוק שחיקה וחופשים במתלים, במסבים ובמחברי ההיגוי. במידה ויש חופש ברכיבי המתלה ו/או מערכת ההיגוי, אזי הכיוון לא יהיה אפקטיבי. זאת בדיקה מקדימה חשובה ביותר! אולם ישנם בעלי מקצוע שמוותרים על הבדיקה הזו. כבעל הרכב, אתה חייב לזכור שלא ניתן לבצע כיוון כהלכה ללא טיפול קודם בבעיות הללו, ובמרבית המקרים הכיוון שיבוצע לא יענה בצורה טובה על הבעיות שבגינן בוצע הכיוון.



### צורת העבודה הנכונה היא:

**1. בדיקה חזותית של הצמיגים והחישוקים (ג'אנטים).** המטרה היא לאתר פגיעה בחישוקים, שחיקת יתר ייחודית באחד או יותר מהצמיגים, צמיגים פסולים לשימוש וכו'. תנאי הכרחי להצלחת כיוון זוויות היגוי הוא שצמיגי הרכב הם במצב

טוב, ובעלי שחיקה אחידה פחות או יותר (כל צמיג בפני עצמו, וכל הצמיגים במבט כולל). כך, לדוגמא, באחד הגלגלים הייתה זווית קמבר לא תקינה, הרי שעם הנסיעה ברכב הצמיג נשחק בהיקפו, והשחיקה אינה אחידה. לאחר הכיוון, לאותו צמיג יהיה מגע חלקי עם הכביש, כך שלא יושגו התוצאות האופטימליות שנבעות מהכיוון החדש.

2. ניפוח אוויר בצמיגי הרכב, בהתאם ללחץ האוויר המומלץ ע"י יצרן הרכב.

3. בדיקת חופשים קפדנית במתלים (משולשים, בולמי זעזועים, בוקסות, תותבים).

4. בדיקת חופשים במערכת ההיגוי (ממסרת ההגה, תפוחי הגה, זרועות ההגה, מסבים).

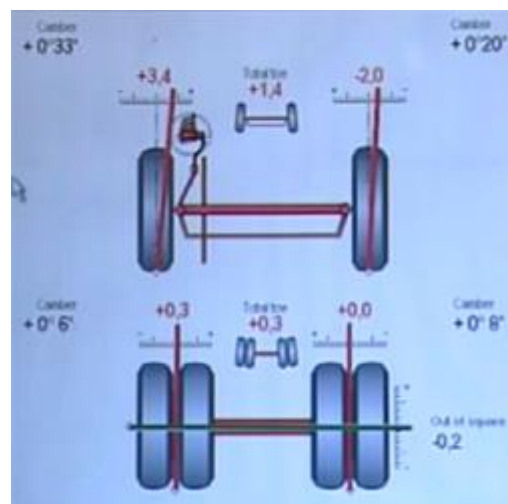
5. בדיקה ויזואלית כללית.

6. בדיקת זוויות היגוי באמצעות מערכת לייזר ממוחשבת.

7. כיוון הגלגלים, במתכונת הבסיסית ביותר, כולל כיוון של זוויות הגלגל בצירי האורך, הרוחב והגובה, בזוויות הנקבעות ע"י יצרן הרכב, וכן את ההקבלה בין כל הגלגלים. המטרה של כיוון זה הוא להבטיח שחיקה מינימלית של הצמיג, ומשך חיים מקסימלי. מבחינה בטיחותית, כיוון זוויות זה הוא שהרכב ייסע בצורה בטוחה, ללא משיכה לאחד הצדדים, וזאת במצב של נסיעה בכיוון ישר. זוויות ההיגוי העיקריות של הגלגל הבודד הן קמבר, קסטר והתכנסות אופנים

Toe-in, Caster, Camber

8. מבחן דרך מעשי: תהליך כיוון גלגלים  
חייבת תמיד להסתיים בנסיעת מבחן.  
במבחן זה איש המקצוע יכול לחשוף בעיות שלא מתגלות בבדיקה הרגילה, וכן לדעת האם התיקון שביצע ענה על הבעיה שהתעוררה.



9. בסוף התהליך בעל הרכב מקבל פלט מחשב

בפלט המחשב מופיעות לפחות שלוש זוויות ההיגוי העיקריות: התכנסות אופנים (TOE), שפיעת האופנים (CAMBER),

וזווית קדם האופן (CASTER). התדפיס חייב לכלול את כל הגלגלים, וכן להציג את הוראות היצרן באשר לתחום זוויות ההיגוי המותרת בכל אופן. תוצאות שאינן בהתאם להוראות היצרן חייבות להיות מודגשות בצורה בולטת. נדגיש שוב שאין לוותר על בדיקת הזוויות של הסרן האחורי על מנת לאתר סטייה חריגה בזוויות של הסרן, כמו גם במיקומו ביחס לסרן הקידמי.

### עובדות נוספות שכדאי לדעת כל כוון גלגלים מקצועי:

בעיות של 'משיכה בהגה' אינן נובעות תמיד מזוויות היגוי שאינן מכוונות. יתכנו בעיות נוספות שמקורן בצמיגים (ובעיקר עקב ניפוח לא אחיד של הצמיגים), בעיות במערכת הבלמים ואף בעיות במערכת היגוי הכוח של הרכב. בנקודה זו יש חשיבות רבה לוותק ולניסיון העשיר של בעל המקצוע, כך שהוא יכול לזהות גם בעיות שאינן קשורות ישירות לתחום עיסוקו.

### כיוון גלגלים אינו איזון גלגלים



נהגים רבים מבלבלים בין כיוון גלגלים לבין איזון גלגלים. לשני המונחים הללו אין למעשה קשר האחד לשני, וזאת פרט לעובדה ששניהם משפיעים על איכות ונוחות הנהיגה וכן על טיב השליטה של הנהג ברכב. איזון גלגלים (דינמי) פירושו שהגלגל המסתובב במהירות אינו מאוזן כהלכה. היעדר האיזון נגרם לרוב כתוצאה מחישוק עקום מעט, צמיג מעוות ופסול לנסיעה, ו/או מתהליכי הייצור של החישוק והצמיג, שבו האיזון הדינמי אינו מושלם. את התוצאות הנהג ירגיש היטב במהירויות גבוהות יחסית, וזאת לרוב בתחושה של ויברציות בגלגל ההגה. במצב שכזה יש לפנות לצמיגאי על מנת לבצע איזון, וזאת בכל הגלגלים. האיזון מבוצע באמצעות משקלות המותקנות על חישוק הגלגל ותפקידן ליצור איזון דינמי של הגלגל הספציפי. איזון גלגלים לא תקין אינו גורם לתופעה של 'משיכת' ההגה לאחד הכיוונים. מנגד, לכיוון גלגלים לא תקין יש מאפיינים אחרים, ובהם משיכה של הרכב לצד אחד במהלך הנסיעה, בלאי מואץ של הצמיגים וכדומה.