

Универзитет у Крагујевцу

Факултет инжењерских наука



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Друмски саобраћај

Предмет: Моторна возила 1

Број индекса: 731/2017

Владислав П. Јовичић

**Утицај конструктивних параметара на бочну стабилност возила
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Јованка Лукић, проф. -ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Резиме

Под стабилношћу возила, у суштини се подразумева његова способност да се креће задржавајући свој смер кретања без обзира на дејство спољних сила. У том смислу може да се говори о стабилности са аспекта: превртања, проклизавања (попречна), дејства центрифугалне силе при вожњи у кривини, под утицајем силе бочног ветра.

У овом раду акценат је стављен на бочну стабилност возила. Одређени конструктивни параметри возила утичу на стабилност и помоћу њих су добијени услови под којим настаје превртање и клизање возила. Нарушавање стабилности је испитано и у условима хоризонталног пута, нагиба и контра нагиба кроз кривину. Брзина превртања која настаје у условима нагиба и контра нагиба је већа од брзине клизања, а угао под којим настаје клизање и превртање је мањи од угла превртања. Клизање наступа пре превртања у условима нагиба и контра нагиба.

Кључне речи: Конструктивни параметри, возило, стабилност возила, бочна стабилност возила

Abstract

The stability of a vehicle, it is essentially implied that it is able to maintain the retention of its own direction of movement regardless of the effect of the external forces. In this respect, stability can be said from the aspect of: overturning, slipping (transverse), centrifugal force driving in the curve, under the influence of the side wind force.

In this paper, emphasis is put on the lateral stability of the vehicle. Certain structural parameters of the vehicle have the influence on the stability and on the conditions under which the overtaking and slipping of the vehicle occur. The distortion of stability was also investigated in the conditions of the horizontal path, inclination and contour inclination through the curve. The roll-over velocity generated by the slope and counter-slope conditions is greater than the slip rate, and the angle at which slip and rollover occurs is less than the rollover angle. Sliding occurs before roll-over in slope and counter slope conditions.

Key words: Constructive parameters, vehicle, stability of the vehicle, lateral stability of the vehicle

САДРЖАЈ

Abstract.....	3
УВОД	1
1. СТАБИЛНОСТ ВОЗИЛА	3
1.1. Попречна стабилност возила	4
1.2. Заокретање возила са еластичним точковима	7
2. УТИЦАЈ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТАРА НА БОЧНУ СТАБИЧНОСТ ВОЗИЛА	9
2.1. Праволиниско кретање возила на попречно нагнутом путу	9
2.2. Заокретање возила на попречно нагнутом путу	11
2.3. Заокретање возила у условима контра нагиба	23
3. ЗАКЉУЧАК.....	35
4. ЛИТЕРАТУРА.....	36

УВОД

У реалним условима експлоатације, брзина кретања моторног возила се често мења због промене фактора релевантних за кретање. У те факторе убрајају се путни услови - врста и стање коловоза, профил пута, затим климатски и метеоролошки услови (снег, лед киша, магла, ветар и слична). Од великог значаја су и саобраћајни услови, нпр. интензитет и структура саобраћајних токова, укрштања у нивоу, прелази преко пруга, пешачки прелази, насељена места и друго. Сви ови фактори одређују услове кретања моторног возила, а то значи и брзину кретања. Поред ових „спољних”, на стварну брзину кретања утичу и тзв. „унутрашњи” фактори као што су техничко стање моторног возила, техника вожње и други. [3]

Стабилност возила представља једну од експлоатационих карактеристика возила која показује његову способност да се у различитим условима креће без опасности да се занесе (проклиза) или преврне.

Када се говори о бочној-попречној стабилности возила, провера попречне стабилности је много потребнија, јер је често безбедност саобраћаја угрожена због попречног исклизавања или превртања возила.

Када се говори о попречној стабилности возила, у суштини се ради о стабилности са аспекта кретања у два случаја:

- кретање возила на хоризонталном путу са попречним нагибом;
- кретање возила на путу са попречним нагибом у кривини.

Активни елементи директно утичу на настанак саобраћајне незгоде. У активне елементе спадају уређаји за управљање од којих зависи управљивост и стабилност, уређаји за кочење (ефикасност, стабилност, поузданост), мењач, поље видљивости возача и евентуално постојање „мртвих” углова, уређаји за осветљавање пута, уочљивост возила од стране других учесника у саобраћају (боја, систем сигнализације).[5]

Основни задатак наведених активних елемената јесте да задрже управљивост, стабилност, добре кочионе ефекте и видљивост. Активни безбедносни елементи могу помоћи да се избегне саобраћајна незгода помажући возачу да боље контролише возило и избегне препреку.

Активни системи безбедности смањују могућност саобраћајних незгода и побољшавају општу сигурност вожње; основни елементи су: антиблокадни систем кочница [4] АБС (*anti blocking system*), систем за регулацију проклизавања погонских точкова АСР (*Anti Skid Regulation*), тј.систем за спречавање блокирања точкова при интензивном кочењу, систем за регулацију динамике вожње ЕСП (*electronic differential control*), електронска регулација диференцијала, тј. преноса снаге на погонске точкове ЕДС (*electronic damper control*) и електронска регулација амортизера. [5]

При кретању возила у правцу попречна стабилност може бити угрожена попречним нагибом пута. На јавним путевима попречни нагиб у правцу се одређује с обзиром на могућност одводњавања воде са коловозног застора. Попречни нагиб у правцу обично износе 2.5% и овај нагиб не представља опасност по стабилност возила. У брдским пределима нагиб износи 6-7%, понекад и 8-10 за путеве лошијег стања и конструкције [5]

1. СТАБИЛНОСТ ВОЗИЛА

Возило је свако превозно средство намењено за кретање по путу, осим покретних столица без мотора за немоћна лица и дечјих превозних средстава.

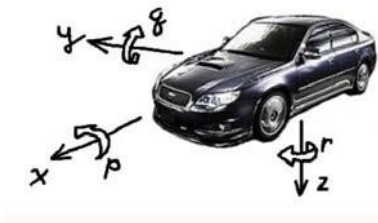
Према SRPS-у M.N0.001 возила представљају копнена саобраћајна средства која су по конструкцији, уређајима и опреми оспособљена за кретање по путевима, шинама или по терену и која су намењена за обављање транспортне или специјализоване делатности у саобраћају, односно у другим областима привреде.

Стабилност возила представља његову способност да се креће у различитим условима експлоатације по задатој трајекторији без клизања једног или више точкова и без превртања.

У овом делу рада разматрају се услови под којима је кретање возила стабилно, односно када се губи попречна стабилност возила.

У свим разматрањима овог дела претпоставља се да су точкови возила апсолутно крути.

Возило представља комплексан динамички систем са великим бројем степени слободе. Посматрајући само тело возила (каросерија са припадајућим елементима), оно у општем случају представља тело са свих 6 степени слободе у простору, слика 1.



Слика 1. Шест степени слободе кретања возила [5]

Поред тога, сваки од точкова такође има по 6 степени слободе, чиме укупан број степени слободе достиже 30, без узимања у обзир било каквих унутрашњих померања тј. деформација (које се у стварности јављају у одређеној мери). С обзиром на везе између точкова и возила, параметри који описују сва ова кретања су у међусобним интеракцијама. Такође, многи елементи исказују сложене форме понашања са изразитим нелинеарностима. Аналитичко моделирање кретања возила у општем случају зато би довело до изузетно

сложеног система једначина, при чему би била потпуно изгубљена прегледност и разумевање појединих утицаја и међузависности. Због тога је детаљна анализа кретања возила предмет специфичних разматрања, при чему се за овакве анализе обавезно користе рачунарски подржане симулације. За потребе проучавања кретања возила и разумевање основних законитости, међутим, сврсисходна је анализа специјалних, поједностављених случајева кретања, који смањују број степени слободе и утицајних фактора, омогућавајући на тај начин бољу прегледност и разумевање система. У пракси се ови специјални случајеви класификују према осама дуж којих делују силе које су од интереса па се тако динамика возила класификује на следеће целине:

- уздужна динамика – силе делују у правцу кретања; главни аспекти изучавања су отпори кретања и могућност њиховог савладавања, кочење итд.; кретање возила је транслаторно, параметри кретања се обично третирају као унапред задати; математички приступ је овде најједноставнији и базира се углавном на алгебарским релацијама;
- попречна динамика – силе делују у правцу попречне осе, од интереса је пре свега кретање возила у кривини; математички модели су по правилу знатно сложенији него код уздужне динамике, пре свега због комплексног понашања пнеуматика, али и због присуства већег броја утицајних фактора
- вертикална динамика – силе делују у правцу вертикалне осе, подручје од интереса су осцилације возила и њихов утицај на комфор путника као и на контакт точка са подлогом; углавном се заснива на примени теорије осцилација.[2]

1.1. Попречна стабилност возила

Провера попречне стабилности је много потребнија, јер је често безбедност саобраћаја угрожена због попречног исклизавања или превртања возила.

Када се говори о попречној стабилности возила, у суштини се ради о стабилности са аспекта кретања у два случаја:

- кретање возила на путу са попречним нагибом,
- кретање возила на равном хоризонталном путу у кривини.

При кретању возила у правцу попречна стабилност може бити угрожена попречним нагибом пута.

нагиба пута (друго је када се возило користи на узбрдицама и нагибима ван пута).

Саобраћајне незгоде су много чешће повезане са попречном стабилношћу возила (клизање-превртање око уздужне осе) у кривинама.

Критична брзина у кривини без попречног нагиба је гранична дозвољена брзина иза које свако повећање доводи до превртања и може се изразити формулом: [1]

$$V_k = \sqrt{\frac{g \cdot R \cdot l}{2h_t}} \quad [\text{m/s}] \quad (1.2)$$

где је:

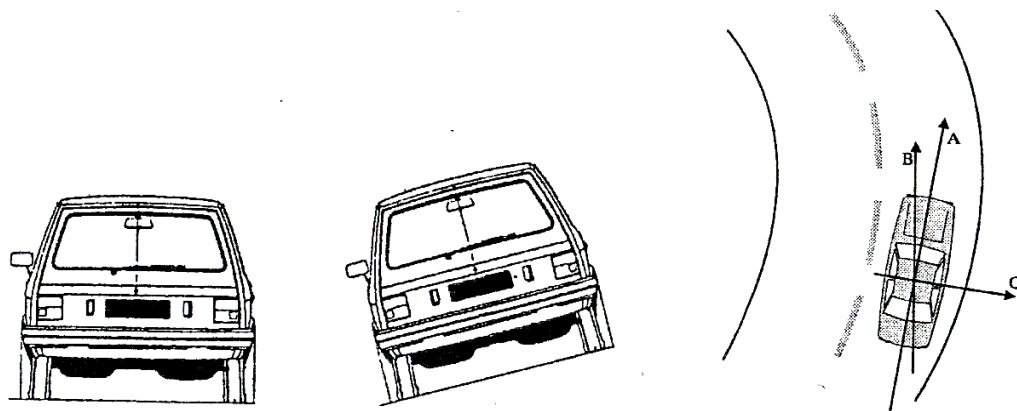
V_k – критична брзина [m/s],

g – убрзање силе земљине теже [m / s²],

R – полупречник кривине [m],

l – размак између точкова [m],

h_t – висина тежишта [m].



Слика 3. Деловање сила на возило прикретању у кривини: A = сила инерције; B = усмеравање правца; C = центрифугална сила [6]

У општем случају за котрљање аутомобила без бочног клизања важе услови:

- за предњу осовину: [2]

$$Y_1 \leq \sqrt{Z_1^2 \varphi^2 x_1^2} \quad (1.3)$$

- за задњу осовину:

$$Y_2 \leq \sqrt{Z_2^2 \varphi^2 x_2^2} \quad (1.4)$$

Наведени изрази укључују претпоставку да је коефицијент пријања исти за све точкове. У пракси то није случај. Такође бочне реакције тла $Y_1 = Y_1' + Y_1''$ и $Y_2 = Y_2' + Y_2''$, зависе од великог броја утицајних фактора, као што су: [3]

- утицај еластичног ослањања одражава се на подужни и попречни нагиб возила. С тим у вези појављује се неједнакост нормалних реакција тла.
- различите бочне еластичности пнеуматика проузрокују неједнакост тангенцијалних реакција на левим и десним точковима возила, што се, такође, одражава на расподелу бочних реакција предњих и задњих точкова.

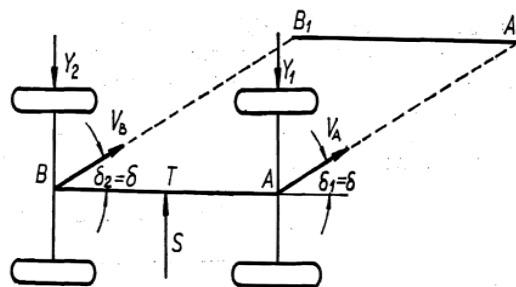
При заокретању возила са предњим погонским точковима, тангенцијалне реакције (вучне силе) заклапају одређени угао у односу на подужну осу аутомобила што проузрокује појаву бочних сила. [2]

На основу израза (1.3.) и (1.4.) закључује се могућа бочна реакција (Y_1 , Y_2) смањује са повећањем тангенцијалних реакција (X_1 , X_2) услед вуче или кочења. Тиме се, за исте услове пријањања, смањује попречна стабилност возила.

Уколико су тангенцијалне реакције ближе вредностима $Z_{1\phi}$ и $Z_{2\phi}$ утолико су потребне мање бочне силе које проузрокују бочно клизање једне осовине или читавог аутомобила. За случај када тангенцијалне реакције достигну вредност сила пријањања ($Z_{1\phi}$ и $Z_{2\phi}$) десне стране израза (1.3.) и (1.4.) имају вредност 0. У том случају довољна је било каква мала бочна сила па да проузрокује бочно клизање. [2]

1.2. Заокретање возила са еластичним точковима

Ако се претпостави да се возило на слици 4 креће праволиниски. Под дејством бочне силе S у тежишту возила T појавиће се бочне реакције тла Y_1 –напред и Y_2 –назад.



Слика 4. Праволинијско кретање аутомобила [2]

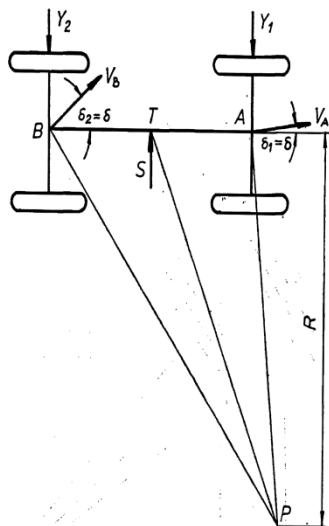
На слици 4 са δ_1 означен је угао скретања предњих точкова, а са δ_2 угао скретања задњих точкова. Очигледно је да ће се за $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ возило при кретању премештати по правој која заклапа угао δ у односу на првобитни правац кретања. [2]

За $\delta_1 > \delta_2$, слика 5, возила ће се кретати по кривој линији одступајући од првобитног праволинијског правца у смеру супротног од смера дејства бочне силе; за $\delta_1 < \delta_2$, слика 6, возила се креће по кривој линији одступајући од првобитног правца кретања у смеру дејства бочне силе S .

Одступања трајекторије точкова од задатог правца кретања у односу на подужну осу возила називамо скретање (или повођење) аутомобила.

При проучавању заокретању возила најчешће се модел возила са више трагова замењује еквивалентним моделом возила са једним трагом. Под претпоставком да су точкови крути, полупречник круга заокретања срачунавамо из односа:

$$R_0 = \frac{l}{\tan \lambda}; l = R_0 \tan \lambda \quad (1.5)$$



Слика 5. Заокретање аутомобила по кривој линији [2]

2. УТИЦАЈ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТАРА НА БОЧНУ СТАБИЧНОСТ ВОЗИЛА

У овом поглављу ће детаљније бити анализирана бочна стабилност возила која је условљена одређеним конструктивним параметрима.

Бочна стабилност возила је анализирана у три услова експлоатације возила:

- праволиниско кретање аутомобила на попречно нагнутом путу;
- условима нагиба и
- условима контра нагиба.

Посматрајући слику 6, силе које делују на возило уводе се у моментну једначину. Добијене изразе на крају моментне једначине сачињавају конструктивни параметри за које се уводе вредности. Њиховим комбиновањем добијају се различита решења на основу којих се може утврдити који од тих параметара највише утиче на стабилност возила.

Табела 1. Конструктивни параметри

Маса (m), kg	1200	1400	1500
Висина тежишта (h_t), m	0.4	0.5	0.6
Траг точка (s), m	0.75	0.8	0.85
Полупречник кривине (R), m	50	100	150
Попречни нагиб (β), °	0	2	5
Коефицијент пријањања(ϕ),	0.7	0.7	0.7
убрзање силе земљине теже, (g), m/s^2	9,81	9,81	9,81

2.1. Праволиниско кретање возила на попречно нагнутом путу

Посматра се услов при коме наступа превртање возила који се креће праволинијски на путу са попречним нагибом β , слика 6.

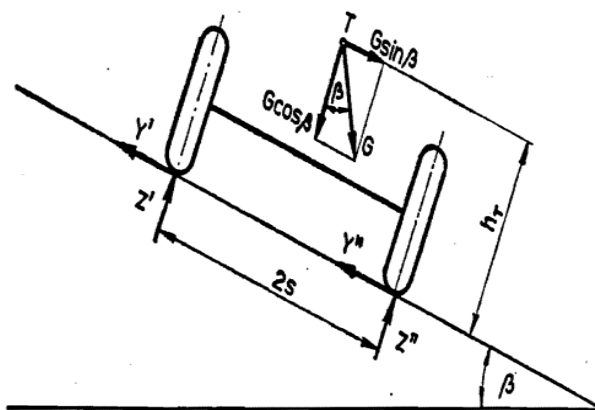
Занемарујући напред побројане утицајне параметре, предпоставља се да је коефицијент пријањања једнак за све тачкове. На основу услова равнотеже у подужном правцу следи да је сума момената за тачку контакта задњих тачкова:

$$\sum M_B = 0 \quad (2.1)$$

$$2sZ' + Gh_t \sin \beta - Gs \cos \beta = 0 \quad (2.2)$$

Према слици 6, поставља се моментна једначина за збир реакција сила које делују на леву осовину. Изражавање једначине за реакцију левих точкова Z' добија се:

$$Z' = \frac{Gs \cos \beta}{2s} - \frac{Gh_t \sin \beta}{2s} \quad (2.3)$$



Слика 6. Возило у попречној равни [2]

Почетак превртања око десне осе је могуће под условом:

$$Z' \leq 0 \quad (2.4)$$

$$2s > 0 \quad (2.5)$$

$$Gs \cdot \cos \beta - Gh_t \sin \beta \leq 0 \quad (2.6)$$

$$- Gh_t \sin \beta \geq -Gs \cos \beta / \cdot (-1) \quad (2.7)$$

$$Gh_t \cdot \sin \beta \geq Gs \cos \beta / \cdot \cos \beta S \quad (2.8)$$

$$\operatorname{tg} \beta \cdot h_t \geq s \quad (2.9)$$

Добија се решење за превртање:

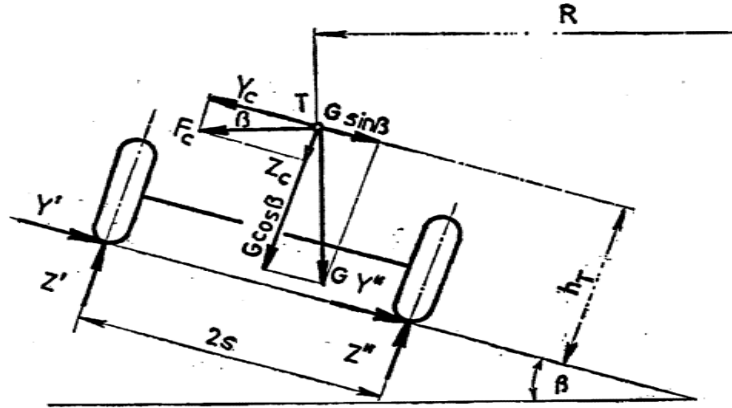
$$\operatorname{tg} \beta \geq \frac{s}{h_t} \quad (2.10)$$

Клизање би наступило да је:

$$\varphi < \frac{s}{h_t} \quad (2.11)$$

2.2. Заокретање возила на попречно нагнутом путу

Стабилност возила може бити нарушена превртањем или клизањем. Стога, се врши провера појаве клизања и превртања. У ту сврху посматра се слика 7, која описује криволинијско кретање возила у кривини полупречника R на бочно нагнутом путу угла β .



Слика 7. Кретање у кривини у бочно нагнутом путу [2]

Превртање возила

Услов превртања:

$$Z'' \leq 0$$

Поставља се моментна једначина сила за леве (спољашње) точкове:

$$Z'' \cdot 2s - G \cdot h_t \cdot \sin \beta - F_c \cdot s \sin \beta + F_c \cdot h_t \cdot \cos \beta - G \cdot s \cos \beta = 0 \quad (2.12)$$

Добија се израз решење за Z'' :

$$Z'' = \frac{G h_t \sin \beta + F_c s \sin \beta - F_c h_t \cos \beta + G s \cos \beta}{2s} \quad (2.13)$$

Пошто је $2S > 0$, а услов превртања је $Z'' \leq 0$ израз (2.13) добија облик:

$$G h_t \cdot \sin \beta + F_c \cdot s \cdot \sin \beta - F_c h_t \cos \beta + G s \cos \beta \leq 0 \quad (2.14)$$

Пошто је познато да је: $F_c = \frac{G V^2}{g R}$, онда је:

$$G h_t \cdot \sin \beta + \frac{G V^2}{g R} \cdot s \cdot \sin \beta - \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} h_t \cos \beta + \frac{G}{g} \cdot s \cdot \cos \beta \leq 0 \quad (2.15)$$

Даље је:

$$h_t \sin \beta + \frac{V^2}{g R} (\sin \beta \cdot S - h_t \cdot \cos \beta) + s \cdot \cos \beta \leq 0 \quad (2.16)$$

$$\operatorname{tg}\beta \cdot \left[h_t + \frac{v^2 s}{gR} \right] - \frac{v^2}{gR} \cdot h_t + s \leq 0 / \cdot g \quad (2.18)$$

$$g \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot h_t + \frac{v^2}{R} \cdot h_t + \cdot g \leq 0 \rightarrow \quad (2.19)$$

$$h_t \sin\beta + \frac{v^2}{gR} (\sin\beta \cdot S - h_t \cdot \cos\beta) + s \cdot \cos\beta \leq 0 \quad (2.20)$$

$$\operatorname{tg}\beta \cdot \left[h_t + \frac{v^2}{R} \right] - h_t + s \leq 0 / \cdot g \quad (2.21)$$

$$g \cdot h_t \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot + \operatorname{tg} \frac{v^2 s}{R} \cdot \operatorname{tg}\beta - \frac{v^2}{R} \cdot h_t + s \cdot g \leq 0 \rightarrow \quad (2.22)$$

$$\frac{v^2}{R} \cdot (s \cdot \operatorname{tg}\beta - h_t) \geq -g \cdot h_t \cdot \operatorname{tg}\beta - g \cdot s \quad (2.23)$$

$$\frac{v^2}{R} \geq \frac{-g \cdot h_t \cdot \operatorname{tg}\beta - g \cdot s}{-(h_t - s \cdot \operatorname{tg}\beta)} \quad (2.24)$$

$$\frac{v^2}{R} \geq \frac{g \cdot h_t \cdot \operatorname{tg}\beta + g \cdot s}{h_t - s \cdot \operatorname{tg}\beta} \quad (2.25)$$

Брзина при којој наступа превртање је:

$$\frac{v^2}{R} \geq \frac{(h_t \cdot \operatorname{tg}\beta + s)}{h_t - s \cdot \operatorname{tg}\beta} \cdot g \quad (2.26)$$

Да би се испитало како конструктивни параметри возила утичу на бочну стабилност, уводи се вредности за параметре који се налазе у обрасцу (2.26.). Комбинацијом вредности свих параметара добијају се резултати на којима ће се видети који од параметара највише утиче на бочну стабилност, а који на најмање. У табели број 2. приказана је маса (m), висине тежишта (h_t), полутраг точкова (s), полупречник кривине (R) и угао бочног нагиба (β).

Табела 2. Граничне брзине превртања у нагибу V_{pr}

s	h_t	R	β	Гранична брзина превртања V
0,8	0,5	100	2	41,216
0,8	0,5	100	2	41,216
0,8	0,5	100	2	41,216
0,8	0,5	100	2	41,216
0,75	0,5	100	2	39,862
0,85	0,5	100	2	42,536
0,8	0,5	100	2	41,216
0,8	0,4	100	2	46,326
0,8	0,6	100	2	37,52
0,8	0,5	100	2	41,216
0,8	0,5	50	2	29,144
0,8	0,5	150	2	50,479
0,8	0,5	100	2	41,216
0,8	0,5	100	0	39,618
0,8	0,5	100	5	43,873

Из приложене табеле 2 види се да највећа брзина којом возило може да прође кроз кривину полупречника 150 m је 50.479 m/s. Смањењем полупречника кривине брзина које возило може да савлада кривину максимално је 29.144 m/s, слика 8.

Преко добијеног израза (2.26) може да се изрази угао β . Ако је $h_t - s \cdot tg\beta = 0$, онда је и $tg\beta = \frac{h_t}{s}$, и за добијену вредност угла неће доћи до превртања, за било коју вредност V.

Преко моментне једначине може да се изрази и угао β .

Повратком у једначину (2.22) добија се:

$$(2.22) \rightarrow g \cdot h_t \cdot tg\beta + \frac{v^2 s}{R} \cdot tg\beta - \frac{v^2}{R} \cdot h_t + s \cdot g \leq 0 \quad (2.27)$$

$$tg\beta \cdot \left[g \cdot h_t + \frac{v^2}{R} \cdot s \right] \leq \frac{v^2}{R} \cdot h_t - g \cdot s \quad (2.28)$$

Коначним сређивањем једначине добија се израз за $tg\beta$:

$$tg\beta \leq \frac{\frac{v^2}{R} \cdot h_t - g \cdot s}{g \cdot h_t + \frac{v^2}{R} \cdot s} \quad (2.29)$$

Ако су познате вредности за брзину V, h_t , g, R и s добија се решење за $tg\beta$ а самим тим и за β . Комбиновањем вредности добија се решење за $tg\beta$.

Табела 3. Гранични углови превртања на нагибу β

s	h_t	R	V	Бочни угао нагиба пута β
0.8	0.5	100	25	154.5067988
0.8	0.5	100	25	154.5067988
0.8	0.5	100	25	154.5067988
0.8	0.5	100	25	154.5067988
0.75	0.5	100	25	156.1914831
0.85	0.5	100	25	152.9669605
0.8	0.5	100	25	154.5067988
0.8	0.4	100	25	149.0664667
0.8	0.6	100	25	159.3713132
0.8	0.5	100	25	154.5067988
0.8	0.5	50	25	173.8805603
0.8	0.5	150	25	145.0180943
0.8	0.5	100	25	154.5067988
0.8	0.5	100	16.67	137.8212737
0.8	0.5	100	33.33	170.5584131

Из Табеле 3 закључе је се да на угао превртања највише утиче брзина V и полупречник кривине R . Што је већа брзина то је мањи угао у ком долази до превртања, односно, што већа брзина пре ће наступити превртање.

При кретању константом брзином на хоризонталном путу, за угао $\beta=0$ добија се и брзина:

$$\frac{V^2}{R} = \frac{g \cdot S}{h_t} \quad (2.30)$$

Клизање возила

Пошто је испитан услов превртања, на реду је испитивање клизања. Услов бочног клизања је:

$$(Y' + Y'') \max = \varphi Z \quad (2.31)$$

У овом случају је:

$$(Y' + Y'') \max = \left[G \cdot \cos\beta + \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \sin\beta \right] \cdot \varphi \quad (2.32)$$

Равнотежа сила у правцу осе y је:

$$Y' + Y'' + G \cdot \sin\beta - Y_c = 0 \quad (2.33)$$

$$Y' + Y'' = Y_c - G \cdot \sin\beta \quad (2.34)$$

$$Y' + Y'' = \frac{G}{V} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \cos\beta - G \cdot \sin\beta \quad (2.35)$$

У овом случају је:

$$\underbrace{\frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \cos\beta - G \cdot \sin\beta}_{\text{почетак клизања}} \geq \underbrace{\left[G \cdot \sin\beta + \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \sin\beta \right]}_{\text{бочна реакција}} \quad (2.36)$$

$$\frac{V^2}{gR} \cdot \cos\beta - \sin\beta \geq \left[\cos\beta + \frac{V^2}{R} \cdot \sin\beta \right] \frac{V^2}{gR} \cdot \varphi \quad (2.37)$$

$$\frac{V^2}{gr} \cdot \cos\beta - \frac{V^2}{R} \cdot \varphi \cdot \sin\beta \geq \varphi \cdot \cos\beta + \sin\beta / \cdot g \quad (2.38)$$

$$\frac{V^2}{R} \cdot (\cos\beta - \sin\beta \cdot \varphi) \geq g \cdot (\varphi \cdot \cos\beta + \sin\beta) \quad (2.39)$$

$$\frac{V^2}{R} \geq \frac{g \cdot (\sin\beta + \varphi \cos\beta)}{\cos\beta - \varphi \sin\beta} / \cdot \cos\beta \quad (2.40)$$

Добијено решење за израчунавање брзине бочног клизања је:

$$\frac{V^2}{R} \geq \frac{g \cdot (\operatorname{tg}\beta + \varphi)}{1 - \varphi \cdot \operatorname{tg}\beta} \quad (2.41)$$

Табела 4. Граничне брзине клизања за нагиб V_{kl}

ht	R	β	φ	Гранична брзина клизања V
0.5	100	2	0.7	27.185
0.5	100	2	0.7	27.185
0.5	100	2	0.7	27.185
0.5	100	2	0.7	27.185
0.5	100	2	0.7	27.185
0.5	100	2	0.7	27.185
0.5	100	2	0.7	27.185
0.5	100	2	0.7	27.185
0.4	100	2	0.7	27.185
0.6	100	2	0.7	27.185
0.5	100	2	0.7	27.185
0.5	50	2	0.7	19.223
0.5	150	2	0.7	33.295
0.5	100	2	0.7	27.185
0.5	100	0	0.7	26.205
0.5	100	5	0.7	28.687

У случају када је $1 - \varphi \cdot \operatorname{tg}\beta = 0$, онда је $\operatorname{tg}\beta = \frac{1}{\varphi}$.

На основу израза (2.41) може се изразити $\operatorname{tg}\beta$, односно угао β , који представља попречни нагиб коловоза. Изабраним параметрима постављају се услови на основу којих се проналази највећи угао бочног нагиба пута којим је могуће проћи кроз кривину, а да возило не проклиза. Тако да следи:

$$\frac{V^2}{R} \geq \frac{g \cdot (\operatorname{tg}\beta + \varphi)}{1 - \varphi \cdot \operatorname{tg}\beta} \quad (2.42)$$

$$V^2 - \varphi \cdot V_s^2 \cdot \operatorname{tg}\beta \geq R \cdot g \cdot \varphi + R \cdot g \cdot \operatorname{tg}\beta \quad (2.43)$$

$$V^2 - R \cdot g \cdot \varphi \geq \varphi \cdot V^2 \cdot \operatorname{tg}\beta + R \cdot g \cdot \operatorname{tg}\beta \quad (2.44)$$

$$V^2 - R \cdot g \cdot \varphi \geq \operatorname{tg}\beta \cdot (\varphi \cdot V^2 + R \cdot g) \quad (2.45)$$

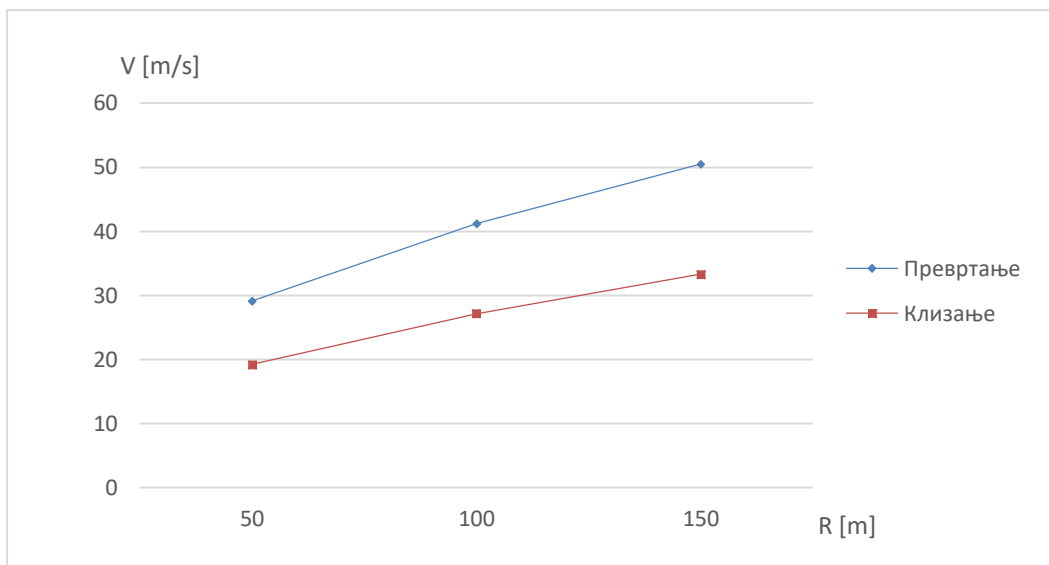
На крају добија се израз за угао :

$$\operatorname{tg}\beta \leq \frac{\frac{V^2}{R} - g \cdot \varphi}{\varphi \cdot \frac{V^2}{R} + g} \quad (2.46)$$

Табела 5. Гранични углови клизања β

s	R	V	φ	Бочни угао нагиба пута β
0.8	100	25	0.7	177.509
0.8	100	25	0.7	177.509
0.8	100	25	0.7	177.509
0.8	100	25	0.7	177.509
0.75	100	25	0.7	177.509
0.85	100	25	0.7	177.509
0.8	100	25	0.7	177.509
0.8	100	25	0.7	177.509
0.8	100	25	0.7	177.509
0.8	100	25	0.7	177.509
0.8	50	25	0.7	13.561
0.8	150	25	0.7	168.021
0.8	100	25	0.7	177.509
0.8	100	16.67	0.7	160.824
0.8	100	33.33	0.7	13.561

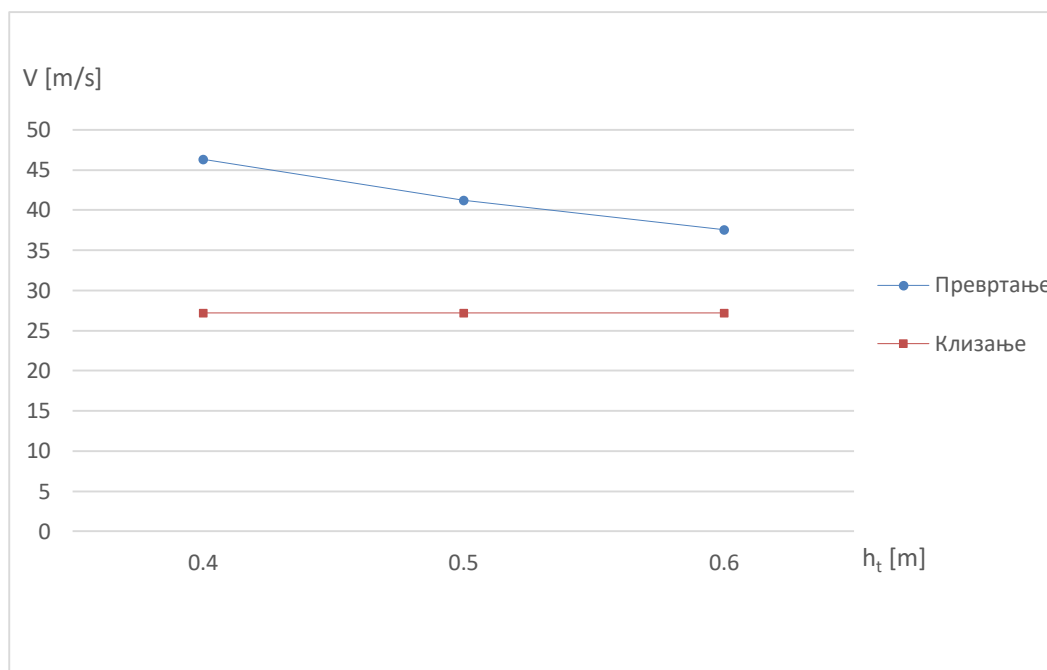
На највећу добијену вредност угла β утиче полупречник кривине, што показује да је највећи угао клизања у кривини са најмањим полупречником. Такође са повећањем брзине на 33.33 m/s на углу већем од $\beta=14^\circ$ настаће превртање.



Слика 8. Утицај полупречника кривине на стабилност возила при заокретању у условима нагиба, $\beta=2^\circ$

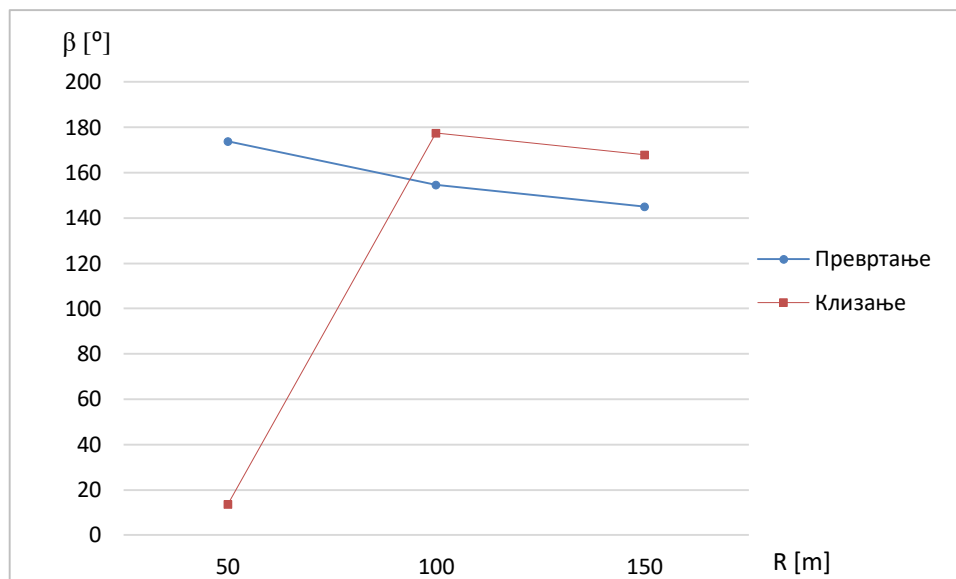
Посматрајући слику 8, закључује се да ће клизање пре наступити пре превртања. У условима попречног нагиба $\beta=2^\circ$, полупречнику кривине од 50 m, клизање ће наступити већ на 19,22 m, док ће за превртање при радујусу од 50 m бити потребно 29,14 m/s. На истом нагибу, на полупречнику од 150 m биће потребна брзина од 33,29 m/s да би се нарушила стабилност у виду клизања, док да би се возило преврнуло, за исту вредност полупречника, било потребно 50,48 m/s. Без обзира на величину полупречника кривине стабилност возила је нарушена клизањем. Повећање полупречника кривине доводи до веће стабилности возила. Разлика између брзина клизања и превртања расте са порастом полупречника кривине.

После полупречника, положај тежишта на возилу h_t , има највећи утицај на стабилност. Са повећањем висине тежишта опада брзина којом возило може да прође кроз кривину на 37.520 m/s, док код смањења висине брзина се знатно повећала на 46.326 m/s. Траг точкова 2S (у примеру s) не утиче битно на брзину превртања, док маса возила m , не утиче уопште, јер ни не фигурише у обрасцима за граничне вредности углова и брзина.



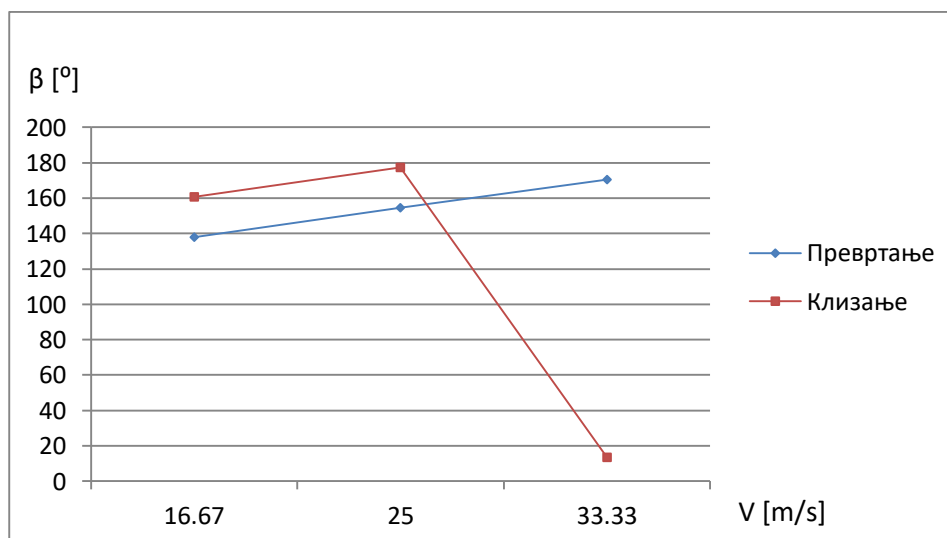
Слика 9. Утицај висине тежишта на стабилност при заокретању у условима нагиба, $\beta=2^\circ$, $R=100$ m

На слици 9 упоређени су параметри зависности брзине V од висине тежишта возила h_t , у попречном нагибу од $\beta=2^\circ$ и полупречника кривине $R=100$ m. При висини тежишта од $h_t=0.4$ m клизање ће наступити на 27,18 m/s, док ће превртање наступити при 46,32 m/s. При висини тежишта од 0.6 m клизање ће наступити на 27,18 m/s, док ће се возило превнути на најмањој вредности од 37,52 m/s. Закључује се да ће прво наступити клизање, па превртање за исте вредности тежишта. Промена висине тежишта не утиче промену брзине на којој настаје клизање, што значи да у овој кривини ће сигурно наступити клизање на 27,18 m/s. Са повећањем висине тежишта превртање ће се догодити раније, односно при све мањој брзини, а разлика између брзине клизања и брзине превртања опада.



Слика 10. Утицај полупречника кривине на гранични угао нагиба пута на ком се нарушава стабилност, $V=25 \text{ m/s}$

Из табела 4 и 5 пореде се вредности најутицајнијих параметара. Полупречник кривине R битно утиче на стабилност у кривини, и самим тим је директно повезан са попречним нагибом који ће се извести кроз кривину за дати полупречник. Према датим параметрима за $R=50 \text{ m}$, при брзини од $V=25 \text{ m/s}$ клизање би наступило на $13,56^\circ$, а превртање на $173,88^\circ$. Када је $R=100 \text{ m}$ клизање би наступило тек на $177,509^\circ$, а превртање на $154,51^\circ$. Ако се полупречник повећа на 150 m , клизање и превртање опада за једнаке интервале на $168,02^\circ$ и $145,01^\circ$. Са повећањем полупречника кривине угао превртања опада, односно са истом брзином ће возило бити мање стабилно кроз кривину.



Слика 11. Утицај брзине на гранични угао нагиба пута на ком се нарушава стабилност, $R=100 \text{ m}$, $h_t=0,5 \text{ m}$

После полупречника кривине, на стабилност највише утиче брзина. На слици 11 је приказан утицај брзине на нагиб пута за полупречник кривине $R=100\text{ m}$ и висину тежишта, $h_t=0,5\text{ m}$. При брзини $V=16,67\text{ m/s}$ угао при коме настане клизање је $160,82^\circ$, док при истој брзини превртање настаје већ на $137,82^\circ$ угла нагиба β . При повећању брзине на $V=25\text{ m/s}$, угао превртања расте на $154,51^\circ$ као и угао клизања на $177,51^\circ$, док при повећању брзине на $V=33,33\text{ m/s}$ угао клизања је већ на $13,56^\circ$. Угао превртања при истој брзини је $170,56^\circ$. Са слике 11 се може закључити да угао клизања и превртања расте са повећањем брзине осим у случају клизања при брзини од $33,33\text{ m/s}$ када клизање наступа и при малом углу нагиба β . Само при брзини од $33,33\text{ m/s}$ ће клизање наступити пре превртања, док при мањој брзини прво наступа превртање, затим клизање. Повећањем брзине поређава се гранични угао губитка стабилности.

$$\operatorname{tg}\beta = 0$$

На хоризонталном путу, где је $\beta=0$, настаје клизање за случај брзине:

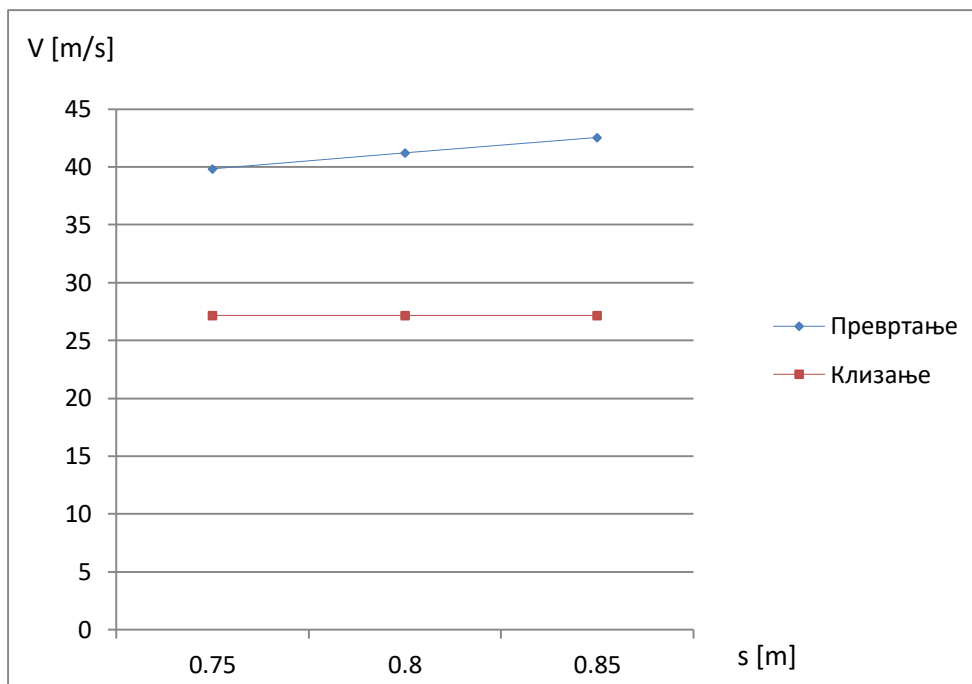
$$\frac{V^2}{R} \geq g \cdot \varphi \quad (2.47)$$

Посматрајући Табелу 2, Табелу 3, Табелу 4 и Табелу 5 и њихове вредности долази се до закључка: да су вредности из табела у којима се изражава клизање мање од вредности у табелама које показују вредности превртања. Стога закључује се да је потребна мања брзина, односно угао да би дошло до клизања него до превртања. Самим тим прво ће наступити клизање па онда превртање.

$$V_{kl} < V_{pr}$$

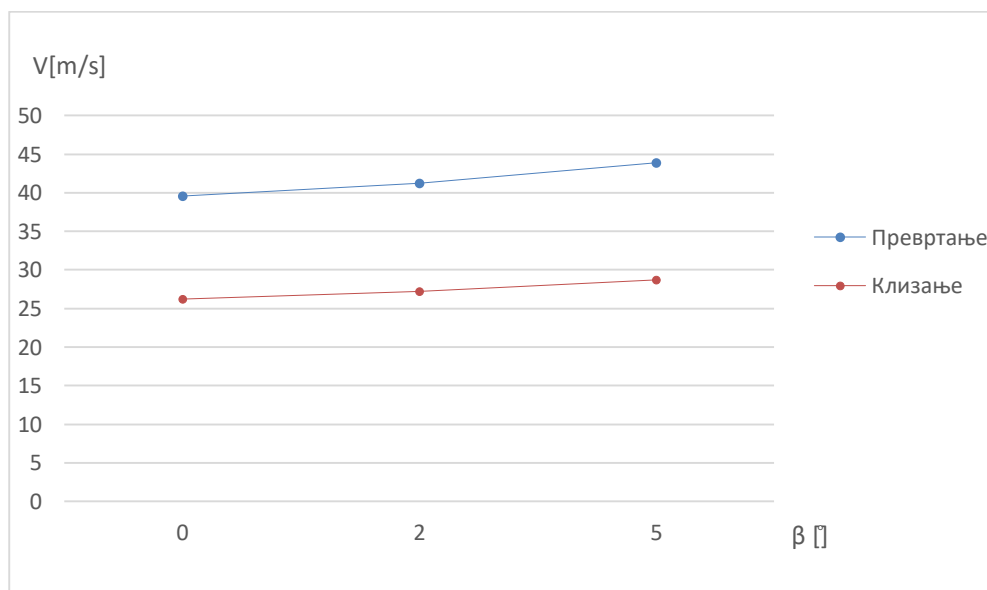
2.3.1 Анализа утицајних параметара на гранични угао нагиба пута при ком се нарушава стабилност возила

Конструктивни параметри утичу на граничне углове нарушавања стабилности тако што ће одложити или преуранити њихово настајање у зависности од варирања вредности параметара. У случају када угао превртања или клизања расте, са аспекта стабилности, возило је стабилније и касније ће доћи до нарушавања стабилности, а са аспекта безбедности, кривина је безбеднија. Усваја се једна брзина кретања возила кроз кривину, осим у случају када се директно пореди утицај брзине на гранични угао нарушавања стабилности, где се узимају за пример различите вредности брзина.



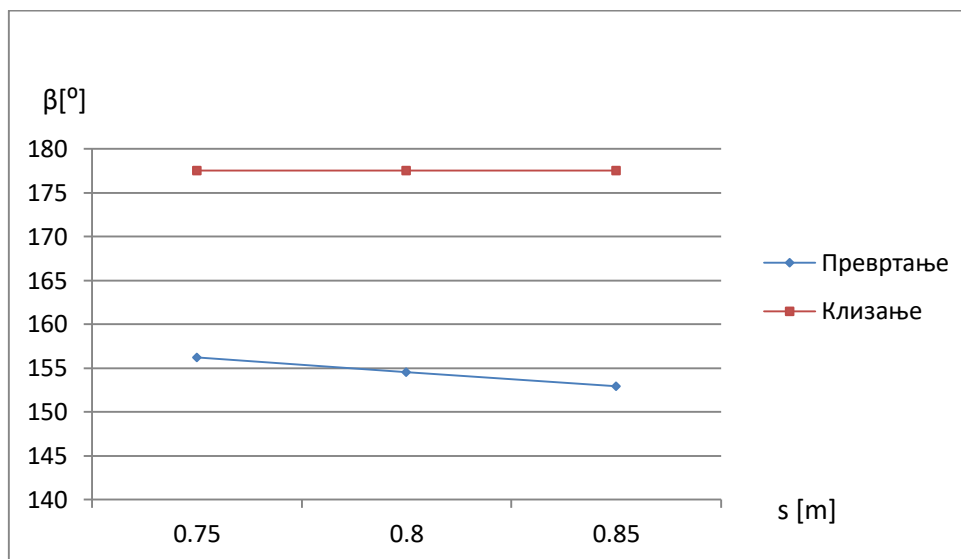
Слика 12. Утицај трага точка на стабилност возила при заокретању, $\beta=2^\circ$

Са слике 12 се може закључити да прво настаје клизање па превртање. За дате величине трага точка s и угла нагиба пута $\beta=2^\circ$, добијене су брзине на којима настаје клизање и превртање. Клизање се настаје на 25,24 m/s за све три величине трага точка, што показује да клизање не зависи од промене трага точка. Превртање наступа на 36,96 m/s. Са повећањем трага точка повећава се и брзина на којој настаје превртање, па тако са трагом точка 0,85 m брзина на којој настаје превртање је 39,27 m/s.



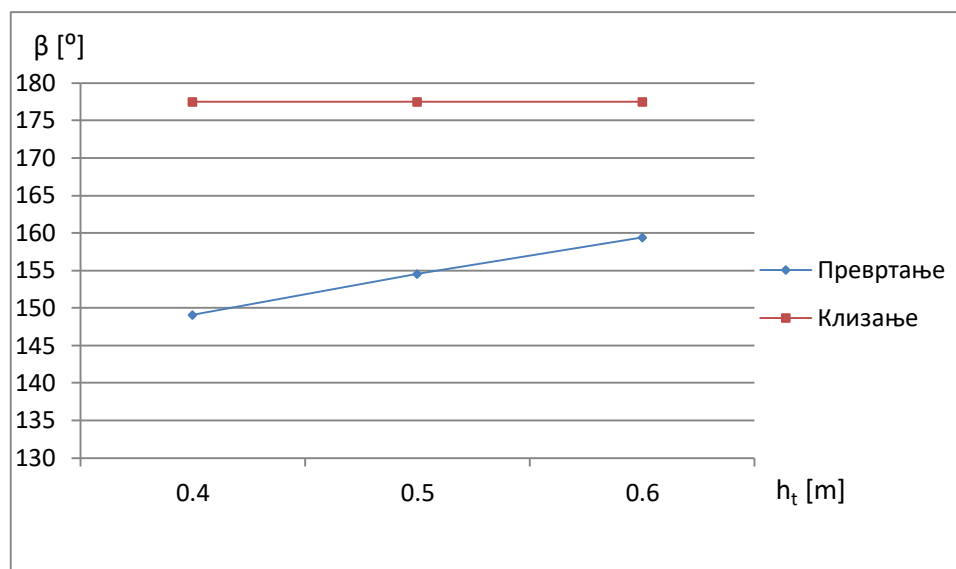
Слика 13. Утицај нагиба пута на граничну брзину клизања, $R=100\text{ m}$, $h_t=0,5\text{ m}$

Однос брзине V и угла нагиба β је директно повезана са повећањем вредности параметара, као што је приказано на слици 12, ако се узму у обзир услови полупречника $R=100$ m и висине тежишта $h_t=0,5$ m. На нагибу $\beta=0^\circ$, клизање ће наступити на 26,20 m/s, на $\beta=2^\circ$ клизање настаје на 27,19 m/s, а на $\beta=5^\circ$ клизање почиње на 28.68 m/s. Превртање при углу $\beta=0^\circ$ почиње на 39,62 m/s, на $\beta=2^\circ$ настаје на 41,22 m/s и на $\beta=5^\circ$ настаје на 43,87 m/s. Може се закључити да се са повећањем угла нагиба повећава и брзина на ком ће настати превртање, односно клизање. Кривина је све безбеднија, а само нарушавање стабилности ће се догодити касније и са већим брзинама.



Слика 14. Утицај трага точка на гранични угао нагиба пута на ком се нарушава стабилност возила, $V=25$ m/s

При условима брзине $V=25$ m/s, највећа вредност угла β за тачку превртања износи $156,19^\circ$, када је траг точка $s=0,75$ m, а најмања $152,97^\circ$, када је траг точка $s=0,85$ m. Са повећањем вредности трага точка мањи је угао при коме ће доћи до превртања. За све анализиране вредности трага точка S клизање ће наступити на $\beta=177,51^\circ$, што значи да пораст вредности s не утиче када је у питању нарушавање стабилности у виду клизања. Ако се возило кретало истом брзином $V=25$ m/s, превртање ће се догодити пре клизања, а разлика између граничног угла превртања и клизања расте са порастом вредности трага точка, као што је приказано на слици 14.

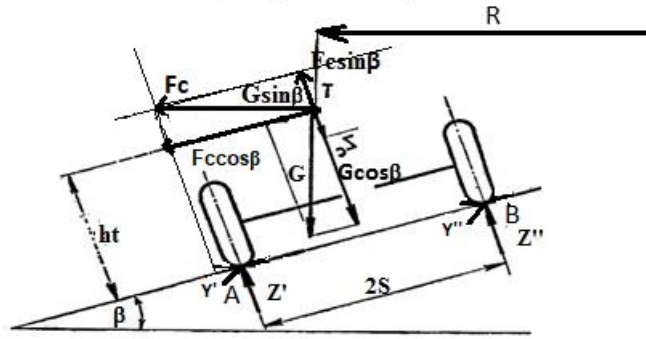


Слика 15. Утицај висине тежишта на гранични угао нагиба пута на ком се нарушава стабилност возила, $R=100$ m, $V=25$ m/s

На слици 15 приказан је однос попречног нагиба β и висине тежишта возила h_t , за полупречник $R=100$ m, и брзину $V=25$ m/s. Када је $h_t=0,4$ m, превртање би наступило на $\beta=149,07^\circ$, док на висини тежишта $h_t=0,6$ m превртање би наступило на $\beta=159,37^\circ$. Код клизања, на висини тежишта $h_t=0,4$ m, оно би наступило на $\beta=177,51^\circ$ и оно би остало исте вредности са порастом h_t . Закључује се да повећање висине тежишта утиче на повећање попречног нагиба β на ком би се возило преврнуло, али и да повећање вредности h_t не утиче на повећање вредности нагиба β на ком би настало клизање. Самим тим, касније ће доћи до превртања и возило је стабилније ако имамо у обзир да се возило креће брзином од 25 m/s. Разлика између клизања и превртања опада са порастом нагиба превртања.

2.3. Заокретање возила у условима контра нагиба

Попречни нагиб пута представља позитиван нагиб, док контра нагиб представља негативан нагиб пута. Дозвољава се само у благим кривинама и зависи од самог полупречника, као и од радијалног убрзања које не сме да износи више од $0,5 \text{ m/s}^2$. Контра нагиб се изводи обично до $-2,5\%$, и најчешће се примењује у раскрсницама које су регулисане кружним током.



Слика 16. Смер окретања возила око ове која пролази кроз спољне тачкове на контра нагибу [2]

Превртање-контра нагиб

Рачуна се моментна једначина за тачку А за контра нагиб са слике:

$$Z'' \cdot 2s - G \cdot s \cdot \cos\beta + F_c \cdot s \cdot \sin\beta + F_c \cdot h_t \cdot \cos\beta + G \cdot h_t \cdot \sin\beta = 0 \quad (2.48)$$

Услов превртања на контра нагибу:

$$Z'' \leq 0 \quad (2.49)$$

Онда је:

$$(F_c \cdot h_t - G \cdot s) \cdot \cos\beta + (F_c \cdot s + G \cdot h_t) \cdot \sin\beta \leq 0 \quad (2.50)$$

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot h_t \cdot \cos\beta + \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot s \cdot \sin\beta \leq G \cdot s \cdot \cos\beta - G \cdot h_t \cdot \sin\beta \quad (2.51)$$

$$\frac{v^2}{R} \cdot h_t \cdot \cos\beta + \frac{v^2}{R} \cdot s \cdot \sin\beta \leq g \cdot s \cdot \cos\beta - g \cdot h_t \cdot \sin\beta \rightarrow \quad (2.52)$$

$$\frac{v^2}{R} \cdot (h_t \cdot \cos\beta + s \cdot \sin\beta) \leq g \cdot (s \cdot \cos\beta - h_t \cdot \sin\beta) \quad (2.53)$$

$$\frac{v^2}{R} \leq \frac{g \cdot (s \cdot \cos\beta - h_t \cdot \sin\beta)}{h_t \cdot \cos\beta + s \cdot \sin\beta} \quad (2.54)$$

Добија се израз за брзину за превртања возила на контра нагибу:

$$\frac{v^2}{R} \leq \frac{g \cdot (s - h_t \cdot \tan\beta)}{h_t + s \cdot \tan\beta} \quad (2.55)$$

При чему је:

$$\frac{v^2}{R} > 0 \quad (2.56)$$

Ако је:

$$s - h_t \cdot \operatorname{tg} \beta > 0 \quad (2.57)$$

Онда је:

$$\operatorname{tg} \beta < \frac{s}{h_t}. \quad (2.58)$$

Испитује се утицај конструктивних параметара на брзину при којој наступа превртање и резултати су приказани у табели 6.

Табела 6. Граничне брзине превртања у контра нагибу за брзину V_{pr}

s	h_t	R	β	Гранична брзина превртања V
0.8	0.5	100	2	38.133
0.8	0.5	100	2	38.133
0.8	0.5	100	2	38.133
0.8	0.5	100	2	38.133
0.75	0.5	100	2	36.955
0.85	0.5	100	2	39.267
0.8	0.5	100	2	38.133
0.8	0.4	100	2	42.449
0.8	0.6	100	2	34.887
0.8	0.5	100	2	38.133
0.8	0.5	50	2	26.964
0.8	0.5	150	2	46.703
0.8	0.5	100	2	38.133
0.8	0.5	100	0	39.618
0.8	0.5	100	5	36.077

Из Табеле 6 се закључује да, како у нагибу, тако и у контра нагибу, на брзину највише утиче полупречник кривине. Поред полупречника битну улогу има и висина тежишта. Када је $\operatorname{tg} \beta = 0$, долази до блажег повећања брзине.

Повратком у израз (2.52) у претходном извођењу добија се ново решење за угао при коме настаје превртање за контра нагиб:

$$\frac{v^2}{R} \cdot h_t \cdot \cos \beta + \frac{v^2}{R} \cdot s \cdot \sin \beta \leq g \cdot s \cdot \cos \beta - g \cdot h_t \cdot \sin \beta / \cdot \cos \beta \quad (2.59)$$

$$\frac{v^2}{R} \cdot h_t + \frac{v^2}{R} \cdot s \cdot \operatorname{tg} \beta \leq g \cdot s - g \cdot h_t \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (2.60)$$

$$\frac{v^2}{R} \cdot s \cdot \operatorname{tg} \beta + g \cdot h_t \cdot \operatorname{tg} \beta \leq g \cdot s - \frac{v^2}{R} \cdot h_t \quad (2.61)$$

Добија се решење за израз за угао превртања при контранагибу:

$$\operatorname{tg} \beta \leq \frac{g \cdot s - \frac{v^2}{R} \cdot h_t}{\frac{v^2}{R} \cdot s + g \cdot h_t} \quad (2.62)$$

Уносе се параметри из претходног изрази у табелу за испитивање угла превртања:

Табела 7. Гранични углови превртања за контра нагиб β

s	ht	R	V	Бочни угао нагиба пута β
0.8	0.5	100	25	25.493
0.8	0.5	100	25	25.493
0.8	0.5	100	25	25.493
0.8	0.5	100	25	25.493
0.75	0.5	100	25	23.808
0.85	0.5	100	25	27.033
0.8	0.5	100	25	25.493
0.8	0.4	100	25	30.934
0.8	0.6	100	25	20.629
0.8	0.5	100	25	25.493
0.8	0.5	50	25	6.119
0.8	0.5	150	25	34.982
0.8	0.5	100	25	25.493
0.8	0.5	100	16,67	42.179
0.8	0.5	100	33,33	9.442

Из приложене Табеле 7. се закључује да највећи добијени угао за које настаје превртање је за 42,18° при промени брзине. Слична брзина је и при повећању полупречника кривине. Најмањи угао при коме настаје превртање је за промени полупречника кривине R.

Клизање –контра нагиб

Услов клизања настаје ако је:

$$(Y' + Y'') \max = (G \cdot \cos \beta - F_c \cdot \sin \beta) \cdot \varphi \quad (2.63)$$

Ако се зна да је:

$$F_c = \frac{v^2}{R} = \frac{G}{g} \cdot \frac{v}{R} \quad (2.64)$$

Онда је:

$$(Y' + Y'') = \left[G \cdot \cos \beta - \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \sin \beta \right] \cdot \varphi \quad (2.65)$$

$$\sum Y' = 0 \quad (2.66)$$

И ако се зна да:

$$Y' + Y'' - G \cdot \sin \beta - \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \cos \beta \quad (2.67)$$

$$G \cdot \sin \beta - \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cos \beta \geq \varphi \cdot \left(G \cdot \cos \beta - \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \sin \beta \right) \quad (2.68)$$

$$\frac{V^2}{g \cdot R} \cdot \sin \beta \cdot \varphi - \frac{V^2}{g \cdot R} \cdot \cos \beta \geq \varphi \cdot \cos \beta - \sin \beta \rightarrow \quad (2.69)$$

$$\frac{V^2}{g \cdot R} \cdot \left(\frac{\varphi \cdot \sin \beta}{g} - \frac{\cos \beta}{g} \right) \geq \varphi \cdot \cos \beta - \sin \beta / \cdot g \quad (2.70)$$

$$\frac{V^2}{R} (\varphi \cdot \sin \beta - \cos \beta) \geq g \cdot (\varphi \cdot \cos \beta - \sin \beta) \quad (2.71)$$

$$\frac{V^2}{R} \geq \frac{g \cdot (\varphi \cdot \cos \beta - \sin \beta)}{\varphi \cdot \sin \beta - \cos \beta} /: \cos \beta \quad (2.72)$$

Добија се решење извода брзине при којој настаје клизање:

$$\frac{V^2}{R} \geq \frac{g \cdot (\varphi - \operatorname{tg} \beta)}{1 + \varphi \cdot \operatorname{tg} \beta} \quad (2.73)$$

При чему је $\varphi \cdot \operatorname{tg} \beta - 1 = 0$, а $\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{\varphi}$.

За испитивање промене брзине клизања код контра нагиба уводимо параметре из извода:

Табела 8. Граничне брзине клизања за контра нагиб β

R	g	β	φ	Гранична брзина клизања V
100	9.81	2	0.7	25.236
100	9.81	2	0.7	25.236
100	9.81	2	0.7	25.236
100	9.81	2	0.7	25.236
100	9.81	2	0.7	25.236
100	9.81	2	0.7	25.236
100	9.81	2	0.7	25.236
100	9.81	2	0.7	25.236

100	9.81	2	0.7	25.236
100	9.81	2	0.7	25.236
50	9.81	2	0.7	17.845
150	9.81	2	0.7	30.908
100	9.81	2	0.7	25.236
100	9.81	0	0.7	26.205
100	9.81	5	0.7	23.795

Превртање код контра нагиба највише зависи од полупречника кривине R као и од угла нагиба β .

Угао $\text{tg}\beta$ може се израчунати враћањем у једначину (2.69) моменте једначине. Крајњим решењем може се израчунати конкретан нагиб β .

$$(2.69.) \rightarrow \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \cos\beta - G \cdot \sin\beta \geq \varphi \cdot (G \cdot \cos\beta + \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \sin\beta) \cdot \cos\beta \quad (2.74)$$

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} - G \text{tg}\beta \geq \varphi \cdot (\frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} + G \text{tg}\beta) \quad (2.75)$$

$$\frac{V^2}{g \cdot R} - \varphi \geq \text{tg}\beta + \varphi \cdot \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \text{tg}\beta / \cdot g \quad (2.76)$$

$$\frac{V^2}{R} + g \cdot \text{tg}\beta \geq g \cdot \varphi - \frac{V^2}{R} \cdot \text{tg}\beta \quad (2.77)$$

$$\text{tg}\beta \left(g + \frac{V^2}{R} \right) > g \cdot \varphi - \frac{V^2}{R} \quad (2.78)$$

На крају добија се решење за угао под којим настаје клизање за услове контра нагиба:

$$\text{tg}\beta > \frac{g \cdot \varphi - \frac{V^2}{R}}{g + \frac{V^2}{R}} \quad (2.79)$$

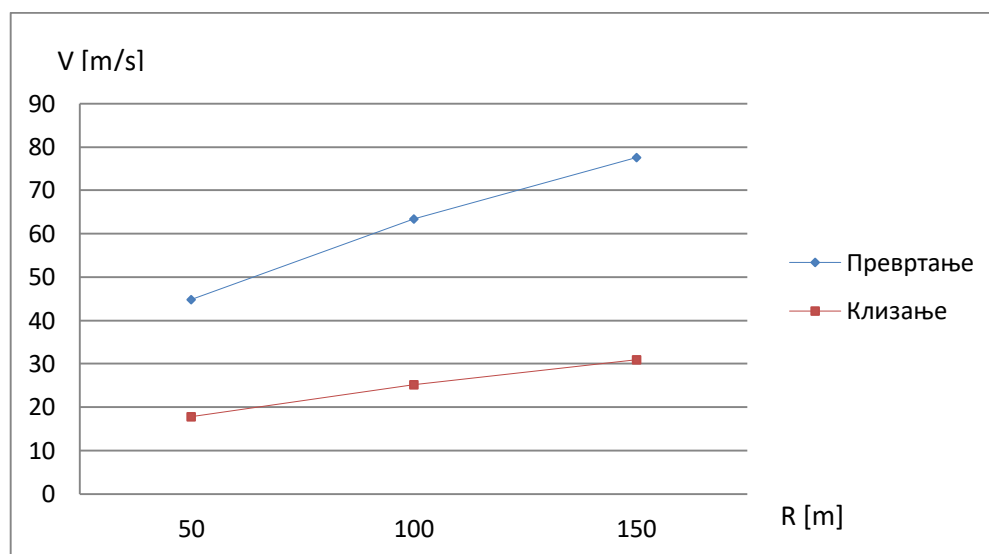
Уводе се вредности конструктивних параметара за вредности из израза (2.79).

Табела 9. Гранични углови клизања за контра нагиб β

R	V	φ	Бочни угао нагиба пута β
100	25	0.7	2.201
100	25	0.7	2.201
100	25	0.7	2.201
100	25	0.7	2.201
100	25	0.7	2.201
100	25	0.7	2.201
100	25	0.7	2.201

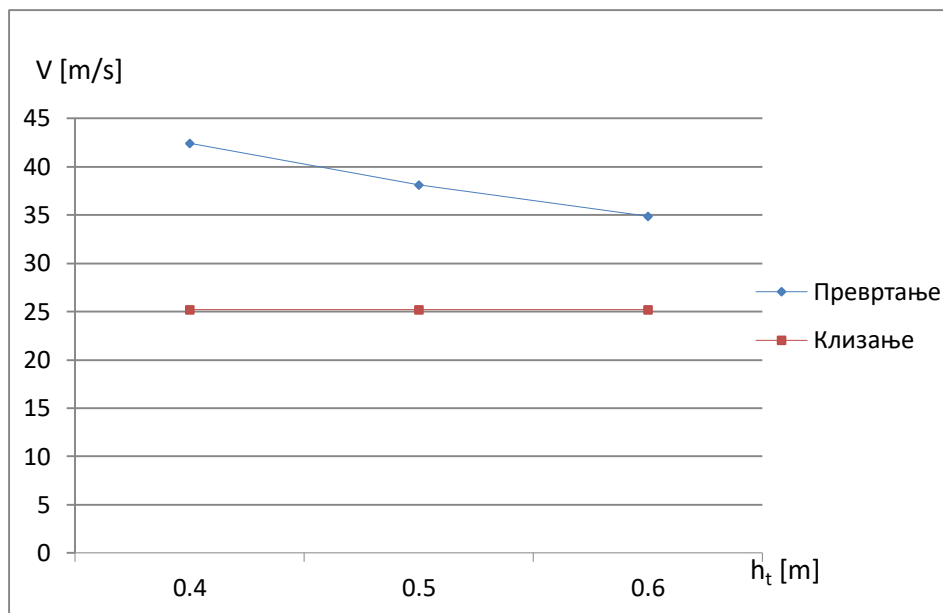
100	25	0.7	2.201
100	25	0.7	2.201
100	25	0.7	2.201
50	25	0.7	165.830
150	25	0.7	10.935
100	25	0.7	2.201
100	16.67	0.7	17.991
100	33.33	0.7	168.537

У Табели 9 приказане су вредности конструктивних параметара. За смањивање брзине V повећава се угао клизања на 18° . Такође и полупречник кривине битно утиче на повећање угла настанка клизања. Са повећањем брзине угао знатно опада.



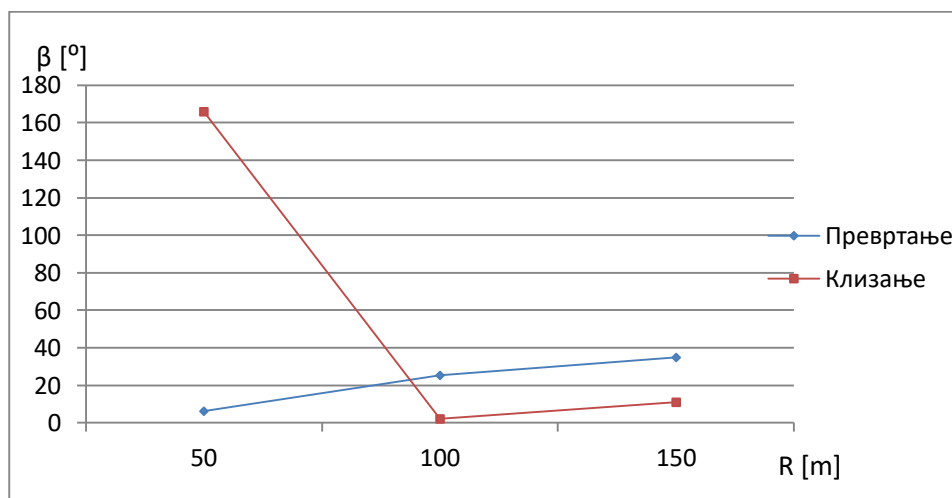
Слика 17. Утицај полупречника кривине на нарушавање стабилности, $\beta=2^\circ$

У условима контра нагиба $\beta=2^\circ$, полупречник R представља битан параметар стабилности. На слици 17 је приказано варирање брзине клизања и превртања. Када је полупречник $R=50$ m, тачка клизања је 17,84 m/s, а тачка превртања 26,96 m/s. Са повећањем полупречника расте и брзина на којој се јавља клизање и превртање. Када је полупречник $R=150$ m клизање настаје на 30,91 m/s, а превртање на 46,70 m/s. Са слике 17 се може закључити да клизање настаје пре превртања. Са повећањем полупречника кривине расте гранична брзина превртања и клизања, што директно утиче на стабилност возила у кривини. Возило је стабилније што је већи полупречник кривине. Разлика између клизања и превртања је све већа са повећањем полупречника кривина.



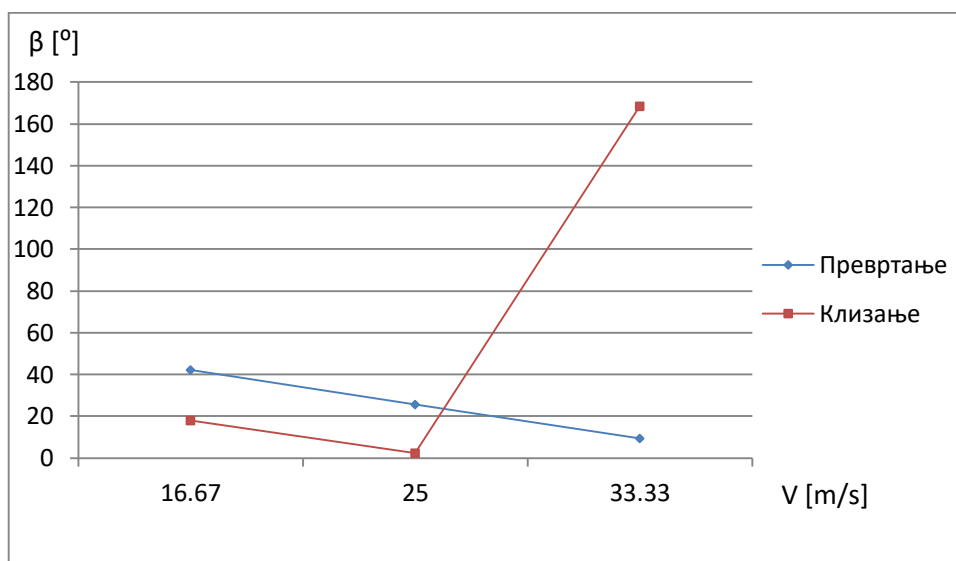
Слика 19. Утицај висине тежишта на нарушавање стабилности, $R=100$ m, $\beta=2^\circ$

На слици 19 је представљен однос брзине V и висине тежишта h_t у условима полупречника $R=100$ m и контра нагиба $\beta=2^\circ$. Када је висина тежишта $h_t=0,4$ m клизање наступа на 25,24 m/s, а превртање на 42,45 m/s. Са повећањем висине тежишта на 0,5 m, брзина на којој настаје клизање остаје непромењена, док брзина превртања је 38,13 m/s. Ако се узме да је висина тежишта 0,6 m, брзина на којој настаје превртање је 34,89 m/s. Брзина на којој настаје клизање остаје иста, односно 25,24 m/s, што говори да промена висине тежишта не утиче на промену настанка клизања, док са повећањем висине тежишта брзина на којој настаје превртање битно опада, односно возило је нестабилније. Та чињеница је битна са аспекта стабилности возила.



Слика 20. Утицај полупречника кривине на гранични угао стабилности контра нагиба, $V=25$ m/s

На слици 20 приказан је однос угла контра нагиба β и полупречника кривине R . За вредност $R=50$ m, клизање наступа на много већем углу него превртање, у $\beta=165,83^\circ$ а превртање на $\beta=6,12^\circ$. То значи да би превртање настало пре од клизања. Када је $R=100$ m, услови су другачији, клизање наступа на мањем углу $\beta=2,2^\circ$, док превртање настаје на $\beta=25,49^\circ$. На највећем полупречнику $R=150$ m, возило клиза на $\beta=10,93^\circ$, а преврће се на $\beta=34,98^\circ$. Ако се возило креће константно $V=25$ m/s, са повећањем полупречника кривине повећава се угао превртања што говори да је возило све стабилније. Клизање наступа на знатно мањем углу нагиба, али такође има позитиван раст граничног угла клизања, што говори да је возило стабилније у оба вида наруђавања стабилности.



Слика 21. Утицај брзине на гранични угао контра нагиба, $R=100$ m

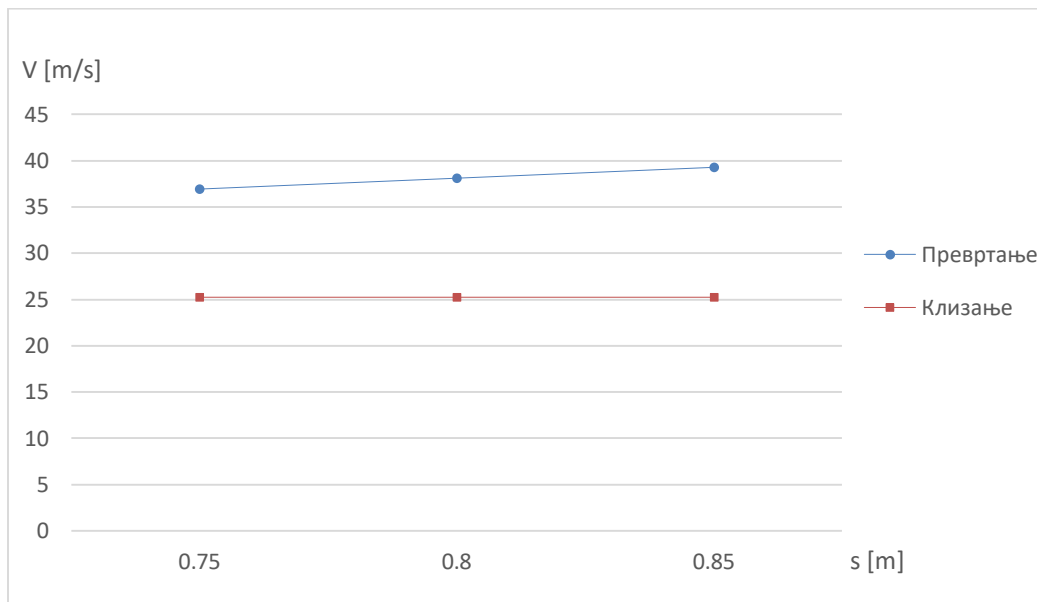
Са порастом брзине V опада угао β на коме се нарушава стабилност возила, као што је приказано на слици 21, што говори да гранични угао нарушавања стабилности настаје раније. Ако је полупречник кривине $R=100$ m, брзина кретања возила кроз кривину са контра нагибом је $V=16,67$ m/s, онда је угао превртања на $\beta=42,18^\circ$, а угао клизања $\beta=17,99^\circ$. Са повећањем брзине на 25 m/s, превртање би се догодило $\beta=25,49^\circ$, а клизање већ на $\beta=2,2^\circ$. Ако се брзина повећа на $V=33,33$ m/s, онда се превртање дешава на $\beta=9,44^\circ$, а клизање тек на $\beta=168,54^\circ$. Угао на коме настаје клизање је такође у паду са порастом брзине, што показује да је возило знатно нестабилније. Само у последњем случају ће прво наступити превртање, на мањем углу контра нагиба, затим клизање.

Посматрајући разлике у брзини и нагибу β при коме настаје заокретање за Табеле 6, 7, 8 и 9, уочава се да су брзине и углови при којима настаје превртање веће од брзине клизања. Самим тим доћи до клизања пре превртања.

$$V_{kl} < V_{pr}$$

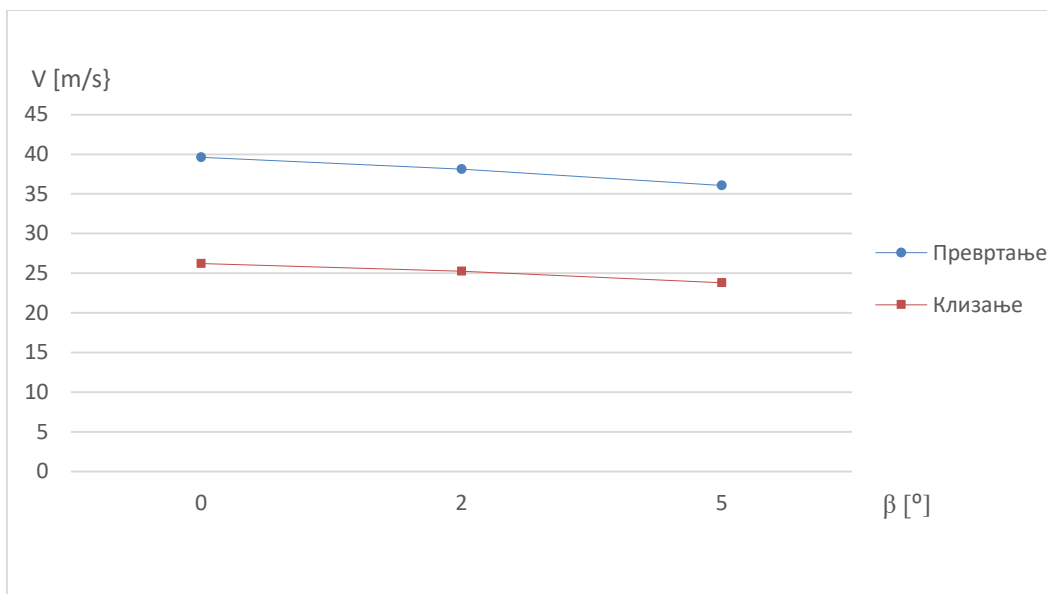
Анализа параметара у условима контранагиба.

Добијене вредности брзина и углова из табела за контра нагиб, преносе се на дијаграм:



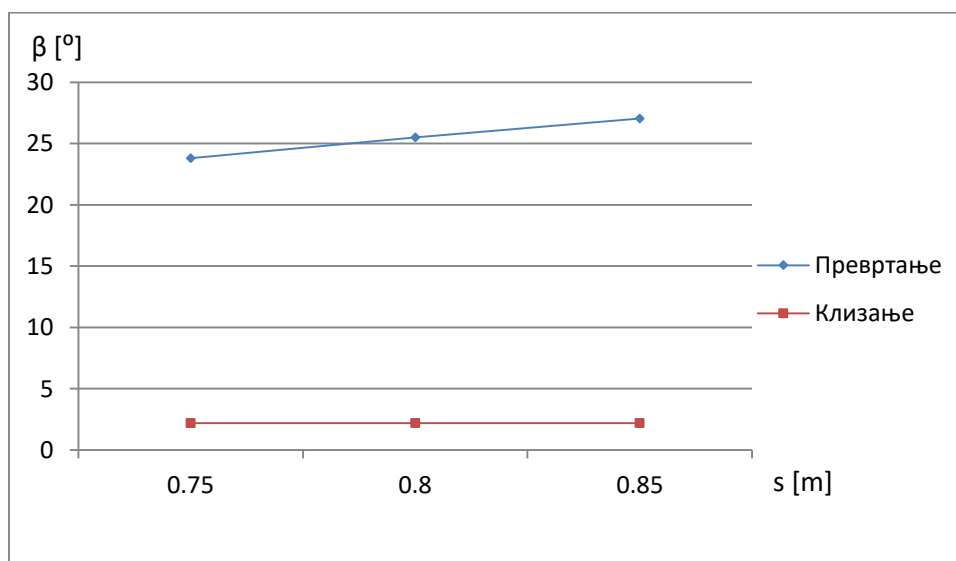
Слика 22. Утицај трага точка на нарушавање стабилности, $R=100$ m, $\beta=2^\circ$

Са слике 22 се може закључити да прво настаје клизање па превртање. За дате величине трага точка s добијене су брзине на којима настаје клизање и превртање у условима полупречника $R=100$ m, и углу контра нагиба $\beta=2^\circ$. Клизање настаје на 25,24 m/s за све три величине трага точка, што показује да клизање не зависи од промене трага точка. Превртање наступа на 36,96 m/s. Са повећањем трага точка повећава се и брзина на којој настаје превртање, па тако са трагом точка 0,85 m брзина на којој настаје превртање је 39,27 m/s. Повећање трага точка доводи до повећања граничне брзине превртања, а самим тим до веће стабилности возила. Разлика између брзине клизања и превртања расте са порастом трага точка.



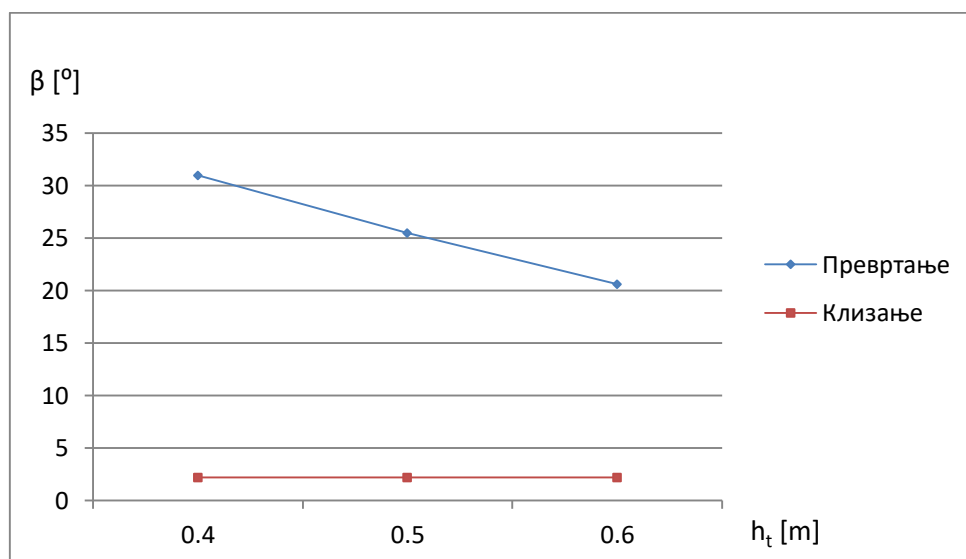
Слика 23. Утицај угла нагиба на нарушавање стабилности, $h_t=0,5$ m, $R=100$ m

Са повећањем угла нагиба β контра нагиба брзина на којој настаје брзина превртања и клизање се смањује, што је приказано на слици 23. За вредност угла $\beta=0$ клизање се јавља на 26,20 m/s, док брзина на којој настаје превртање је 39,62 m/s. Када је $\beta=2$, клизање настаје на 25,24 m/s, а превртање на 38,13 m/s. Када се угао конта нагиба повећа на $\beta=5^\circ$, клизање тада доста раније наступа, већ на 23,79 m/s, а превртање на 36,08 m/s. У условима варирања угла контра нагиба где су висина тежишта $h_t=0,5$ m и полупречник кривине $R=100$ m прво наступа клизање. Закључује се да се са повећањем угла нагиба нарушава стабилност, односно да ће превртање и клизање наступити на мањим брзинама. Разлика између клизања и превртања је готово идентична.



Слика 24. Утицај трага точкова на гранични угао контра нагиба пута, $V=25$ m/s

Са повећањем трага точка s , угао β на коме ће наступити превртање расте. Тако за вредност трага точка $s=0,75$ m, угао контра нагиба је $\beta=23,81^\circ$. Када је траг точка $s=0,8$ m, угао контра нагиба је $\beta=25,49^\circ$, а када се траг точка повећа на $s=0,85$ m, угао контра нагиба расте на $\beta=27,03^\circ$. Са порастом трага точка, повећава се угао контра нагиба на коме настаје превртање, самим тим возило је стабилније. Угао контра нагиба на коме настаје клизање је непромењен у свим вредностима трага точка, односно $\beta=2,2^\circ$, што значи да већи траг точка не утиче на повећање угла клизања, а самим тим и на стабилност возила. Разлика између угла клизања и угла превртања расте, ако се зна да се возило кретало у условима брзине $V=25$ m/s.



Слика 25. Утицај висине тежишта на гранични угао контра нагиба, $R=100$ m, $V=25$ m/s

Висина тежишта h_t битно утиче на угао на коме настају превртање и клизање у условима контра нагиба. За висину тежишта $h_t=0,4$ m превртање настаје на $\beta=30,93^\circ$. При висини тежишта $h_t=0,5$ m превртање настаје на $\beta=25,49^\circ$, а при висини тежишта $h_t=0,6$ m превртање настаје на углу $\beta=20,63^\circ$. Са слике 25 се јасно може закључити да угао превртања опада са повећањем висине тежишта. То говори да повећање висине тежишта доводи до мање стабилности возила, ако се возило креће истом брзином, $V=25$ m/s, кроз кривину полупречника $R=100$ m. Угао клизања је исти за све вредности висине тежишта h_t , односно $\beta=2,2^\circ$, док разлика између угла нагиба клизања и превртања стално опада.

3. ЗАКЉУЧАК

У овом раду дат је теоријски осврт на врсту стабилности возила. Објашњена је подужна и бочна стабилност возила.

Детаљно је обрађена пажња на бочну стабилност. Теоријски је објашњено њено значење и дата је дефиниција бочне стабилности. Такође су наведене слике и услови под којима долази до нарушавања стабилности. Посебна пажња је обрађена на утицај конструктивних параметара на бочну стабилност, што представља и суштину самог рада.

Испитивана је бочна стабилност за појаве клизања и превртања помоћу одређених параметара у различитим условима експлоатације. Испитивана је бочна стабилност под условом нагиба на хоризонталном путу и у кривини. Такође је испитано заокретање возила у услову контра нагиба. При испитивању утицаја конструктивних параметара на бочну стабилност произвољно су усвојене вредности параметара.

При испитивању утицаја конструктивних параметара на бочну стабилност произвољно су усвојене вредности параметара. Поштујући услове заокретања возила под нагибом и контра нагибом изведене су једначине за које се комбинују вредности параметара. На основу добијених резултата приказано је које од два вида губљења стабилности прво наступа. У табеларном приказу вредности утицајних параметара јасно је назначено која је вредност брзине или угла највећа и најмања, и лако се уочава који од параметара највише утиче на бочну стабилност у виду превртања или клизања.

Добијене вредности из табела приказане су графички у виду дијаграма, на којима је назначена свака промена величина брзине или углова за свако комбиновање параметара.

Упоређивањем резултата из табела претходно наведених услова добија се решење које од два типа нарушавања стабилности прво наступа. Пошто је брзина при којој настаје клизање V_{kl} мања од брзине при којој настаје превртање V_{pr} прво ће наступити клизање за већину од наведених услова пута.

4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Демић М., Лукић Ј.: Теорија кретања моторних возила, Машински факултет у Крагујевцу, 2011.
- [2] Симић Д.: Моторна возила, Београд, 1988, Крагујевац, Научна књига 2010.
- [3] Стојић, Б.: Теорија кретања друмских возила-скрипта, Нови Сад, Департман за механизацију и конструкционо машинство, катедра за моторна возила, 2012.
- [4] Стефановић, А.: Друмска возила, Ниш, Научна књига, 2008.
- [5] Тојагић, М.: Безбедност друмског саобраћаја, Европски универзитет, Брчко, 2015.
- [6] Предавања стабилност возила 275700332- Microsoft PowerPoint, Лилић, Ошмур, Шаги, Загреб, 2016-2017.