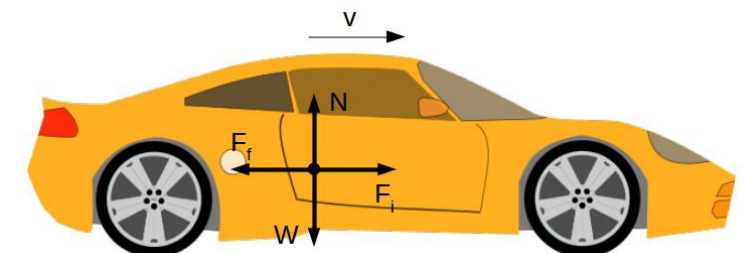


مدل سازی و شبیه سازی ABS

در این تمرین به منظور شبیه سازی دینامیک خودرو هنگام ترمز گرفتن، از مدل یک چهارم خودرو برای خودرو و چرخ استفاده کنید. همچنین یک کنترل کننده ABS ساده به منظور شبیه سازی گشتاور ترمز در شرایط لغزش طراحی کنید.

مدل خودرو



نیروهای عمل کننده در هنگام ترمز خودرو

اگر یک خودرو را که در حال ترمز گرفتن به صورت مستقیم حرکت می کند در نظر بگیریم، می توانیم معادلات نیروها در حالت تعادل را به صورت زیر بنویسیم:

- در جهت افقی:

$$F_f = F_i \quad (1)$$

که:

– F_f [N] نیروی اصطکاک بین چرخ و جاده
– F_i [N] نیروی اینرسی خودرو
در جهت عمودی:

$$N = W \quad (2)$$

که:

– N [N] نیروی عمودی (واکنش جاده)
– W [N] وزن خودرو

می توانیم نیروی اصطکاک را به صورت زیر بنویسیم:

$$F_f = \mu \cdot N \quad (3)$$

که در آن μ ضریب اصطکاک بین چرخ و جاده است.
وزن خودرو:

$$W = m_v \cdot g \quad (4)$$

با جایگزینی وزن خودرو نیروی اصطکاک را به صورت زیر است:

$$F_f = \mu \cdot m_v \cdot g \quad (5)$$

که:

– m_v [kg] جرم کل خودرو
– g [m/s²] شتاب گرانشی

نیروی اینرسی خودرو:

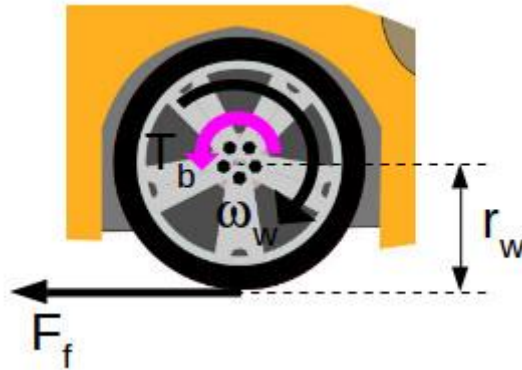
$$F_i = m_v \cdot a_v = m_v \cdot \frac{dv_v}{dt} \quad (6)$$

در اینجا v_v [m/s] سرعت خودرو است. از معادلات (۱)، (۵) و (۶) می توانیم رابطه شتاب خودرو را بنویسیم:

$$\frac{dv_v}{dt} = \frac{1}{m_v} \cdot (\mu \cdot m_v \cdot g) \quad (7)$$

سرعت خودرو با انتگرال گیری از (۷) به دست می آید.

مدل چرخ



نیروهای عمل کننده در هنگام ترمز چرخ

در هنگام ترمزگیری، راننده از طریق سیستم ترمز، گشتاور ترمز T_b [Nm] را به چرخ ها اعمال می کند. نیروی اصطکاک F_f [N] بین چرخ و جاده با شعاع چرخ r_w [m] ایجاد یک گشتاور مخالف می کند. می توانیم معادله حرکت چرخ را به صورت زیر بنویسیم:

$$T_b - F_f \cdot r_w - J_w \cdot \frac{d\omega_w}{dt} = 0 \quad (8)$$

که:

J_w [kg·m²] – ممان اینرسی چرخ

ω_w [rad/s] – سرعت زاویه ای چرخ

از رابطه (۸) می توانیم رابطه شتاب چرخ را بنویسیم:

$$\frac{d\omega_w}{dt} = \frac{1}{J_w} \cdot (T_b - F_f \cdot r_w) \quad (9)$$

سرعت چرخ با انتگرال گیری از رابطه (۹) به دست می آید.

لغزش چرخ

سیستم ABS باید لغزش چرخ را در اطراف مقدار بهینه کنترل کند. لغزش چرخ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$s = 1 - \frac{\omega_w}{\omega_v} \quad (10)$$

که در آن ω_v [rad/s] سرعت زاویه ای متناظر با خودرو است:

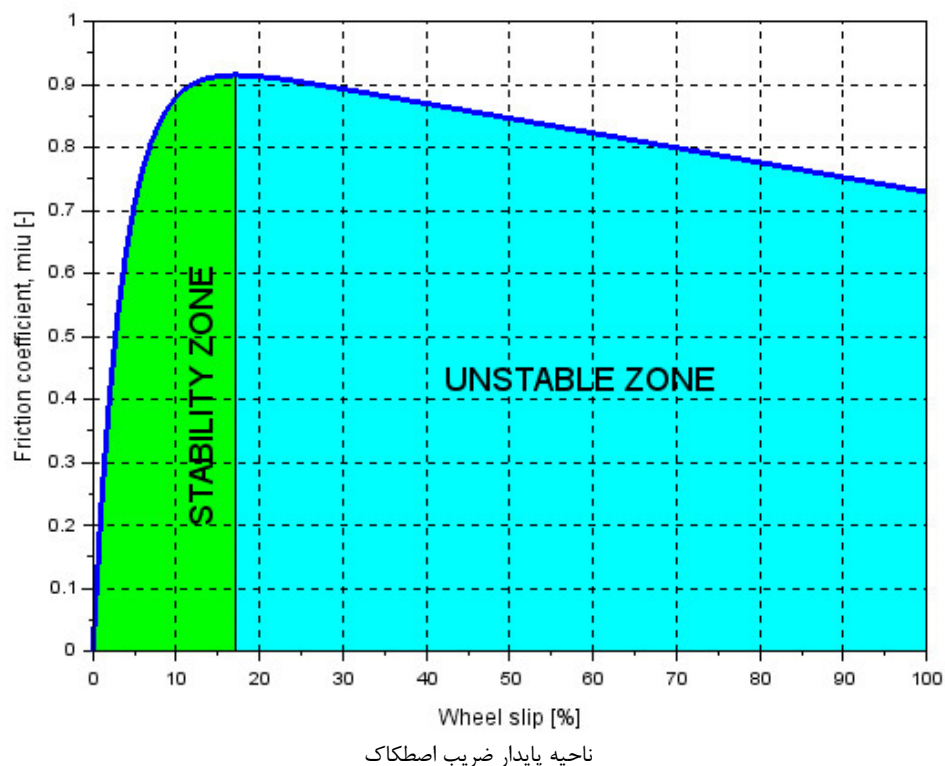
$$\omega_v = \frac{v_v}{r_w} \quad (11)$$

و v_v [m/s] سرعت خودرو است.

ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک بین چرخ و جاده به عوامل مختلفی بستگی دارد:

- لغزش چرخ
- سرعت خودرو
- سطح جاده
- شرایط محیطی (رطوبت، دما و غیره)



ناحیه پایدار ضریب اصطکاک

در هنگام ترمزگیری، اگر لغزش چرخ ۱۰۰٪ باشد، چرخ قفل می‌شود اما خودرو همچنان در حال حرکت است. در لغزش ۰ درصد، چرخ و خودرو دقیقاً سرعت یکسانی دارند. ضریب اصطکاک بهینه (بالاترین مقدار) زمانی به دست می‌آید که لغزش چرخ حدود ۲۰ درصد باشد. چنانکه در شکل نشان داده شده است، منحنی ضریب اصطکاک به دو ناحیه تقسیم می‌شود:

- ناحیه پایدار: ضریب اصطکاک با افزایش لغزش چرخ افزایش می‌یابد
- ناحیه ناپایدار: ضریب اصطکاک با افزایش لغزش چرخ کاهش می‌یابد

اگر لغزش چرخ وارد ناحیه ناپایدار شود، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و چرخ قفل می‌شود و باعث لغزش و ناپایداری خودرو می‌شود. در این تمرین، سیستم ABS باید لغزش چرخ را در حدود ۲۰ درصد نگه دارد.

ضریب اصطکاک را می‌توان با رابطه تجربی زیر بیان کرد:

$$\mu(\lambda) = c_1(1 - e^{-c_2 s}) - c_3 s$$

که در آن s لغزش چرخ و ضرایب C_1 , C_2 , C_3 بسته به نوع جاده با مقادیر زیر تعریف می‌شوند:

Road Type	Road Condition	c_1	c_2	c_3
1	Dry Asphalt	1.1	24.0	0.52
2	Wet Asphalt	0.86	33.82	0.35
3	Snow	0.2	94.13	0.066
4	Ice	0.15	100	0.05

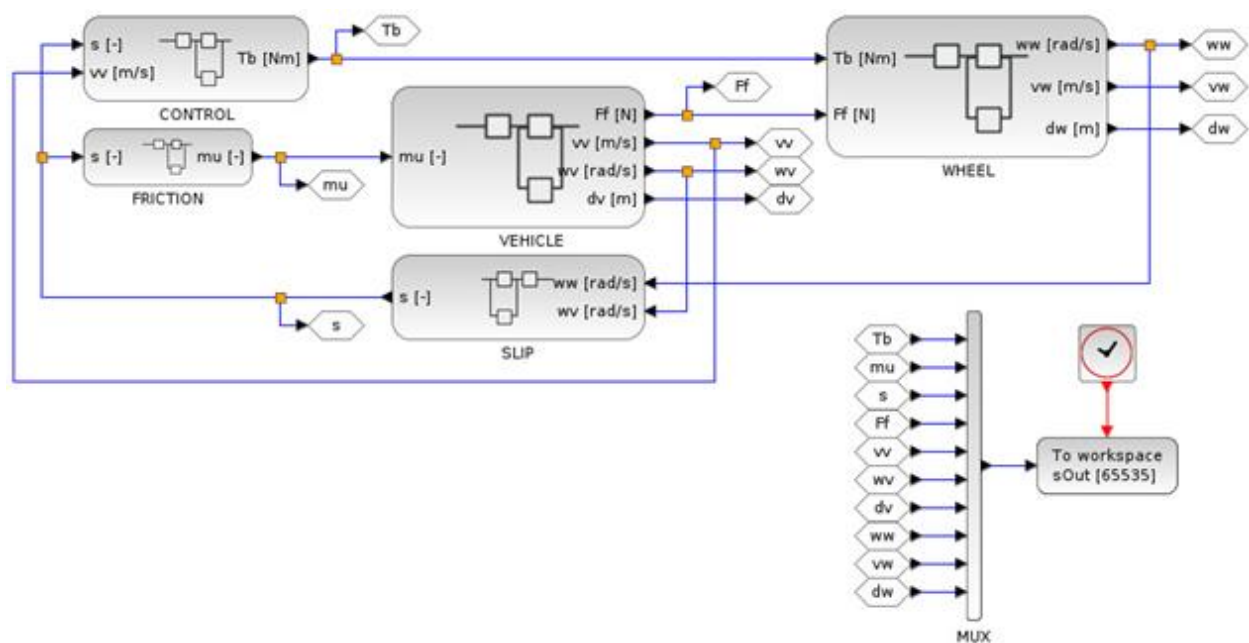
پارامترهای خودرو

برای مسأله شبیه‌سازی خود، از اسامی و مقادیر زیر برای پارامترهای خودرو و کنترل‌کننده استفاده کنید:

Symbol	Unit	Value	Description
m_v	kg	1400	total vehicle mass
J_w	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.01	wheel inertia
r_w	m	0.32	wheel radius
v_0	m/s	33.33	initial vehicle speed
v_{\min}	m/s	1.5	minimum vehicle speed for slip control active
g	m/s^2	9.8	gravitational acceleration
K	—	1000	hydraulic system amplification factor
T	s	0.05	time constant to simulate braking system inertia
$T_{b\max}$	Nm	2000	maximum braking torque applied to the wheels
ε	—	$2.2204 \cdot 10^{-16}$	division by zero protection constant
ON	—	1 or 0	logic variable for activation/deactivation of the slip controller
road type	—	1, 2, 3 or 4	constant for road type setting

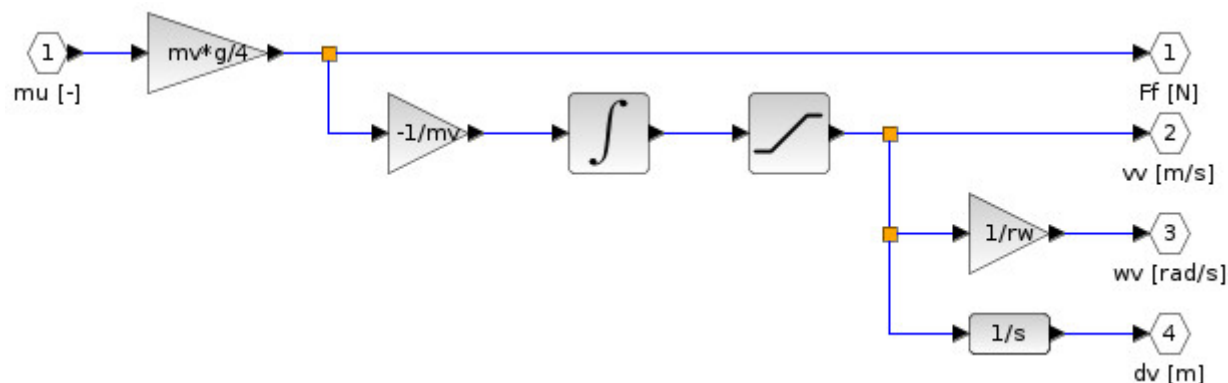
نمودار بلوکی

مدل خودرو و چرخ مورد استفاده برای شبیه‌سازی به عنوان مدل یک‌چهارم خودرو شناخته می‌شود. به این معنی که یک چهارم جرم خودروی تنها با یک چرخ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، تنها دینامیک طولی خودرو بدون توجه به تاثیر سیستم تعلیق در نظر گرفته شده است. لایه بالای نمودار شامل اجزای اصلی و رابط‌های بین آنها است که در ادامه هر جزء و ورودی و خروجی آن با جزئیات شرح داده می‌شود.



مدل ABS

خودرو

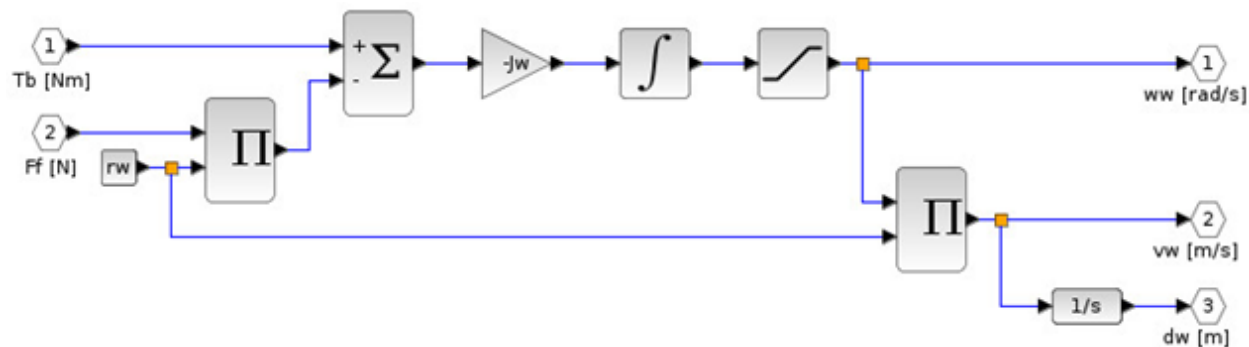


مدل خودرو

مدل خودرو از معادله (۷) استفاده می‌کند. از آنجایی که ما از مدل یک چهارم خودرو استفاده می‌کنیم، وزن کل خودرو با فرض توزیع برابر در هر چرخ بر ۴ تقسیم می‌شود. ورودی مدل ضریب اصطکاک μ است که تابع لغزش چرخ است. بلوک انتگرال‌گیر دارای مقدار اولیه v_0 است و به حداکثر ۱۰۰۰ متر بر ثانیه و حداقل ۰,۰۰۱ متر بر ثانیه محدود شده است. مسافت طی شده توسط خودرو با انتگرال‌گیری سرعت خودرو محاسبه می‌شود. خروجی‌های این بلوک عبارتند از:

- نیروی اصطکاک $F_f [N]$
- سرعت خودرو $v_v [m/s]$
- معادل سرعت دورانی $w_v [rad/s]$
- مسافت طی شده $d_v [m]$

چرخ



مدل چرخ

مدل چرخ از معادله (۹) استفاده می‌کند. انتگرال گیر سرعت زاویه‌ای چرخ w_w [rad/s] دارای مقدار اولیه v_0/r_w [rad/s] است و به حداکثر ۱۰۰۰ رادیان بر ثانیه و حداقل ۰ رادیان بر ثانیه محدود می‌شود. سرعت خطی (مماسی) چرخ v_w [m/s] با ضرب سرعت زاویه‌ای در شعاع چرخ r_w [m] به دست می‌آید. مسافت طی شده توسط چرخ d_w [m] با انتگرال گیری سرعت خطی به دست می‌آید.

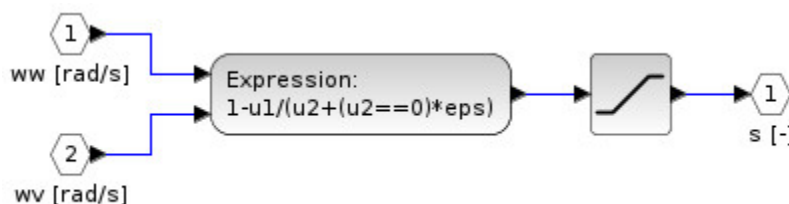
ورودی‌ها:

- گشتاور ترمز T_b [Nm]
- نیروی اصطکاک F_f [N]

خروجی‌ها:

- سرعت زاویه‌ای چرخ w_w [rad/s]
- سرعت خطی چرخ v_w [m/s]
- مسافت طی شده توسط چرخ d_w [m]

لغزش



مدل لغزش چرخ

لغزش چرخ با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. هنگامی که سرعت خودرو صفر است، برای جلوگیری از تقسیم بر صفر، ثابت ϵ به عنوان مخارج استفاده می‌شود. مقدار لغزش محاسبه شده به حداکثر ۱ و حداقل ۰ محدود می‌شود.

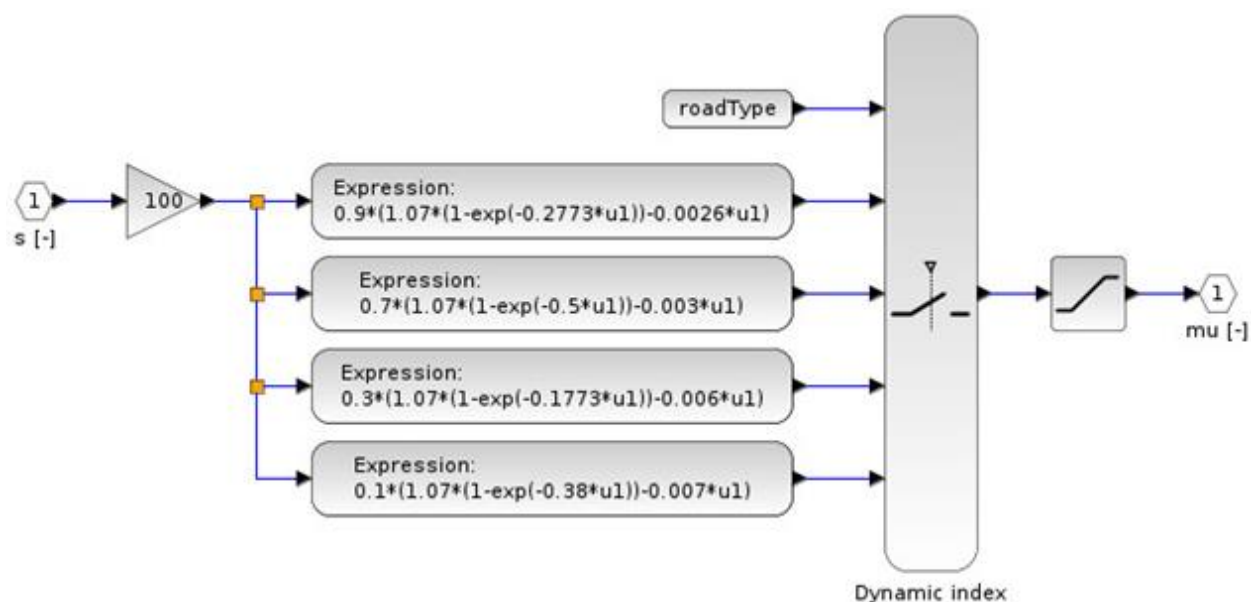
ورودی‌ها:

- سرعت زاویه‌ای چرخ w_w [rad/s]
- سرعت زاویه‌ای معادل خودرو w_v [rad/s]

خروجی‌ها:

- لغزش چرخ s [-]

اصطکاک



مدل اصطکاک چرخ

نمودار ضریب اصطکاک هر چهار نوع معادله (۱۲) را پیاده سازی می کند، که هر کدام برای یک وضعیت جاده است. روابط ریاضی ضریب اصطکاک را به صورت درصد $[\%]$ می گیرند، بنابراین s با استفاده از یک بلوک بهره در ۱۰۰ ضرب می شود. ضریب اصطکاک وابسته به جاده با استفاده از بلوک Dynamic index انتخاب می شود که توسط متغیر roadType کنترل می شود. ضریب اصطکاک بین حداقل ۰ و حداکثر ۱ محدود می شود.

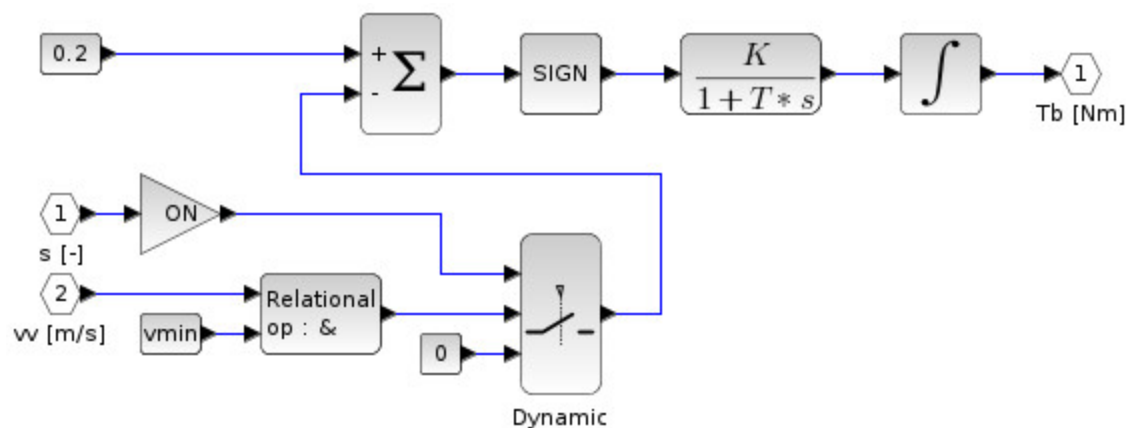
ورودی:

- لغزش چرخ $s [-]$

خروجی:

- ضریب اصطکاک $\mu [-]$

کنترل



کنترل لغزش ABS

کنترل کننده لغزش نسبتاً ساده و از نوع Bang-Bang است. همانطور که در بخش ضریب اصطکاک بالا بحث شد، حداکثر مقدار ضریب اصطکاک حول یک لغزش ۲۰ درصد به دست می آید که آن را به عنوان لغزش هدف در نظر می گیریم. خطای لغزش با کم کردن لغزش واقعی از لغزش هدف محاسبه می شود.

کنترل کننده ABS با قراردادن بلوک بهره $ON = 0$ غیرفعال می شود و با $ON = 1$ فعال می شود. برای جلوگیری از عملکرد کنترل کننده در سرعت های پایین، لغزش واقعی S تنها زمانی استفاده می شود که سرعت خودرو بالاتر از v_{min} [m/s] باشد. بلوک SIGN علامت خطای لغزش (۱، ۰، یا -۱) را در خروجی ایجاد می کند. سیستم هیدرولیک با یک تابع انتقال مرتبه اول (به منزله تأخیر سیستم هیدرولیک)، با ضریب بهره K و ثابت زمانی T مدل می شود. خروجی تابع انتقال، گشتاور ترمز T_b [Nm] است. در ادامه از یک انتگرال گیر برای اطمینان از میل کردن خطا به سمت صفر استفاده می شود. خروجی انتگرال گیر بین ۰ نیوتن متر و T_{bmax} [Nm] محدود شده است.

ورودیها:

- لغزش چرخ [-] s
- سرعت خودرو v_v [m/s]

خروجی:

- گشتاور ترمز T_b [Nm]

سوالات:

- ۱- تغییر ضریب اصطکاک را به عنوان تابعی از لغزش، برای شرایط مختلف جاده ترسیم کنید.
- ۲- شبیه سازی را برای ترمزگیری از سرعت اولیه v_0 (۱۲۰ کیلومتر بر ساعت) تا توقف کامل خودرو، با ترمز شدید راننده در دو حالت زیر اجرا کنید:

- بدون ABS
- با ABS

شبیه سازی را برای ۲۵ ثانیه اجرا کنید.

متغیرهای زیر را برای دو حالت بالا و چهار نوع جاده ترسیم کنید و در باره نتایج بحث کنید:
گشتاور ترمز چرخ، لغزش چرخ، ضریب اصطکاک چرخ، سرعت چرخ و خودرو، مسافت طی شده.