بسمه تعالی

دانشکده علوم و فنون نوین

گزارش پرژه ی مکاترونیک

فاز اول پروژه

توسط:

مریم آتیار

زکیه رزم دیده

استاد درس:

دکتر علیرضا هادی

پاییز ۱۴۰۴

فهرست مطالب شماره صفحه

Contents

پیشینه ی تحقیق 7
مقدمه‌ای بر حمل‌ونقل ریلی سبک و ضرورت سامانه‌ی پیشنهادی 7
درایزین و وسایل سبک ریلی (Draisine / Rail-Bike) 8
تعریف و تاریخچه 8
درایزین‌های انسان‌محور و پدالی 8
درایزین‌های موتوردار و خودروهای دو منظوره ی جاده–ریل 9
روش‌ها و فناوری‌های بازرسی خط در سطح جهانی 10
بازرسی هندسه و عیوب ریل 10
وسایل انسان‌بر در بازرسی و گردشگری 11
ذخیره‌سازی انرژی و ترمز احیاگر در سامانه‌های ریلی 12
دوچرخه‌های برقی (E-Bike) و ترمز احیاگر 13
تکامل و معماری دوچرخه‌های برقی 13
ترمز احیاگر در دوچرخه‌های برقی 14
جمع‌بندی شکاف پژوهشی و جایگاه پروژه 15
مقایسه روش‌های موجود از جهات مختلف علمی و اجرایی 17
مقدمه 17
روش‌های بازرسی و دسترسی روی ریل در شبکه‌های ریلی عمومی 18
بازرسی پیاده 18
بازرسی با ترالی سبک (Track inspection trolley) 19
بازرسی با قطار / واگن ویژه‌ی بازرسی (Track Recording Car) 19
پایش در حین سرویس (In-service vehicle monitoring) 19
مقایسه‌ی روش‌های حمل و جابه‌جایی نفر در معادن 19
لوکوموتیو و واگن در معادن 20
سیستم‌های Man Riding Chair Lift (MRCL) 20
وسایل سبک برقی روی ریل و rail-bike های صنعتی 20
برای بازرسی سریع در شبکه‌های ریلی rail-bike 21
و ترالی‌های برقی نگه‌داری rail-bike 21

21 ..... در حوزه‌ی گردشگری و پیامدهای طراحی rail-bike .
22 ..... مقایسه‌ی راهبردهای انرژی و ترمز در وسایل کوچک برقی
22 ..... دوچرخه‌ی برقی بدون ترمز احیاگر
22 ..... دوچرخه‌ی برقی با ترمز احیاگر و نتایج تجربی
24 ..... جمع‌بندی مقایسه‌ای در نسبت با پروژه‌ی دوچرخه‌ی برقی ریلی
25 ..... معرفی و طراحی مفهومی مکانیزم دوچرخه برقی ریلی
26 ..... معماری کلی سیستم (تقسیم به زیرسیستم‌ها)
27 ..... طراحی مفهومی زیرسیستم مکانیکی
27 ..... انتخاب پلتفرم مکانیکی: چرا چهارچرخ و نه «دوچرخه با اوت‌ریگر»؟
28 ..... چرخ و تماس چرخ–ریل
28 ..... شاسی و جانمایی اپراتور
29 ..... مکانیزم کوپلینگ به واگن
30 ..... طراحی مفهومی زیرسیستم محرکه و انرژی
30 ..... انتخاب نوع موتور: Mid-Drive یا Hub Motor؟
32 ..... طراحی مفهومی ترمز و ایمنی
33 ..... طراحی مفهومی سیستم کنترل، سنسورها و رابط کاربر
33 ..... سنسورها
35 ..... بلوک‌دیاگرام و روند داده در سیستم (توصیف مفهومی)
36 ..... اسکچ مفهومی سیستم (توضیح کلامی)
37 ..... جمع‌بندی طراحی مفهومی
38 ..... بخش‌های سیستم و وظایف آن‌ها (پروسس، پلنت، اکچوئیتورها، سنسورها و بخش ارتباط با کاربر)
38 ..... ساختار کلی سیستم و تعریف بخش‌ها
39 ..... پروسس (Process): وظیفه‌ی فیزیکی و محیط عملکرد
39 ..... تعریف پروسس در این پروژه
39 ..... آشفتگی‌ها و ورودی‌های مزاحم (Disturbances)
40 ..... پلنت (Plant): سیستم فیزیکی تحت کنترل
40 ..... زیرپلنت مکانیکی–حرکتی
41 ..... زیرپلنت محرکه‌ی الکتریکی
41 ..... زیرپلنت ترمز و تماس چرخ–ریل

42 ..... مبدل‌های انرژی و عملگرها :(Actuators) اکچوئیتورها
42 ..... اکچوئیتورهای حرکتی
42 ..... اکچوئیتورهای ترمز و ایمنی
43 ..... اکچوئیتورهای نمایش و هشدار
43 ..... اندازه‌گیری وضعیت برای کنترل و ایمنی :(Sensors) سنسورها
44 ..... سنسورهای حرکت و دینامیک وسیله
44 ..... سنسورهای انرژی و توان
45 ..... سنسورهای ورودی انسانی
45 ..... سنسورهای ایمنی و سازه‌ای
46 ..... انسان، سیستم و کاهش خطا :(HMI) بخش ارتباط با کاربر
46 ..... HMI ورودی‌های
48 ..... نقش متقابل بخش‌ها و زنجیره‌ی اطلاعات
49 ..... طراحی بلوک‌دیاگرام و روند دیتا در سیستم
49 ..... نقش بلوک‌دیاگرام در طراحی سیستم مکاترونیکی
50 ..... سطح صفر: بلوک‌دیاگرام کلان سیستم
51 ..... سطح یک: معماری کنترلی سلسله‌مراتبی
52 ..... لایه‌ی ۱: مدیریت مأموریت و ایمنی (Mission & Safety Supervisor)
52 ..... لایه‌ی ۲: کنترل حرکت طولی (Longitudinal Motion Control)
53 ..... لایه‌ی ۳: کنترل اکچوئیتورها (Actuator Control)
53 ..... سطح دو: بلوک‌دیاگرام داخلی زیرسامانه‌ها
53 ..... بلوک‌دیاگرام زیرسامانه‌ی محرکه‌ی برقی
54 ..... بلوک‌دیاگرام زیرسامانه‌ی مدیریت گشتاور کمکی (Assist / Torque Management)
55 ..... بلوک‌دیاگرام زیرسامانه‌ی ترمز و RBS
56 ..... روند جریان داده در سناریوهای عملی
56 ..... سناریو ۱: حرکت عادی بدون واگن در مسیر تقریباً افقی
57 ..... سناریو ۲: حرکت با واگن سبک در سربالایی
57 ..... سناریو ۳: ترمز در سراشیبی با ترمز احیاگر
58 ..... جمع‌بندی ساختار بلوک‌دیاگرام و روند دیتا
59 ..... تعریف کلی نوع سیستم مکاترونیکی و درجات آزادی

سخت‌افزار زیرسیستم مکانیکی (پلنت مکانیکی) 60
شاسی و ساختار کلی 60
چرخ‌ها و تماس چرخ–ریل 61
کوپلر و اتصال به واگن 61
سخت‌افزار زیرسیستم محرکه و انتقال قدرت 62
انتخاب نوع موتور (Mid-Drive BLDC) 62
سیستم انتقال قدرت 62
HESS(باتری و سیستم ذخیره‌سازی و مدیریت انرژی 63
بستهی باتری (Battery Pack) 63
گزینهی توسعه‌ای – سیستم ذخیره‌سازی هیبریدی (HESS: Battery + Supercapacitor) 64
سخت‌افزار سیستم ترمز و ایمنی 64
ترمز سرویس (Service Brake) 64
ترمز احیاگر (Regenerative Braking) 65
سخت‌افزار سنسورها 66
سنسورهای حرکت 66
سنسورهای انرژی و وضعیت الکتریکی 66
سنسورهای ورودی انسان (HMI Sensors) 67
سنسورهای ایمنی سازه و کوپلر 68
سخت‌افزار سیستم کنترل و پردازش 68
واحد کنترل مرکزی (Main Controller) 68
درایو موتور (Motor Drive) 69
سخت‌افزار HMI رابط انسان–ماشین 69
شبکهی سیم‌کشی، تغذیه و حفاظت 70
جمع‌بندی سخت‌افزار برای هر بخش 71
خلاصه ادامه نقشه راه طراحی سیستم دوچرخه برقی ریلی 73
تثبیت نهایی نیازمندی‌ها 73
مدل‌سازی ریاضی سیستم 73
طراحی کنترل و استراتژی انرژی 74
شبیه‌سازی چنددامنه‌ای 75

طراحی تفصیلی مکانیکی و الکتریکی 75
نمونه‌سازی، تست آزمایشگاهی و HIL 75
تست میدانی و کالیبراسیون نهایی 76
خروجی علمی و مهندسی 76

پیشینه ی تحقیق

مقدمه‌ای بر حمل‌ونقل ریلی سبک و ضرورت سامانه‌ی پیشنهادی

استفاده از سامانه‌های ریلی سبک برای جابه‌جایی نفرات و تجهیزات نگه‌داری خطوط ریلی، از قرن نوزدهم تا امروز یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش هزینه و افزایش ایمنی در بهره‌برداری از زیرساخت ریلی بوده است. در محیطهایی مانند **معادن زیرزمینی یا روباز، خطوط صنعتی و ریل‌های فرعی** که عبور لوکوموتیوهای سنگین اقتصادی یا عملی نیست، نیاز به وسایل سبک، ساده، و قابل‌کنترل توسط یک یا دو نفر انسان، بسیار برجسته می‌شود. از طرف دیگر، توسعه ی سامانه‌های برقی کوچک و **دوچرخه‌های برقی (Electric Bicycles, E-bikes)** در دهه ی اخیر نشان داده است که ترکیب نیروی انسانی و نیروی الکتریکی می‌تواند راه‌حلی کارآمد، کم‌مصرف و منعطف برای حمل‌ونقل سبک فراهم کند(ResearchGate).

پروژه‌ی حاضر در تقاطع همین دو جریان قرار می‌گیرد :**طراحی و مدلسازی یک دوچرخه‌ی برقی ریلی** که بتواند هم یک نفر را روی ریل جابه‌جا کند و هم واگن‌های سبک را در مسیرهای اغلب شیب‌دار و محدود (مثل معادن) هل بدهد، و در عین حال، ظرفیت افزودن یا به‌کارگیری **ترمز احیاگر**[1] **(Regenerative Braking, RBS)**برای بازیابی انرژی را داشته باشد. برای تبیین جایگاه علمی این طرح، لازم است پیشینه ی تحقیق در سه محور اصلی مرور شود:

۱. وسایل سبک ریلی مانند **درایزین(Draisine / Rail-bike)**
۲. سامانه‌ها و روش‌های بازرسی و نگه‌داری خط در سطح جهانی
۳. سامانه‌های مدیریت و ذخیره‌سازی انرژی در حمل‌ونقل ریلی و دوچرخه‌های برقی

---

[1] Regenerative Braking

درایزین و وسایل سبک ریلی(Draisine / Rail-Bike)

تعریف و تاریخچه

درایزین (Draisine) به‌صورت کلاسیک به عنوان یک **وسیله ی کمکی ریلی سبک (light auxiliary rail vehicle)** تعریف می‌شود که توسط کارکنان بهره‌برداری و نگه‌داری هدایت شده و برای حمل نفرات و ابزار لازم جهت تعمیر و نگه‌داری زیرساخت ریلی به‌کار می‌رود(Wikipedia).

نام این وسیله از **بارون کارل درایس (Karl Drais)** گرفته شده است؛ مخترعی که در سال ۱۸۱۷ وسیله‌ای دوچرخ و با نیروی پای انسان به نام **Laufmaschine** را معرفی کرد که به عنوان یکی از نخستین پیش‌نمونه‌های دوچرخه شناخته می‌شود. این وسیله در زبان آلمانی *Draisine* و در فرانسوی *draisienne* نام گرفت و بعدها این نام برای انواع وسایل سبک ریلی نیز به‌کار رفت(Wikipedia).

شکل ۱- Two-person rail-cycle draisine with four wheels

اولین درایزین‌های ریلی در دهه ی ۱۸۳۰ در پاسخ به گسترش شبکه‌های راه‌آهن و نیاز به **بازرسی سریع و سبک خط** ساخته شدند. از همان ابتدا، فلسفه ی طراحی آن‌ها بر **وزن کم، قابلیت قرار دادن و برداشتن سریع از روی ریل (on/off-tracking)** و امکان حمل چند نفر و تجهیزات سبک استوار بوده است(pixelpicture.eu).

درایزین‌های انسان‌محور و پدالی

در بسیاری از کشورها، خصوصاً در اروپا و آمریکای شمالی، انواع مختلفی از درایزین‌های انسان‌محور توسعه یافته‌اند:

- **Handcar / Velocipede handcar**: وسیله ی ریلی دستی که با اهرم پمپی یا مکانیزم‌های مشابه حرکت می‌کند.
- **Rail-cycle / Rail-bike**: ترکیبی از دوچرخه و وسیله ی ریلی که معمولاً با پدال (pedal-powered) حرکت می‌کند.

این وسایل به‌طور معمول از یک دوچرخه یا سازه‌ی سه‌چرخ تشکیل می‌شوند که روی یک ریل حرکت می‌کند و با یک **اوت‌ریگر**[2] **(outrigger)** یا بازوی جانبی و غلتک بر روی ریل دوم پایدار می‌شود. طراحی آن‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که هم **پایداری جانبی** تأمین شود و هم امکان بازگشت سریع به حالت دوچرخه‌ی عادی (برای حرکت روی جاده یا مسیر خاکی) وجود داشته باشد(Wikipedia).

در دهه‌های اخیر، همین پلتفرم به شکل **وسیله ی گردشگری-(tourist draisine / leisure rail bike)** روی خطوط متروکه در کشورهای متعددی مانند آلمان، فرانسه، بلژیک، سوئد، نروژ و آمریکا استفاده می‌شود (Wikipedia).در این کاربرد، معمولاً از درایزین‌های چهارچرخ با فریم فولادی، صندلی برای ۲ رکاب‌زن و چند مسافر، و سیستم پدالی ساده استفاده می‌شود؛ سرعت کارکرد معمول در حدود ۴ متر بر ثانیه تعریف می‌شود تا ایمنی حفظ گردد(Wikipedia).

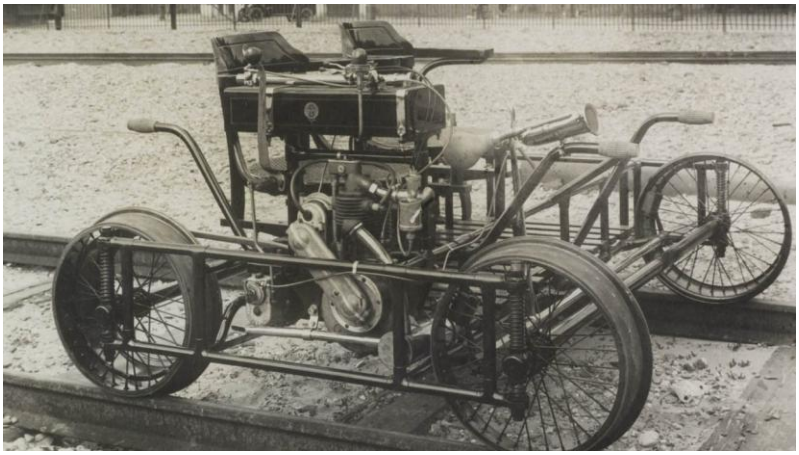
درایزین‌های موتوردار و خودروهای دو منظوره ی جاده–ریل

با افزایش ترافیک خطوط ریلی، نیاز به بازرسی سریع‌تر و پوشش طولانی‌تر مسیرها باعث ظهور **درایزین‌های موتوردار (motorized draisines / speeders)** شد. این وسایل:

- ابتدا به‌عنوان خودروهای کوچک بازرسی (inspection cars) در شبکه‌های ریلی به‌کار رفتند؛
- برخی به‌طور خاص برای راه‌آهن طراحی شدند (مانند مدل‌های Simplex وFairmont)،
- و برخی دیگر از تبدیل خودروهای جاده‌ای نظیر **Oldsmobile**، **Volkswagen Type 2**، **GAZ-13 Chaika**به وسایل دو منظوره ی جاده–ریل (road–rail vehicles, Hy-Rails) به‌دست آمدند(Wikipedia).

در دوران معاصر، سازندگان تخصصی تجهیزات ریلی (مثل Geismar و دیگر شرکت‌های اروپایی) انواع **track inspection trolley**و **light rail inspection vehicle**را عرضه می‌کنند که قادر به حمل چند نفر، سوار شدن سریع روی ریل، و نصب سنسورهای بازرسی هندسه خط، عیوب ریل و سامانه‌های سیگنالینگ هستند(spoorwegmuseum.nl).

[2] outrigger



شکل ۲- *An old fashioned vehicle on a track*

این سابقه ی تاریخی و صنعتی نشان می‌دهد که **مفهوم وسیله ی سبک ریلی انسان‌بر برای بازرسی و نگه‌داری** کاملاً جاافتاده است؛ اما عمدتاً یا به صورت انسان‌محور بدون محرکه ی برقی است، یا به شکل خودروهای کوچک موتوردار نسبتاً سنگین. جای خالی یک **پلتفرم بسیار سبک، برقی و مبتنی بر معماری دوچرخه‌ای** در این میان به‌خوبی قابل مشاهده است.

روش‌ها و فناوری‌های بازرسی خط در سطح جهانی

بازرسی وضعیت خط ریلی (Track Inspection) برای ایمنی بهره‌برداری نقشی حیاتی دارد و در سطح جهانی ترکیبی از **روش‌های دستی، نیمه‌خودکار و تمام‌خودکار** به کار گرفته می‌شود. مطالعات مروری متعددی وضعیت کنونی این حوزه را جمع‌بندی کرده‌اند.

بازرسی هندسه و عیوب ریل

مرور Wang و همکاران بر روی فناوری‌های تشخیص آسیب ریل در خطوط پرسرعت، روش‌های مختلف **آشکارسازی عیوب ریل (rail damage detection)** را شامل اندازه‌گیری هندسه خط، عیوب سطحی و زیرسطحی ریل، و سامانه‌های دید ماشینی طبقه‌بندی و مقایسه کرده است(MDPI).

از سوی دیگر، مرور **Gonzaloو همکاران** تحت عنوان *Railway Track and Vehicle Onboard Monitoring: A Review*تکنیک‌های **پایش وضعیت خط و وسیله‌ی نقلیه** را با استفاده از حسگرهای نصب‌شده روی وسیله (onboard) و کنارخط (trackside) بررسی می‌کند. در این کار، روش‌هایی مانند:

- حسگرهای شتاب و ارتعاش روی واگن‌ها برای تخمین هندسه و وضعیت خط
- سامانه‌های مبتنی بر دید ماشینی (Machine Vision) برای شناسایی ترک‌ها و عیوب سطحی
- حسگرهای مغناطیسی، التراسونیک و لیزری برای عیوب زیرسطحی

به‌صورت مقایسه‌ای ارائه شده است(ResearchGate).

اخیراً یک مرور گسترده دیگر توسط **Khajehdezfuly و همکاران** درباره ی کاربرد **هوش مصنوعی (AI)**در پایش و بازرسی خط منتشر شده که طیف وسیعی از روش‌های یادگیری ماشین(ML) ، یادگیری عمیق (DL) و مدل‌های ترکیبی را برای تشخیص خطا، پیش‌بینی خرابی و تصمیم‌گیری نگه‌داری بررسی می‌کند(ScienceDirect).

این مطالعات نشان می‌دهند که در خطوط اصلی (mainline) و پرسرعت، گرایش به سمت **سامانه‌های بازرسی با سرعت بالا، مبتنی بر سنسورهای پیچیده و پردازش داده‌ی سنگین** است؛ در حالی که در خطوط فرعی و صنعتی، همچنان وسایل سبک و ساده جایگاه خود را دارند.

وسایل انسان‌بر در بازرسی و گردشگری

گذشته از وسایل تماماً خودکار، الگوی دیگری که به‌خصوص برای پروژه‌ی حاضر مهم است، **وسایل انسان‌محور سبک** است که اپراتور روی آن سوار می‌شود و همزمان با حرکت، خط را بررسی یا از آن استفاده می‌کند.

مطالعه‌ی Brauckmann درباره‌ی استفاده از **درایزین‌های توریستی** به‌عنوان ابزاری برای حفظ خطوط کم‌استفاده نشان می‌دهد که این وسایل می‌توانند ضمن ایجاد یک فعالیت تفریحی و آموزشی برای عموم مردم، به **حفظ فیزیکی خط و جلوگیری از جمع‌آوری یا تخریب ریل‌ها** کمک کنند(docutren.com).

در برخی کشورها، خطوط متروکه‌ی نظامی یا محلی به مسیرهای rail-bike تبدیل شده‌اند و گردشگران با رکاب زدن روی این وسایل، هم از منظر تاریخی–منظره‌ای استفاده می‌کنند و هم بازدید غیررسمی از وضعیت خط انجام می‌شود(Railtripping).

در عین حال، گزارش‌های صنعتی و موزه‌ای نشان می‌دهند که **درایزین‌های موتوردار کوچک** همچنان برای **حمل گروه‌های کوچک بازرسی** در شبکه‌های ریلی در اروپا، آفریقا (مثلاً نامیبیا) و دیگر کشورها به کار می‌روند(spoorwegmuseum.nl).

برای محیط‌هایی مانند معدن، که ترکیبی از نیاز به **حضور انسان روی وسیله، قابلیت مانور در فضای محدود، شیب قابل توجه و لزوم امکان پیاده‌سازی/برداشت سریع از خط** وجود دارد، ادبیات موجود نشان می‌دهد که هنوز **راه‌حل استاندارد و سبک‌وزنِ برقی** به‌صورت جدی توسعه نیافته است؛ و بیشتر راه‌حل‌های فعلی یا مکانیکی و دستی‌اند یا خودروهای کوچک موتوردار نسبتاً سنگین.

ذخیره‌سازی انرژی و ترمز احیاگر در سامانه‌های ریلی

با رشد قیمت انرژی و تأکید بر پایداری، در سال‌های اخیر استفاده از **سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (Energy Storage Systems, ESS)** در سامانه‌های ریلی، به‌ویژه در محیط‌های شهری و خطوط DC، بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

مرور جامع **Domínguez و همکاران** در سال ۲۰۲۵ تحت عنوان *Review on the Use of Energy Storage Systems in Railway Applications*، طیفی از فناوری‌های ذخیره‌سازی مانند **باتری‌ها، ابرخازن‌ها(Supercapacitors) ، فلای‌ویل‌ها (Flywheels)** و ترکیب‌های هیبریدی (Hybrid ESS, HESS)را از نظر اصول عملکرد، چگالی انرژی/توان، طول عمر و کاربرد در زمینه‌های مختلف ریلی بررسی کرده است(ScienceDirect).

در کنار آن، یک مرور تخصصی دیگر بر روی **سیستم‌های ذخیره‌سازی در بازیابی انرژی ترمزی در شبکه‌های DC شهری**، به‌طور خاص نشان می‌دهد که چگونه سه جزء کلیدی یعنی:

- فناوری ذخیره‌ساز(ESS technology) ،
- مبدل‌های دوطرفه(Bidirectional DC-DC Converters) ،
- و واحد کنترل(Controller Unit)

در کنار هم برای حداکثرسازی بازیابی انرژی ترمزی و کاهش پیک توان از شبکه به کار گرفته می‌شوند(ResearchGate).

مطالعات موردی متعددی که در این مرورها گردآوری شده‌اند، نشان می‌دهد که ESS/HESS می‌تواند منجر به:

- کاهش محسوس انرژی دریافتی از شبکه،
- کاهش پیک‌بار و هزینه‌ی اتصال،
- بهبود پایداری ولتاژ در شبکه‌ی تغذیه،
- و افزایش انعطاف‌پذیری بهره‌برداری (مثلاً امکان حرکت بدون کاتنری در بخشی از مسیر) شود(ScienceDirect).

هرچند مقیاس این سامانه‌ها در قطارها و متروها بسیار بزرگ‌تر از وسیله‌ی مورد نظر در این پروژه است، اما در سطح مفهومی چند نکته‌ی مهم برای طراحی دوچرخه‌ی برقی ریلی قابل‌تعمیم است:

۱. ترمز احیاگر در سامانه‌های ریلی، **یک فناوری بالغ و پذیرفته‌شده** است و از نظر اصول الکتریکی و کنترلی، کاملاً مستند است.

۲. استفاده از **ترکیب باتری و ابرخازن (HESS)** برای جدا کردن وظیفه‌ی توان پیک از ذخیره‌سازی انرژی بلندمدت، در سناریوهایی که چرخه‌های ترمز/شتاب زیاد و شیب مسیر بالا است، می‌تواند عمر باتری را بهبود دهد و بازدهی سیستم را افزایش دهد(ResearchGate).

۳. مفهوم **مدیریت انرژی (Energy Management Strategy, EMS)** که در LRV ها و قطارها برای تخصیص توان بین اجزاء مختلف ESS استفاده می‌شود، می‌تواند در مقیاس کوچک‌تر برای وسیله‌ای نظیر دوچرخه‌ی برقی ریلی ساده‌سازی و اقتباس شود(ScienceDirect).

دوچرخه‌های برقی (E-Bike) و ترمز احیاگر

تکامل و معماری دوچرخه‌های برقی

مرور جامع **Dhandapani و همکاران** در سال ۲۰۲۴ تحت عنوان *Comprehensive Review on Evolution, Progression, Design and Exploration of Electric Bicycle*، سیر تکاملی، معماری سیستم، و کاربردهای دوچرخه‌ی برقی را بر اساس تحلیل نظام‌مند مقالات پایگاه Scopus تا سال ۲۰۲۳ بررسی کرده است(ResearchGate).

این مطالعه نشان می‌دهد که:

- اقبال عمومی به e-bike به‌عنوان گزینه‌ی حمل‌ونقل پاک و مناسب سفرهای کوتاه و متوسط، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛
- معماری‌های متداول شامل **موتور توپی جلو/عقب(Hub Motor)** ، **موتور میانی (Mid-Drive)** و ترکیب‌های مختلف جعبه‌دنده‌ی[3] مکانیکی و الکترونیکی است؛
- باتری‌های لیتیوم-یون با ولتاژ و ظرفیت‌های متنوع، استاندارد اصلی تأمین انرژی هستند؛
- سامانه‌های **کنترل کمکی پدال (Pedal-Assist)** و **کنترل گشتاور (Torque Sensing)** نقش مهمی در بهبود تجربه‌ی کاربر و راندمان دارند(aaejournal.com).

یک مرور نظام‌مند دیگر تحت عنوان *The Evolution of Electric Bikes: A Systematic Review* روند رشد فناوری e-bike و پذیرش بازار را بر اساس تحلیل ۲۰ ژورنال بین‌المللی بررسی کرده و نشان داده است که e-bike ها سهم قابل توجهی در جایگزینی سفرهای با خودرو شخصی و حمل‌ونقل شهری آلاینده دارند، به‌ویژه در کشورهایی مانند هلند(ijrrjournal.com).

---

[3] gearbox

ترمز احیاگر در دوچرخه‌های برقی

در زمینه‌ی اختصاصی **ترمز احیاگر درe-bike** ، برخلاف خودروهای برقی، ادبیات پژوهشی نسبتاً محدودتر است، اما چند مسیر مهم قابل‌ذکر است:

- **Kuruppu (۲۰۱۰** و **Huaو همکاران** یک سامانه‌ی ترمز احیاگر برای دوچرخه‌ی برقی مبتنی بر **کنترل DSP** و تنظیم توالی کلیدزنی مبدل را طراحی و ارزیابی کرده‌اند. در این روش، موتور به‌عنوان ژنراتور عمل کرده و انرژی ترمزی به باتری بازگردانده می‌شود(Purdue e-Pubs).
- مطالعات جدیدتر مانند **"Design and Evaluation of a Regenerative Braking System for Electric Bicycles Based on Battery Energy Storage Technology" (2025)**به ارزیابی تجربی عملکرد ترمز احیاگر در شرایط سرعت و شیب مختلف پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که هرچند مقدار انرژی بازیابی‌شده نسبت به کل مصرف محدود است، اما در مسیرهای شیب‌دار و با ترمزگیری‌های مکرر، می‌تواند بخشی از انرژی را جبران کند بدون آن‌که به باتری آسیب برساند(ResearchGate).
- کارهای دیگری مانند **"Design and Fabrication of Electric Bicycle with Regenerative System"**نیز طراحی و پیاده‌سازی عملی یک e-bike با ترمز احیاگر را گزارش می‌کنند و بر سازگاری جریان و ولتاژ تولیدی با مشخصات باتری تأکید دارند(ijraset.com).

در کنار ادبیات علمی، گزارش‌ها و تحلیل‌های فنی–بازاری متعددی (از تولیدکنندگان و رسانه‌های تخصصی e-bike) وجود دارد که به صورت انتقادی بررسی کرده‌اند **چرا اکثر دوچرخه‌های برقی تجاری فاقد ترمز احیاگر هستند** .نتایج رایج این تحلیل‌ها چنین است(Ampler Bikes):

۱. **نیاز به موتور :Direct-Drive Hub** ترمز احیاگر معمولاً مستلزم موتورهای توپی بی‌دنده و چهاربعی است که نسبت به موتورهای گیربکسی متداول، سنگین‌تر و گران‌تر هستند و در صورت خاموشی باتری، مقاومت محسوس در پدال ایجاد می‌کنند.

۲. **بازده انرژی محدود** :اکثر مطالعات و تحلیل‌های عملی نشان داده‌اند که بازیابی انرژی در سناریوهای شهری معمول، معمولاً در حدود ۳–۵٪ برد بیشتر است و در بهترین حالت، در مسیرهای بسیار شیب‌دار به حدود ۱۰–۱۵٪ می‌رسد. این مقدار در بسیاری از کاربردهای شهری، توجیه اقتصادی کامل ندارد(Nepal Journals Online).

۳. **پیچیدگی و هزینه‌ی کنترلی** :کنترل دقیق گذار بین حالت محرکه (motoring) و ژنراتوری (generating)و مدیریت جریان شارژ باتری، نیازمند کنترلرهای پیچیده‌تر و طراحی دقیق‌تر سیستم است.

با وجود این محدودیت‌ها، ظهور محصولات خاصی مانند **e-bikeهای مجهز به KERS** (Kinetic Energy Recovery System)، نمونه‌های شهری با ترمز احیاگر یکپارچه در موتور عقب، و حتی وسایل پیشرفته‌تری مانند **سه‌چرخه‌ی برقی Vigoz با سامانه‌ی Pedaling Energy Recovery System (PERS)**نشان می‌دهد که در کاربردهای خاص (شیب زیاد، نیاز به کنترل دقیق سرعت در سراشیبی، یا وسایل نیمه‌خودرو مانند میکروکارهای پدالی)، ترمز احیاگر به‌عنوان یک گزینه‌ی جدی در حال توسعه است(TechRadar).

برای پروژه‌ی حاضر، دو نکته‌ی کلیدی از این ادبیات قابل‌برداشت است:

- از نظر **فنی و الکتریکی**، پیاده‌سازی ترمز احیاگر در مقیاس e-bike با استفاده از موتورهای توپی Direct-Drive یا سامانه‌های خاص کنترلی ممکن و آزموده شده است؛
- از نظر **کاربردی**، در سناریوهایی که **شیب‌های طولانی و ترمزهای مکرر** وجود دارد (مانند مسافت‌های معدنی و صنعتی)، نسبت سود انرژی و کاهش استهلاک ترمز ممکن است بسیار بیشتر از سناریوهای شهری عادی باشد و در نتیجه توجیه‌پذیری سیستم افزایش یابد (Nepal Journals Online).

جمع‌بندی شکاف پژوهشی و جایگاه پروژه

بر اساس مرور منابع تاریخی، صنعتی و علمی، می‌توان وضعیت فعلی را این‌گونه خلاصه کرد:

۱. **وسایل سبک ریلی انسان‌محور(Draisine / Rail-bike)**

- در سراسر جهان به‌عنوان وسیله‌ای برای نگه‌داری، بازرسی و اخیراً گردشگری بر روی ریل‌های کم‌استفاده وجود دارند.
- طراحی آن‌ها مبتنی بر وزن کم، قابلیت قرار دادن و برداشتن سریع از روی ریل، و حمل چند نفر و تجهیزات است.

۲. **سامانه‌های بازرسی و پایش وضعیت خط**

- در خطوط اصلی، به سمت سامانه‌های پیشرفته‌ی مبتنی بر حسگرهای onboard و راهکارهای AI حرکت کرده‌اند؛
- اما در خطوط فرعی و صنعتی هنوز نیاز به وسایل ساده‌تر و سبک وجود دارد که اپراتور روی آن سوار می‌شود و عملیات را از نزدیک انجام می‌دهد(MDPI).

۳. **ذخیره‌سازی انرژی و ترمز احیاگر در سامانه‌های ریلی**

- ESS/HESSبه عنوان ابزارهای کلیدی برای کاهش مصرف انرژی، بهره‌گیری از انرژی ترمزی و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه به‌خوبی تثبیت شده‌اند.
- مفاهیم مدیریت انرژی (EMS) و ترکیب باتری–ابرخازن در خطوط DC شهری وLRV ها پیاده‌سازی عملی شده است(ScienceDirect).

۴. **دوچرخه‌های برقی و ترمز احیاگر**

- دوچرخه‌های برقی از نظر طراحی مکانیکی و الکتریکی به بلوغ نسبی رسیده‌اند و حجم وسیعی از ادبیات درباره‌ی انتخاب موتور، جعبه‌دنده، باتری و کنترل آن‌ها وجود دارد(aaejournal.com).
- ترمز احیاگر در e-bike از نظر فنی امکان‌پذیر و در برخی نمونه‌ها پیاده‌سازی شده است، اما به دلیل محدودیت بازده انرژی و هزینه/وزن در بازار عمومی فراگیر نشده؛ با این حال، در سناریوهای خاص (شیب زیاد، ترمز طولانی) مزیت آن برجسته‌تر است(ResearchGate).

در عین حال، **تقریباً هیچ منبع علمی مستقیمی که دقیقاً ترکیب "دوچرخه‌ی برقی ریلی انسان‌بر + قابلیت هل‌دادن واگن سبک + استفاده از ترمز احیاگر در محیط معدن" را بررسی کرده باشد، گزارش نشده است؛** ادبیات موجود این عناصر را جداگانه و در مقیاس‌های متفاوت پوشش می‌دهد. این وضعیت دو پیام دارد:

- از نظر **علمی**، پروژه‌ی حاضر در حال پر کردن یک شکاف مشخص در ادبیات است؛
- از نظر **عملی**، می‌تواند راهکاری میان‌رده بین درایزین‌های مکانیکی سبک و خودروهای بازرسی سنگین ارائه کند و برای خطوط معدنی و صنعتی شیب‌دار به‌عنوان یک گزینه‌ی جدید مطرح شود.

در فازهای بعدی پروژه (مقایسه‌ی روش‌ها، طراحی مفهومی، انتخاب سخت‌افزار)، می‌توان مستقیماً بر این پیشینه تکیه کرد:

- بخش مکانیکی و حرکتی بر مبنای ادبیات **draisines / rail-bikes**،
- بخش انرژی و ترمز بر اساس ادبیات **ESS/HESSدر راه‌آهن** و **regenدرe-bike** ،
- و بخش کارکردی–اپراتوری بر اساس مطالعات **بازرسی و نگه‌داری خط**.

این ترکیب یک چارچوب نظری محکم برای طراحی و مدلسازی دوچرخه‌ی برقی ریلیِ مورد نظر فراهم می‌کند.

مقایسه روش‌های موجود از جهات مختلف علمی و اجرایی

مقدمه

در این بخش، روش‌ها و سامانه‌هایی که در دنیا برای **دسترسی، جابه‌جایی نفرات و بازرسی روی خطوط ریلی (به‌خصوص در محیط‌های صنعتی و معدنی)** به‌کار رفته‌اند، از دو منظر اصلی مقایسه می‌شوند:

۱. رویکردهای مختلف از نظر **مبانی علمی و فنی** (دینامیک، ایمنی، امکان تجهیز به سنسور، مدیریت انرژی)

۲. کارکرد آن‌ها از نظر **اجرایی** (هزینه، بهره‌وری، زیرساخت موردنیاز، سازگاری با محیط معدن)

در ادامه، این مقایسه در چهار محور انجام می‌شود:

- روش‌های بازرسی و دسترسی روی ریل در شبکه‌های ریلی عمومی
- سیستم‌های حمل‌ونقل و دسترسی در معادن
- وسایل سبک برقی وrail-bike های صنعتی

- راهبردهای انرژی و ترمز (با و بدون ترمز احیاگر) در وسایل کوچک برقی

روش‌های بازرسی و دسترسی روی ریل در شبکه‌های ریلی عمومی

استانداردها و گزارش‌های بین‌المللی برای بازرسی خط، معمولاً چند سطح از روش‌ها را تعریف می‌کنند:

- **بازرسی پیاده(Walking inspection / visual inspection on foot)**
- **بازرسی با ترالی یا وسیله‌ی سبک**
- **بازرسی با قطار یا واگن ویژه‌ی بازرسی**
- **پایش وضعیت خط توسط وسایل در حال سرویس(in-service monitoring)**

استاندارد APTA برای بازرسی و نگه‌داری خطوط ریلی شهری، و اسناد FRA و FTA در آمریکا، این روش‌ها را از نظر دوره‌ی بازرسی، محدوده‌ی سرعت، و نوع عیوب قابل‌شناسایی طبقه‌بندی کرده‌اند(APTA).

بازرسی پیاده

در بسیاری از شبکه‌های ریلی (مثلاً Network Rail در بریتانیا وTransport for London)، **بازرسی بصری پیاده** همچنان جزء الزامی برنامه‌ی نگه‌داری است. بازرس روی خط قدم می‌زند و با چشم و ابزار دستی، عیوب نظیر شکستگی ریل، فرسایش، خطاهای بست‌ها و وضعیت بالاست را بررسی می‌کند(Network Rail).

از نظر علمی:

- این روش به ابزار پیشرفته نیاز ندارد، ولی **وابسته به انسان** و بسیار نظری است؛ احتمال خطای انسانی در تشخیص عیوب کوچک زیاد است.
- عملاً «مدل» سیستم، تجربه‌ی بازرس است نه یک الگوریتم گردآوری شده.

از نظر اجرایی:

- مزیت :**حداقل هزینه‌ی تجهیزات**، قابل‌اجرا حتی روی خطوط کوتاه و معدنی با زیرساخت ضعیف.
- عیب: سرعت کم، بهره‌وری پایین، **ریسک ایمنی بالا** چون بازرس روی خط در معرض برخورد با وسایل نقلیه است. همین موضوع باعث شده که بسیاری از راه‌آهن‌ها در اسناد رسمی به‌صراحت هدف‌گذاری کنند که «تا حد ممکن، افراد روی خط کم شوند و بازرسی به سمت بازرسی روی قطار برود(Network Rail).»

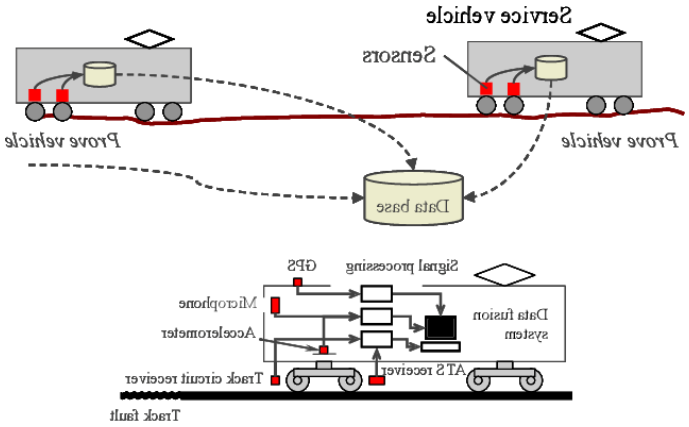
در محیط معدن، با توجه به تنگی فضا و تردد واگن‌های بار، بازرسی صرفاً پیاده هم از نظر ایمنی و هم از نظر زمان، پاسخ مناسبی برای نیاز روزمره نیست.

بازرسی با ترالی سبک(Track inspection trolley)

بازرسی با قطار / واگن ویژه‌ی بازرسی(Track Recording Car)

پایش در حین سرویس(In-service vehicle monitoring)

شکل 5- In-service vehicle monitoring



در سال‌های اخیر، یک رویکرد کارآمد و رو به رشد، استفاده از **وسایل در حال سرویس** (قطار مسافری / باری موجود) برای پایش وضعیت خط است؛ با نصب شتاب‌سنج، ژیروسکوپ و سامانه‌ی مکان‌یابی روی واگن، داده‌ها به‌صورت پیوسته هنگام حرکت معمول ثبت می‌شود و الگوهای ناهنجاری استخراج می‌شوند. راهنماهای FRA و مقالات جدید روش‌های طراحی آزمون و ارزیابی این سامانه‌ها را تشریح کرده‌اند(railroads.dot.gov).

این رویکرد از نظر علمی، بستری برای **تحلیل داده‌محور و یادگیری ماشین** در تشخیص عیوب ایجاد می‌کند؛ از جهت اجرایی، مزیتش این است که **بدون ورود نیروی انسانی روی خط**، اطلاعات مداوم فراهم می‌شود. محدودیت آن این است که به **شبکه‌ی با تردد منظم قطار** احتیاج دارد؛ در خطوط معدنی که تنها واگن‌های کوچک و پراکنده وجود دارد، زمینه‌ی کمتری برای چنین سامانه‌ای وجود دارد، مگر این‌که همان وسیله‌ی حمل‌ونقل کارگران (مثلاً دوچرخه‌ی برقی ریلی) به حامل داده تبدیل شود.

مقایسه‌ی روش‌های حمل و جابه‌جایی نفر در معادن

در معادن زیرزمینی و روباز، مسئله‌ی **حمل نفرات و بار روی مسیرهای طولانی، شیب‌دار و با فضای محدود**، سال‌هاست که موضوع طراحی سیستم‌های مختلف بوده است. ادبیات مهندسی معدن چند دسته‌ی اصلی را مطرح می‌کند:

- سیستم‌های **لوکوموتیو و واگن(Mine locomotive & rail cars)**
- سیستم‌های **کششی با کابل(rope haulage)**
- سامانه‌های **نوار نقاله (conveyor) برای حمل بار**
- و برای نفرات، **سیستم‌های man-riding** مانند **Man Riding Chair Lift (MRCL)**

لوکوموتیو و واگن در معادن

مراجع کلاسیک «Underground locomotive haulage» و مقالات انتخاب سیستم حمل (مثلاً مطالعه‌ی انتخاب سیستم حمل برای معدن زغال‌سنگ Parvadeh)نشان می‌دهند که **لوکوموتیوهای برقی یا دیزلی** به‌همراه واگن‌های بدون ترمز، رایج‌ترین راه‌حل برای حمل بار در معادن هستند(cornettscorner.com).

از نظر علمی:

- طراحی این سیستم‌ها بر اساس **چسبندگی چرخ–ریل، شیب، طول مسیر، و وزن قطار** انجام می‌شود.
- در بسیاری از معادن، واگن‌های بار **بدون ترمز مستقل** هستند و کنترل قطار تنها از طریق لوکوموتیو با ترمز مکانیکی و دینامیکی انجام می‌شود. این موضوع در متون کلاسیک به‌عنوان عامل اصلی محدودیت در شیب مجاز و طول قطار ذکر شده است(cornettscorner.com).

از نظر اجرایی:

- مزیت: ظرفیت بار بالا، مناسب برای حمل مقادیر زیاد سنگ معدن.
- عیب: سرمایه‌گذاری اولیه‌ی زیاد، نیاز به زیرساخت و تهویه (در موتورهای دیزلی)، انعطاف‌پذیری کم برای مسیرهای فرعی کوتاه یا تونل‌های تنگ.

به‌علاوه، برای **حمل نفرات** معمولاً یا واگن‌های مخصوص «man-riding» به همین لوکوموتیو اضافه می‌شوند، یا از سیستم‌های جداگانه استفاده می‌شود(cornettscorner.com).

سیستم‌های Man Riding Chair Lift (MRCL)

وسایل سبک برقی روی ریل وrail-bike های صنعتی

علاوه بر درایزین‌های سنتی، در سال‌های اخیر نمونه‌هایی از **rail-bikeبرقی و وسایل سبک برقی نگه‌داری خط** در صنعت دیده می‌شود؛ هرچند معمولاً در ادبیات علمی کمتر و در اسناد صنعتی/تجاری بیشتر گزارش شده‌اند.

rail-bike برای بازرسی سریع در شبکه‌های ریلی

برخی راه‌آهن‌ها، مثل راه‌آهن هند، از **rail bicycle** به‌عنوان مکانیزمی برای جابه‌جایی سریع بازرس روی خط استفاده کرده‌اند؛ در خبر رسمی منتشر شده از سوی وزارت راه‌آهن هند، rail bicycle به‌عنوان «مکانیزم نو برای بازرسی سریع خط» معرفی شده که اجازه می‌دهد کارکنان با سرعت و هزینه‌ی کم به نقاط دوردست خط دسترسی داشته باشند(facebook.com).

از نظر علمی، این وسیله از نظر پلتفرم نزدیک به rail-bike است، اما با افزودن تجهیزات بازرسی (مانند دوربین، GPS و ابزار دستی) برای مأموریت‌های بازرسی کوتاه‌برد بهینه شده است.

rail-bike .و ترالی‌های برقی نگه‌داری

در بازار صنعت، نمونه‌هایی مثل **Automated Orbit Rail Bike Electric Maintenance Equipment** گزارش شده که یک وسیله‌ی سبک برقی روی ریل، با قابلیت حمل ابزار و انجام تعمیرات سبک در کارگاه‌ها، معادن و صنایع دیگر است. توصیف این کلاس تجهیزات نشان می‌دهد که:

- محرکه‌ی برقی،
- شاسی سبک،
- و تمرکز بر **نگه‌داری خطوط داخلی و صنعتی** دارند(Alibaba).

این نوع تجهیزات، هرچند در مقالات علمی کمتر تحلیل شده‌اند، به‌عنوان **state-of-practice صنعتی** نشان می‌دهند که ایده‌ی وسیله‌ی سبک برقی روی ریل برای تعمیرات و نگه‌داری کاملاً عملی است؛ اما اغلب تمرکز آن‌ها روی حمل ابزار و کارگران در محیط‌های صنعتی عمومی است، نه الزماً روی هل‌دادن واگن‌های معدن در شیب بالا یا کار کردن در تونل‌های بسیار تنگ.

rail-bike .در حوزه‌ی گردشگری و پیامدهای طراحی

گزارش‌های رسانه‌ای مانند راهنمای ریلبایک‌های آمریکا در مجله‌ی *Trains*، و صفحه‌ی تاریخچه‌ی Rail Explorers، نشان می‌دهند که انواع rail-bike برای حمل مسافر در مسیرهای ۷ تا ۱۱ مایلی روی خطوط متروکه استفاده می‌شوند؛ این وسایل گاهی با موتور برقی کوچک، گاهی صرفاً با پدال، و گاهی به‌صورت دونفره/چهارنفره طراحی شده‌اند(Trains).

این تجربه‌ها دو نکته‌ی اجرایی مهم دارند:

- شاسی‌های سبک و ماژولار، که به‌راحتی روی ریل نصب/برداشت می‌شوند، در عمل سال‌ها بدون مشکل کار کرده‌اند.

- محدودیت سرعت به‌منظور ایمنی و کاهش خطر خروج از خط، یک قید طراحی کلیدی است که برای دوچرخه‌ی برقی ریلی در محیط معدن هم باید رعایت شود.

مقایسه‌ی راهبردهای انرژی و ترمز در وسایل کوچک برقی

در این بخش، تمرکز بر **دوچرخه‌ی برقی و وسایل سبک برقی** است تا مشخص شود از نظر **علمی و اجرایی** کدام گزینه‌های انرژی و ترمز برای یک وسیله‌ی سبک ریلی منطقی‌تر است.

دوچرخه‌ی برقی بدون ترمز احیاگر

بخش عمده‌ی e-bike های موجود در بازار، از **ترمزهای اصطکاکی معمول (دیسکی/وی-بریک)** استفاده می‌کنند و موتور صرفاً در حالت محرکه (موتور) کار می‌کند. تحلیل‌های تجربی و مقایسه‌ای روی e-bikeهای شهری نشان می‌دهد که:

- در سفرهای شهری با توقف و حرکت معمول، **مصرف انرژی غالباً در شتاب‌گیری و غلبه بر مقاومت هوا** است؛
- انرژی قابل بازیابی در ترمزگیری‌های کوتاه و کم‌سرعت، محدود است و در بیشتر موارد، پیچیدگی ترمز احیاگر توجیه اقتصادی ندارد(Ampler Bikes).

این وضعیت باعث شده که بسیاری از تولیدکنندگان معتبرe-bike ، به‌طور آگاهانه **ترمز احیاگر را در مدل‌های روزمره کنار بگذارند** و تمرکز را روی وزن کم، سادگی، و برد قابل قبول باتری بگذارند(TechRadar).

دوچرخه‌ی برقی با ترمز احیاگر و نتایج تجربی

در مقابل، چند دسته پژوهش و محصول وجود دارد که **ترمز احیاگر در e-bike** را بررسی یا پیاده‌سازی کرده‌اند:

۱. **مطالعات تجربی و شبیه‌سازی**

- مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳–۲۰۲۴ درباره‌ی **بهبود کارایی دوچرخه‌ی برقی با ترمز احیاگر و سیستم شارژ پدالی** نشان داده که ترکیب این دو می‌تواند به‌طور معناداری مصرف خالص انرژی از شبکه را کاهش دهد، هرچند میزان دقیق صرفه‌جویی به پروفیل مسیر (به‌ویژه وجود شیب) وابسته است(ResearchGate).
- مقاله‌ی دیگری درباره‌ی **ترمز احیاگر در دوچرخه‌ی برقی خورشیدی (solar e-bike)** نشان می‌دهد که استفاده از RBS می‌تواند «برد» دوچرخه را در سفرهای طولانی حدود چند درصد افزایش دهد، و در سراشیبی‌ها نقش پررنگ‌تری دارد(cibtech.org).

- مطالعه‌ی *Experimental Determination of Bicycles and Electric Bicycle Stopping Distance* نیز از نظر ایمنی، فاصله‌ی توقف دوچرخه و e-bike را (با و بدون مداخله ی سیستم ترمز) بررسی کرده و نشان می‌دهد که طراحی صحیح سامانه‌ی ترمز، چه مکانیکی و چه احیاگر، برای کنترل فاصله‌ی توقف در سرعت‌های مختلف حیاتی است(MDPI).

۲. **مرورهای عمومی RBS در وسایل برقی**

- مرور جدید *Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles* پیشرفت‌های RBS را بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ تحلیل کرده و نشان می‌دهد که طراحی سیستم، استراتژی کنترل، و فناوری ذخیره‌سازی تأثیر مستقیمی بر بازده انرژی بازیابی‌شده دارد. هرچند تمرکز این مرور بر خودرو و اتوبوس است، اصول حاکم بر RBS در وسایل کوچک‌تر نیز قابل‌تعمیم است(MDPI).

۳. **تحلیل‌های صنعتی و تجربیات بازار**

- تولیدکنندگانی مانند Kalkhoff وMarsant ، در مطالب فنی خود توضیح داده‌اند که **بازیابی انرژی در e-bike** عمدتاً در سراشیبی‌ها و ترمزهای طولانی معنا پیدا می‌کند و در مسیرهای کاملاً مسطح، سهم آن در برد کل محدود است(Kalkhoff Bikes).

- برخی مدل‌های خاص مانند **Quella Imperial Electric Courier** از سیستم KERS(ترمز احیاگر با پدال عقب) استفاده می‌کنند و گزارش‌های تست میدانی نشان داده‌اند که علاوه بر افزایش جزئی برد، «کنترل نرم‌تر سرعت و کاهش سایش ترمز» از مزایای اصلی آن است(TechRadar).

- در سطح پیشرفته‌تر، نمونه‌ای مانند) **Cixi Vigoz** تری‌سیکل برقی با سیستم Pedaling Energy Recovery System)نشان می‌دهد که چگونه می‌توان در یک وسیله‌ی نیمه‌خودرو، پدال‌زدن را به سیگنال کنترل و ترمز احیاگر را به جزء اصلی راهبرد انرژی تبدیل کرد؛ این نمونه نشان‌دهنده‌ی جهت‌گیری صنعتی به سمت «ترکیب توان انسانی، محرکه‌ی برقی و «RBS است(TechRadar).

از نظر علمی، این مطالعات تأیید می‌کنند که:

- RBSدر وسایل سبک، **از نظر اصول فیزیکی و کنترلی قابل طراحی و پیاده‌سازی است؛**
- سهم انرژی بازیابی‌شده، بسته به پروفیل سرعت/شیب، از چند درصد تا حدود ۱۰–۱۵٪ تغییر می‌کند؛

- طراحی نامناسب می‌تواند **برای باتری و سیستم الکتریکی خطرناک** باشد، به همین دلیل استانداردهایی مثل **UL 2849** برای ایمنی سیستم‌های الکتریکیe-bike ، شامل نحوه‌ی برخورد سیستم با جریان‌های برگشتی ازRBS ، اهمیت یافته‌اند(marsantsx).

از نظر اجرایی:

- RBSپیچیدگی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را افزایش می‌دهد، ولی در سناریوهایی که **شیب زیاد، طول مسیر محدود، و نیاز به ترمزهای مکرر** وجود دارد، می‌تواند مزایای انرژی و ایمنی قابل توجهی داشته باشد؛ دقیقاً مشابه شرایط خطوط معدنی شیب‌دار مورد بحث در این پروژه.

جمع‌بندی مقایسه‌ای در نسبت با پروژه‌ی دوچرخه‌ی برقی ریلی

با کنار هم گذاشتن روش‌های موجود، می‌توان چند نتیجه‌ی مقایسه‌ای روشن گرفت:

۱. **در شبکه‌های ریلی عمومی،** روند کلی از بازرسی پیاده به سمت بازرسی با وسیله‌ی سبک و سپس قطارهای بازرسی و سامانه‌های in-service است؛ این روند با هدف کاهش حضور انسان روی خط، افزایش ایمنی و استفاده‌ی بهتر از داده صورت گرفته است(railroads.dot.gov).

۲. **در معادن زیرزمینی و روباز،** سیستم‌های متداول یا روی حمل بار (لوکوموتیو و واگن) تمرکز دارند یا روی حمل نفر خارج از ریل) مانند .(MRCL هیچ‌یک برای سناریویی که **نفر باید روی ریل حرکت کند، گاهی واگن سبک را هل بدهد و زیرساخت سنگین توجیه ندارد،** بهینه نشده‌اند(cornettscorner.com).

۳. **rail-bikeها و وسایل سبک برقی روی ریل** در صنعت وجود دارند، ولی عمدتاً در نقش‌های گردشگری یا نگه‌داری سبک هستند. این موضوع نشان می‌دهند که از نظر اجرایی، شاسی سبک، محرکه‌ی برقی و حرکت ایمن روی ریل در مقیاس کوچک کاملاً عملی است، اما معمولاً برای محیط‌های ساده‌تر از معدن (خطوط باز، بدون بار) طراحی شده‌اند(facebook.com).

۴. در حوزه‌ی **مدیریت انرژی و ترمز،** RBSدر وسایل کوچک برقی از نظر علمی تثبیت شده و در مواردی رویe-bike ها و وسایل نوظهوری مثل Vigoz پیاده‌سازی شده است؛ محدودیت اصلی آن در کاربرد عمومی، نسبت سود انرژی به هزینه و پیچیدگی است، اما در مسیرهای شیب‌دار و کاربردهای خاص، مزایای بیشتری (مانند کنترل سرعت، کاهش سایش ترمز، بازیابی انرژی) دارد(ResearchGate).

در نتیجه، از دید **علمی** و **اجرایی،** می‌توان جایگاه سامانه‌ی پیشنهادی را چنین توصیف کرد:

- از نظر پلتفرم، دوچرخه‌ی برقی ریلی پیشنهادی **بین rail-bike سنتی و ترالی‌های بازرسی سبک** قرار می‌گیرد؛

- از نظر محیط کاربرد، **بین سیستم‌های حمل نفر در معدن(MRCL)** ، **(man-riding cars)و وسایل سبک نگه‌داری ریلی** قرار دارد؛
- از نظر راهبرد انرژی، از اصول **ESS/HESSو RBS در وسایل برقی** الهام می‌گیرد، ولی در مقیاسی کوچک و متناسب با یک وسیله‌ی سبک انسان‌بر.

معرفی و طراحی مفهومی مکانیزم دوچرخه برقی ریلی

۳–۱ .اهداف طراحی و الزامات عملکردی

بر اساس نیاز تعریف‌شده در پروژه، سیستم پیشنهادی یک **وسیله‌ی سبک ریلی برقی انسان‌بر** است که:

- یک یا دو نفر اپراتور را بر روی ریل جابه‌جا می‌کند؛
- قابلیت **هل‌دادن واگن‌های سبک معدنی** را روی همان ریل دارد؛
- بتواند روی مسیرهای **افقی و شیب‌دار** در محیط معدن (زیرزمینی یا روباز) کار کند؛
- وزن و ابعاد آن به‌حدی کم باشد که **قرار دادن/برداشتن (on/off-track)** به‌صورت دستی و توسط یک یا دو نفر امکان‌پذیر باشد؛
- از نظر ایمنی، با اصول رایج برای وسایل نقلیه در معادن (شامل ترمز مطمئن، fail-safeو کنترل سرعت در شیب) سازگار باشد(dgms.gov.in).

با توجه به استانداردها و دستورالعمل‌های سیستم‌های حمل نفر در معادن (مثل *Man Riding Car Rope Haulage* و *Man Riding Chair Lift System* در مقررات DGMS هند) حداقل الزامات زیر برای طراحی مطرح‌اند(dgms.gov.in):

- **استحکام سازه و اجزا** با ضریب اطمینان مناسب در برابر بارهای دینامیکی و ضربه؛
- **دو سیستم ترمز مستقل** service brake و parking / emergency brake و رفتار fail» to safety«در صورت قطع توان یا خرابی؛(Ontario)
- محدودیت سرعت در به نحوی که ریسک خروج از خط و فاصله‌ی توقف قابل‌کنترل باشد؛
- پایداری جانبی کافی در پیچ‌ها و ناهمواری‌های محدود ریل؛
- طراحی ارگونومیک برای اپراتور (زاویه‌ی صندلی، دسترسی به فرمان، کنترل‌ها و ترمزها).

از طرف دیگر، از نظر دنیای **دوچرخه‌ی برقی(E-bike)** ، هدف این است که یک طراحی شبیهe-bike ها داشته باشیم که:

- ترکیب نیروی انسانی و محرکه‌ی برقی را پیاده کند؛(TENWAYS)
- قابلیت افزودن یا استفاده از **ترمز احیاگر (Regenerative Braking)** در نسخه‌های پیشرفته را داشته باشد(ResearchGate).

بنابراین طراحی مفهومی باید تلفیقی از این دو ایده باشد:
یک **draisine / rail-bike صنعتی سبک** روی ریل معدن، با مغز و قلب یک **دوچرخه‌ی برقی مهندسی‌شده**.

معماری کلی سیستم (تقسیم به زیرسیستم‌ها)

برای این‌که سیستم فقط «یک چیز روی ریل» نباشد!، بلکه یک **سیستم مکاترونیکی قابل‌تحلیل** باشد، آن را به زیرسیستم‌های زیر تقسیم می‌کنیم:

۱. **پلنت مکانیکی(Mechanical Plant)**
   - شاسی(frame)
   - چرخ‌ها و مجموعه‌ی چرخ–محور(wheelsets)
   - مکانیزم کوپلینگ به واگن
   - سازه‌های محافظتی و ارگونومی اپراتور

۲. **زیرسیستم محرکه و انرژی(Propulsion & Energy)**
   - موتور برقی(Electric Motor)
   - سیستم انتقال قدرت (شامل تسمه/زنجیر)
   - باتری و (در نسخه‌ی پیشرفته) ابرخازن(Hybrid Energy Storage)
۳. **زیرسیستم ترمز و ایمنی(Braking & Safety)**
   - ترمز سرویس(Service brake)
   - ترمز اضطراری/پارک(Emergency/Parking brake)
   - ترمز احیاگر (Regenerative braking) به‌عنوان لایه‌ی مکمل
۴. **زیرسیستم حسگر و کنترل(Sensors & Control)**
   - حسگر سرعت چرخ، جریان موتور، وضعیت باتری(SOC) ، شتاب/شیب(IMU)
   - کنترلر موتور و ترمز(motor / brake controller)
   - واحد کنترل مرکزی MCU/PLC کوچک برای منطق ایمنی و استراتژی انرژی
۵. **رابط انسان–ماشین(HMI)**
   - فرامین اپراتور: گاز (throttle) یاpedal-assist ، دسته ترمز، کلیدهایmode
   - نمایشگر ساده برای سرعت، سطح شارژ، هشدارها

این ساختار دقیقاً با چارچوب‌های مرسوم طراحی سیستم‌های مکاترونیکی–(process–plant actuator–sensor–HMI)هم‌خوان است و در بخش بلوک‌دیاگرام و جریان داده به‌صورت صریح‌تر نشان داده می‌شود.

طراحی مفهومی زیرسیستم مکانیکی

انتخاب پلتفرم مکانیکی: چرا چهارچرخ و نه «دوچرخه با اوت‌ریگر»؟

درrail-bike های تفریحی، دو الگوی اصلی مشاهده می‌شود:

- **دوچرخه روی یک ریل** +اوت‌ریگر (بازوی جانبی) روی ریل دیگر،
- یا یک **درایزین چهارچرخ** با فریم فولادی و چهار چرخ فلنج‌دار(Rail Explorers USA).

برای پروژه‌ی حاضر:

- ما با **واگن بار** سروکار داریم؛
- شیب مسیر قابل توجه است؛
- محیط معدن می‌تواند مرطوب، لغزنده و دارای ضربه باشد؛
- و خروج از خط، یک مسئله‌ی ایمنی جدی است.

بنابراین **پلتفرم مناسب** یک **وسیله‌ی چهارچرخ (دو محور)** است، نزدیک به درایزین کلاسیک(Wikipedia):

- دو چرخ فلنج‌دار در جلو، دو چرخ فلنج‌دار در عقب؛
- هر دو محور روی یک شاسی فولادی سبک (مثلاً مقاطع توخالی مستطیلی) نصب می‌شوند؛
- فاصله‌ی بین محورها (wheelbase) بر اساس شعاع حداقل قوس ریل معدن انتخاب می‌شود تا بدون درگیر شدن فلنج‌ها در قوس‌ها، حرکت امکان‌پذیر باشد.

چرخ و تماس چرخ–ریل

با توجه به اطلاعات خطوط معدنی، معمولاً از **ریل‌های سبک با گیج باریک** (مثلاً ۶۰۰ یا ۷۵۰ میلی‌متر) استفاده می‌شود. در اسناد تجهیزات حمل معدن، به ریل‌های ویژه برای سیستم‌های haulage اشاره شده است(Mine Portal).

انتخاب مناسب برای چرخ:

- **چرخ‌های فولادی فلنج‌دار** با قطر متوسط (مثلاً ۳۰–۴۰ سانتی‌متر)
- پروفیل فلنج مطابق با ریل معدن، با شعاع گوشه‌ی مناسب برای کاهش سایش
- یاتاقان‌بندی روی محور با بلبرینگ‌های صنعتی استاندارد

برخلاف دوچرخه‌های جاده‌ای، در اینجا چرخ لاستیکی کاربرد ندارد:

- چسبندگی و هدایت توسط تماس فلز–فلز تأمین می‌شود،
- و ناهمواری در ریل معدن (اگر ریل درست نگه‌داری شود) آن‌قدر زیاد نیست که نیاز به تایر لاستیکی باشد. در موارد خاص می‌توان از لایه‌ی الاستیک نازک روی چرخ های وفلادی استفاده کرد، اما طراحی پایه بر چرخ فولادی استوار است.

شاسی و جانمایی اپراتور

شاسی به صورت یک **فریم U یا مستطیلی** در نظر گرفته می‌شود، با:

- محور جلو در نزدیکی بخش جلوی شاسی
- محور عقب در نزدیکی بخش عقبی؛
- صندلی اپراتور تقریباً نزدیک به محور میانی سیستم (برای توزیع یکنواخت بار روی چرخ‌ها)؛
- فرمان (handlebar) در قسمت جلو برای هدایت حسّی و نصب کنترل‌ها ؛هرچند هدایت واقعی توسط ریل انجام می‌شود، اما فرمان محل منطقی برای ارگونومی و کنترل‌هاست، مشابه برخی rail-bikeها(Rail Explorers USA).

شکل 7- rail explorers rail bike

باتری و تجهیزات الکترونیکی در مرکز شاسی و در پایین‌ترین ارتفاع ممکن نصب می‌شوند تا **مرکز جرم پایین** و پایداری جانبی بهبود یابد.

مکانیزم کوپلینگ به واگن

برای هل‌دادن واگن‌های کوچک معدنی، باید مکانیزم کوپلینگ با ویژگی‌های زیر طراحی شود(MKP):

- ارتفاع کوپلر مطابق ارتفاع کوپلر واگن‌های موجود در معدن؛
- **مدولار بودن** :امکان استفاده از کوپلر سفت (rigid) یا نیمه‌الاستیک (مثلاً با بوش لاستیکی یا فنر) جهت کاهش ضربه هنگام شروع حرکت؛
- مکانیزم ساده‌ی **قفل/رهاسازی (latch / release)** که اپراتور بتواند بدون پیاده‌شدن، در زیر واگن و فقط با دسترسی از پشت وسیله، واگن را متصل یا جدا کند.
- مقاومت کافی در برابر نیروهای فشاری (هل‌دادن) و کششی محدود (در صورت برگشت یا مانور).

از استانداردهای man-riding در معادن می‌توان الهام گرفت که ایستگاه‌های پیاده/سوار کردن و سیستم uncouplingباید به‌گونه‌ای طراحی شوند که کاربر در معرض خطر حداقلی قرار گیرد(MKP).

طراحی مفهومی زیرسیستم محرکه و انرژی

انتخاب نوع موتور Mid-Drive :یاHub Motor ؟

در دنیایe-bike ، بحث کلاسیک این است که **موتور توپی (Hub Motor)** بهتر است یا **موتور میانی (Mid-Drive)**. مرورهای فنی و مقایسه‌های صنعتی نشان می‌دهند که(TENWAYS):

- **Mid-Drive Motor**
  - گشتاور بهتر در سربالایی‌ها(hill-flattening torque)
  - استفاده از سیستم دنده‌ی مکانیکی برای بهینه‌کردن عملکرد در سرعت‌های مختلف
  - توزیع جرم بهتر و مرکز جرم پایین‌تر
- **Hub Motor**
  - ساخت ساده‌تر، هزینه‌ی کمتر
  - مناسب برای مسیرهای نسبتاً مسطح و کاربردهای شهری
  - پیاده‌سازی راحت‌تر regen در موتورهایDirect-Drive

با توجه به این‌که در پروژه‌ی حاضر:

- شیب مسیر ممکن است قابل توجه باشد؛
- بار اضافی به‌صورت واگن معدنی نیز وجود دارد؛
- کنترل دقیق گشتاور در سرعت پایین اهمیت زیادی دارد؛

گزینه‌ی منطقی‌تر **موتور میانی (Mid-Drive) نصب‌شده روی شاسی** است که خروجی آن از طریق **زنجیر یا تسمه** به محور عقب منتقل می‌شود. این انتخاب با تجربه‌یe-bike های با کیفیت بالا در سربالایی‌ها همخوان است(EVELO).

در نسخه‌ی توسعه‌یافته که ترمز احیاگر مدنظر است، می‌توان از ساختار ترکیبی استفاده کرد:

- یا Mid-Drive با قابلیت چهار ربع (تولید گشتاور مثبت و منفی)،
- یا Hub Motor Direct-Drive روی یکی از چرخ‌های عقب (اما این انتخاب ممکن است وزن unsprungرا بالا ببرد و طراحی مکانیکی را پیچیده‌تر کند)

تخمین مفهومی توان مورد نیاز

برای تخمین مفهومی، نیروی کشش مورد نیاز را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$F_{tractive} = m_{total} * g * \sin(theta) + m_{total} * g * f_r + F_{extra}$$

که در آن:

- m_{total}: جرم مجموع وسیله + اپراتور + واگن سبک،
- θ: زاویه‌ی شیب،
- (f_r) :ضریب مقاومت غلتشی (برای تماس چرخ فولادی–ریل، حدود ۰٫۰۰۱–۰٫۰۰۲)،
- F_{extra} :حاشیه برای شتاب‌گیری و غلبه بر مقاومت‌های اضافی (ناهمواری، اصطکاک کوپلر و...).

با توجه به داده‌های سیستم‌های حمل معدنی، برای شیب‌های حدود ۱:۱۶ (تقریباً ٪۶)، سرعت‌های معمول در haulage بین ۲ تا ۵ km/h است و توان موردنیاز با توجه به جرم، در حد چند کیلووات می‌تواند کافی باشد(Mine Portal).

در این طراحی مفهومی، می‌توان **توان موتور را در محدوده‌ی ۱–۲ kW** برای نسخه‌ی سبک (یک واگن کوچک، شیب متوسط) در نظر گرفت و در مراحل بعدی، بر اساس مشخصات واقعی خط معدن، این مقدار را دقیق کرد.

معماری ذخیره‌سازی انرژی

برای سیستم پایه، یک **باتری لیتیومی** با ولتاژ نامی (مثلاً ۴۸ ولت) و ظرفیت متناسب با مأموریت (مثلاً ۱–۲ kWh)کافی است. این معماری مشابه معماریe-bike ها و وسایل برقی سبک است(ijraset.com).

در نسخه‌ی پیشرفته‌تر، می‌توان از **سیستم ذخیره‌سازی هیبریدی (HESS)** شامل باتری + ابرخازن استفاده کرد، همان‌طور که در مقالات مربوط به RBS در e-bike و خودروهای برقی پیشنهاد شده است(ResearchGate):

- باتری: تأمین انرژی میان‌مدت،
- ابرخازن: جذب پیک توان ترمز احیاگر و تحویل پیک توان در شتاب‌گیری.

این ساختار علاوه بر کاهش استرس حرارتی و جریان‌های پیک روی باتری، اجازه می‌دهد **ترمز احیاگر قوی‌تر و ایمن‌تری** برای سراشیبی‌ها طراحی شود.

طراحی مفهومی ترمز و ایمنی

اگر قرار است یک وسیله در شیب معدن، واگن را هل بدهد،.طراحی ترمز یک مسئله ضروری و جدانشدنی از پروژه است. مقررات ایمنی برای وسایل معدنی و بریده‌های راهنما از سازمان‌هایی مانندOntario ، NSWو WA روی چند اصل تأکید می‌کنند(Ontario):

- وجود **سیستم ترمز سرویس (service brake)** با ظرفیت مناسب؛
- وجود **ترمز پارک/اضطراری (parking/emergency brake)** مستقل که در صورت قطع توان، **خودبه‌خود درگیر شود** fail-to-safety)، معمولاً با فنر فشاری و آزادسازی هیدرولیک یا پنوماتیک یا الکتریکی؛
- طراحی برای جلوگیری از run-away vehicle در شیب؛
- حتی‌الامکان جلوگیری از قفل شدن چرخ‌ها (anti-lock tendency) برای حفظ کنترل.

ساختار پیشنهادی ترمز

در طراحی مفهومی، ساختار زیر منطقی است:

۱. **ترمز مکانیکی دیسکی روی هر دو محور**

- ترمز دیسکی مکانیکی (یا هیدرولیکی) روی چرخ‌های عقب به‌عنوان ترمز سرویس اصلی (کنترل‌شده توسط دسته ترمز در دست اپراتور)؛
- ترمز دیسکی جداگانه روی محور جلو، که توسط یک مکانیزم فنری–مکانیکی به‌عنوان **ترمز پارک/اضطراری** عمل می‌کند: در حالت عادی توسط یک سیم/مکانیزم الکتریکی آزاد نگه داشته می‌شود و در صورت قطع توان یا فعال‌شدنE-stop ، فنر ترمز را درگیر می‌کند(resources.nsw.gov.au).

۲. **ترمز احیاگر (Regenerative Braking) در موتور**

- موتور میانی یا توپی، در سرعت‌های بالاتر از یک حد آستانه، می‌تواند در حالت ژنراتور کار کند؛
- گشتاور منفی توسط کنترلر موتور بر اساس سرعت و وضعیت باتری تنظیم می‌شود؛
- انرژی تولیدی در ترمز احیاگر به باتری) یا در نسخهٔ HESS به ابرخازن (منتقل می‌شود؛(ResearchGate)
- مقدار این ترمز به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که **همیشه قابل‌جایگزینی توسط ترمز مکانیکی** باشد؛ یعنی در صورت بروز خطا در سیستم الکتریکی، توقف وسیله فقط به ترمز مکانیکی متکی است، نه.RBS

مطالعات روی RBS در دوچرخه‌ی برقی نشان داده‌اند که طراحی نامناسب کنترل جریان و ولتاژ می‌تواند منجر به آسیب باتری یا عدم پایداری سیستم شود؛ به همین دلیل در طراحی مفهومی، RBSبه‌عنوان **لایه‌ی افزایشی** در نظر گرفته می‌شود، نه ستون اصلی ایمنی(ResearchGate).

رفتار ایمن در شیب

برای حرکت در شیب، چند سناریوی بحرانی باید در طراحی مفهومی در نظر گرفته شود:

- قطع ناگهانی توان موتور در حین بالا رفتن
- شکست مکانیکی کوپلر و جدایی واگن
- خطای اپراتور (رها کردن دسته ترمز، استفاده‌ی نادرست از گاز و...)

برای مقابله با این حالات، منطق زیر در سیستم کنترل و ترمز تعریف می‌شود:

- در صورت تشخیص **قطع توان اصلی** یا خطای شدید در سیستم کنترل:
  - ترمز احیاگر در صورت در دسترس بودن فعال می‌شود؛
  - ترمز پارک فنری روی محور جلو درگیر می‌شود؛
- در صورت فعال‌سازی **دکمه‌ی توقف اضطراری (E-stop)** توسط اپراتور:
  - موتور بلافاصله از مدار محرکه خارج می‌شود؛
  - ترمز مکانیکی و احیاگر هر دو در حداکثر حد مجاز فعال می‌شوند (با اولویت مکانیکی).

این منطق مطابق توصیه‌های اسناد مربوط به سیستم‌های ترمز در معادن است که بر «fail to safety» و امکان انجام توقف امن در صورت خرابی تأکید دارند(resources.nsw.gov.au).

طراحی مفهومی سیستم کنترل، سنسورها و رابط کاربر

سنسورها

برای این‌که سیستم فقط «یک دوچرخه روی ریل» نباشد و واقعاً یک **سیستم مکاترونیکی قابل‌کنترل** باشد، حداقل سنسورهای زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- **سنسور سرعت چرخ (Wheel speed sensor)** روی یکی از چرخ‌های محرک؛
- **سنسور جریان و ولتاژ موتور/باتری** برای تخمین توان و وضعیت شارژ(SOC) ؛

- **IMUکوچک (شتاب‌سنج + ژیروسکوپ)** برای تخمین زاویه‌ی شیب و شتاب‌های طولی، که در کنترل ترمز و تشخیص run-away کاربرد دارد؛
- سنسور وضعیت ترمز پارک (مثلاً میکروسوییچ برای وضعیت آزاد/درگیر بودن ترمز فنری)؛
- در نسخه‌ی پیشرفته، **سنسور نیرو روی کوپلر** برای محدودکردن بار واگن و جلوگیری از اضافه‌بار.

چنین مجموعه‌ای با نیازهای پایش وضعیت که در سامانه‌های in-service monitoring برای خطوط اصلی هم استفاده می‌شود، از نظر مفهوم مشابه است، اما در مقیاس کوچک‌تر(dgms.gov.in).

کنترلر و ساختار کنترلی

ساختار کنترلی پیشنهادی در سطح مفهومی:

- **Motor Controller**
  - کنترل گشتاور یا سرعت موتور بر اساس ورودی اپراتور (throttle / pedal-assist) و محدودیت‌های ایمنی؛
  - پیاده‌سازی حالت‌های motoring و regenerating؛(dlsu.edu.ph)
- **Brake Controller / Safety Logic**
  - مانیتورینگ سرعت، شیب، وضعیت ترمز و کوپلر؛
  - اعمال خودکار RBS در سراشیبی و کاهش سرعت به محدوده‌ی امن؛
  - فعال‌سازی ترمز پارک در شرایط خرابی یا توقف طولانی(resources.nsw.gov.au).
- **واحد کنترل مرکزی MCU/PLC کوچک**
  - پیاده‌سازی قوانین ایمنی (Safety Interlocks) مانند:
    - حرکت ممنوع با ترمز پارک درگیر؛
    - محدود کردن گشتاور موتور در صورت اضافه‌بار کوپلر؛
    - عدم اجازه‌ی فعال‌سازی RBS زمانی که باتری در حالت شارژ کامل است؛
  - ثبت داده (Data logging) برای تحلیل بعدی و نگه‌داری پیشگیرانه.

رابط کاربر (HMI)

رابط کاربر باید در عین سادگی، اطلاعات کلیدی را منتقل کند:

- نمایشگر ساده LCD کوچک یا LED bar شامل:
  - سرعت(km/h)
  - وضعیت شارژ باتری(SOC)
  - حالت سیستم(Normal / Regen / Fault)
- کنترل‌ها:
  - دسته‌ی گاز یا سطح کمکی(assist level)
  - دو دسته‌ی ترمز (چپ/راست) برای ترمز مکانیکی
  - دکمه‌یE-stop
  - سوئیچ انتخاب mode (مثلاً فقط انسان‌محور، انسان+برقی، فقط برقی در محدوده‌ی سرعت پایین)

تجربه‌ی e-bike های باکیفیت نشان می‌دهد که سادگی HMI و بازخورد واضح به کاربر، علاوه بر راحتی، تأثیر مستقیم بر ایمنی دارد؛ به‌خصوص زمانی که سیستم ترکیبی از نیروی انسانی و برقی است(Bicycling).

بلوک‌دیاگرام و روند داده در سیستم (توصیف مفهومی)

۱. **ورودی‌های انسان**
   - گاز / سطح کمک(u_1)
   - فرمان ترمز(u_2)
   - E-stop (u_3)
۲. **ورودی‌های محیطی / سنسورها**
   - سرعت چرخ(y_1)
   - شیب/شتاب(y_2)
   - وضعیت باتری/ابرخازن(y_3)
   - وضعیت ترمز پارک و کوپلر(y_4)

۳. **واحد کنترل مرکزی(Controller)**
   - دریافت u و y ها
   - اجرای قوانین ایمنی و استراتژی انرژی
   - تولید دستورات:
     - فرمان گشتاور موتور(τ_ref)
     - شدت ترمز احیاگر(b_regen)
     - فرمان درگیر/آزاد بودن ترمز پارک(b_park)
۴. **پلنت مکانیکی + الکتریکی**
   - موتور + گیربکس + چرخ‌ها
   - شاسی + واگن متصل
   - ترمزها
۵. **خروجی سیستم**
   - سرعت وسیله، شتاب، مسیر طی‌شده
   - وضعیت انرژی (مصرف/بازیابی)

این بلوک‌دیاگرام کاملاً با ساختار استاندارد مدل‌سازی سامانه‌های مکاترونیکی هم‌خوان است و در فازهای بعدی (مدل‌سازی دینامیکی و طراحی کنترل) می‌تواند مبنای نوشتن معادلات حالت قرار گیرد.

اسکچ مفهومی سیستم (توضیح کلامی)

برای قسمت «ارائه‌ی بصری سیستم»، می‌توان در گزارش یک اسکچ ساده دستی یا CAD بر اساس توصیف زیر تهیه کرد:

- **نمای جانبی(Side View)**
  - دو محور با چهار چرخ فلنج‌دار در جلو و عقب
  - صندلی اپراتور بالای محور میانی، کمی متمایل به عقب
  - فرمان در جلو با دسته‌های ترمز و نمایشگر کوچک وسط

- باتری در زیر صندلی، داخل محفظه ای فلزی
- موتور میانی در قسمت پایین شاسی، نزدیک محور عقب، متصل به چرخ عقب با زنجیر
- کوپلر در پشت وسیله، در راستای مرکز، با یک articulation کوتاه برای اتصال به واگن

- **نمای روبه‌رو(Front View)**
  - دو چرخ روی ریل، شاسی سبک با عرض کنترل‌شده (کمی کمتر از عرض واگن‌های معدن)
  - قوس محافظ (roll-over bar) کوچک بالای صندلی (اختیاری) برای حفاظت در برابر واژگونی احتمالی
- **نمای بالا(Top View)**
  - چیدمان باتری، موتور، کنترلر و مسیر عبور کابل‌ها
  - محل احتمالی نصب سنسورهای اضافی (مثلاً IMU در نزدیک مرکز جرم)

جمع‌بندی طراحی مفهومی

در این بخش، مکانیزم دوچرخه‌ی برقی ریلی به‌عنوان یک **سیستم مکاترونیکی چندزیرسیستمی** معرفی و طراحی مفهومی شد:

- از نظر مکانیکی، یک **درایزین چهارچرخ سبک** با شاسی فولادی، چرخ‌های فلزی فلنج‌دار و کوپلر سازگار با واگن معدنی؛
- از نظر محرکه، یک **سیستم برقی مبتنی بر موتور میانی** با توان کافی برای عبور از شیب و حمل واگن سبک؛
- از نظر انرژی، یک **باتری لیتیومی** در نسخه‌ی پایه و امکان توسعه به HESS با ابرخازن؛
- از نظر ایمنی، ساختار **دو ترمز مستقل** و ترمز احیاگر به‌عنوان لایه‌ی تکمیلی، مطابق اصول fail-to-safetyو الزامات وسایل معدنی؛
- از نظر کنترل، یک HMI ساده برای اپراتور، همراه با سنسورها و منطق کنترلی برای محدودکردن سرعت، گشتاور و حفظ وضعیت ایمن در شرایط خطا.

ادبیات موجود در حوزه‌ی **درایزین‌ها**، **man-riding systems**، **mine haulage**، **E-bike** و **RBS** نشان می‌دهد که هر یک از اجزای پیشنهادی قبلاً در زمینه‌ای آزموده شده و از نظر علمی و اجرایی توجیه‌پذیر است؛ نوآوری پروژه در **ترکیب هدفمند این عناصر** برای حل مسئله‌ی خاص «جابجایی نفر + هل‌دادن واگن سبک روی ریل معدن» است.

بخش‌های سیستم و وظایف آن‌ها (پروسس، پلنت، اکچوئیتورها، سنسورها و بخش ارتباط با کاربر)

ساختار کلی سیستم و تعریف بخش‌ها

در ادبیات مکاترونیک، یک سیستم مکاترونیکی معمولاً شامل اجزای اصلی زیر است: **پروسس (Process)** به‌عنوان وظیفه‌ی فیزیکی که باید انجام شود، **پلنت (Plant)** به‌عنوان سیستم فیزیکی تحت کنترل، **اکچوئیتورها (Actuators)** به‌عنوان مبدل‌های انرژی، **سنسورها (Sensors)** به‌عنوان ابزار اندازه‌گیری وضعیت سیستم، و **بخش ارتباط انسان–ماشین (Human–Machine Interface, HMI)** که اپراتور از طریق آن با سیستم تعامل می‌کند(Google Books).

کتاب‌های مرجع مکاترونیک مانند Bolton و Bishop تأکید می‌کنند که این اجزا باید به‌صورت یکپارچه و هم‌زمان طراحی شوند تا سیستم نه‌فقط از نظر عملکرد، بلکه از نظر **ایمنی**، **قابلیت کنترل**، و **قابلیت نگه‌داری** پاسخ‌گو باشد(Google Books).

در ادامه، همین چارچوب برای سیستم «دوچرخه‌ی برقی ریلی برای جابه‌جایی نفر و هل‌دادن واگن سبک در معدن» به‌طور ساختاری تعریف می‌شود.

پروسس :(Process) وظیفه‌ی فیزیکی و محیط عملکرد

تعریف پروسس در این پروژه

در این پروژه، **پروسس** به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

جابجایی امن و کنترل‌شده‌ی یک نفر اپراتور و در صورت نیاز، هل‌دادن یک یا چند واگن سبک معدنی روی ریل، در مسیرهای افقی و شیب‌دار محیط معدن، با استفاده از یک وسیله‌ی سبک ریلی برقی.

این پروسس شامل چند جزء کلیدی است:

۱. **حرکت طولی روی ریل**
   - حرکت در سرعت‌های پایین تا متوسط، متناسب با محیط معدن(مثلاً ۵–۱۵ km/h)
   - عبور از **شیب‌های مثبت (رفت) و منفی (بازگشت)** با بار و بدون بار.
۲. **تعامل با واگن بار سبک**
   - اتصال و جداسازی واگن از طریق کوپلر؛
   - اعمال نیروی فشاری (هل‌دادن) و در حد محدود نیروی کششی، متناسب با ظرفیت مکانیکی وسیله.
۳. **ایمنی در محیط معدن**
   - توقف مطمئن در حداکثر شیب قابل‌قبول؛
   - جلوگیری از حرکت فرار (runaway) در سراشیبی؛
   - حفاظت از اپراتور در برابر تصادم و واژگونی.

در استانداردهای مربوط به حمل‌ونقل زیرزمینی و ماشین‌آلات معدن، برای ماشین‌های متحرک، پروسس معمولاً به صورت ترکیب «حرکت + حمل بار + ایمنی» تعریف می‌شود و طراحی ترمز، محرکه و HMIبر همین اساس انجام می‌گیرد؛ استانداردهایی مانند **ISO 19296** و **CSA M424.3** به صراحت روی این ابعاد تمرکز دارند(ISO).

آشفتگی‌ها و ورودی‌های مزاحم(Disturbances)

پروسس تحت تأثیر ورودی‌های مزاحم زیر قرار دارد:

- تغییرات **پروفیل ریل** (شیب، قوس، ناهمواری‌های موضعی)؛
- تغییرات **جرم کل سیستم** به‌علت وجود یا عدم وجود واگن و میزان بار داخل آن؛

- شرایط محیطی مانند رطوبت، لغزندگی، آلودگی روی سطح ریل؛
- خطاهای انسانی (انتخاب نادرست سرعت، ترمز دیرهنگام، استفاده‌ی نامناسب از گاز و...)؛
- تغییر وضعیت **باتری** (کاهشSOC ، افت ولتاژ تحت بار، دما)

بنابراین، طراحی پلنت، اکچوئیتورها، سنسورها و HMI باید به‌گونه‌ای باشد که در حضور این آشفتگی‌ها، پروسس همچنان **ایمن، قابل‌پیش‌بینی و پایدار** باشد.

پلنت :(Plant) سیستم فیزیکی تحت کنترل

در چارچوب مکاترونیک، **پلنت** شامل تمام اجزای فیزیکی است که دینامیک سیستم را تعیین می‌کنند و تحت تأثیر فرمان اکچوئیتورها قرار می‌گیرند(Google Books).

برای دوچرخه‌ی برقی ریلی، پلنت را می‌توان به سه زیرپلنت اصلی تقسیم کرد:

۱. **زیرپلنت مکانیکی–حرکتی(Mechanical & Vehicle Dynamics Sub-plant)**

۲. **زیرپلنت محرکه‌ی الکتریکی(Electric Drive Sub-plant)**

۳. **زیرپلنت ترمز و تماس چرخ–ریل(Braking & Wheel–Rail Contact Sub-plant)**

زیرپلنت مکانیکی–حرکتی

این زیرپلنت شامل موارد زیر است:

- شاسی (frame) و سازه‌ی نگه‌دارنده؛
- مجموعه‌ی محور–چرخ‌ها (wheelsets) روی ریل؛
- کوپلر و اتصال به واگن؛
- جرم اپراتور، جرم واگن و بار؛
- تماس مکانیکی چرخ–ریل و قیدهای هندسی ریل (گیج، قوس).

دینامیک این زیرپلنت مشابه دینامیک وسایل سبک ریلی است؛ ادبیات پایش وضعیت وسایل ریلی نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی شاسی و محور به ناهمواری‌های ریل، با استفاده از مدل‌های چندجرمی و مدل تماس چرخ–ریل تحلیل می‌شود(e3s-conferences.org).

از دید کنترل، حالت‌های اصلی این زیرپلنت عبارت‌اند از:

- سرعت و شتاب طولی وسیله؛

- موقعیت طولی روی مسیر؛
- زاویه و شتاب‌های کوچک جانبی/پیچشی (برای پایداری در قوس‌ها، هرچند در این پروژه در مرتبه‌ی دوم اهمیت است).

زیرپلنت محرکه‌ی الکتریکی

این زیرپلنت شامل:

- موتور برقی احتمالاً نوع **موتور میانیMid-Drive**؛
- گیربکس/زنجیر/تسمه انتقال قدرت به محور محرک؛
- اینورتر و درایور موتور(Motor Inverter/Drive) ؛
- باتری لیتیومی و در نسخه‌ی پیشرفته، ابرخازن به‌عنوان بخشHESS

در سطح مدل‌سازی، این زیرسیستم می‌تواند با مدل‌های استاندارد موتور DC/BLDC و مبدل توان توصیف شود؛ مقالات طراحی کنترل‌کننده‌های e-bike نشان می‌دهند که کنترل جریان و گشتاور به صورت حلقه‌ی داخلی، و کنترل سرعت یا گشتاور مرجع بر اساس ورودی اپراتور و محدودیت‌های ایمنی به‌صورت حلقه‌ی بیرونی پیاده می‌شود(betronic.nl).

زیرپلنت ترمز و تماس چرخ–ریل

بر اساس مقررات ایمنی معدن و راهنماهای ترمز برای وسایل زیرزمینی، سیستم ترمز باید بتواند **وسیله را با بار معمول روی حداکثر شیب مسیر نگه دارد** و در صورت خرابی، به حالت ایمن برود(arlweb.msha.gov).

این زیرپلنت شامل:

- ترمزهای مکانیکی دیسکی (Service Brakes) روی محور محرک / هر دو محور؛
- ترمز پارک/اضطراری (Parking/Emergency Brake) که معمولاً به صورت **Spring-applied, Power-released**طراحی می‌شود؛
- گشتاور ترمز احیاگر (Regenerative Braking Torque) ایجادشده توسط موتور در حالت ژنراتوری؛
- تماس چرخ–ریل که حداکثر نیروی ترمز قابل‌اعمال را محدود می‌کند (چسبندگی).

راهنماهای فنی مانند **TRG – Braking Systems Used in Underground Transport**و بولتن ایمنی Mines Inspectorate بر اهمیت طراحی صحیح ترمز سرویس، ثانویه و پارک، و نگه‌داری

آن‌ها تأکید می‌کنند؛ هر سه این لایه‌ها باید در مدل پلنت دیده شوند، زیرا پاسخ دینامیکی سیستم به فرمان ترمز، ترکیبی از این سه است(resources.nsw.gov.au).

اکچوئیتورها :(Actuators) مبدل‌های انرژی و عملگرها

در تعریف کلاسیک، **اکچوئیتور** عنصر تبدیل‌کننده‌ی فرمان کنترلی به عمل فیزیکی (نیرو، گشتاور، حرکت، توقف، صدا، نور) است(Bol).

در این سیستم، می‌توان اکچوئیتورها را به سه گروه عمده تقسیم کرد:

۱. **اکچوئیتورهای حرکتی(Traction Actuators)**

۲. **اکچوئیتورهای ترمز و ایمنی(Braking & Safety Actuators)**

۳. **اکچوئیتورهای نمایش و هشدار(Indicative / HMI Actuators)**

اکچوئیتورهای حرکتی

- **موتور محرکه‌ی اصلی(Traction Motor)**
  - تبدیل فرمان گشتاور/سرعت از کنترلر به گشتاور مکانیکی روی محور؛
  - کار در دو حالت motoring (شتاب و حرکت) و regenerating (ترمز احیاگر)؛
  - پاسخ دینامیکی سریع متناسب با نیازهای کنترل سرعت در شیب(betronic.nl).
- **مکانیزم انتقال قدرت(Gear/Chain/Belt Drive)**
  - اگرچه ذاتاً اکچوئیتور نیست، اما در زنجیره‌ی عمل قرار می‌گیرد و خصوصیات نسبت انتقال و بازده آن روی دینامیک نیرو مؤثر است. مراجع طراحی انتقال قدرت برای e-bikeنشان می‌دهند که انتخاب نسبت دنده‌ی مناسب برای سربالایی‌ها و سرعت‌پایین اهمیت دارد(Smarty Bikes).

اکچوئیتورهای ترمز و ایمنی

- **ترمزهای دیسکی(Disc Brake Calipers)**
  - عملگر تبدیل‌کننده‌ی نیروی دست اپراتور (یا فرمان هیدرولیک/مکانیکی) به نیروی گیره روی دیسک؛
  - اجرای ترمز سرویس (کاهش سرعت و توقف در شرایط عادی).
- **ترمز پارک فنری(Spring-applied Parking Brake)**

- در بسیاری از ماشین‌آلات معدن، از ترمزهای فنری استفاده می‌شود که در حالت بدون نیرو، درگیر هستند و با اعمال فشار هیدرولیک/پنوماتیک/الکتریکی آزاد می‌شوند؛ در صورت قطع توان، ترمز به‌طور خودکار درگیر می‌شود(rshq.qld.gov.au).
- در این سیستم می‌توان از یک مکانیزم مکانیکی ساده‌ی تحت فنر استفاده کرد که با یک سلونوئید یا مکانیزم دستی آزاد می‌شود.

- **اکچوئیتور ترمز احیاگر(Regenerative Brake Torque)**

- در عمل، خود موتور محرکه نقش اکچوئیتور ترمز احیاگر را دارد؛ کنترلر موتور با اعمال جریان مناسب در فازها، گشتاور منفی تولید و انرژی را به سمت باتری/ابرخازن برمی‌گرداند(ResearchGate).

مقررات MSHA و CSA برای تجهیزات متحرک معدنی تأکید می‌کنند که **ترمز سرویس، ثانویه و پارک باید مستقل بوده و توان نگه‌داشتن وسیله بر روی حداکثر شیب عملیاتی را داشته باشند؛** بنابراین، در معماری پیشنهادی، RBSصرفاً یک لایه‌ی کمکی است و به‌عنوان اکچوئیتور اصلی ایمنی در نظر گرفته نمی‌شود(arlweb.msha.gov).

اکچوئیتورهای نمایش و هشدار

این دسته گرچه حرکت مکانیکی تولید نمی‌کنند، ولی بخشی از زنجیره‌ی «عمل» در HMI هستند:

- **نمایشگر (LCD/LED Display)** برای نمایش سرعت، سطح شارژ، حالت سیستم؛
- **LEDهای هشدار** برای خطاهای بحرانی (ترمز پارک درگیر، خطای سیستم، دمای باتری بالا و...)؛
- **بیزر/آلرم صوتی** برای هشدارهای فوری (مثلاً فعال شدنE-stop ، خطای ترمز)

راهنماهای طراحی HMI در خودروها و سیستم‌های خودکار (استانداردهای ISO و راهنماهای اروپایی) بر اهمیت بازخورد واضح و غیرمبهم به کاربر تأکید می‌کنند تا از «ابهام در حالت سیستم» و سوءاستفاده/عدم‌استفاده جلوگیری شود(publications.tno.nl).

سنسورها :(Sensors) اندازه‌گیری وضعیت برای کنترل و ایمنی

سنسورها پل میان دنیای فیزیکی و سیستم کنترل هستند. در مرجعBolton ، سنسورها به‌عنوان بخشی از «سیستم اندازه‌گیری» تعریف می‌شوند که متغیرهای وضعیت را اندازه‌گیری و به سیگنال‌های قابل‌پردازش تبدیل می‌کنند(Google Books).

در سیستم حاضر، سنسورها را می‌توان در چند دسته‌ی عملکردی تقسیم کرد:

۱. سنسورهای حرکت و دینامیک وسیله(Vehicle Motion Sensors)

۲. سنسورهای انرژی و توان(Energy & Power Sensors)

۳. سنسورهای ورودی انسانی(Human Input Sensors)

۴. سنسورهای ایمنی و سازه‌ای(Safety & Structural Sensors)

سنسورهای حرکت و دینامیک وسیله

۱. سنسور سرعت چرخ(Wheel Speed Sensor)

- معمولاً به صورت سنسور هال یا انکودر ساده روی یکی از چرخ‌های محرک نصب می‌شود و سرعت خطی وسیله را تخمین می‌زند؛
- در کنترل موتورe-bike ها، سنسور سرعت برای محدود کردن سرعت به مقادیر مجاز و تنظیم سطح کمک بر اساس سرعت استفاده می‌شود(betronic.nl).

۲. IMU شتاب‌سنج و ژیروسکوپ

- یک IMU سه‌محوره‌ی کوچک می‌تواند شتاب طولی، شتاب عمودی و نرخ‌های زاویه‌ای را اندازه‌گیری کند؛
- در سیستم‌های پایش وسایل ریلی، شتاب‌سنج‌ها به‌صورت گسترده برای تشخیص ناهنجاری‌های دینامیکی، ضربه‌ها و وضعیت نامطلوب track استفاده شده‌اند(MDPI).
- در این پروژه، IMUعلاوه بر پایش، می‌تواند برای تخمین **شیب مسیر** (با تفکیک اجزای گرانشی) و بهینه‌سازی کنترل ترمز/کمک در سراشیبی‌ها به‌کار رود.

سنسورهای انرژی و توان

۱. سنسور جریان (Current Sensor) و ولتاژ (Voltage Sensor) برای باتری و موتور

- اندازه‌گیری جریان و ولتاژ برای تخمین توان لحظه‌ای، وضعیت شارژ (State of Charge, SOC)و محافظت از باتری ضروری است؛
- در کنترلرهایe-bike ، این داده‌ها برای محدود کردن جریان در حالت ترمز احیاگر و جلوگیری از شارژ بیش‌ازحد استفاده می‌شوند(betronic.nl).

۲. سنسور دما

- دمای سلول‌های باتری و در صورت لزوم دمای موتور، برای جلوگیری از overtemperature پایش می‌شوند؛

- در استانداردهای ایمنی سیستم‌های برقی e-bike و وسایل برقی، کنترل دما یکی از الزامات کلیدی برای جلوگیری از آتش‌سوزی و خرابی است(Smarty Bikes).

سنسورهای ورودی انسانی

در معماری e-bike ، ورودی‌های انسانی معمولاً با **سنسورها** برداشت می‌شوند، نه سوئیچ‌های ساده:

- **Pedal Assist Sensor (PAS):** تشخیص چرخش پدال؛
- **Torque Sensor:** اندازه‌گیری نیروی پدال توسط راکب؛
- **Throttle Sensor:** حسگر موقعیت دسته‌ی گاز؛
- **Brake Sensor:** قطع فرمان موتور هنگام ترمز گرفتن(ENGWE Official).

برای دوچرخه‌ی برقی ریلی، بسته به فلسفه‌ی طراحی، می‌توان از ترکیبی از این سنسورها استفاده کرد:

- در حالت **Pedal-Assist**، یک PAS ساده + torque sensor می‌تواند شدت کمک موتور را متناسب با تلاش اپراتور تنظیم کند؛
- در حالت **Throttle-Controlled**، throttle به‌صورت سنسور موقعیت (مثلاً پتانسیومتری یا هال) ورودی مرجع گشتاور را تعیین می‌کند؛
- brake sensors تضمین می‌کنند که با فعال‌شدن ترمز مکانیکی، موتور فوراً از حالت محرکه خارج و در صورت مناسب بودن، به حالت ترمز احیاگر وارد شود(ENGWE Official).

این ساختار در مقالات و راهنماهای فنی سیستم‌های e-bike به‌عنوان معماری استاندارد کنترل ورودی انسانی شناخته می‌شود(betronic.nl).

سنسورهای ایمنی و سازه‌ای

برای افزایش ایمنی و نگه‌داری پیشگیرانه، استفاده از سنسورهای زیر توصیه می‌شود:

- **سنسور وضعیت کوپلر** (مثلاً سوئیچ حدی) برای تشخیص صحیح قفل شدن اتصال با واگن؛
- **سنسور نیروی کوپلر(** load cell ساده) برای محدود کردن نیروی هل‌دادن و جلوگیری از اضافه‌بار؛
- **سنسور وضعیت ترمز پارک** برای اطلاع به کنترلر و HMI از آزاد یا درگیر بودن ترمز؛
- در صورت توسعه‌ی بیشتر، حسگرهای ارتعاش/شتاب روی شاسی به‌عنوان بخشی از سیستم پایش وضعیت ریل و وسیله(condition monitoring)

مرورهای مربوط به **condition monitoring در سیستم‌های ریلی** نشان می‌دهند که نصب شتاب‌سنج‌ها و سنسورهای مختلف روی وسایل، ابزار قدرتمندی برای تشخیص زودهنگام مشکلات ریل و وسیله است(e3s-conferences.org).

بخش ارتباط با کاربر :(HMI) انسان، سیستم و کاهش خطا

HMI رابطی است که از طریق آن، اپراتور وضعیت سیستم را می‌بیند، فرمان می‌دهد و بازخورد می‌گیرد. استانداردهای HMI برای وسایل نقلیه و سیستم‌های خودکار (مانند ISO 21956 ، ISO 9241 و دستورالعمل‌های اتحادیه‌ی اروپا برای HMI در خودرو) تأکید می‌کنند که(ISO):

- HMI باید **وضعیت سیستم، حالت‌های عملکرد و مسئولیت اپراتور** را شفاف منتقل کند؛
- از ابهام حالت (mode confusion) جلوگیری کند؛
- بار شناختی (cognitive load) اپراتور را در شرایط بحرانی افزایش ندهد؛
- هشدارها به‌صورت **واضح، اولویت‌بندی‌شده و قابل‌فهم** نمایش داده شوند.

در سیستم‌های e-bike ، HMI معمولاً شامل یک نمایشگر کوچک(LCD/LED) ، کلیدهای انتخاب mode و سطح کمک، و نمایش وضعیت باتری و سرعت است(Hyena E-Bike Systems).

ورودی‌های HMI

- **فرمان حرکت(Throttle / Assist Level)**
  - انتخاب سطح کمک برقی (مثلاً ۰ تا ۳)؛
  - یا استفاده از throttle برای کنترل مستقیم گشتاور موتور، مطابق با توصیه‌های طراحی سیستم‌های e-bike.(MIHOGO eBIKES)
- **فرمان ترمز**
  - دو دسته‌ی ترمز برای ترمز مکانیکی؛
  - سنسورهای ترمز برای ارسال سیگنال قطع به کنترلر موتور(ENGWE Official).
- **انتخاب mode عملیاتی**
  - حالت‌های پیشنهادی:
    - فقط انسان‌محور (برق خاموش)

- کمک برقی(pedal-assist)
- فقط برقی با سرعت محدود (برای شرایط خاص)

- این ساختار با توصیه‌های HMI برای جلوگیری از گیجی در حالت سیستم همسو است؛ اپراتور باید بداند در هر لحظه، کدام منبع انرژی فعال است(publications.tno.nl).

- **دکمه‌ی توقف اضطراری(Emergency Stop)**

- یک دکمه‌ی قرمز بزرگ در دسترس، که بلافاصله فرمان موتور را قطع کرده و ترمزها را در حالت ایمن فعال می‌کند؛
- راهنماهای ایمنی ماشین‌آلات و تجهیزات متحرک معدن، وجود چنین E-stop فیزیکی را توصیه می‌کنند(rshq.qld.gov.au).

خروجی‌های HMI (نمایش و هشدار)

- **نمایشگر اصلی**

- سرعت لحظه‌ای؛
- سطح شارژ باتری (نمایش گرافیکی + درصد، در حد نیاز)؛
- حالت سیستم Regen / Fault / Electric / Assist / (Human-only Active).(Hyena E-Bike Systems)

- **هشدارهای نوری**

- چراغ هشدار برای:
  - فعال بودن ترمز پارک،
  - خطای سیستم ترمز،
  - دمای بالای باتری/موتور،
  - خطای سنسورهای بحرانی.

- **هشدارهای صوتی**

- بیزر برای حالت‌هایی که نیازمند واکنش فوری اپراتور هستند مانند فعال شدنE-stop ، حرکت ناخواسته، یا خطای جدی.

مطالعات HMI در سیستم‌های رانندگی خودکار نشان می‌دهند که HMI نقش مهمی در جلوگیری از سوءاستفاده، عدم‌استفاده یا استفاده‌ی نادرست از سیستم دارد؛ در سیستم حاضر نیز، HMIباید به‌گونه‌ای طراحی شود که اپراتور درکی واضح از **این‌که چه کسی «فرمان» را در دست دارد (انسان یا سیستم)** و **سیستم در چه وضعیتی است** داشته باشد(publications.tno.nl).

نقش متقابل بخش‌ها و زنجیره‌ی اطلاعات

با توجه به تعاریف بالا، می‌توان **زنجیره‌ی اطلاعات و انرژی** در سیستم را به صورت خلاصه چنین توصیف کرد:

۱. **پروسس** مشخص می‌کند چه کاری باید انجام شود (جابجایی نفر + واگن در شیب با ایمنی) و چه قیودی بر سیستم حاکم است (حداکثر شیب، سرعت، شرایط معدن).

۲. **پلنت** (وسیله‌ی ریلی + موتور + ترمز + ریل + واگن) رفتار فیزیکی را تعیین می‌کند و تابع فرمان اکچوئیتورها و آشفتگی‌هاست.

۳. **اکچوئیتورها** (موتور، ترمز مکانیکی، ترمز پارک، RBS، نمایشگر و آلارم) خروجی‌های کنترلی را به حرکت، توقف یا هشدار تبدیل می‌کنند.

۴. **سنسورها** وضعیت پلنت را (سرعت، شتاب، انرژی، وضعیت کوپلر، ورودی انسان) اندازه‌گیری کرده و به کنترلر و HMI می‌فرستند.

۵. **HMI**همزمان:

- ورودی‌های انسانی (فرمان، ترمز، انتخابmode ، E-stop)را دریافت و به کنترلر منتقل می‌کند؛
- و خروجی‌های سیستم (حالت، خطا، هشدار) را به اپراتور نشان می‌دهد.

این ساختار کاملاً مطابق چارچوب‌های مرجع برای طراحی سیستم‌های مکاترونیکی است که در متون Bolton، Bishopو سایر مراجع طراحی سیستم‌های مکاترونیکی ارائه شده‌اند، و بستر لازم را برای فاز بعدی پروژه (مدل‌سازی ریاضی و طراحی کنترل) فراهم می‌کند(Google Books).

طراحی بلوک‌دیاگرام و روند دیتا در سیستم

نقش بلوک‌دیاگرام در طراحی سیستم مکاترونیکی

در مراجع استاندارد مکاترونیک(Bolton، Bishopو دیگران) تأکید می‌شود که اولین گام در طراحی یک سیستم مکاترونیکی، **سا د ه سازی سیستم در قالب بلوک‌دیاگرام‌های تابع–سیگنال** است: ورودی‌ها، خروجی‌ها، اکچوئیتورها، سنسورها و فرآیندهای کنترلی به‌صورت بلوک‌های متصل به هم نمایش داده می‌شوند(Taylor & Francis).

در ادبیات کنترل کلاسیک نیز، ساختار عمومی یک سیستم حلقه‌بسته به فرم زیر معرفی می‌شود: ورودی مطلوب → کنترلر → اکچوئیتور → پروسس/پلنت → سنسور → فیدبک به کنترلر(Studeersnel).

در پروژه‌ی حاضر، بلوک‌دیاگرام باید همزمان:

- ساختار **کنترل حرکت طولی روی ریل** را نشان دهد (مشابه کنترل طولی قطارها و خودروها)،(ResearchGate)
- معماری **کنترل محرکه و ترمز + ترمز احیاگر** را لحاظ کند (مشابه EV / e-bike با RBS)،(MDPI)

- و ساختار **سیستم کمکی دوچرخه‌ی برقی (torque / assist management)** را در سطح سیگنال‌ها در نظر بگیرد(MDPI).

در ادامه، ابتدا نمای کلان (سطح صفر) و سپس سطوح جزئی‌تر معرفی می‌شوند.

سطح صفر: بلوک‌دیاگرام کلان سیستم

در سطح صفر، می‌توان کل سیستم را طبق الگوی کنترل حلقه‌بسته این‌گونه ترسیم و توصیف کرد:

اپراتور + محیط ← سیستم کنترل (کنترل حرکت، ترمز، انرژی) ← پلنت (دوچرخه‌ی برقی ریلی + واگن + ریل) ← خروجی (سرعت، موقعیت، وضعیت انرژی)

بلوک‌های اصلی:

۱. **بلوک اپراتور / انسان(Human Operator)**

- ورودی: هدف مأموریت رسیدن به نقطه‌ی A یا هل‌دادن یک واگن تا نقطه‌یB ، تجربه و قضاوت انسانی.
- خروجی: سیگنال‌های کنترلی سطح بالا از طریقHMI
  - فرمان گشتاور/سرعت throttle یا سطح کمک،
  - فرمان ترمز،
  - انتخابmode ،
  - فعال‌سازیE-stop

۲. **بلوک کنترلر سطح بالا(Supervisory / High-level Controller)**

- ورودی:
  - دستورات اپراتور،
  - اطلاعات محیطی (شیب، محدودیت سرعت بخش‌های معدن)،
  - محدودیت‌های ایمنی و انرژی SOCباتری، دما.
- خروجی:
  - مراجع سرعت / گشتاور برای کنترلر محرکه،

- مراجع گشتاور ترمز و ترمز احیاگر،
- حالت‌های کاری (mode) زیرسامانه‌های کنترل.

این ساختار مطابق معماری‌های **کنترل طولی سلسله‌مراتبی** در خودروها و قطارهای هوشمند است که در آن، کنترل‌کننده‌ی بالا سرعت و شتاب مطلوب را تعیین و کنترل‌کننده‌ی پایین، throttle و ترمز را تنظیم می‌کند(MDPI).

۳. **بلوک کنترلر سطح پایین(محرکه و ترمز Low-level Traction & Braking) Controllers)**

- کنترلر موتور(current/torque/speed control) ،
- کنترلر ترمز احیاگر و توزیع گشتاور بین ترمز برقی و مکانیکی(brake blending) ،
- منطق فعال‌سازی ترمز پارک / اضطراری(MDPI).

۴. **پلنت(Plant)**

- دوچرخه‌ی برقی ریلی + اپراتور + واگن + تماس چرخ–ریل + شیب + مقاومت‌ها، همان‌طور که در بخش ۴ تشریح شد(ResearchGate).

۵. **بلوک حسگرها و تخمین(Sensors & Estimator)**

- سنسور سرعت چرخ، IMU، جریان و ولتاژ، دما، وضعیت کوپلر و ترمز، سنسورهای ورودی انسانیthrottle ، PAS، ترمز.
- در صورت نیاز، یک لایه‌ی تخمین (مثلاً فیلتر کالمن ساده برای تخمین شیب و سرعت هموارتر)(MDPI).

خروجی کل سیستم در سطح صفر، سرعت و موقعیت وسیله روی ریل، وضعیت انرژی (SOC) و وضعیت ایمنی (ترمز فعال/غیرفعال، خطاها) است که هم برای HMI نمایش داده می‌شوند و هم برای حلقه‌های کنترلی داخلی استفاده می‌شوند.

سطح یک: معماری کنترلی سلسله‌مراتبی

مطابق با معماری‌های کنترلی پیشنهادی در **کنترل طولی قطارها و خودروهای هوشمند**، معمولاً یک ساختار **دو یا سه‌لایه** استفاده می‌شود: لایه‌ی برنامه‌ریزی و تصمیم، لایه‌ی کنترل حرکت (سرعت/شتاب) و لایه‌ی کنترل اکچوئیتور (گشتاور/فشار ترمز)(MDPI).

برای سیستم حاضر، می‌توان سه لایه‌ی زیر را تعریف کرد:

لایهی ۱: مدیریت مأموریت و ایمنی(Mission & Safety Supervisor)

- ورودی‌ها:
  - مقصد، جهت حرکت، وجود یا عدم وجود واگن،
  - اطلاعات مسیر (حداکثر شیب مجاز، سرعت‌های مجاز) که می‌تواند به‌صورت پارامتر ثابت یا جدول ساده در کنترلر ذخیره شود،
  - وضعیت عمومی سیستم SOC باتری، خطاها.
- وظایف:
  - محدود کردن سرعت مرجع بر اساس بخش‌های مختلف مسیر (مثلاً بخش‌های با شیب زیاد یا نزدیکی به انتهای تونل)،
  - تعیین این‌که آیا حرکت با واگن مجاز است یا خیر (بر اساس حد مجاز جرم/نیروی کوپلر)،
  - اعمال سیاست‌های ایمنی سطح بالا (اجازه ندادن به حرکت در صورت خطای بحرانی، باتری بیش از حد تخلیه‌شده یا دمای غیرمجاز)(digibuo.uniovi.es).

خروجی این لایه، **مراجع سرعت و محدودیت‌های ایمنی** برای لایه‌ی بعدی است.

لایه‌ی ۲: کنترل حرکت طولی(Longitudinal Motion Control)

این لایه مشابه لایه‌ی میانی در معماری کنترل طولی قطار/خودرو عمل می‌کند(MDPI):

- ورودی‌ها:
  - سرعت مرجع (v_{ref}) از لایه‌ی بالاتر + فرمان اپراتور،
  - سرعت واقعی(v) ، شیب تخمینی(θ) ،
  - محدودیت‌های گشتاور/ترمز ناشی از وضعیت انرژی و چسبندگی.
- وظایف:
  - محاسبه‌ی **گشتاور طولی مرجع** ($T_{long,ref}$)برای رسیدن به سرعت/شتاب مطلوب؛
  - تعیین این‌که گشتاور مورد نیاز، مثبت (حرکت) است یا منفی (ترمز)،
  - در حالت ترمز، محاسبه‌ی سهم ترمز احیاگر و مکانیکی(MDPI).(blending)

خروجی این لایه، **گشتاور مرجع موتور** و **گشتاور مرجع ترمز مکانیکی** است.

لایه‌ی ۳: کنترل اکچوئیتورها(Actuator Control)

در این لایه، سیگنال‌های مرجع گشتاور به دستورات پایین‌سطحی برای موتور، مبدل توان و سیستم ترمز تبدیل می‌شوند:

- **کنترل موتور**
  - کنترل جریان/گشتاور موتور BLDC یاPMSM ؛
  - ساختار این بلوک در رفرنس‌های صنعتی e-bike و مدارهای مرجعMicrochip) ، (TI به‌صورت حلقه‌ی جریان داخلی و حلقه‌ی سرعت/گشتاور بیرونی نشان داده شده است(Microchip).
- **کنترل ترمز مکانیکی**
  - تبدیل گشتاور ترمز مرجع به فشار/نیروی اعمالی بر کالیپر یا مکانیزم مکانیکی؛
  - در سطح مفهومی، می‌تواند به‌صورت یک بلوک با بهره‌ی متناسب + اشباع (برای حداکثر نیروی ترمز) مدل شود(fenix.tecnico.ulisboa.pt).
- **کنترل ترمز احیاگر(RBS Controller)**
  - بر اساس گشتاور ترمز مرجع منفی، محدودیت‌های باتریSOC ، ولتاژ، دما و محدودیت جریان مبدل، **گشتاور مجاز احیاگر** را تعیین می‌کند؛
  - الگوریتم‌های مختلفی برای توزیع گشتاور ترمز بین مکانیکی و الکتریکی (Hybrid Braking)درEV ها پیشنهاد شده‌اند که از نظر ساختار، از بلوک‌های logic / decision برای توزیع نیرو استفاده می‌کنند(MDPI).

خروجی این لایه‌ها، سیگنال‌های PWM و فرمان به مبدل موتور و عملگرهای ترمز مکانیکی هستند.

سطح دو: بلوک‌دیاگرام داخلی زیرسامانه‌ها

در این سطح، برای هر زیرسامانه، ساختار سیگنال‌ها مطابق با ادبیات تخصصی آن حوزه تشریح می‌شود.

بلوک‌دیاگرام زیرسامانه‌ی محرکه‌ی برقی

مطابق با مدارهای مرجع e-bike و گزارش‌های طراحی کنترلرهای BLDC برای دوچرخه‌ی برقی، بلوک‌دیاگرام داخلی کنترل محرکه معمولاً به شکل زیر است(Microchip):

- ورودی‌ها:

- گشتاور مرجع از لایه‌ی کنترل حرکت، (T_{ref}):
- سرعت (v) یا سرعت زاویه‌ای موتور (ω) ،
- وضعیت باتری (ولتاژ (V_b) ، جریان.(I_b))

- بلوک‌ها:

۱. **مبدل گشتاور–جریان(Torque-to-Current Mapping)**

- تبدیل گشتاور مرجع به جریان محور d/q یا فاز موتور، با درنظر گرفتن مدل الکترومغناطیسی موتور؛

۲. **کنترلر جریان(Current Controller)**

- معمولاً یک حلقه‌ی PI در هر محورd/q ؛

۳. **تولید PWM و درایو گیت‌ها** برای اینورتر سه‌فاز؛

۴. **بلوک موتور الکتریکی** مدل الکتریکی–مکانیکی.

- خروجی: گشتاور واقعی (T_{act}) روی محور محرک و سرعت واقعی (ω_m) که فیدبک به کنترلر سرعت/گشتاور می‌شود.

ساختار مشابهی در مقالات **تحلیل و مدل‌سازی سیستم‌های e-bike با کمک سنسور گشتاور** نیز ارائه شده است؛ در آن مقالات، بلوک PAS/torque sensor به‌عنوان ورودی به بلوک «مدیریت گشتاور» قرار دارد(MDPI).

بلوک‌دیاگرام زیرسامانه‌ی مدیریت گشتاور کمکی(Assist / Torque Management)

مطابق مقاله‌ی Ho و همکاران در(2023) Sensors ، بلوک‌دیاگرام مدیریّت گشتاور در e-bike شامل(MDPI):

- ورودی‌ها:
  - گشتاور پدال(T_{rider}) ،
  - کَدِنس (سرعت رکاب‌زدن)،
  - سرعت دوچرخه،
  - سطح کمک انتخاب‌شده توسط کاربر.
- بلوک‌ها:

- تخمین بار خارجی (شیب، مقاومت هوا، مقاومت غلتشی)،
- محاسبه‌ی گشتاور مورد نیاز برای حفظ سرعت/شتاب مطلوب،
- محاسبه‌ی سهم انسانی و سهم موتور،
- محدودسازی بر اساس توان و SOC باتری.

برای سیستم حاضر، همین ساختار می‌تواند تطبیق داده شود:

- **جایگزین شدن "شیب تخمینی از "IMU به‌جای محاسبه‌ی پیچیده از نقشه‌ی مسیر،**
- لحاظ کردن **جرم واگن** در تخمین بار خارجی،
- تنظیم سیاست کمک‌کردن موتور (مثلاً نسبت ثابت یا متغیر بین نیروی انسانی و موتور).

خروجی این بلوک، گشتاور مرجع (T_{ref}) برای بخش کنترل محرکه است.

بلوک‌دیاگرام زیرسامانه‌ی ترمز وRBS

مطابق با مروری بر RBS درEV ها و مقالات طراحی استراتژی ترمز هیبریدی، ساختار بلوک‌دیاگرام RBSمعمولاً شامل مولفه‌های زیر است(MDPI):

- ورودی‌ها:
  - فرمان ترمز از اپراتور (سطح ترمز)،
  - سرعت(v) ،
  - SOCو ولتاژ باتری،
  - محدودیت‌های جریان و گشتاور موتور،
  - شرایط چسبندگی چرخ–ریل (تخمین‌زده‌شده).
- بلوک‌ها:

۱. **تبدیل فرمان ترمز به گشتاور ترمز کل مرجع** ($T_{brake,tot}$)

۲. **ماژول تصمیم‌گیری توزیع(Braking Force Distribution Logic)**

- تعیین سهم گشتاور احیاگر ($T_{brake,\mathrm{regen}}$) و سهم گشتاور مکانیکی ($T_{brake,fric}$)،
- توجه به محدودیت) SOC مثلاً جلوگیری از شارژ بیش از حد باتری(،

- توجه به محدودیت چسبندگی (عدم قفل شدن چرخ).

۳. **کنترلرRBS**

- تبدیل ($T_{brake,\text{regen}}$) به جریان ژنراتوری موتور،
- هماهنگی با کنترلر موتور در حالت ژنراتور.

۴. **کنترلر ترمز مکانیکی**

- اعمال ($T_{brake,fric}$) از طریق مکانیزم ترمز.

خروجی این زیرسامانه، گشتاور ترمز واقعی و توان بازیابی‌شده است. مرجع‌های EV و e-bike نشان می‌دهند که این ساختار، چارچوب استاندارد برای ترکیب ترمز احیاگر و مکانیکی است(MDPI).

روند جریان داده در سناریوهای عملی

برای روشن شدن روند دیتا، سه سناریوی کلیدی مرور می‌شود: حرکت عادی، حرکت با واگن در سربالایی، و ترمز در سراشیبی با RBS.

سناریو ۱: حرکت عادی بدون واگن در مسیر تقریباً افقی

۱. اپراتور سطح کمک/گاز را تنظیم می‌کند ← سیگنال ورودی به HMI و سپس کنترلر.
۲. HMI سیگنال throttle / assist را به کنترلر سطح بالا می‌فرستد(Microchip).
۳. کنترلر سطح بالا بر اساس mode و سرعت مجاز، سرعت مرجع (v_{ref}) را ایجاد می‌کند(MDPI).
۴. کنترلر حرکت طولی با استفاده از (v_{ref}) و سرعت واقعی(v) ، گشتاور مرجع (T_{ref}) را محاسبه می‌کند(MDPI).
۵. بلوک مدیریت گشتاور کمکی، با توجه به (T_{rider}) در صورت وجود (pedal-assist و شرایط باتری، بخش انسانی و برقی را تعیین می‌کند و نهایتاً (T_{ref}) موتور به کنترلر محرکه ارسال می‌شود(MDPI).
۶. کنترلر موتور جریان مورد نیاز را تنظیم و از طریق اینورتر، گشتاور واقعی را تولید می‌کند.
۷. سرعت وسیله افزایش می‌یابد؛ سنسور سرعت، مقدار جدید را اندازه گرفته و حلقه بسته می‌شود(Microchip).

در این حالت، مسیر اصلی داده :**انسان** ← **HMI** ← **کنترلر سرعت** ← **کنترلر موتور** ← **پلنت** ← **سنسور سرعت** ← **کنترلر** است.

سناریو ۲: حرکت با واگن سبک در سربالایی

۱ .اپراتور در ابتدا واگن را کوپل می‌کند؛ سنسور وضعیت کوپلر، اتصال صحیح را به کنترلر گزارش می‌دهد(digibuo.uniovi.es).
۲ .لایه‌ی مدیریت مأموریت با توجه به:

- جرم تقریبی واگن،
- شیب مسیر از IMU یا اطلاعات ثبت‌شده‌ی مسیر،
- محدودیت گشتاور موتور،

تصمیم می‌گیرد که حرکت با این بار مجاز است یا خیر؛ در صورت اضافه‌بار، HMIپیام خطا/محدودیت نشان می‌دهد(SciSpace).
۳ .برای حرکت، اپراتور throttle/assist را تنظیم می‌کند؛ کنترلر سطح بالا سرعت مرجع را (احتمالاً کمتر از حالت بدون بار) تعیین می‌کند.
۴ .کنترلر حرکت طولی، با توجه به شیبθ گشتاور مرجع بیشتری برای غلبه بر مؤلفه‌ی وزن در راستای شیب و مقاومت رولینگ تولید می‌کند(ResearchGate).
۵ .بلوک مدیریت گشتاور کمکی، با توجه به توان قابل‌ارائه توسط اپراتور و محدودیت باتری، سهم گشتاور موتور را تنظیم می‌کند(MDPI).
۶ .در صورت نزدیک شدن به حدود جریان یا دمای باتری/موتور، بلوک مدیریت انرژی (درون کنترلر) حداکثر (T_{ref}) را محدود می‌کند و از طریق HMI پیغام «محدودیت توان» به اپراتور داده می‌شود(Iris Publishers).

این سناریو نشان می‌دهد که چگونه **دیتای مربوط به محیط (شیب)، وضعیت کوپلر، وضعیت انرژی و ورودی انسان** در لایه‌های مختلف کنترل ترکیب شده و به گشتاور موتور تبدیل می‌شود.

سناریو ۳: ترمز در سراشیبی با ترمز احیاگر

این سناریو جایی است که RBS واقعاً معنا پیدا می‌کند و جریان داده کمی پیچیده‌تر می‌شود. روند به صورت زیر است:

۱ .وسیله به همراه واگن در سراشیبی در حال حرکت است .IMU شیب (θ< 0) را تشخیص می‌دهد؛ سرعت (v) از سنسور سرعت اندازه‌گیری می‌شود(Studeersnel).
۲ .اپراتور دسته‌ی ترمز را می‌کشد ← سیگنال ترمز به کنترلر ارسال می‌شود(irjmets.com).
۳ .لایه‌ی کنترل حرکت طولی، بر اساس سرعت فعلی و سرعت هدف (یا صفر در صورت توقف)، **گشتاور ترمز کل مرجع ($T_{brake,tot}$)** را محاسبه می‌کند(MDPI).
۴ .بلوک توزیع ترمز (brake blending) وارد عمل می‌شود:

- SOCو ولتاژ باتری خوانده می‌شود؛
- محدودیت جریان برگشتی به باتری و توان مجاز موتور در حالت ژنراتور، از سمت بلوک مدیریت انرژی دریافت می‌شود؛
- بر این اساس، سهم ترمز احیاگر ($T_{brake,regen}$) و سهم ترمز مکانیکی ($T_{brake,fric}$) تعیین می‌شود(MDPI).

۵ .کنترلرRBS ، ($T_{brake,regen}$)را به جریان ژنراتوری موتور تبدیل می‌کند؛ کنترلر موتور در حالت ژنراتور کار می‌کند و انرژی را به باتری (یا ابرخازن) برمی‌گرداند.

۶ .کنترلر ترمز مکانیکی، متناسب با($T_{brake,fric}$) ، نیروی ترمز را روی دیسک اعمال می‌کند.

۷ .سرعت وسیله کاهش می‌یابد؛ سنسور سرعت و IMU وضعیت جدید را گزارش می‌کنند و حلقه‌ی کنترل به‌روز می‌شود.

۸ .در صورت نزدیک شدن SOC به حد بالای مجاز یا رسیدن ولتاژ به آستانه‌ی خطر، بلوک مدیریت انرژی دستور می‌دهد که سهم RBS کم یا صفر شود و ترمز مکانیکی سهم بیشتری از کار را بر عهده بگیرد(MDPI).

این رفتار کاملاً با **بلوک‌دیاگرامهای منتشرشده برای RBS درEV ها** همخوان است که در آن‌ها، سیگنال پدال ترمز، سرعت، SOCو محدودیت‌های سیستم، در یک منطق توزیع ترکیب می‌شوند و خروجی آن گشتاورهای ترمز برای موتور و ترمز اصطکاکی است(MDPI).

جمع‌بندی ساختار بلوک‌دیاگرام و روند دیتا

با جمع‌بندی مطالب این بخش، می‌توان گفت:

- **سطح صفر**، سیستم را به صورت یک حلقه‌ی بسته‌ی بزرگ شامل اپراتور، کنترلر، پلنت، سنسورها و محیط نشان می‌دهد؛ ساختاری که در ادبیات مکاترونیک و کنترل کلاسیک استاندارد است(Studeersnel).
- **سطح یک**، معماری کنترلی سلسله‌مراتبی را روشن می‌کند:
  - لایه‌ی مدیریت مأموریت و ایمنی(Mission & Safety Supervisor) ،
  - لایه‌ی کنترل حرکت طولی(Longitudinal Motion Control) ،

- لایه‌ی کنترل اکچوئیتورها.(Traction & Braking Actuator Control) این ساختار بر اساس الگوهای پذیرفته‌شده در کنترل طولی قطارها و خودروها و نیز کنترل سیستم‌های RBS در EV ها است(MDPI).

- **سطح دو**، بلوک‌دیاگرام داخلی زیرسامانه‌ها را تشریح می‌کند:
  - کنترل محرکه‌ی برقی (مطابق با بلوک‌دیاگرامهای کنترل BLDC در e-bike)،(Microchip)
  - مدیریت گشتاور کمکی (هم‌راستا با مدل‌های torque management در e-bike)،(MDPI)
  - و زیرسامانه‌ی ترمز و RBS همخوان با ساختارهای ترمز هیبریدی در EV.(MDPI)
- بررسی سه سناریوی عملی نشان داد که **روند جریان داده** چگونه از اپراتور و سنسورها به کنترلر می‌رسد، چگونه تصمیمات در لایه‌های مختلف گرفته می‌شود، و چگونه در نهایت به گشتاور محرکه، گشتاور ترمز و رفتار ایمن سیستم تبدیل می‌شود.

تعریف کلی نوع سیستم مکاترونیکی و درجات آزادی

با تکیه بر طبقه‌بندی سیستم‌های مکاترونیکی در مراجعBolton ، BishopوShetty ، این سیستم در رده‌ی زیر قرار می‌گیرد(Google Books):

- **نوع سیستم مکاترونیکی:**
  - *سیستم حمل‌ونقل ریلی سبک برقی انسان‌بر*
  - از دید رباتیک: یک **ربات متحرک constrained روی ریل** (Rail-guided mobile robot)با یک درجه آزادی اصلی (حرکت طولی).
- **درجات آزادی اصلی مورد نظر در طراحی کنترل:**

۱. یک درجه آزادی انتقالی در راستای طولی ریل (s(t)) متغیر اصلی کنترل سرعت و موقعیت.

۲. درجات آزادی چرخش چرخ‌ها (rotation of wheelsets) که به‌طور ضمنی در مدل انتقال قدرت لحاظ می‌شوند.

۳. نوسانات عمودی/پیچشی شاسی نسبت به ریل (برای تحلیل ارتعاش و راحتی/ایمنی، نه برای کنترل فعال در این فاز).

در عمل، در بیشتر طراحی‌های وسایل سبک ریلی و ترالی‌های نگه‌داری، برای کنترل حرکت، **حالت را به یک درجه آزادی طولی کاهش می‌دهند** و سایر درجات آزادی را به صورت دینامیک داخلی مدل می‌کنند(Henan Perfect Handling Equipment).

سخت‌افزار زیرسیستم مکانیکی (پلنت مکانیکی)

شاسی و ساختار کلی

با توجه به طرح‌های عملی ترالی‌های برقی نگه‌داری خط و کارت‌های بازرسی (مثل MEC-4 و ترالی‌های بازرسی مبتنی بر باتری)، می‌توان ساختار زیر را برای شاسی انتخاب کرد(Don Fabs and Consillia):

- **نوع سازه:**
  - فریم جوشی فولادی (یا آلیاژ آلومینیوم تقویت‌شده) با مقاطع توخالی مستطیلی؛
  - طراحی به صورت یک «پلتفرم مستطیلی» با دو محور (چهار چرخ)؛
  - استحکام کافی برای تحمل جرم وسیله + اپراتور + واگن سبک (با ضریب اطمینان مطابق توصیه‌های طراحی تجهیزات متحرک معدن)(Glencore Nordenham).
- **درجه آزادی مکانیکی شاسی:**
  - آزاد در حرکت طولی روی ریل (قید شده در سایر جهت‌ها توسط ریل).
- **ویژگی‌های ایمنی سازه‌ای:**
  - امکان افزودن یک قوس محافظ (Roll-Over Protection Mini-Frame) بالای صندلی، بر اساس توصیه‌ی سیستم‌های ROPS در وسایل معدن(Fambition).

چرخ‌ها و تماس چرخ–ریل

با توجه به تجهیزات نگه‌داری ریلی تجاری (inspection carts) و استانداردهای خطوط سبک، انتخاب منطقی(Henan Perfect Handling Equipment):

- **تعداد چرخ :**چهار چرخ (دو محور)
- **نوع چرخ:**
  - چرخ فولادی فلنج‌دار (rail wheel) متناسب با گیج ریل معدن (مثلاً ۶۰۰ یا ۷۵۰mm)؛
  - در صورت نیاز، استفاده از چرخ‌های عایق‌شده (insulated wheels) مشابه ترالی‌های صنعتی، برای عدم ایجاد اتصال الکتریکی ناخواسته بین ریل‌ها(Henan Perfect Handling Equipment).
- **یاتاقان‌بندی:**
  - بلبرینگ‌های ردیفی استاندارد صنعتی روی هر محور؛
  - برای کاهش نگه‌داری، گریس‌کاری دوره‌ای طبق توصیه‌ی تجهیزات ریلی نگه‌داری(Encyclopedia Pub).
- **درجات آزادی مرتبط با چرخ‌ها:**
  - هر چرخ یک DOF دورانی حول محور خود دارد؛
  - محور جلو و عقب می‌توانند به صورت rigid به شاسی متصل شوند (بدون تعلیق مستقل) یا در نسخه‌ی پیشرفته، از یک تعلیق ساده برای کاهش ضربات استفاده شود.

کوپلر و اتصال به واگن

با توجه به راهنماهای حمل بار در معادن و سیستم‌هایman-riding ، کوپلینگ باید ساده و ایمن باشد(Ontario).

- **نوع کوپلر:**
  - کوپلر مکانیکی ساده از نوع pin-type یا hook-type با قفل ایمن؛
  - ارتفاع کوپلر مطابق ارتفاع استاندارد کوپلر واگن معدن.
- **درجات آزادی کوپلر:**
  - یک درجه آزادی دورانی حول محور عمودی (yaw) برای امکان عبور از قوس‌ها؛

- در صورت نیاز، آزادی محدود عمودی (pitch) برای ناهمواری‌های ریل.

- **سخت‌افزار ایمنی در کوپلر:**
  - پین قفل با مکانیزمspring-loaded ؛
  - امکان نصب میکروسوییچ برای تشخیص قفل شدن کامل اتصال (به عنوان سنسور ایمنی).

سخت‌افزار زیرسیستم محرکه و انتقال قدرت

انتخاب نوع موتور(Mid-Drive BLDC)

بر اساس مقایسه‌های به‌روز بین موتور توپی و موتور میانی درe-bike ها، برای مسیرهای شیب‌دار و کاربردهای با بار بیشتر، **موتور میانی (Mid-Drive)** به‌دلیل گشتاور بهتر و توزیع جرم مناسب، انتخاب برتر گزارش شده است(TENWAYS).

بنابراین:

- **نوع موتور:**
  - موتور الکتریکی **BLDC**یا **PMSM نوع Mid-Drive** نصب‌شده روی شاسی، نه روی چرخ؛
  - توان نامی در محدوده‌ی ۱ تا ۲ kW (با توجه به نیاز عبور از شیب و بار واگن، تخمین مفهومی در بخش ۳ انجام شد)
- **درجات آزادی مرتبط با محرکه:**
  - محور موتور: یک DOF دورانی؛
  - از دید سیستم، این DOF به DOF طولی وسیله کوپل شده است (از طریق گیربکس/زنجیر).

مراجع طراحی درایو دوچرخه‌ی برقی و پروژه‌های طراحی RBS درe-bike ها نیز معمولاً از BLDC/PMSMبه‌عنوان موتور اصلی بهره می‌برند(reepqj.com).

سیستم انتقال قدرت

برای انتقال توان از موتور به محور محرک، دو گزینه‌ی اصلی مطرح است:

- زنجیر(Chain Drive)

- تسمه‌ی دندانه‌دار(Synchronous Belt)

با توجه به تجربیات طراحی دوچرخه‌های برقی و کارت‌های ریلی سبک(reepqj.com):

- **گزینه‌ی پایه:**
  - انتقال قدرت از موتور به محور عقب با **زنجیر یک‌مرحله‌ای** (single-stage chain drive)؛
  - نسبت دنده به‌گونه‌ای که سرعت نامی در محدوده‌ی ۱۰–۱۵ km/h روی ریل، با حداکثر گشتاور کافی در شیب حاصل شود.
- **گزینه‌ی جایگزین (برای کاهش سروصدا و نگه‌داری):**
  - تسمه‌ی دندانه‌دار مقاوم، در صورت تحمل گشتاور مورد نیاز و محیط آلودگی معدن.

درجه آزادی انتقال قدرت:

- یک DOF دورانی بین شفت موتور و محور محرک؛
- در مدل ساده، می‌توان انتقال را به صورت یک گیربکس ایده‌آل با نسبت ثابت در نظر گرفت.

سیستم ذخیره‌سازی و مدیریت انرژی (باتری وHESS)

بسته‌ی باتری(Battery Pack)

بر اساس سخت‌افزار ترالی‌های برقی نگه‌داری خط (که معمولاً از باتری لیتیومی با ولتاژهای ۴۸–۷۲ V استفاده می‌کنند) و پروژه‌هایe-bike ، معماری زیر برای باتری منطقی است Henan Perfect):
Handling Equipment)

- **نوع سلول :**لیتیوم-یونی(Li-ion) ، مناسب برای شارژ/دشارژ تکراری و جریان‌های نسبتاً بالا.
- **ولتاژ نامی بسته :**در محدوده‌ی ۴۸) V یا ۵۲ V ، متداول درe-bike ها و آسان برای یافتن مبدل و درایو مناسب(cibtech.org).
- **ظرفیت انرژی :**در حد ۱–۲kWh ، بسته به طول مسیر معدن و تعداد سیکل‌های رفت و برگشت؛ این محدوده در بسیاری از دوچرخه‌ها و کارت‌های برقی سبک کاربرد دارد Don Fabs and).
Consillia)
- **سخت‌افزار جانبی باتری:**

- BMS (Battery Management System)برای پایش سلول‌ها، محدودکردن جریان، محافظت در برابر over-charge وover-discharge ؛
- فیوز اصلی و قطع‌کننده‌ی اضطراری.(manual disconnect)

سیستم ذخیره‌سازی هیبریدی – (HESS: Battery + Supercapacitor) گزینه‌ی توسعه‌ای

مطابق مقالات **Regenerative Braking in Electric Bicycles with Supercapacitors**، **Regenerative Braking Using Super Capacitor in Electric Bike**و کار Bronstein روی e-bike با اولترا-کاپاسیتور، ترکیب باتری و ابرخازن (HESS) برای مدیریت بهتر توان ترمز احیاگر و پیک‌های توان محرکه توصیه شده است(ResearchGate).

برای سیستم حاضر، می‌توان این سخت‌افزار توسعه‌ای را در نظر گرفت:

- **ماژول ابرخازن:**
  - بانک ابرخازن با ظرفیت مناسب برای جذب پیک توان ترمز در سراشیبی‌ها؛
  - ولتاژ کاری بالاتر از ولتاژ باسDC ، به‌منظور انتقال توان از ابرخازن به باتری/موتور از طریق DC-DC.(IJSDR)
- **مبدل DC-DC دوطرفه:**
  - بین بسته‌ی باتری و بانک ابرخازن قرار می‌گیرد؛
  - در حالت ترمز، انرژی را از موتور به ابرخازن منتقل می‌کند؛
  - در حالت شتاب‌گیری، توان اضافی را از ابرخازن به باس DC می‌رساند.

این ساختار در مرورهای جدید RBS برایEV ها به‌عنوان یک معماری **دو منبع انرژی (battery + supercapacitor)**استاندارد معرفی شده است(ScienceDirect).

سخت‌افزار سیستم ترمز و ایمنی

انتخاب سخت‌افزار ترمز باید مطابق راهنماهای ایمنی وسایل متحرک معدن باشد؛ راهنماهای NSW، TRG، MHSC، Ontarioو MSHA بر طراحی سه‌لایه(service، secondary ، parking/emergency)تأکید می‌کنند(NSW Resources).

ترمز سرویس(Service Brake)

- **نوع سخت‌افزار:**

- ترمز دیسکی (Disc Brake) مکانیکی یا هیدرولیکی روی محور محرک (و در صورت امکان، هر دو محور)؛
- دیسک فولادی با قطر مناسب، کالیپر با عملگر مکانیکی/هیدرولیک.

- **ویژگی‌ها:**
  - توانایی ایجاد گشتاور ترمز کافی برای توقف وسیله در شیب حداکثر با بار کامل؛
  - امکان کنترل پیوسته (modulation) توسط دسته‌ی ترمز اپراتور.

۶–۵–۲ .ترمز پارک / اضطراری(Parking / Emergency Brake)

مطابق با توصیه‌ی **spring-applied, power-released brakes**در تجهیزات زیرزمینی، سخت‌افزار پیشنهادی(NSW Resources):

- **نوع سخت‌افزار:**
  - مکانیزم ترمز دیسکی جداگانه روی حداقل یک محور (مثلاً جلو)، که توسط فنر قوی درگیر و با نیروی الکتریکی/مکانیکی آزاد می‌شود؛
  - در حالت فقدان انرژی (قطع برق، خطای شدید)، ترمز به‌طور خودکار درگیر می‌ماند (fail-safe).

- **درجه آزادی:**
  - در راستای طولی، این ترمز همان DOF حرکت را «قفل» می‌کند.

ترمز احیاگر(Regenerative Braking)

سخت‌افزار RBS در این سطح عمدتاً همان موتور و مبدل توان است، اما از نظر معماری، باید قابلیت کار چهاربعی داشته باشد(reepqj.com).

- **سخت‌افزار درگیر:**
  - موتور BLDC/PMSM با قابلیت کار در حالت ژنراتور؛
  - اینورتر سه‌فاز با امکان سوییچینگ دوطرفه توان؛
  - مسیر جریان از باس DC به باتری/ابرخازن همراه با محدودیت‌های BMS وDC-DC

- **وظیفه:**
  - تولید گشتاور منفی در DOF طولی، هم به‌منظور ترمز و هم بازیابی انرژی.

استانداردهای ایمنی تأکید دارند که سیستم ترمز احیاگر **نباید تنها سیستم ترمز ایمن باشد** و همیشه باید ترمز اصطکاکی مستقل وجود داشته باشد؛ در این طراحی، RBSصرفاً لایه‌ی کمکی است(NSW Resources).

سخت‌افزار سنسورها

انتخاب سنسورها مطابق توصیه‌های Bolton (فصل انتخاب سنسورها) و Bishop برای سیستم‌های مکاترونیکی انجام می‌شود: ابتدا کمیت‌های لازم برای کنترل و ایمنی مشخص، سپس نوع سنسور متناسب انتخاب می‌شود(Pearson).

سنسورهای کلیدی و سخت‌افزار متناظر:

سنسورهای حرکت

۱. **سنسور سرعت چرخ(Wheel Speed Sensor)**

- نوع: سنسور هال دیجیتال یا انکودر ساده‌ی مغناطیسی روی یکی از چرخ‌های محرک؛
- خروجی: سیگنال پالسی متناسب با سرعت دورانی، تبدیل‌شده به سرعت خطی وسیله؛
- مشابه سنسورهای مورد استفاده درe-bike ها و سیستم‌های(yozmasport)ABS.

۲. **واحد(IMU (Inertial Measurement Unit**

- نوع: ماژول MEMS شامل شتاب‌سنج و ژیروسکوپ سه‌محوره؛
- کاربردها:
  - تخمین شیب مسیر (تفکیک مؤلفه‌ی گرانش)،
  - ثبت شتاب‌های طولی/عمودی برای تحلیل دینامیک و پایش وضعیت ریل(Encyclopedia Pub).

سنسورهای انرژی و وضعیت الکتریکی

۱. **سنسور جریان(Current Sensor)**

- نوع: شنت مقاومتی + تقویت‌کننده یا سنسور جریان هال؛
- محل: مسیر جریان باتری و/یا فازهای موتور؛

- کاربرد:
  - تخمین توان لحظه‌ای،
  - حفاظت در برابرover-current ،
  - کنترل) RBS محدودکردن جریان برگشتی(cibtech.org).(

۲. **سنسور ولتاژ باتری(Voltage Sensing)**

- نوع: تقسیم ولتاژ ADC + در کنترلر؛
- کاربرد: تخمینSOC ، تشخیص over-charge و(cibtech.org)under-voltage.

۳. **سنسور دما(Temperature Sensors)**

- نوع NTC :یا سنسور دیجیتال روی ماژول‌های باتری و در صورت نیاز روی موتور؛
- کاربرد: حفاظت حرارتی، مطابق توصیه‌های ایمنی باتری و تجهیزات برقی(cibtech.org).

سنسورهای ورودی انسان(HMI Sensors)

مطابق معماری رایج(YouTube):e-bike

- **سنسور موقعیتthrottle**
  - نوع: پتانسیومتری یا هال(Hall-effect throttle) ؛
  - خروجی متناسب با خواسته‌ی اپراتور در گشتاور/سرعت.
- **سنسور pedal-assist (PAS) / torque sensor** در صورت استفاده از پدال
  - :PASدیسک مغناطیسی + سنسور هال برای تشخیص رکاب‌زدن؛
  - Torque sensor: strain gaugeروی محور پدال یا کرانک برای اندازه‌گیری گشتاور انسانی.
- **سنسور ترمز(Brake Cut-off Sensor)**
  - نوع: سوئیچ مغناطیسی یا میکروسوییچ روی دسته‌ی ترمز؛
  - کاربرد: سیگنال دیجیتال به کنترلر برای قطع فوری گشتاور موتور و فعال‌سازی.RBS

سنسورهای ایمنی سازه و کوپلر

در راستای توصیه‌های ایمنی معدن و سیستم‌های(Ontario)man-riding:

- **سنسور وضعیت کوپلر**
  - نوع: میکروسوییچ برای تشخیص قفل بودن پین کوپلر؛
  - خروجی: اجازه/عدم اجازه حرکت با واگن.
- **سنسور نیروی کوپلر (اختیاری)**
  - نوع Load cell :تک‌محوره در مسیر نیروی فشاری کوپلر؛
  - کاربرد: محدودکردن نیروی هل‌دادن برای جلوگیری از اضافه‌بار روی سیستم محرکه و ترمز.
- **سنسور وضعیت ترمز پارک**
  - نوع: سوییچ حدی برای تشخیص درگیر بودن ترمز فنری؛
  - کاربرد: جلوگیری از اعمال گشتاور موتور در حالی که ترمز پارک هنوز درگیر است.

سخت‌افزار سیستم کنترل و پردازش

مطابق چارچوب طراحی سیستم‌های مکاترونیکی در Bolton وBishop ، لایه‌ی کنترل و پردازش شامل واحد پردازنده، اینترفیس‌های ورودی/خروجی و مدارهای قدرت/حفاظت است(Google Books).

واحد کنترل مرکزی(Main Controller)

- **نوع سخت‌افزار:**
  - یک **کنترلر تعبیه‌شده (Embedded Controller)** با هسته‌ی ۳۲ بیتی) مثلاً مبتنی بر ARM Cortex-M)، دارای:
    - ADCهای کافی برای ولتاژ/جریان/حرارت،
    - ورودی‌های دیجیتال برای سنسورها و کلیدها،
    - رابط‌های ارتباطی (CAN / UART) برای ارتباط با درایو موتور وBMS ،
    - خروجی‌های) PWM در صورت کنترل مستقیم موتور در همین واحد.(
- **وظایف نرم‌افزاری:**

- اجرای الگوریتم‌های کنترل سرعت/گشتاور، توزیع ترمز، مدیریت انرژی و ایمنی؛
- ثبت داده (Data Logging) برای تحلیل عملکرد و نگه‌داری پیشگیرانه.

درایو موتور (Motor Drive)

اگر کنترل جریان/سرعت موتور در ماژول جداگانه انجام شود:

- **نوع سخت‌افزار:**
  - درایو BLDC/PMSM سه‌فاز با قابلیت کار در چهار ربع (motoring و regenerating)؛
  - ورودی‌های فرمان از کنترلر مرکزی) مثلاً گشتاور/سرعت مرجع روی CAN یا آنالوگ(reepqj.com).(
- **وظیفه در RBS:**
  - کنترل شکل موج جریان در حالت ژنراتور، طبق محدودیت‌های BMS و DC-DC.

سخت‌افزار HMI رابط انسان–ماشین

با توجه به معماری e-bike ها و اصول HMI در سیستم‌های حمل‌ونقل، سخت‌افزار HMI می‌تواند به صورت زیر باشد(YouTube):

- **نمایشگر (Display Unit):**
  - نمایشگر LCD/LED کوچک روی فرمان؛
  - قابلیت نمایش: سرعت، سطح شارژ، mode سیستم، هشدارهای اصلی.
- **دسته‌ی گاز / تنظیم کمک (Throttle / Assist Selector):**
  - throttle چرخشی یا اهرمی روی فرمان؛
  - دکمه‌ها یا کلید برای انتخاب سطح کمک (۰ تا ۳).
- **دسته‌های ترمز (Brake Levers):**
  - دو دسته‌ی ترمز با سنسور قطع موتور؛
  - طراحی ارگونومیک طبق استاندارد دوچرخه/موتور.

- **دکمه‌ی توقف اضطراری:(Emergency Stop Button)**
  - دکمه‌ی قرمز بزرگ (push-to-latch) در دسترس اپراتور؛
  - در صورت فعال‌شدن، فرمان قطع توان موتور و درگیر شدن ترمز پارک را صادر می‌کند(Mine Health and Safety Administration).
- **المان‌های هشدار بصری/صوتی:**
  - LEDهای هشدار برای خطاهای باتری، ترمز، کوپلر؛
  - بیزر برای هشدارهای بحرانی (مثلاً عبور از سرعت مجاز در شیب).

شبکه‌ی سیم‌کشی، تغذیه و حفاظت

هرچند در این فاز نیازی به جزئیات کابل و کانکتور نیست، از دید سخت‌افزاری باید عناصر زیر در نظر گرفته شوند:

- **باس DC اصلی:**
  - اتصال باتری، درایو موتور، DC-DCها) در صورت وجود (HESS و بارهای جانبی؛
  - فیوزها و کلیدهای قدرت نزدیک منبع (باتری)(cibtech.org).
- **شبکه‌ی تغذیه‌ی سطوح پایین:**
  - مبدل‌های DC-DC برای تغذیه‌ی ۱۲V/۵ Vمورد نیاز کنترلر، سنسورها وHMI ؛
  - حفاظت اضافه‌ولتاژ و اضافه‌جریان.
- **سیم‌کشی سیگنال:**
  - کابل‌های شیلددار برای سنسورهای حساسIMU) ، torque sensor، load cell)؛
  - کانکتورهای صنعتی مقاوم در برابر گرد و غبار و رطوبت (محیط معدن)(Fambition).

جمع‌بندی سخت‌افزار برای هر بخش

برای این‌که جمع‌بندی با درخواست صورت‌بندی اولیه هم‌خوان باشد، به صورت فهرست‌وار:

۱. **پروسس / پلنت**

- نوع سیستم: وسیله‌ی ریلی سبک برقی انسان‌بر (rail-guided mobile mechatronic system)
- DOFاصلی: ۱ درجه آزادی طولی روی ریل
- شاسی: فریم دو محوره‌ی چهارچرخ فلنج‌دار، مطابق ترالی‌های نگه‌داری برقی (Henan Perfect Handling Equipment).

۲. **سیستم انتقال قدرت و محرکه**

- موتور: BLDC/PMSM mid-drive، توان حدود ۱–۲ kW ، ولتاژ باس ~۴۸ V
- انتقال قدرت: یک مرحله زنجیر/تسمه به محور محرک
- DOF: یک DOF دورانی مؤثر، کوپل‌شده با DOF طولی وسیله (TENWAYS).

۳. **سیستم انرژی**

- باتری: بسته‌ی Li-ion با BMS ، ظرفیت ۱–۲ kWh
- گزینه‌ی توسعه‌ای HESS: شامل بانک ابرخازن DC-DC + دوطرفه برای ترمز احیاگر و پیک توان (ResearchGate).

۴. **سیستم ترمز و ایمنی**

- ترمز سرویس: دیسکی روی محور محرک (و ترجیحاً هر دو محور)
- ترمز پارک/اضطراری: دیسکی فنری (spring-applied, power-released)
- ترمز احیاگر: گشتاور منفی موتور BLDC/PMSM تحت کنترل درایو (NSW Resources).

۵. **اکچوئیتورها**

- اکچوئیتور اصلی حرکت: موتور الکتریکی + سیستم انتقال قدرت
- اکچوئیتورهای ترمز: کالیپرهای ترمز سرویس و پارک
- اکچوئیتورهای HMI: نمایشگر، LEDها، بیزر (برای بازخورد دیداری/شنیداری) (Bol).

۶. **سنسورها**

- سرعت چرخ(Hall/Encoder)
- IMUشتاب‌سنج + ژیرو
- جریان، ولتاژ، دما
- throttle / PAS / torque sensor / brake sensor
- وضعیت کوپلر، ترمز پارک، و در صورت نیاز load cell کوپلر(Pearson).

۷. **کنترل وHMI**

- کنترلر تعبیه‌شده ۳۲ بیتی، درایو موتور BLDC چهاربعی، رابط‌هایCAN/UART
- نمایشگر کوچک، دسته‌ی گاز/کمک، دسته‌ی ترمز، دکمه‌یE-stop ، LEDها و بیزر(YouTube).

به این ترتیب، در بخش ۶، برای هر بخش سیستم، نوع سخت‌افزار، درجات آزادی مؤثر، نوع انتقال قدرت و نوع سیستم مکاترونیکی مشخص شده و هم‌زمان به ادبیات معتبر در حوزه‌ی مکاترونیک، e-bike، سیستم‌های ترمز معدن و تجهیزات نگه‌داری ریلی استناد شده است. این اسکلت سخت‌افزاری، پایه‌ی ورود به فازهای بعدی (مدلسازی دقیق، انتخاب نهایی مقادیر نامی، و پیاده‌سازی) است.

خلاصه ادامه نقشه راه طراحی سیستم دوچرخه برقی ریلی

تثبیت نهایی نیازمندی‌ها

مواردی که باید عددی و روشن شوند:

- پروفایل مسیر معدن: طول، شیب‌های حدی، شعاع قوس‌ها، کیفیت ریل
- سناریوهای کار:
  - حرکت نفر تنها
  - حرکت با واگن سبک پر/خالی
  - توقف و شروع مکرر در شیب
- حدود عملکرد:
  - سرعت عملیاتی مجاز
  - حداکثر جرم مجاز (سیستم + نفر + واگن + بار)
- الزامات ایمنی:
  - توقف امن روی بدترین شیب
  - محدوده شتاب و ترمز قابل تحمل برای انسان

مدل‌سازی ریاضی سیستم

هدف: تبدیل حرف‌ها و بلوک‌دیاگرام‌ها به معادلات.

- مدل حرکت طولی روی ریل:

$$m_{total}\dot{v} = F_{tractive} - F_{resistive}$$

با جزء شیب، غلتش، اصطکاک و نیروی اضافی برای شتاب‌گیری.

- مدل محرکه الکتریکی:
  - مدل موتور *BLDC/PMSM*
  - اینرسی معادل روی چرخ
  - نسبت دنده انتقال قدرت
- مدل ترمز:
  - ترمز مکانیکی به صورت گشتاور مقاوم
  - ترمز احیاگر به صورت گشتاور ژنراتوری محدودشده با باتری */HESS*
- مدل انرژی:
  - مدل ساده باتری *(RC / Thevenin)*
  - در نسخه پیشرفته: باتری + ابرخازن *DC-DC* + دوطرفه

خروجی این فاز: مدل حالت‌فضا / بلوکی قابل پیاده‌سازی در سیمولینک یا مشابه.

طراحی کنترل و استراتژی انرژی

- **کنترل سرعت/گشتاور طولی**
  - طراحی کنترل‌کننده (مثلاً *PI* یا بهبودیافته) برای نگه داشتن سرعت در حضور شیب، بار و تغییرات.
- **مدیریت گشتاور انسان–موتور**
  - الگوریتمی که بر اساس گشتاور پدال */ throttle* ، شیب و بار، سهم موتور را تنظیم کند.
- ***استراتژی ترمز احیاگر(RBS)***
  - تعیین اینکه کِی و چقدر *RBS* فعال شود
  - تقسیم گشتاور ترمز بین احیاگر و مکانیکی *(brake blending)*
  - لحاظ محدودیت *SOC* ، جریان و ایمنی
- ***لایه نظارت ایمنی(Safety Supervisor)***

- شروط اجازه حرکت
- رفتار سیستم در خطا (قطع موتور، فعال‌سازی ترمز پارک، هشدار به اپراتور)

شبیه‌سازی چنددامنه‌ای

- پیاده‌سازی مدل‌ها + کنترل‌ها در محیط شبیه‌سازی
- سناریوهای تست:
  - حرکت بدون واگن / با واگن در سطح و شیب
  - ترمز کامل در سراشیبی با*RBS*
  - سیکل‌های رفت و برگشت برای ارزیابی مصرف و بازیابی انرژی
  - تزریق خطا (سنسور، ترمز، کوپلر) و بررسی رفتار ایمنی

نتیجه: اعتبار اولیه طراحی، تنظیم ضرایب کنترل و اندازه کلی باتری / توان موتور.

طراحی تفصیلی مکانیکی و الکتریکی

وقتی مطمئن شدیم سیستم روی کاغذ عاقلانه است:

- **مکانیکی:**
  - طراحی *CAD* شاسی، محورها، کوپلر، جایگاه اپراتور
  - تحلیل تنش و خستگی (بدترین حالت: شیب حداکثری + بار کامل + ترمز)
  - بررسی ارگونومی و دید اپراتور
- **الکتریکی/الکترونیکی:**
  - طراحی باس*DC* ، حفاظت‌ها، مسیر توان
  - طراحی مدار سنسورها و*HMI*
  - معماری نرم‌افزار کنترل (حلقه سریع، میانی، کند)

نمونه‌سازی، تست آزمایشگاهی وHIL

- ساخت نمونه اولیه*(prototype)*
- ریگ آزمایش برای محرکه و *RBS* (بدون ریل واقعی)

- تست *Hardware-in-the-loop* برای کنترلر:
  - شبیه‌سازی محیط، اجرای کنترل واقعی
  - تست شرایط بحرانی بدون خطر برای انسان/تجهیزات

تست میدانی و کالیبراسیون نهایی

- تست روی ریل معدن (یا خط آزمایشی) با سناریوهای واقعی
- اندازه‌گیری سرعت، شتاب، نیرو، جریان، ولتاژ، دما
- مقایسه داده واقعی با شبیه‌سازی
- اصلاح پارامترهای مدل و تنظیم نهایی کنترل و استراتژی*RBS*

خروجی علمی و مهندسی

در انتها:

- جمع‌بندی:
  - کارایی انرژی (سهم انرژی احیاشده، کاهش مصرف نسبت به حالت بدون*RBS*)
  - بهبود ایمنی و راحتی اپراتور نسبت به حالت‌های سنتی
- تبدیل نتایج به:
  - گزارش نهایی پروژه
  - و در صورت تمایل، مقاله علمی در حوزه‌های:
    - *e-mobility* و روی ریل*rail-guided light EV /*
    - *RBS* در سیستم‌های سبک
    - یا *condition monitoring* معدن در صورت افزودن بخش پایش ریل

این خلاصه نقشه راه، تصویر کلی از ادامه مسیر را می‌دهد: از نیازمندی و مدل، تا کنترل و انرژی، تا آهن، باتری، تست و در نهایت یک سیستم که به طور عملی قابل پیاده سازی است.