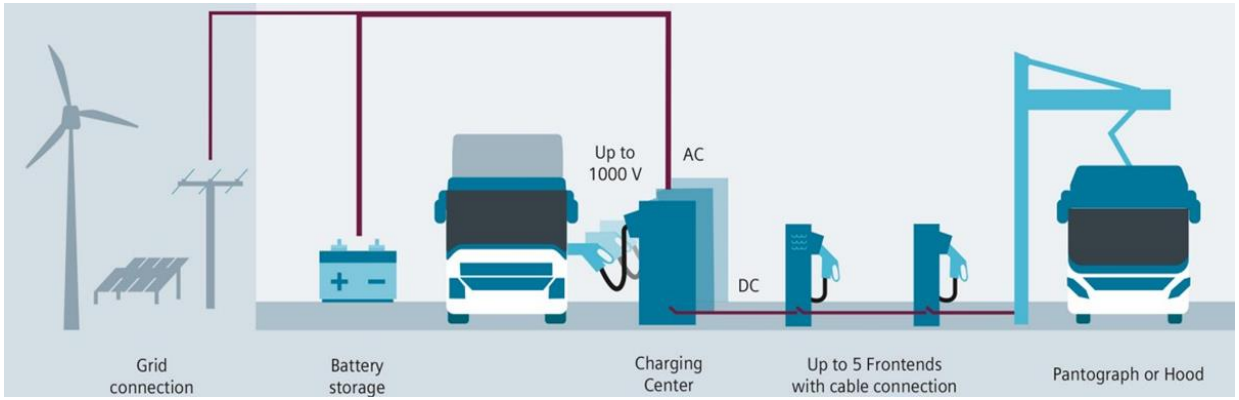
تحلیل انرژی اتوبوس برقی شهری با هدف طراحی استراتژی شارژ



دکتر وحید اصفهانیان
دکتر مسعود مسیح طهرانی مهندس حسن نهضتی مهندس ناصر سینا
مهندس سید وحید نوربخش

فهرست مطالب

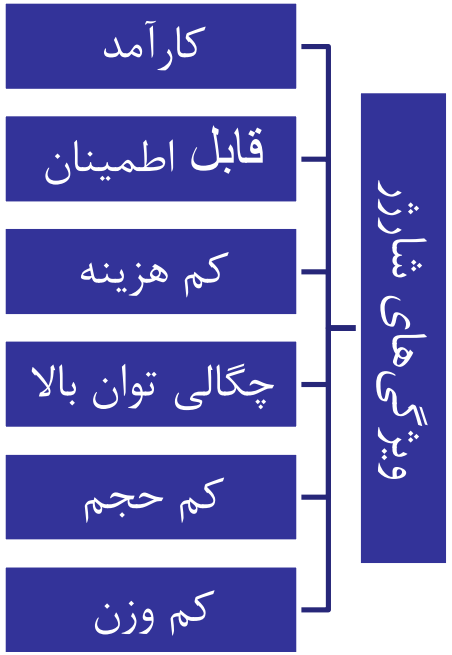
- مقدمه
- انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی
- محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی
- محاسبات و بررسی شارژ کند
- محاسبات و بررسی شارژ سریع
- برآورد اقتصادی
- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی

مقدمه

اهمیت شارژر در اتوبوس برقی

توسعه اتوبوس‌های برقی در حمل و نقل عمومی نقش مهمی در افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش آلودگی هوا دارد

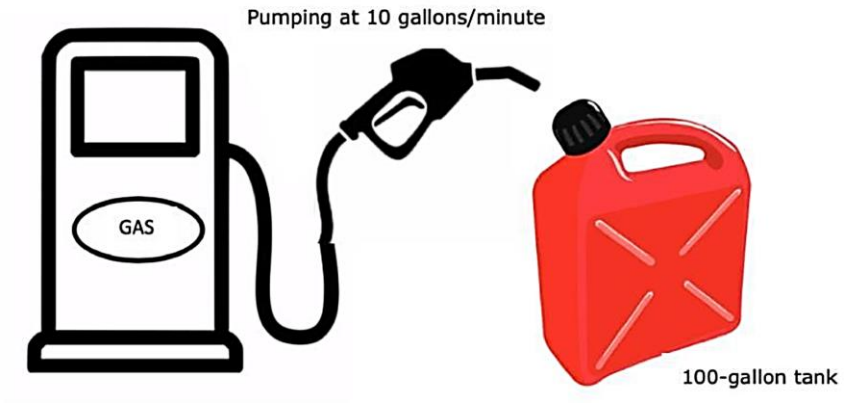
- شارژر، عنصر اساسی در توسعه اتوبوس‌های برقی است.
- نیاز اتوبوس برقی به شارژر مانند نیاز اتوبوس دیزل به گازوئیل است.

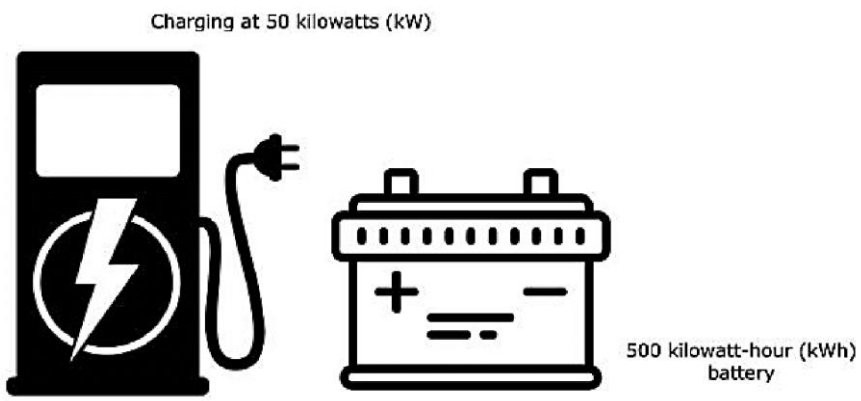


مقدمه

اهمیت شارژر در اتوبوس برقی

مقایسه شارژ وسیله نقلیه برقی با پر کردن مخزن بنزین با پمپ بنزین





زمان شارژ باتری

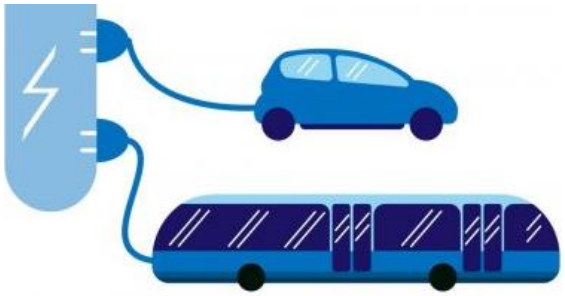
500kWh / 50kW = 10h

زمان پرشدن باک

100gal / 10gal/min = 10min

مقدمه

تفاوت شارژرها



فناوری مورد استفاده در انتقال

- اتصال با سیم
  - AC
    - حالت ۱
    - حالت۲
    - حالت۳
  - DC
    - Plug-in
    - Pantograph
- اتصال بی سیم
- تعویض باتری

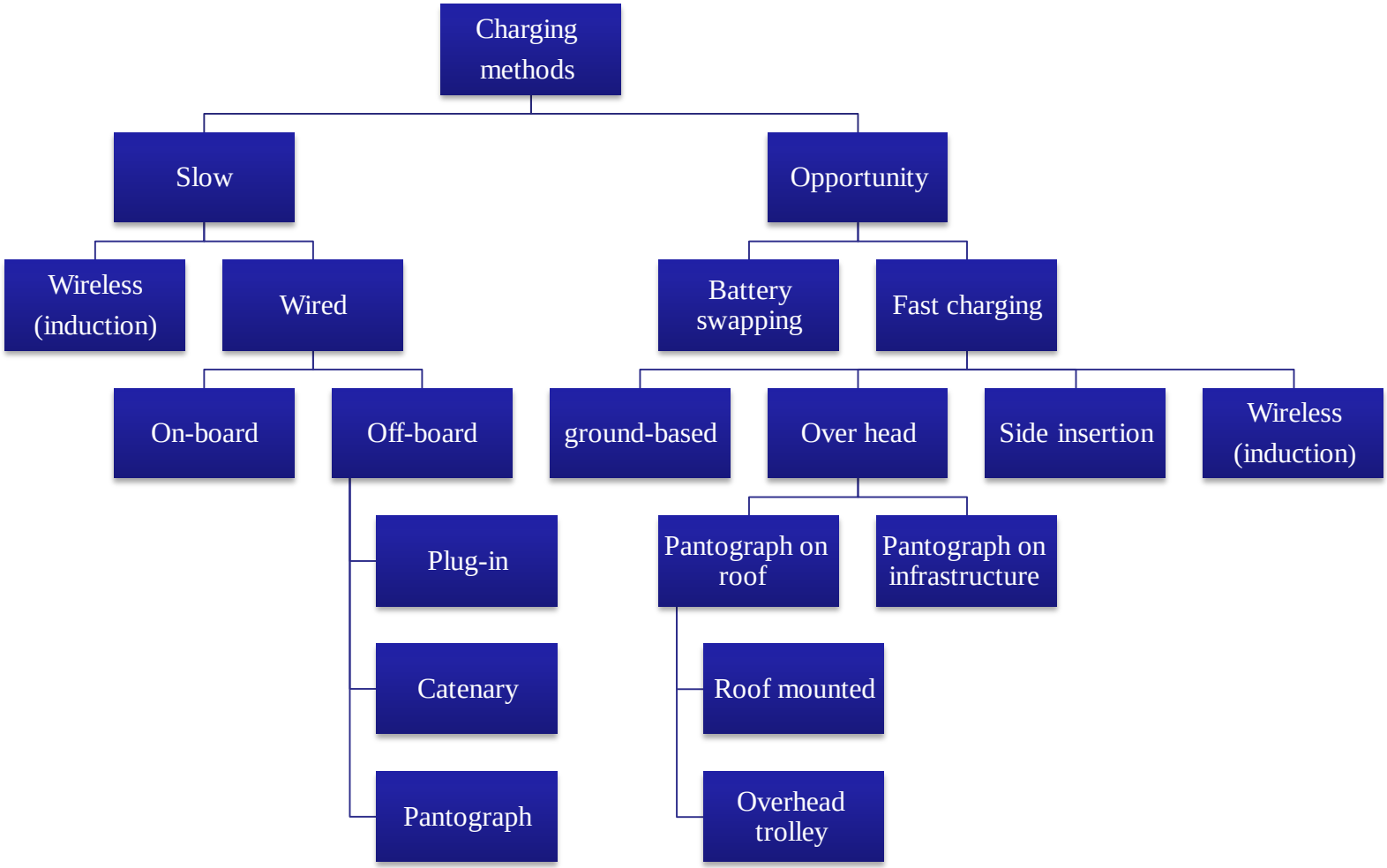
استاندارد شارژ خودرو برقی در اروپا

		ولتاژ (V)	جریان (A)	توان (kW)
مود ۱	شارژر آهسته AC خانگی	۲۵۰/۴۸۰	۱۶	۳/۷-۱۱
مود ۲	شارژ آهسته AC با اتصال نیمه فعال به وسیله نقلیه برای برقراری ارتباط در اهداف ایمنی	۲۵۰/۴۸۰	۳۲	۷/۴-۲۲
مود ۳	شارژ AC با اتصال فعال بین شارژر و وسیله نقلیه برای ایمنی و ارتباط برای شارژ هوشمند	۲۵۰/۴۸۰	۳۲	۱۴/۵-۴۳/۵
مود ۴	شارژ سریع DC ، اتصال فعال بین شارژر و وسیله نقلیه	۶۰۰	۴۰۰	۳۸-۱۷۰

تفاوت شارژر در اتوبوس و خودرو

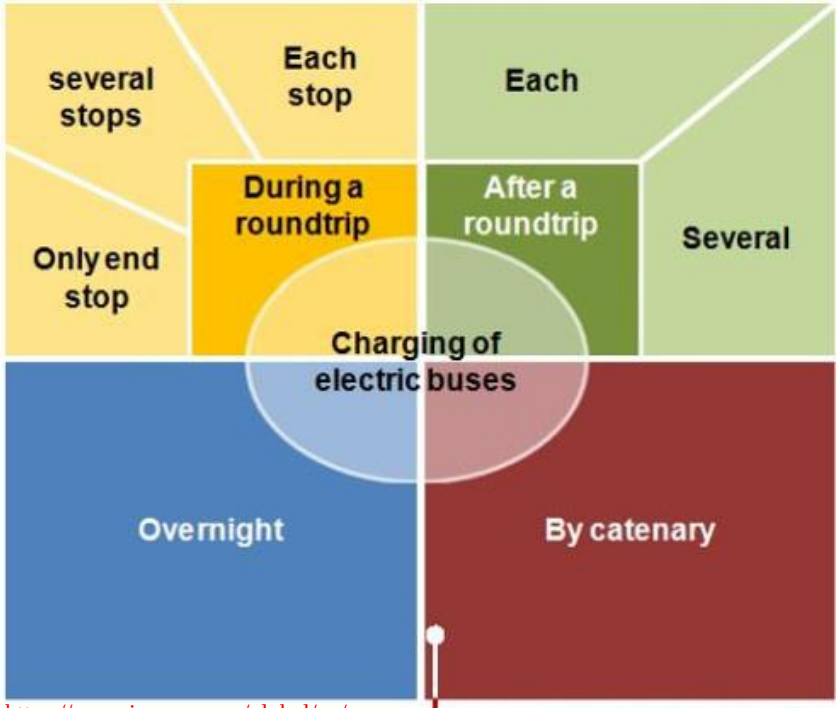
شارژ در خودرو برقی	شارژ در اتوبوس برقی
مود ۱	مود ۳
مود ۲	DC-Plug-in (مود ۴)
مود ۳	DC-Pantograph
مود ۴	

انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی



انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی

نحوه انجام شارژ در اتوبوس‌های برقی



https://new.siemens.com/global/en/markets/transportation-logistics/electromobility/ebus-charging.html

- شارژ آهسته در طول شب (Overnight)
- اتصال مستقیم به شبکه برق در طول حرکت (By catenary)
- بعد از پایان یک رفت و برگشت کامل (After a roundtrip)
- در خلال مسیر رفت و برگشت (During a roundtrip)

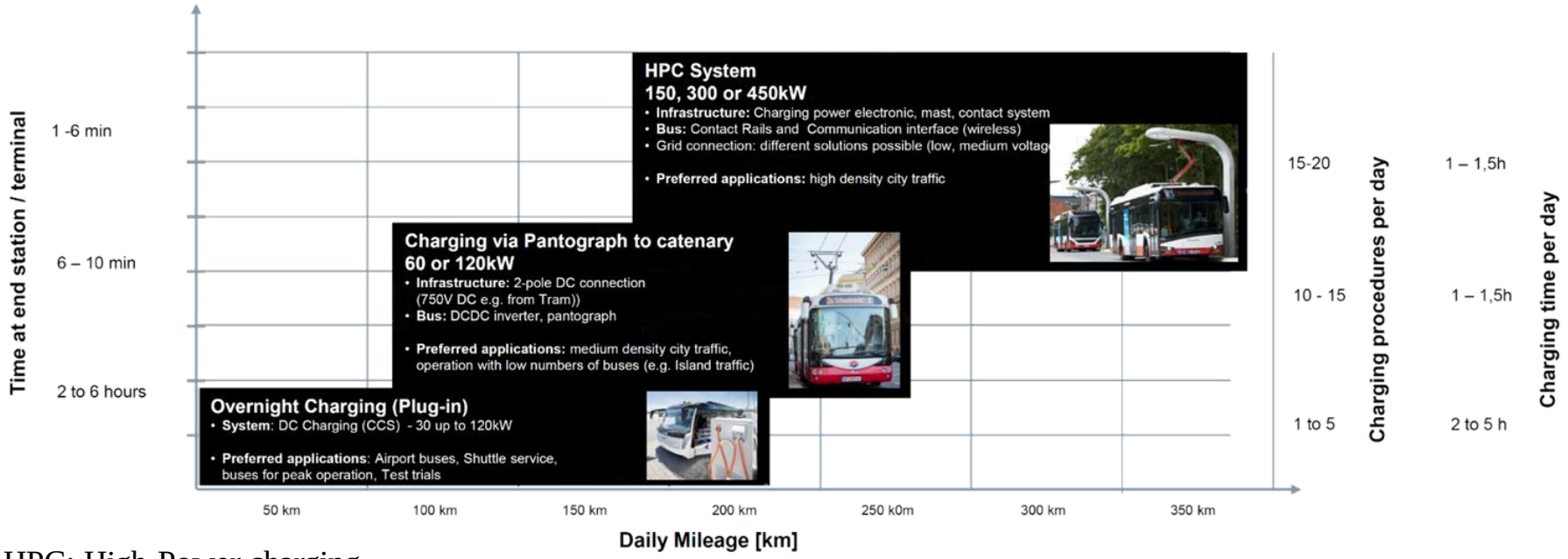
Depot charghing

Electricity supply via catenary wires

Opportunity charghing (terminal or *en-route*)

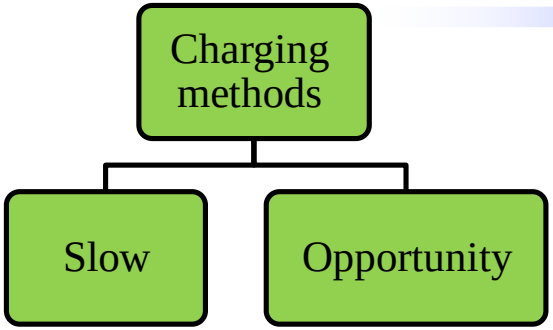
انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی

نسبت مسافت طی شده به مدت زمان شارژ (بسته به نوع شارژ)



HPC: High Power charging

مسافت پیموده شده اتوبوس مجهز به شارژ سریع نسبت به شارژ catenary و Plug-in بیشتر است



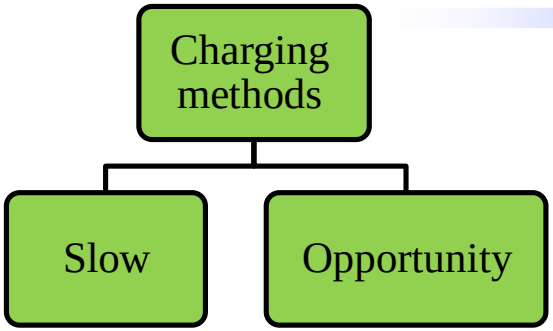
انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی

- تفاوت در شارژ آهسته و سریع
- نوع باتری
- مسافت
- زمان شارژ
- ظرفیت باتری

شارژ آهسته	شارژ سریع
مسافت کمتر	مسافت بیشتر
ظرفیت باتری بیشتر	ظرفیت باتری کمتر
زمان شارژ بیشتر	زمان شارژ کمتر

- Electric range: ≥155 miles(≥250km) per charge
- Battery Type: Lithium Iron-Phosphate battery
- Battery Capacity: 324 kWh
- Charging Power & Time-80 kW (40 kWx2, 480 V, 3c, AC) 4 h; 200 kW (100 kWx2, 480 V, 3c, AC) 2-3 h

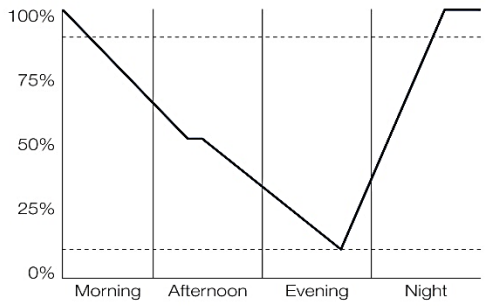
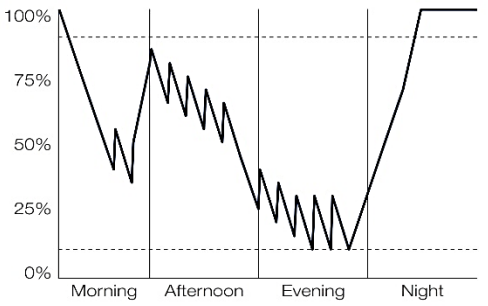
- Electric range: up to 30 - 40 miles (48-64 km) per charge
- Battery Type: Lithium Titanate (LTO) fast-charge
- Battery Capacity: 74kWh
- Charging: Overhead 500kW (0 to 95% SOC in 6 minutes)



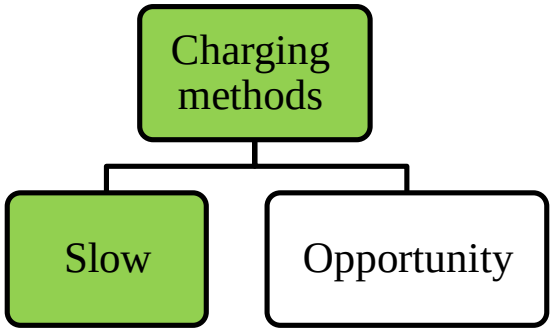
انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی

- تفاوت شارژ آهسته و سریع

Main differences between opportunity and depot charging — Source: McKinsey Energy Insights

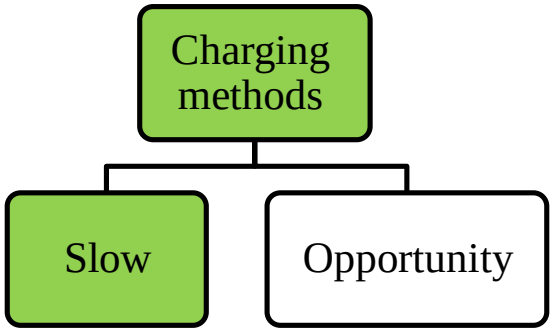
	Depot Overnight only	Opportunity Overnight and mid-day recharging
Charger type	Depot: 30 up to 150 kW (for buses with high range)	Depot: 30-50 kW Opportunity: 150/300/450/600 kW (e.g. at end-stop or terminal)
Charging technology	Mostly plug-in	Mostly pantograph Plug-in (less common) Induction (less common)
Load profile (illustrative)		
Typical range	100-250 km/day	200-500 km/day
Cost drivers	1 Higher battery cost 2 Lower charging infrastructure cost, unless an expensive depot charger of 100+ kW is required to fully recharge during night (instead of cheaper 30-50 kW)	1 Lower battery cost 2 Higher charging infrastructure cost 3 Slightly higher maintenance cost

انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی



- شارژ آهسته در طول شب (Slow)
- به صورت AC یا DC
- On-board: استفاده از برق ۳ فاز شهری و تبدیل آن به DC توسط مبدل روی اتوبوس
- Off-board: تبدیل AC به DC در ایستگاه شارژ
- Plug-in
- توان شارژ حدود ۱۰ تا ۱۵۰ کیلووات
- مدت زمان شارژ حدود ۵ تا ۸ ساعت

BYD

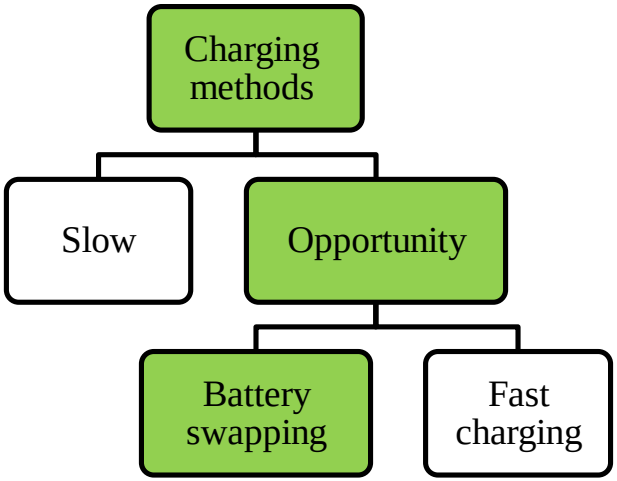


انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی

- شارژ آهسته در طول شب (Slow)
- Pantograph
- توان ۴۰ تا ۱۲۰کیلووات
- ۷۵۰ ولت DC

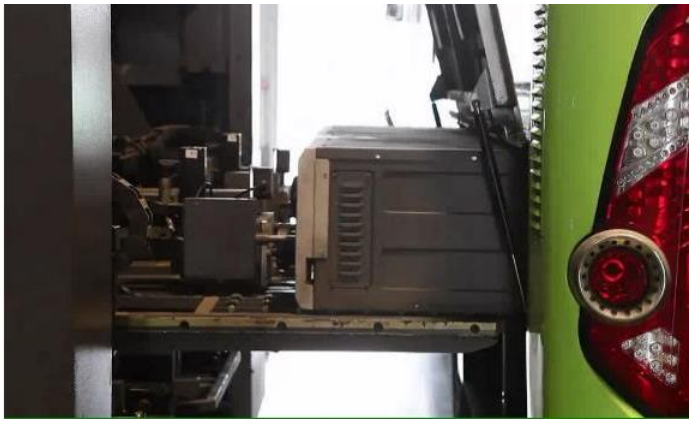
(تبدیل شده از ۴۰۰ ولت AC)

ABB charging solution

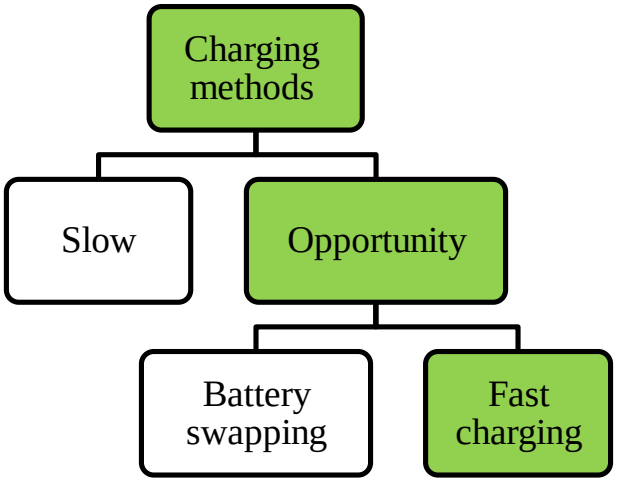


انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی

- شارژ سریع در طول مسیر (Opportunity)
- تعویض باتری: در این روش باتری‌های کاملاً شارژشده جایگزین باتری‌های خالی می‌شوند.



Qingdao battery swap station, China



انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی

- شارژ سریع در طول مسیر (Opportunity)

اتصال کف

اتصال از کنار

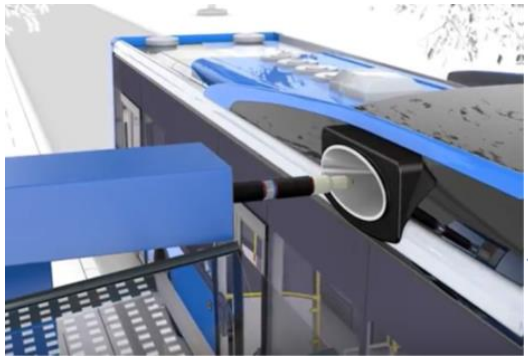
بی‌سیم

شارژ بالاسری (پانتوگراف-ترولی)

شارژ بی سیم

BYD
In Indianapolis

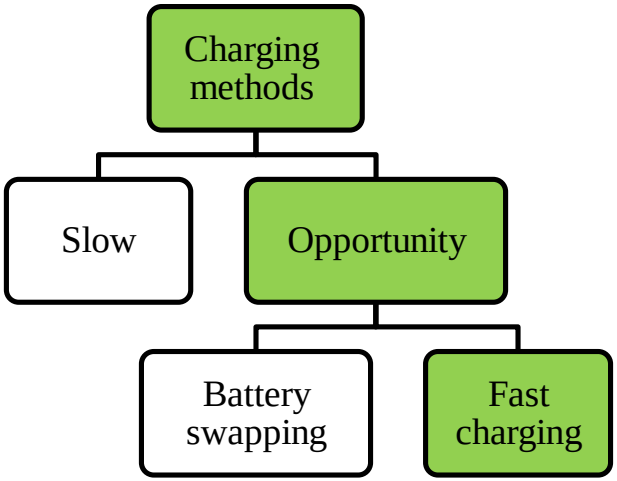
اتصال از کنار اتوبوس



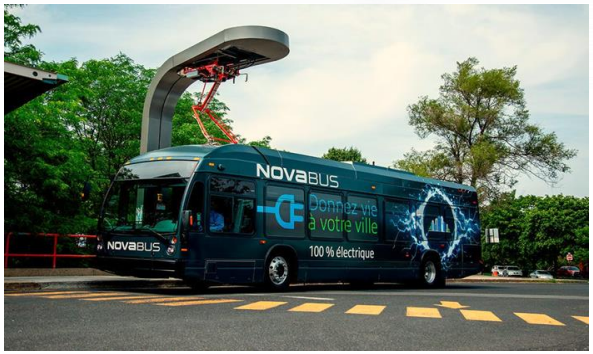
اتصال از کف اتوبوس

Alstom aptis

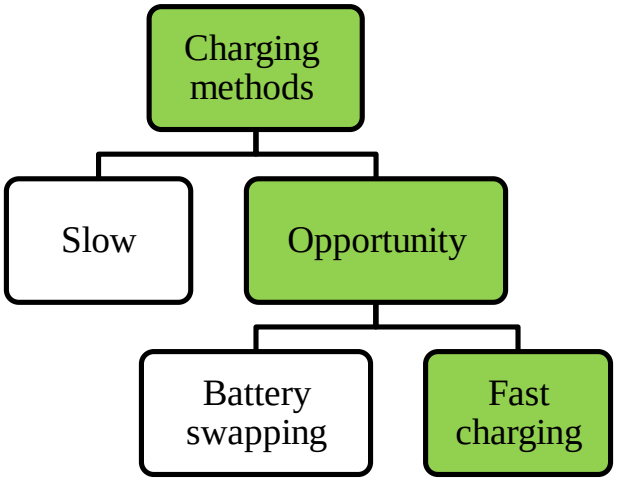
انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی



- شارژ سریع در طول مسیر (Opportunity)
  - پانتوگراف ثابت در ایستگاه
  - پانتوگراف روی سقف اتوبوس
    - زمان شارژ ۱ تا ۲۰ دقیقه
    - توان ۱۵۰ تا ۶۰۰ کیلووات
    - ولتاژ ۴۵۰ تا ۸۵۰ ولت



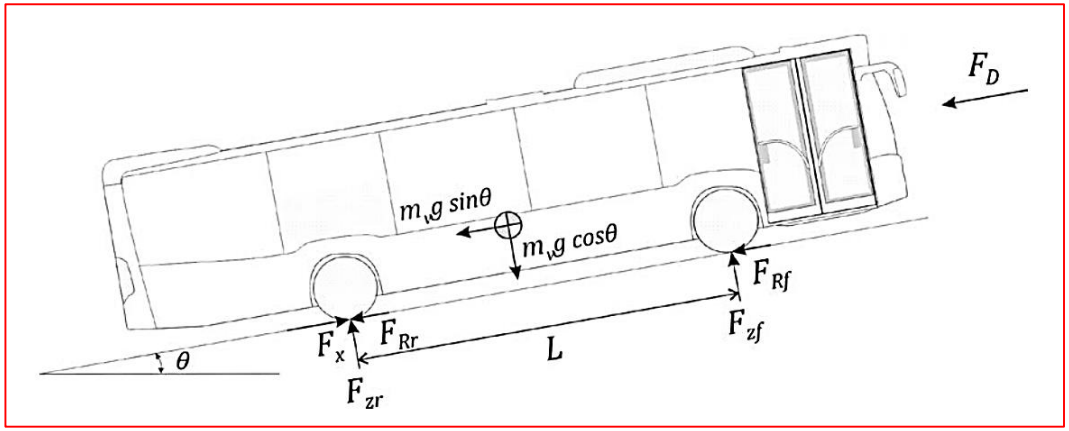
انواع روش‌های شارژ در اتوبوس برقی



- شارژ سریع در مسیر (Opportunity)
- ترولی باس

محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

دینامیک طولی خودرو



$$m_v \ddot{x} = F_x - F_D - m_v g \sin\theta - F_{Rf} - F_{Rr}$$

نیروی پسای هوا $F_D = \frac{1}{2}\rho_a c_D A_f v_x^2$

نیروی مقاومت غلتشی چرخ‌های جلو $F_{Rf} = f_R F_{zf}$

نیروی مقاومت غلتشی چرخ‌های عقب $F_{Rr} = f_R F_{zr}$

توان اینرسی $P_{in} = m_v \ddot{x} v_x$

توان شیب پیمایی $P_G = m_v g \sin\theta v_x$

توان پسای هوا $P_D = \frac{1}{2}\rho_a c_D A_f v_x^3$

توان ناشی از مقاومت غلتشی چرخ‌ها $P_R = (F_{Rf} + F_{Rr}) v_x$

توان پیشران :

$$P_{tr} = \frac{P_D + P_R + P_G + P_{in}}{\eta_{mot}\eta_{dr}\eta_{bat}}$$

انرژی مصرفی:

$$\int (P_{tr} + P_{Aux} + P_{HVAC})\, dt$$

Vehicle Powertrain Systems , Behrooz Mashadi ,David Crolla

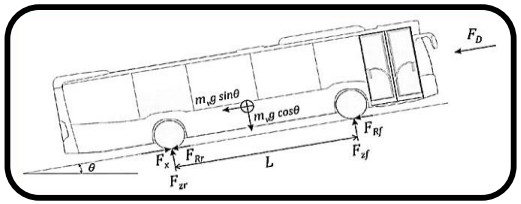
محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

پارامتر و نشانه‌ها

ردیف	پارامتر	نشانه	مقدار
۱	ضریب درگ هوا	C_D	0.7
۲	سطح هواخور	A_f	7.3 m^2
۳	شعاع دینامیکی چرخ	r_{dyn}	0.510 m
۴	ضریب مقاومت غلتشی	f_{R0}	0.0041
		f_{Ry}	2.5×10^{-5} s/m
۵	جرم خودرو	m_v	12000 ~18000
۶	وزن محور جلو	F_{zf}	2800~6500
۷	وزن محور عقب	F_{zr}	7020~11500
۸	فاصله محورها	L	6.055 m
۹	شیب مسیر	$\tan\theta$	$-4\% \leq \tan\theta \leq 4\%$
۱۰	بازده موتور کششی	η_{mot}	0.85
۱۱	بازده درایو کششی	η_{dr}	0.95
۱۲	بازده باتری	η_{Bat}	0.97
۱۳	توان سیستم تهویه مطبوع	P_{HVAC}	8-15 kW
۱۴	توان اجزای کمکی	P_{Aux}	3.5-6.6 kW

محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

شبیه سازی تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو

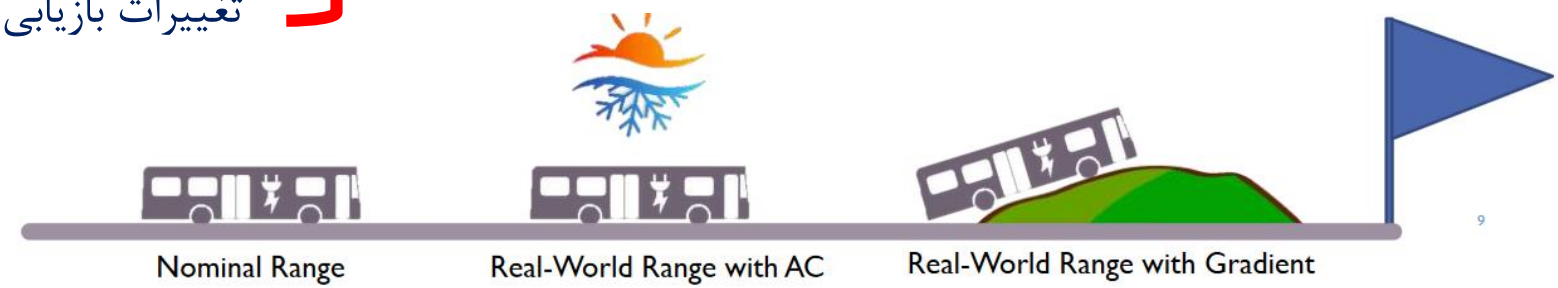


Monte carlo sensitivity analysis

سیکل کاری
تغییرات وزن
تغییرات توان مصرفی اجزای کمکی
تغییرات شیب مسیر
تغییرات بازیابی انرژی

MATLAB & SIMULINK

مصرف انرژی
(kWh/km)



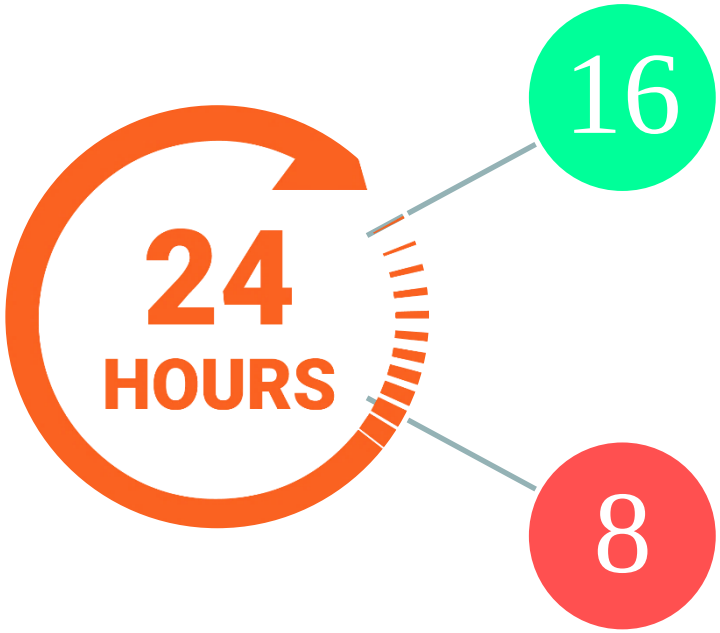
محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

فرآیند شبیه‌سازی

- محاسبه انرژی مصرفی اتوبوس با در نظر گرفتن:
  - ❖ سیکل‌های متناسب با اتوبوس به صورت رفت و برگشتی
  - ❖ تغییرات وزن
  - ❖ تغییرات توان سیستم تهویه مطبوع بر اساس ساعات مختلف روز
  - ❖ تغییرات توان اجزای کمکی
  - ❖ تغییرات شیب
  - ❖ تغییرات بازیابی انرژی
- در نظر گرفتن فرآیند شارژ به صورت جریان ثابت – ولتاژ ثابت
- عمر تخلیه باتری ۸۰٪
- محاسبه مسافت قابل پیمایش و زمان آماده به کار اتوبوس با شارژ کند
- محاسبه مدت زمان مورد نیاز اتوبوس برای پیمایش ۲۰۰ کیلومتر در روز (شارژ کند و شارژ سریع)

محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

محاسبه مسافت و زمان آماده به کار اتوبوس



- محاسبه بیشترین مسافت قابل پیمایش بر اساس مصرف انرژی
- محاسبه توان و تعداد شارژ سریع برای رسیدن به مسافت ۲۰۰ کیلومتر در روز

- بیشترین زمان آماده به کار در روز

https://services/ri.narhet.20

نظافت، سرویس و رفت و آمد بین دپو و سیکل حدود ۳ ساعت

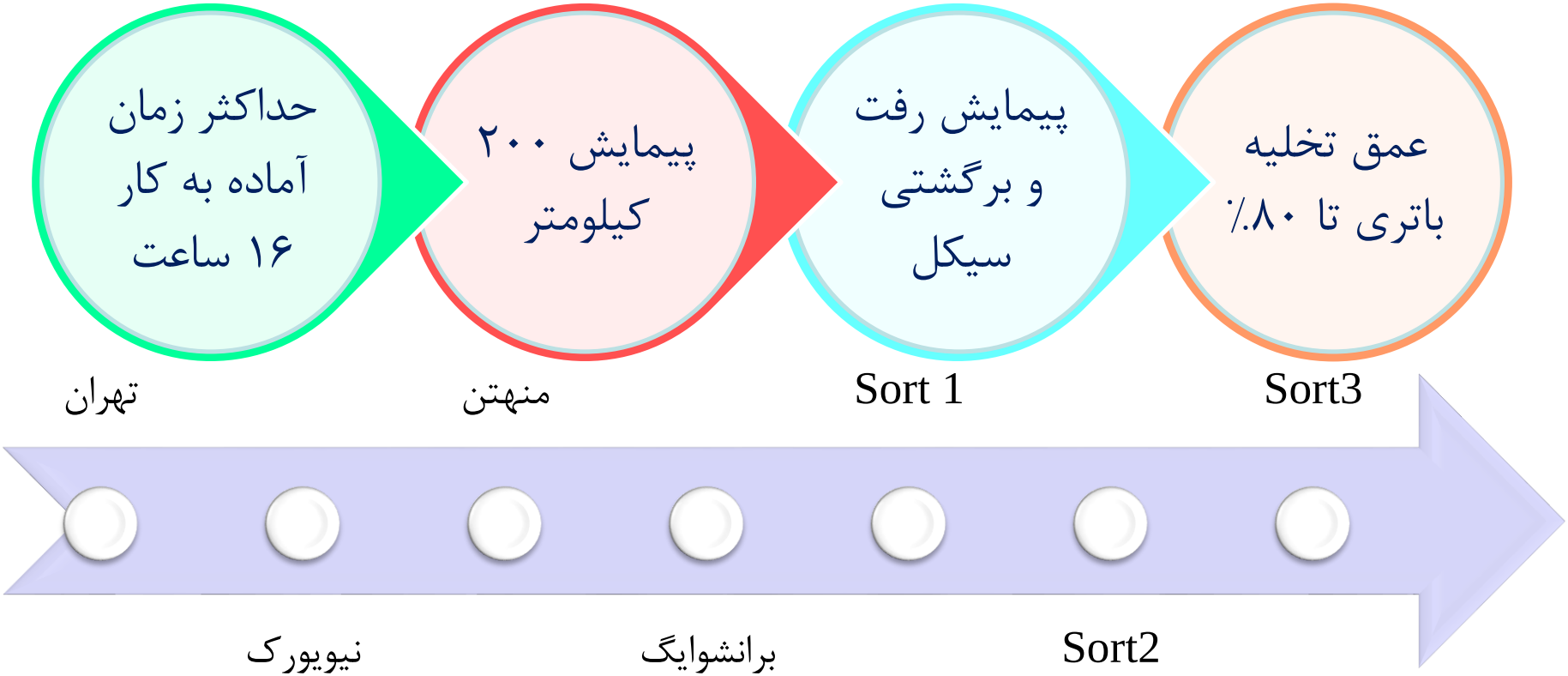
- شارژ شب
- تعمیرات
- نظافت

زمان شارژ قابل قبول کمتر از ۵ ساعت

- رفت و آمد بین سیکل و دپو

محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

فرضیات شبیه‌سازی برای شارژ کند و سریع



- زمان استفاده از اتوبوس از ۵:۳۰ صبح تا ۹:۳۰ شب (براساس زمان‌بندی اتوبوس‌های شهر تهران) https://services20.tehran.ir/

محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

شرایط شبیه‌سازی

تغییرات توان سیستم تهویه مطبوع و دیفراست

- $0 \leq P_{HVAC}\ (W) \leq 15000$

تغییرات توان مجموعه کمکی

- $3500 \leq P_{Aux}\ (W) \leq 6500$

تغییرات وزن اتوبوس از کاملاً خالی تا کاملاً پر

- $12500 \times 9.81 \leq W(N) \leq 18000 \times 9.81$

تغییرات شیب بر اساس تغییرات شیب تهران

- $-0.06 \leq slope \leq 0.06$

ضریب تغییرات توان بازیابی انرژی

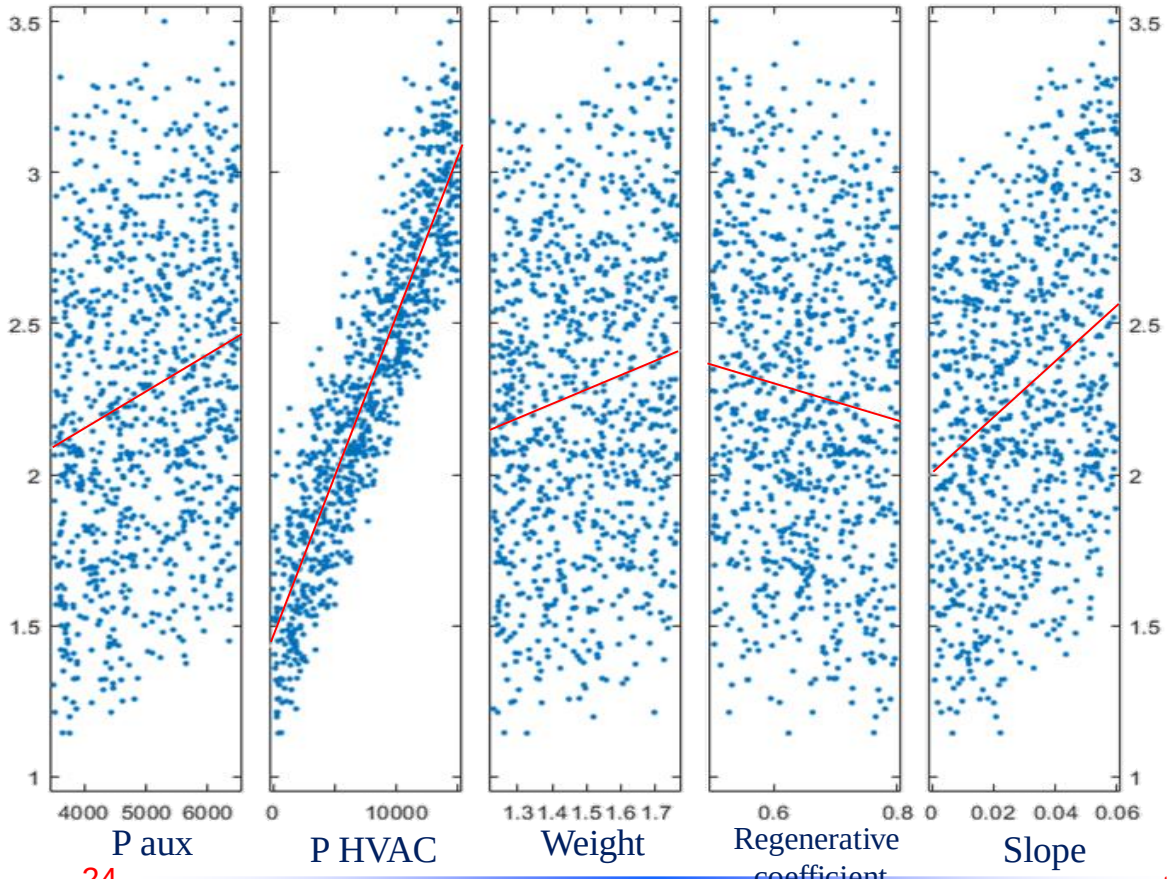
- $0.5 \leq X \leq 0.8$

محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

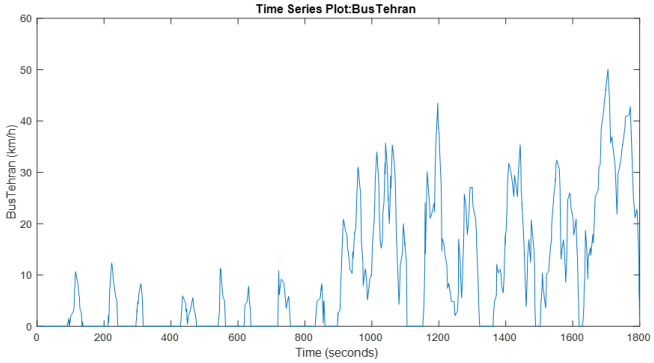
شبیه‌سازی برای سیکل رانندگی رفت و برگشت تهران

به دست آوردن سیکل رانندگی اتوبوس های شهر تهران با استفاده از آنالیز گذار در صفحه سرعت - شتاب و زنجیره مارکوف- مرتضی منتظری ، محمود عارفیان ، عباس فتوحی ،

1000 نمونه برای هر متغیر



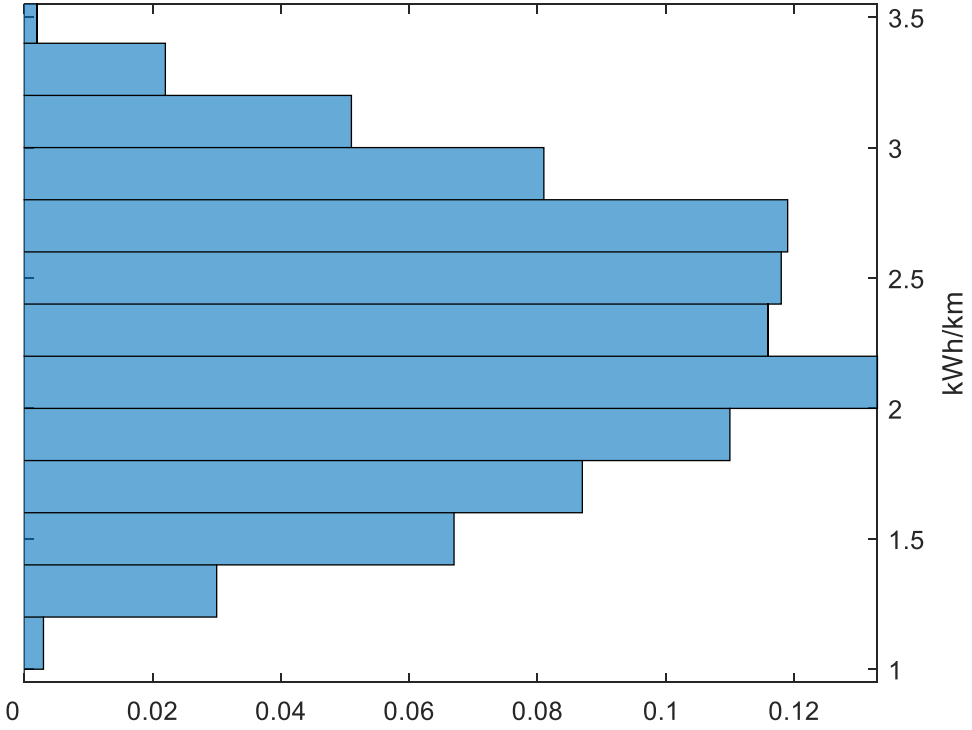
شاخصه	Tehran
زمان (s)	1800
مسافت پیموده (m)	4800
حداکثر سرعت (km/h)	51.1



خروجی شبیه‌سازی: مصرف انرژی

محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

نتایج شبیه‌سازی برای سیکل رانندگی تهران

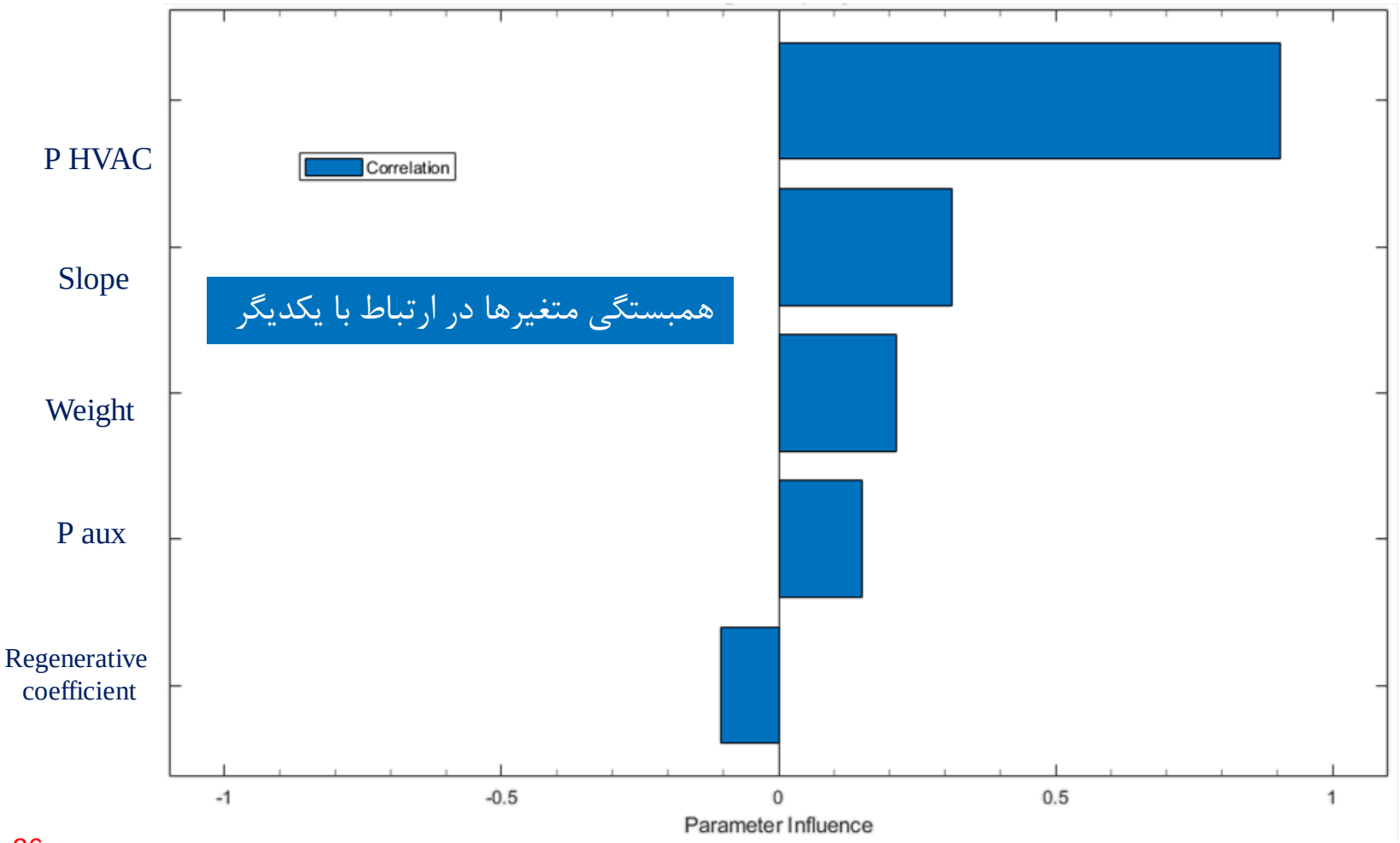


بیشترین فراوانی مصرف انرژی در بازه
2~2.2 kWh/km

میانگین وزنی مصرف انرژی
2.19 kWh/km

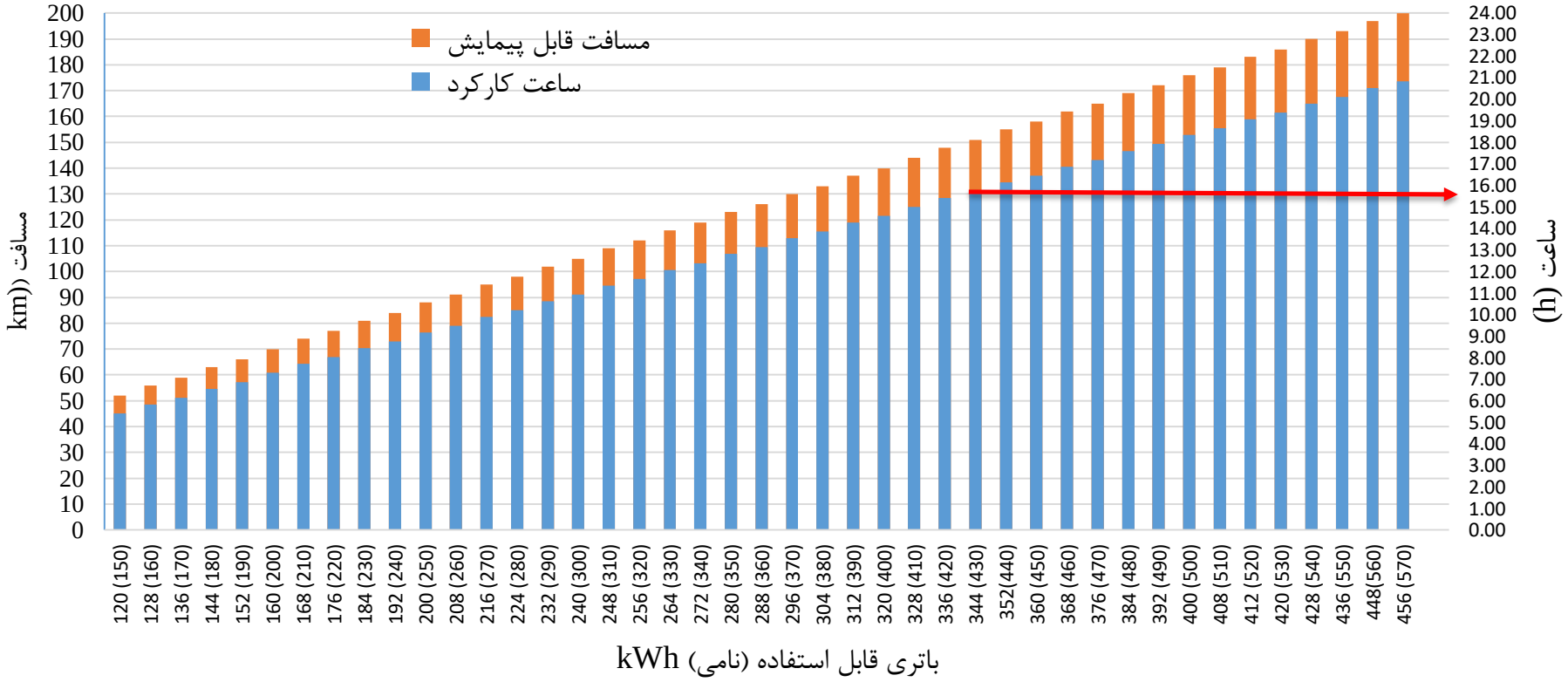
محاسبات و شبیه‌سازی انرژی مصرفی

نتایج شبیه‌سازی برای سیکل رانندگی تهران



محاسبات و بررسی شارژ کند

مسافت و ساعت کارکرد اتوبوس بر اساس شارژ آهسته برای سیکل تهران

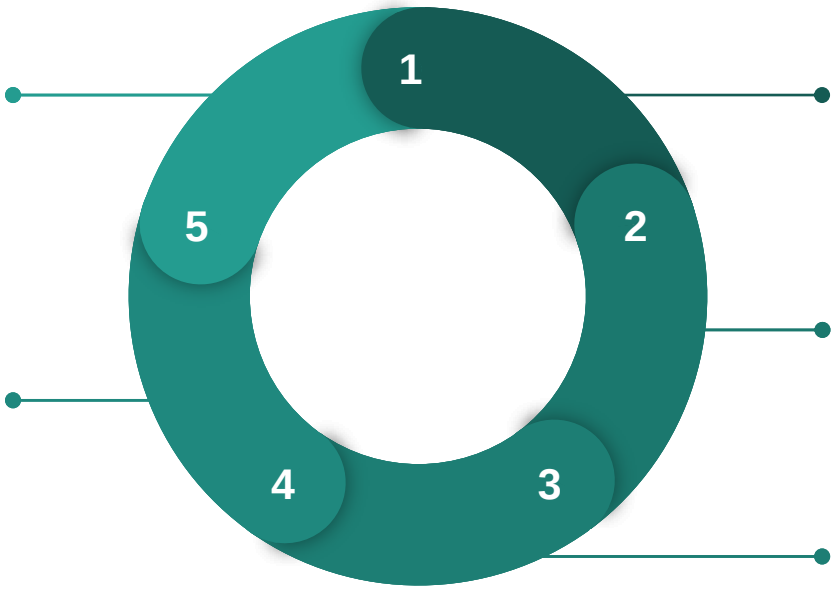


محاسبات و بررسی شارژ کند

نتایج شبیه‌سازی اتوبوس بر اساس شارژ کند برای سیکل تهران

تناقض

مجموع ساعت کارکرد و شارژ کامل خودرو بیش از ۲۴ ساعت می‌شود !!!!!



۲۰۰ کیلومتر پیمایش در ۲۱ ساعت انجام می‌شود

برای پیمایش ۲۰۰ کیلومتر به باتری با ظرفیت نامی ۵۷۰ کیلووات ساعت نیاز است

برای شارژ باتری با ظرفیت ۵۷۰ کیلووات ساعت ظرف مدت ۵ ساعت به شارژر با توان ۹۰ کیلووات نیاز است

بیشترین مسافت قابل پیمایش در ۱۶ ساعت حدود ۱۲۰ کیلومتر

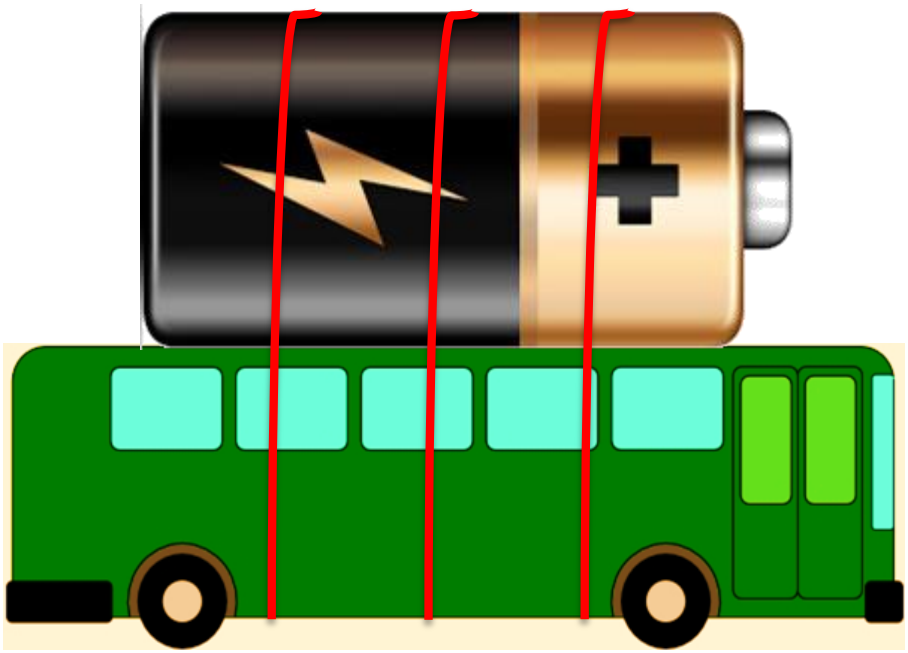
محاسبات و بررسی شارژ کند

نتایج شبیه‌سازی اتوبوس بر اساس شارژ کند برای سیکل تهران

همانطور که مشاهده شد نتایج شبیه سازی برای شارژ کند با ابهامات و تناقضات زیادی رو به رو است
طی کردن ۲۰۰ کیلومتر در روز نیاز به یک باتری حجیم و زمان زیادی دارد
افزایش حجم باتری در کنار افزایش شعاع حرکتی موجب :

- کاهش تعداد مسافران
- افزایش وزن اتوبوس
- افزایش مصرف انرژی
- افزایش هزینه اولیه
- افزایش زمان شارژ

خواهد شد.



محاسبات و بررسی شارژ کند برای سایر سیکل‌ها

محاسبه میزان باتری مورد نیاز برای طی کردن ۲۰۰ کیلومتر

	تهران	منهتن	برانشوایگ	SORT1	SORT2	SORT3
بازه مصرف انرژی (kWh/km)	2~2.2	2.2~2.4	1.6~1.8	2~2.1	1.8~1.9	1.6~1.7
میزان باتری نامی مورد نیاز برای طی کردن ۲۰۰ کیلومتر با شارژ آهسته (kWh)	570	600	450	502	500	450

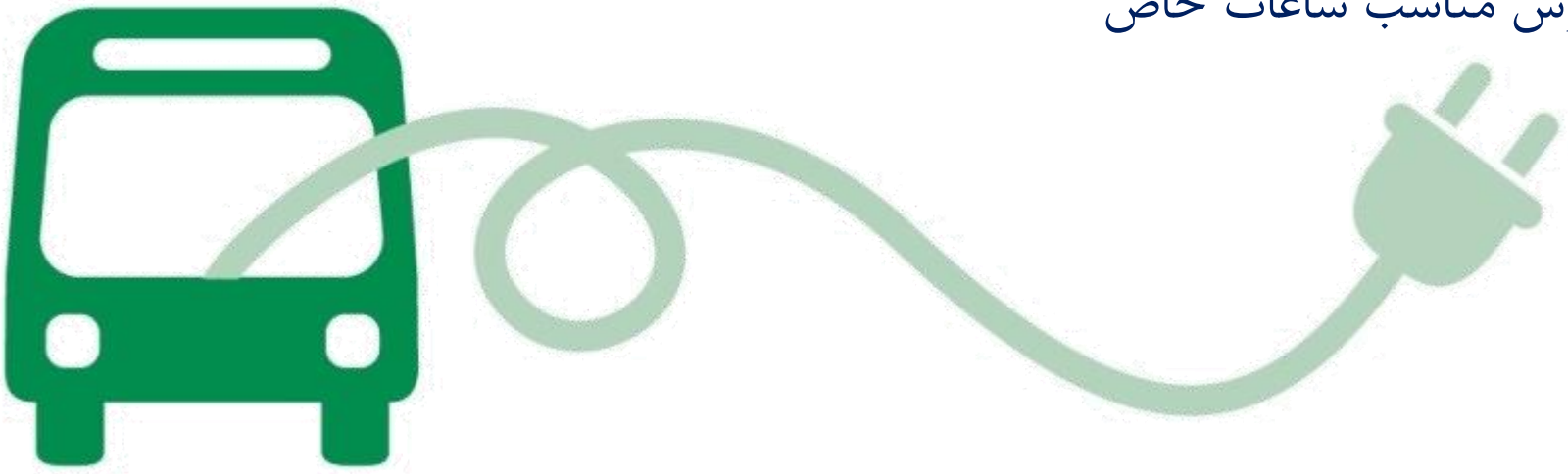
میانگین مصرف انرژی 1.86 ~2.01

محاسبات و بررسی شارژ کند

نتیجه‌گیری سیکل تهران با شارژ کند

تنها در موارد زیر می‌توان از اتوبوس برقی با شارژ کند در سیکل تهران استفاده کرد

- مسیرهای کم شیب و عرضی در تهران
- عدم استفاده از سیستم تهویه
- اتوبوس مناسب ساعات خاص

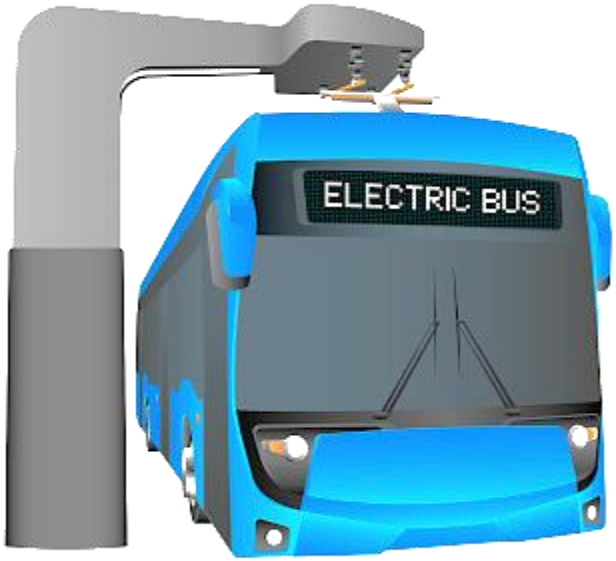


در صورت نیاز به اتوبوسی که توانایی پیمایش مطلوب در روز را داشته باشد میتوان از شارژ سریع در کنار شارژ کند با ظرفیت باتری کمتر استفاده کرد

محاسبات و بررسی شارژ سریع

محاسبات سیکل تهران با شارژ کند و سریع

- استفاده از حجم باتری کمتر
- زمان شارژ بر اساس توان شارژ سریع متغیر است
- زمان شارژ به دست آمده به صورت کلی است، اتوبوس می‌تواند طی زمانهایی که در داخل ایستگاه ابتدایی یا انتهایی مسیر است اقدام به شارژ کند و در طول روز به پیمایش مسیر بپردازد



محاسبات و بررسی شارژ سریع

مسافت و زمان آماده به کار اتوبوس برای سیکل تهران با شارژ ترکیبی

باتری قابل استفاده (اسمی) (kWh)	مسافت با شارژ آهسته (km)	زمان شارژ برای رسیدن به مسافت ۲۰۰ کیلومتر		
		شارژ سریع 200 kW	شارژ سریع 300 kW	شارژ سریع 400 kW
120 (150)	54	01:37:00	01:05:00	00:49:00
128 (160)	58	01:34:00	01:03:00	00:47:00
136 (170)	61	01:32:00	01:02:00	00:46:00
144 (180)	65	01:30:00	01:00:00	00:45:00
152 (190)	69	01:27:00	00:58:00	00:44:00
160 (200)	72	01:25:00	00:57:00	00:43:00
168 (210)	76	01:22:00	00:55:00	00:41:00
176(220)	80	01:20:00	00:53:00	00:40:00
184(230)	83	01:18:00	00:52:00	00:39:00
192(240)	87	01:15:00	00:50:00	00:38:00
200(250)	90	01:13:00	00:49:00	00:37:00

محاسبات و بررسی شارژ سریع برای سایر سیکل‌ها

محاسبه زمان مورد نیاز برای طی کردن ۲۰۰ کیلومتر با شارژ سریع

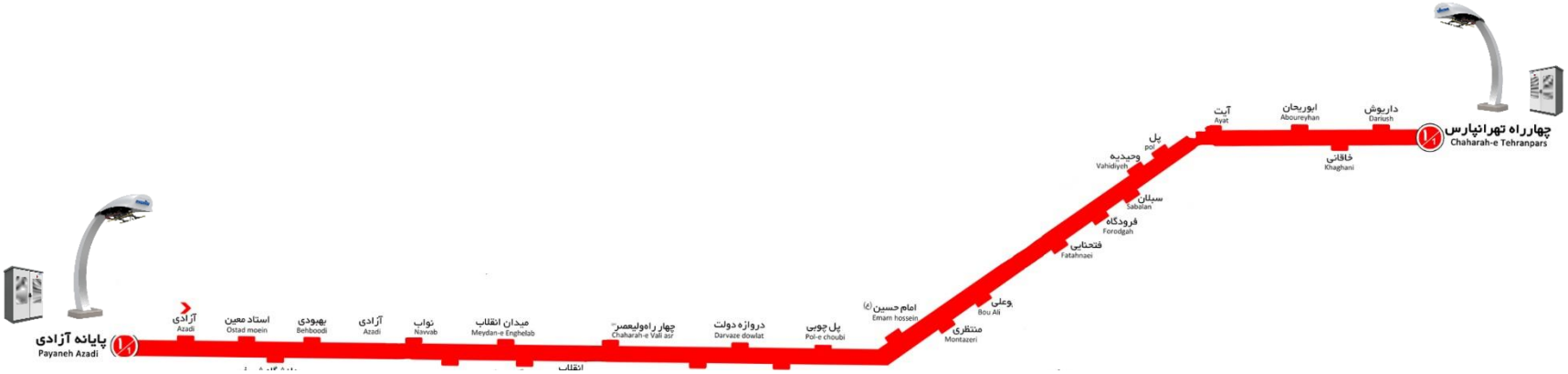
	زمان شارژ سریع مورد نیاز برای طی کردن 200 کیلومتربرای باتری با ظرفیت نامی 200 kWh		
	200 kW	300 kW	400 kW
تهران	01:37:00	01:05:00	00:49:00
منهتن	01:37:00	01:05:00	00:49:00
برانشوایگ	01:01:00	00:41:00	00:31:00
SORT1	01:19:00	00:53:00	00:40:00
SORT2	01:07:00	00:45:00	00:34:00
SORT3	00:55:00	00:37:00	00:28:00

با توجه به اینکه معمولا اتوبوس در ابتدا یا انتهای خط قبل از شروع سیکل کاری حداقل ۱۵ دقیقه معطلی دارد شارژ ۲۰۰ کیلووات، با توجه به هزینه کمتر می‌تواند گزینه خوبی باشد

شارژ ترکیبی

- پایانه آزادی – چهارراه تهرانپارس
- طول مسیر ۱۸/۵ کیلومتر
- ۲۶ ایستگاه
- مدت زمان مسیر ۵۰ تا ۶۰ دقیقه

- باتری مورد نیاز برای طی کردن ۲۰۰ کیلومتر در حالت شارژ کند حدود ۵۵۰ kWh
- در حالت شارژ ترکیبی (شارژ سریع در ابتدا یا انتهای مسیر) با باتری ۲۰۰ kWh با ۲ بار شارژ سریع ۲۰۰kW به پیمایش مورد نظر دست می‌یابد



شارژ ترکیبی

- میدان راه آهن– میدان تجریش
- طول مسیر ۱۷/۵ کیلومتر
- ۲۷ ایستگاه
- مدت زمان مسیر ۵۰ تا ۶۰ دقیقه

- باتری مورد نیاز برای طی کردن ۲۰۰ کیلومتر در حالت شارژ کند حدود ۶۰۰ kWh
- در حالت شارژ ترکیبی (شارژ سریع در ابتدا یا انتهای مسیر) با باتری ۲۰۰ kWh با ۳ بار شارژ سریع ۲۰۰kW به پیمایش مورد نظر دست می‌یابد

برآورد اقتصادی سایزینگ باتری و شارژ

- هزینه ساخت باتری پک شب شارژ حدود $300/kWh
- هزینه ساخت باتری پک برای شارژ ترکیبی حدود $350/kWh
- هزینه راه اندازی ایستگاه شارژ 200 kW حدود $ 60.000

برآورد اقتصادی سایزینگ باتری و شارژ

- در ساعات شروع به کار اتوبوس نیاز به شارژ ندارد
- زمان سرویس دهی یک شارژ سریع ۸ ساعت در نظر گرفته شده
- هر اتوبوس حدود یک ساعت و نیم به شارژ نیاز دارد

هزینه انرژی × سایز باتری = هزینه شارژ

570 kWh

X 2

=

200 kWh

X 5

+

200 kW

- با کاهش حجم باتری پک و خریداری یک ایستگاه شارژ سریع می‌توان تعداد اتوبوس برقی بیشتری داشت
- کاهش حجم باتری موجب کاهش هزینه شارژ و برق مصرفی می‌شود

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

انتخاب نوع شارژر (شب شارژ یا ترکیبی) تابع شرایط زیر است :

- توجه به شیب مسیر و پیمایش روزانه
- توجه به ساعات مورد استفاده
- توجه به تعداد مسافرین مسیر
- توجه به آب و هوا و میزان سردی و گرمی هوا
- توجه به مکان زیرساخت شارژ سریع در ابتدا و انتهای مسیر
- توجه به هزینه زیرساخت در مقایسه با پیمایش
- توجه به ساعات اوج مصرف برق شهری برای راه اندازی ناوگان
- توجه به حجم باتری مورد استفاده در اتوبوس

با تشکر از توجه شما