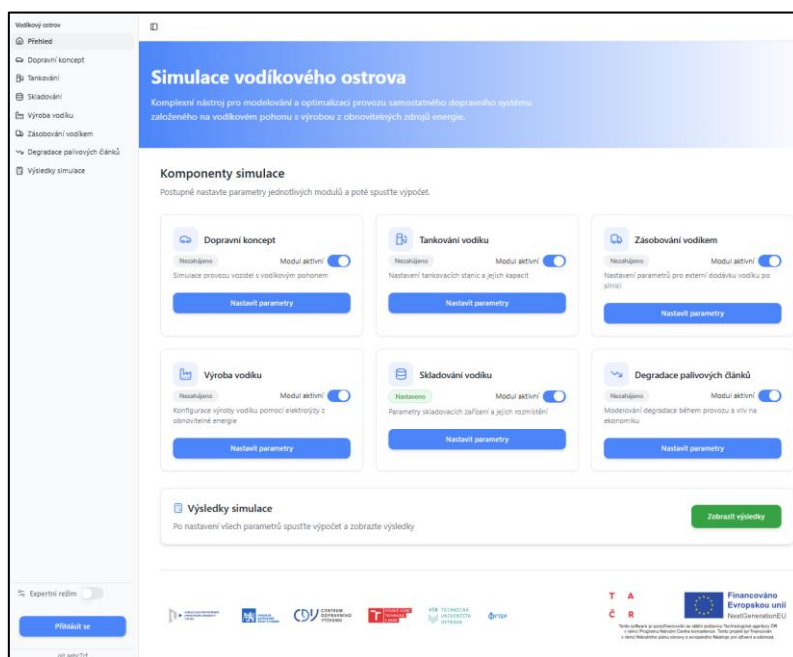


Podpůrný softwarový nástroj pro metodiku rozvoje ostrovních vodíkových řešení

R – Software



prosinec 2025

Tento projekt Národní centrum vodíkové mobility je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Národní Centra kompetence. Tento software byl financován v rámci Národního plánu obnovy z evropského Nástroje pro oživení a odolnost.

NÁZEV SOFTWARE

Podpůrný softwarový nástroj pro metodiku rozvoje ostrovních vodíkových řešení

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Podpůrný SW pro akceleraci zavádění vodíkové mobility

AUTOŘI

Jan Přikryl, Jakub Ševčík (Výzkumné centrum RICE, Fakulta elektrotechnická, ZČU)

Bronislav Vahalík, Vojtěch Přikryl (Centrum dopravního výzkumu)

AUTORSKÝ TÝM KONCEPČNÍCH MATERIÁLŮ K SOFTWARE

Stanislav Novotný, Václav Koleník, Petr Bouchner, Pavel Hruběš (Fakulta dopravní, ČVUT v Praze)

Josef Štětina, Pavel Charvát, Martin Zálešák (Vysoké učení technické v Brně)

David Seidl, Lukáš Prokop (Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava)

Obsah

1	Úvod	5
2	Dosavadní stav poznání	8
2.1	Analýza existujících zastřešujících (integrovaných) řešení	8
2.1.1	Důvody absence integrovaných nástrojů.....	8
2.2	Přehled dostupných dílčích modelů a komponent	8
2.2.1	Výroba vodíku	9
2.2.2	Zásobování vodíkem	9
2.2.3	Vodíkové plnicí stanice.....	9
2.2.4	Vodíková bezpečnost	9
2.2.5	Modely vodíkových ostrovů	9
3	Novost řešení	10
3.1	Vymezení vůči neuznatelným kategoriím dle metodiky TA ČR	10
3.2	Vlastní podstata novosti softwarového výsledku	11
4	Analýza požadavků.....	13
4.1	Architektura a integrované modely	13
4.1.1	Energeticko-nákladový model vozidla pro zásobování plnicích stanic (model 1)	14
4.1.2	Digitální model prvků výroby, komprese a uskladnění vodíku (model 2)	14
4.1.3	Model vodíkové plnicí stanice (model 3)	15
4.1.4	Digitální model vodíkového dopravního mikrogridu (model 4)	16
4.1.5	Matematicko-digitální modely vodíkových vozidel (model 5).....	17
4.1.6	Model degradace palivových článků (model 6)	17
4.2	Funkční požadavky	18
4.2.1	Správa scénářů a konfigurací	18
4.2.2	Provedení a orchestrace simulací	18
4.2.3	Vizualizace a agregace výsledků	18
4.2.4	Uživatelské rozhraní (UI)	19
5	Klíčové případy užití (Use Cases).....	20
5.1	Plánování přechodu městské autobusové dopravy na vodík	20
5.2	Srovnávací analýza logistiky zásobování	21
6	Rizika spojená s tvorbou a provozem podpůrného softwarového nástroje	23
6.1	Technologická a modelová komplexita.....	23
6.2	Kalibrace a validace modelů	23
6.3	Proměnné ekonomické faktory.....	23
6.4	Riziko zastarávání modelů a parametrů	23
7	Popis SW.....	24

7.1	Klíčové principy	24
7.2	Datové struktury a výstupy	24
7.3	Konektivita a integrace	25
7.4	Architektura systému	25
7.4.1	Uživatelské rozhraní (Front-end)	25
7.4.2	Komunikační jádro (Middleware)	25
7.4.3	Výpočetní jádro (Back-end).....	26
7.4.4	Datová vrstva	26
7.5	Funkční požadavky	27
7.5.1	FR01: Správa simulačních scénářů	27
7.5.2	FR02: Interaktivní zadávání vstupů	27
7.5.3	FR03: Spouštění a monitoring simulací.....	27
7.5.4	FR04: Vizualizace výsledků	27
7.5.5	FR05: Integrace s mapovými podklady	27
7.5.6	FR06: Export dat.....	27
7.6	Uživatelské rozhraní a ovládání aplikace	27
7.7	Programátorská dokumentace	31
7.7.1	Vývojový diagram práce s dashboardem	31
7.7.2	Struktura a klíčové části kódu	33
8	Popis ověření funkčnosti SW	35
8.1	Technická validace	35
8.2	Testování uživatelského rozhraní	35
8.3	Integrace dat a export.....	36
9	Umístění SW.....	37
10	Způsob využití	38
10.1	Využití v akademickém prostředí.....	38
10.2	Využití ve státní správě a samosprávě	38
10.3	Využití v průmyslovém prostředí	39
10.4	Možnosti další integrace do nadřazených systémů	39
11	Seznam příloh.....	40
11.1	Uživatelská příručka případně manuál	40
11.2	Videosoubor se záznamem funkčnosti	40
12	Seznam obrázků	40
13	Reference	40

1 Úvod

Vodík je v současné době vnímán jako jeden z klíčových energetických nosičů umožňujících dosažení dlouhodobých cílů dekarbonizace energetiky, průmyslu a dopravy. Jeho význam narůstá zejména v kontextu transformace energetických systémů směrem k vyššímu podílu obnovitelných zdrojů, snižování závislosti na fosilních palivech a posilování energetické bezpečnosti. V oblasti dopravy představuje vodík perspektivní řešení především pro segmenty, kde naráží čistě bateriová elektromobilita na technické, provozní či ekonomické limity – v těžké silniční dopravě, hromadné dopravě osob, komunálních službách nebo specializovaných flotilách s vysokými nároky na dojezd a dostupnost energie.

Vodíková mobilita je perspektivním odvětvím, které se však stále nachází na samém počátku svého rozvoje. Její rozvoj je omezen souborem vzájemně podmíněných faktorů, které se navzájem posilují a vytvářejí strukturální bariéru dalšího rozvoje:

- *Nedostatečná infrastruktura:* Téměř neexistující síť vodíkových plnicích stanic je největší bariérou, která odrazuje potenciální uživatele od pořízení vozidel a současně demotivuje investory od budování infrastruktury.
- *Vysoké náklady:* Pořizovací a provozní náklady vodíkových vozidel zůstávají vysoké. Stejně tak je nákladná i výroba zeleného vodíku z obnovitelných zdrojů, kterou legislativa EU pro dopravu v budoucnu vyžaduje.
- *Nedůvěra a nedostatek zkušeností:* Vzhledem k minimálnímu počtu vodíkových vozidel v reálném provozu panuje mezi potenciálními uživateli a provozovateli flotil nedůvěra plynoucí z nedostatku ověřených provozních dat a dlouhodobých zkušeností.

Specifickým směrem rozvoje vodíkových technologií jsou tzv. *ostrovní vodíková řešení*, tedy lokální, částečně nebo zcela autonomní systémy zahrnující výrobu vodíku, jeho skladování, distribuci a konečné využití, typicky v dopravě nebo lokální energetice. Tato řešení reagují na praktické limity centralizované výroby a dálkové přepravy vodíku, které jsou spojeny s významnými energetickými, ekonomickými a environmentálními náklady. Ostrovní koncepty umožňují přímé propojení lokálních obnovitelných zdrojů energie s výrobou vodíku a jeho spotřebou v daném území, čímž vytvářejí podmínky pro efektivnější, robustnější a lépe škálovatelná řešení odpovídající specifikům jednotlivých regionů, měst nebo provozních celků.

Navrhování a hodnocení ostrovních vodíkových řešení je však velmi komplikovaná úloha, která vyžaduje současné zohlednění technických, energetických, ekonomických, provozních i environmentálních aspektů. Do rozhodovacího procesu vstupuje řada vzájemně provázaných faktorů, jako jsou parametry výroby vodíku, chování elektrolyzérů při proměnném zatížení, kapacity a provozní strategie skladování, spotřeba vodíku jednotlivými typy vozidel, logistika jeho dopravy v rámci ostrova i interakce s okolní dopravní a energetickou infrastrukturou. V praxi tak vzniká potřeba nástrojů, které umožní tyto vazby systematicky analyzovat, modelovat a transparentně prezentovat výsledky různých scénářů.

Z těchto důvodů vznikl v rámci dílčího projektu DP003N centra NAHYC-m předkládaný výsledek „Podpůrný softwarový nástroj pro metodiku rozvoje ostrovních vodíkových řešení“, dále

označovaný také jako **vodíkový dashboard**. Tento nástroj je koncipován jako zastřešující webová aplikace, integrující soubor specializovaných matematických a simulačních modelů vyvíjených v jednotlivých pracovních balíčcích dílčího projektu DP003N. Úlohou dashboardu není pouze samotný výpočet dílčích technických parametrů, ale především vytvoření jednotného aplikačního rámce umožňujícího propojení modelů, správu vstupních dat, definici scénářů a srozumitelnou interpretaci výsledků pro různé typy uživatelů.

Hlavní motivací pro vznik tohoto nástroje byla snaha překlenout kritický nedostatek reálných provozních dat, který brání přesnému technicko-ekonomickému hodnocení vodíkových projektů a zvyšuje investiční riziko. Nástroj tuto mezeru vyplňuje tím, že poskytuje platformu pro realistické, fyzikálně podložené simulace. Umožňuje modelovat a analyzovat kompletní vodíkový řetězec v rámci definovaného ostrovního řešení – od logistiky zásobování vodíkem, přes dynamiku a dimenzování plnicí stanice, až po simulaci provozního konceptu ve vybrané oblasti.

Vodíkový dashboard umožňuje komplexní pohled na navrhovaný systém v jeho celém životním cyklu a v různých provozních konfiguracích. Podporuje analýzu energetických toků, ekonomické náročnosti, provozních režimů i environmentálních dopadů a vytváří tak podklad pro kvalifikované rozhodování při přípravě pilotních projektů, studií proveditelnosti, strategických koncepcí i následné implementace konkrétních řešení v praxi.

Aplikační oblasti tohoto softwaru zahrnují zejména veřejnou správu a samosprávy, které připravují koncepce rozvoje udržitelné mobility a lokální energetiky, dopravní podniky a provozovatele flotil, průmyslové subjekty zvažující zavedení vodíkových technologií, ale také výzkumné a vzdělávací instituce. Přínos podpůrného softwarového nástroje spočívá v systematizaci dosud roztříštěných analytických přístupů, ve zvýšení transparentnosti rozhodovacích procesů a v možnosti srovnávat různé varianty ostrovních vodíkových řešení na jednotné metodické a datové bázi. Tím dashboard přispívá k urychlení a zkvalitnění zavádění vodíkových technologií do reálné praxe a k efektivnímu naplňování cílů centra NAHYC-m i souvisejících národních a evropských strategií.

Softwarový nástroj poskytuje cenné datové podklady pro klíčové fáze plánování a provozu vodíkových projektů. Mezi jeho primární případy užití patří:

- *Optimalizace flotil:* Přímě řeší bariéru *vysokých provozních nákladů a nedůvěry uživatelů* tím, že umožňuje správcům flotil plánovat trasy, hodnotit vhodnost různých typů vozidel pro konkrétní nasazení a simulovat celkové provozní náklady.
- *Plánování infrastruktury:* Pomáhá překonat problém *nedostatečné infrastruktury a paradoxu „slepice a vejce“* poskytováním klíčových dat pro návrh a správné dimenzování vodíkových ekosystémů, včetně kapacity plnicích stanic a logistiky zásobování.
- *Vzdělávání a popularizace:* Adresuje *nedostatek zkušeností a nedůvěru* tím, že slouží jako názorný nástroj pro demonstraci provozních charakteristik vodíkových technologií, čímž pomáhá zvyšovat pochopení této nové technologie.
- *Podpora strategického rozhodování:* Poskytuje robustní datové podklady, které mohou investoři, města či státní instituce využít pro své investiční a strategické plány, čímž *sníží rizika* spojená s dekarbonizací dopravy.



Strategickým cílem a hlavním přínosem tohoto softwarového nástroje je urychlit zavádění vodíkové mobility v České republice. Nástroj umožňuje detailní a daty podložené plánování a věříme, že díky tomu pomůže zásadně snížit investiční rizika spojená s budováním vodíkové infrastruktury a posune vodíkové projekty z roviny akademické proveditelnosti do podoby praktické reality. Díky implementaci na webovém serveru a intuitivnímu grafickému rozhraní navíc umožňuje i uživatelům bez hlubokých technických znalostí modelovat i relativně komplikované scénáře. Vodíkový dashboard považujeme za strategický instrument pro realizaci udržitelných vodíkových projektů v oblasti vodíkové mobility.

2 Dosavadní stav poznání

Pro objektivní posouzení novosti a přidané hodnoty vyvíjeného softwaru je nezbytné provést detailní rešerši existujících nástrojů. Tato analýza se zaměřuje jak na komplexní, integrované platformy, tak na specializované modelovací komponenty, které pokrývají jednotlivé segmenty vodíkového ekosystému.

2.1 Analýza existujících zastřešujících (integrovaných) řešení

Provedená rešerše komerčně dostupných i akademických softwarových řešení neodhalila žádný existující nástroj, který by komplexně integroval modelování celého řetězce ostrovního vodíkového řešení. Na trhu neexistuje platforma, která by propojovala simulaci logistiky zásobování vodíkem, detailní termodynamický a provozní model plnicí stanice a dynamickou simulaci spotřeby koncových vozidel v reálných dopravních a topografických podmínkách.

Tato absence komplexního integrovaného řešení potvrzuje vysokou míru inovativnosti a unikátní povahu softwaru vyvíjeného v rámci projektu NAHYC-m. Nástroj má potenciál zaplnit významnou mezeru na trhu a stát se klíčovým prvkem pro strategické plánování vodíkové infrastruktury.

2.1.1 Důvody absence integrovaných nástrojů

Absence komplexních nástrojů na trhu není náhodná a lze ji podle našeho názoru přisoudit několika klíčovým faktorům, odrážejícím současný stav celého odvětví. Hlavní faktory jsou podle našeho názoru v současné době následující:

- a) *Nízká tržní a technologická zralost:* Vodíková mobilita se stále nachází v rané fázi rozvoje, charakterizované pilotními projekty často financovanými z veřejných zdrojů. Komerční trh je prozatím příliš malý a fragmentovaný na to, aby stimuloval soukromé investice do vývoje nákladných a sofistikovaných softwarových platforem.
- b) *Nedostatek validačních dat:* Spolehlivost komplexního zastřešujícího nástroje je přímo závislá na dostupnosti velkého množství provozních dat. Tento problém je obzvláště závažný, neboť jak uvádějí zdrojové materiály, „jen málo modelů bylo validováno experimentálními daty“ (Štětina a kol., 2024a) a pro většinu těžkých užitkových vozidel „nejsou běžně k dispozici data z jejich dlouhodobého reálného provozu“ (Štětina a kol., 2024b). Tato absence relevantních dat zásadně komplikuje kalibraci a ověřování přesnosti simulací.
- c) *Vysoká systémová komplexita:* Integrace fyzikálních modelů jednotlivých subsystémů představuje značnou technickou výzvu. Propojení dynamiky vozidel, termodynamických procesů v plnicí stanici (komprese, chlazení), optimalizace logistických tras a ekonomického modelu do jednoho funkčního celku vyžaduje hluboké expertní znalosti z několika odlišných oborů, jako jsou strojírenství, elektrotechnika, termodynamika, dopravní inženýrství a ekonomie.

2.2 Přehled dostupných dílčích modelů a komponent

Ačkoliv komplexní řešení neexistují, lze v mezinárodním kontextu identifikovat řadu etablovaných nástrojů, které se soustředí na specifické části vodíkového systému. Tyto dílčí nástroje jsou ovšem

nezávislé a nepředstavují vzájemně propojený ekosystém modulů, jejichž výstupy jednoduše slouží jako vstupy pro ostatní. Právě tvorba takových modulů a jejich vzájemná integrace je klíčovým přínosem tohoto výsledku.

2.2.1 Výroba vodíku

V oblasti výroby vodíku jsou široce využívány techno-ekonomické modely založené na metodice diskontovaných peněžních toků (DCF), typicky reprezentované nástrojem H2A (Penev a kol., 2018). Tyto nástroje umožňují porovnání různých výrobních technologií a velikostí zařízení a poskytují standardizovaný výpočet jednotkových nákladů na vodík. Jejich omezením je však převážně statický charakter a absence vazby na dynamický provoz lokálních energetických systémů.

2.2.2 Zásobování vodíkem

Pro distribuci a logistiku vodíku existují nástroje typu HDSAM (Elgowainy a kol., 2015), které analyzují náklady dodavatelského řetězce v závislosti na hustotě poptávky, způsobu dopravy a konfiguraci infrastruktury. Tyto modely jsou koncipovány spíše pro regionální nebo městské scénáře a méně reflektují specifika lokálních ostrovních řešení s omezeným počtem odběrných míst.

2.2.3 Vodíkové plnicí stanice

Samostatnou kategorií tvoří nástroje zaměřené na plnicí stanice, například HRSAM (Elgowainy a kol., 2017) nebo finanční model H2FAST (Bush a kol., 2017). Tyto nástroje umožňují optimalizaci konfigurace stanice a posouzení investičních a provozních nákladů, nicméně typicky nejsou propojeny s detailními modely vozidel, tras nebo provozních scénářů flotil.

2.2.4 Vodíková bezpečnost

V oblasti bezpečnosti je k dispozici nástroj HyRAM+ (SNL, 2025), který integruje fyzikální a pravděpodobnostní modely havarijních scénářů. Jeho silnou stránkou je detailní posouzení rizik, avšak bezpečnostní analýzy jsou z principu řešeny odděleně od ekonomických a provozních simulací.

2.2.5 Modely vodíkových ostrovů

Pro širší energetické systémy a mikrogridy existují komerční platformy, např. HOMER Pro (NREL a UL Solutions, 2024), které dokáží vodík zahrnout jako součást energetického mixu. Tyto nástroje jsou však primárně zaměřeny na energetickou bilanci a dimenzování a neposkytují detailní doménové modely vodíkové mobility a infrastruktury.

Jak jsme zmínili výše, skutečná komplexita spočívá ve vytvoření bezproblémového datového toku, kde spotřeba vozidel diktuje design stanice a design stanice diktuje logistické operace. Následující kapitola analyzuje tato integrační rizika podrobněji.

3 Novost řešení

Podle Frascati manuálu (OECD, 2015) a navazujících metodických pokynů TA ČR (2025) je software považován za výsledek výzkumu a vývoje pouze tehdy, pokud:

- představuje nové poznatky nebo nové způsoby jejich systematického využití,
- jeho vývoj překračuje rámec rutinní implementace, integrace či konfigurace existujících nástrojů,
- je výsledkem cílené výzkumné činnosti, nikoli běžného aplikačního vývoje.

Novost tedy v následujícím textu neposuzujeme podle použité technologie (v případě předkládaného výsledku jde o dynamický web, založený na technologii React, TypeScriptu a REST API), ale podle toho, co předkládaný software umožňuje modelovat, analyzovat nebo rozhodovat novým způsobem.

3.1 Vymezení vůči neuznatelným kategoriím dle metodiky TA ČR

Níže uvádíme systematické vymezení popisovaného softwarového nástroje vůči bodům a) až h) metodického pokynu TA ČR „Specifikace požadavků poskytovatele na výsledky VaV“ (TA ČR, 2025).

- a) *Software, manuál a dokumentace je předkládán jako jeden výsledek:* Splněno a respektováno.

Výsledek je vykazován jako jeden ucelený software, jehož součástí je technická dokumentace a popis architektury. Nejsou uměle oddělovány dílčí části (UI, API, dokumentace).

- b) *Vývoj běžných obchodních aplikací a informačních systémů:* Nevztahuje se.

Dashboard není informačním systémem typu evidence, workflow nebo správa dat. Primární funkcí není administrace, ale výpočetně-modelová integrace výzkumných modelů a jejich scénářová syntéza v kontextu ostrovních vodíkových řešení.

- c) *Pouhé přidání uživatelských funkcí do existujících aplikací:* Nevztahuje se.

Nejedná se o rozšíření existující aplikace. Software vznikl jako nová integrační a výpočetní vrstva, která předtím neexistovala a nebyla k dispozici v obdobné podobě.

- d) *Tvorba webových stránek nebo software s využitím stávajících nástrojů:* Nevztahuje se.

Použití webových technologií (HTML, REST, JavaScript) je technický prostředek, nikoli podstata výsledku. Novost nespočívá ve volbě použitých softwarových technologií, ale v konceptu integrace heterogenních fyzikálních, dopravních a energetických modelů do jednotného rozhodovacího rámce.

- e) *Použití standardních metod kódování, testování a zabezpečení:* Ano, ale považujeme za irelevantní pro posouzení novosti.

Standardní vývojové postupy byly použity, ty však nejsou nositelem novosti. Novost je dána architekturou modelové integrace a způsobem práce se scénáři, nikoli způsobem vlastní implementace v kódu.

- f) *Přizpůsobení výrobku pro konkrétní použití bez přidání nových poznatků:* Nevztahuje se.

Software není konfigurací existujícího nástroje. Byl navržen současně s vývojem jednotlivých modelů DP003N a reflektuje jejich specifické výzkumné předpoklady, vazby a omezení. Vznikl tak nový způsob jejich společného využití, který předtím nebyl k dispozici.

- g) *Pouhé propojení několika známých software:* Nevztahuje se.

Toto považujeme za klíčový bod: Navržený dashboard není pouhým „slepením“ modelů, ale definuje sjednocený sémantický rámec vstupů a výstupů, zavádí společný scénářový časový a provozní kontext, umožňuje kombinované hodnocení dopravních, energetických a infrastrukturních aspektů, řeší i konzistenci předpokladů mezi modely (trasy, provoz, kapacity, režimy). Tento integrační přístup představuje nový poznatek na úrovni metodiky práce s modely, nikoli jen čistě technickou integraci již dostupných modelů.

- h) *Rutinní ladění stávajících systémů:* Nevztahuje se.

Vývoj dashboardu nebyl optimalizací existujícího systému, ale návrhem nové koncepce integrační vrstvy, která vznikla v přímé návaznosti na výzkumné cíle DP003N.

3.2 Vlastní podstata novosti softwarového výsledku

Novost softwarového nástroje spočívá zejména v následujících aspektech:

- **Metodická novost**
Software zavádí nový způsob práce s výzkumnými modely vodíkové mobility – nikoli izolovaně, ale v podobě provázaných scénářů ostrovních řešení.
- **Architektonická novost**
Výsledkem není monolitický model, ale otevřená integrační vrstva, která umožňuje připojování dalších modelů, výměnu výpočetních jader nebo oddělení výzkumných modelů od aplikační vrstvy.
- **Aplikační novost v rozhodovací podpoře**
Nástroj umožňuje kombinované technicko-energetické a provozní hodnocení, které v dostupných nástrojích obvykle existuje pouze odděleně (výroba, doprava, infrastruktura).
- **Nový typ výstupu**
Výstupem není pouze numerický výsledek jednotlivého modelu, ale interpretovatelný scénář, použitelný pro strategické plánování, veřejnou správu či koncepční rozhodování o investicích.

Přínos předkládaného výsledku nespočívá pouze v samotné implementaci známých algoritmů, ale v novém způsobu jejich systematického propojení a využití při hodnocení ostrovních vodíkových řešení a splňuje tedy podmínku novosti podle Frascati manuálu. Softwarový nástroj představuje výzkumnou integrační platformu, která umožňuje generovat nové poznatky o chování komplexních vodíkových systémů v reálných provozních scénářích, a jako takový přesahuje rámec běžného aplikačního či rutinního softwarového vývoje.

Jedním z klíčových aspektů novosti předkládaného softwarového nástroje je způsob, jakým umožňuje praktické využití výzkumných, fyzikálně založených modelů v režimu interaktivního

a scénářového hodnocení. V oblasti energetického a dopravního modelování je běžným omezením nutnost volby mezi výpočetně jednoduchými přístupy, které jsou vhodné pro rychlé orientační analýzy, a detailními fyzikálními modely, jejichž použití je často omezeno vysokou výpočetní náročností a dlouhými výpočetními časy.

Navržený dashboard tento tradiční kompromis systematicky překonává na aplikační úrovni. Vytváří prostředí, v němž mohou být výzkumné modely s vysokou mírou fyzikální věrnosti využívány opakovaně, parametricky a v krátkých výpočetních cyklech, odpovídajících potřebám rozhodování založeného na datech. Dashboard nepředstavuje pouze pasivní rozhraní k jednotlivým modelům, ale aktivně je zasazuje do jednotného rámce, umožňujícího rychlé změny vstupních předpokladů, porovnávání variant a iterativní práci s výsledky.

Tento přístup má podle našeho názoru zásadní metodický dopad: výzkumné modely, které při samostatném použití slouží k detailním jednorázovým analýzám, jsou prostřednictvím tohoto výsledku zpřístupněny pro strategické a koncepční úlohy, kde je nezbytné vyhodnocovat mnoho rozdílných variant. Dashboard tak funguje jako most mezi výzkumným modelem a rozhodovací praxí, aniž by docházelo k redukci fyzikální podstaty modelů na zjednodušené empirické vztahy.

4 Analýza požadavků

Strategická důležitost dashboardu spočívá v jeho schopnosti propojit specializované simulační modely, které samy o sobě řeší pouze dílčí části vodíkového řetězce. Zatímco jednotlivé modely poskytují detailní pohled na provoz vozidel, logistiku nebo fungování plnicí stanice, jejich skutečná hodnota se projeví až v jejich synergickém propojení. Primární strategická hodnota navrhovaného dashboardu nespočívá v pouhé agregaci výstupů z jednotlivých modelů, ale v odhalování systémově podmíněných, ne zcela zjevných vlastností celého systému. Umožní kvantifikovat například dopad volby zásobovacích vozidel a dopravních podmínek na náklady logistiky zásobování nebo studovat, jak volba plnicího tlaku a technologie chlazení ovlivní celkovou energetickou účinnost celého ostrovního ekosystému.

Na základě analýzy dostupných podkladů byly definovány následující hlavní cíle dashboardu:

1. **Komplexní modelování scénářů:** Umožnit uživatelům modelovat a analyzovat kompletní ostrovní řešení. Uživatel bude moci definovat parametry pro celý řetězec: od složení a provozního nasazení flotily koncových vodíkových vozidel (osobní automobily, autobusy, nákladní vozy), přes simulaci jejich denního provozu a z toho vyplývající poptávky po vodíku, až po návrh a simulaci provozu vodíkové plnicí stanice (VPS) a logistiky jejího zásobování.
2. **Podpora strategického rozhodování:** Dashboard bude poskytovat agregované energetické, provozní a ekonomické výstupy, které poslouží jako robustní datový podklad pro klíčové aktéry. Investoři, provozovatelé dopravních flotil i zástupci veřejné správy budou moci využít výsledky simulací pro plánování investic, optimalizaci provozu a strategický rozvoj vodíkové infrastruktury v daném regionu.
3. **Základní jednoduchá techno-ekonomická analýza:** Dashboard nabídne nástroj pro srovnávání různých technologických a provozních variant. Uživatelé budou moci porovnávat dopady různých rozhodnutí – například volbu mezi různými typy zásobovacích vozidel, odlišné konfigurace plnicích stanic (např. s chlazením nebo bez něj) nebo různé strategie obsluhy území – na celkovou energetickou náročnost, provozní náklady a efektivitu celého systému.
4. **Centralizované a uživatelsky přívětivé rozhraní:** Dashboard sjednotí výstupy z několika specializovaných modelů do jediné, intuitivní webové aplikace. Tento přístup eliminuje potřebu instalace a správy specializovaného softwaru na straně uživatele, zjednodušuje přístup k pokročilým analýzám a zajišťuje konzistentní uživatelskou zkušenost napříč různými platformami a zařízeními.

Pro naplnění těchto cílů musí dashboard efektivně integrovat a orchestrovat několik klíčových výpočetních modelů, které jsou podrobněji popsány v následující sekci.

4.1 Architektura a integrované modely

Koncepční architektura řešení je navržena jako vícevrstvý systém. Samotný vodíkový dashboard představuje výpočetní vrstvu s grafickým uživatelským rozhraním. Tato vrstva slouží navíc jako orchestrátor, který zajišťuje správu uživatelů, spravuje uživatelské scénáře, volá jednotlivé specializované simulační modely, předává mezi nimi data a agreguje jejich výsledky pro finální

vizualizaci. Jádrem systému je 6 samostatných, ale vzájemně provázaných matematických modelů. Klíčovým předpokladem pro jejich úspěšnou integraci je definice a striktní dodržování standardizovaných datových rozhraní (API) mezi orchestrační vrstvou a každým z výpočetních modelů.

4.1.1 Energeticko-nákladový model vozidla pro zásobování plnicích stanic (model 1)

Tento model simuluje logistickou operaci přepravy stlačeného vodíku z místa výroby nebo centrálního skladu k cílové vodíkové plnicí stanici v případě, kdy se v ostrovním řešení nepředpokládá výroba vodíku na místě, respektive v případě, kdy lokální výrobní kapacita nedostačuje. Jeho hlavním cílem je přesně kvantifikovat spotřebu energie (paliva) a související náklady spojené s dopravou definovaného množství vodíku. Model a jeho API je podrobněji popsáno v popisu výsledku TN02000007//003N-V01 tohoto dílčího projektu (Štětina a kol., 2024).

Klíčové vstupy modelu:

- *Typ přepravního vozidla:* Nákladní automobil, souprava s přívěsem, nebo souprava s návěsem. Je nutné poznamenat, že jízdní souprava s návěsem, ačkoliv má menší maximální povolenou délku (16,5 m) než souprava s přívěsem (18,75 m), umožňuje přepravit největší objem vodíku (až 1016 kg), což je klíčový parametr pro optimalizaci logistiky.
- *Typ pohonu:* Vznětový spalovací motor, bateriové elektrické vozidlo (BEV) nebo elektrické vozidlo s palivovými články (FCEV).
- *Parametry trasy:* Data trasy (tvořené sekvencí segmentů proměnné délky, převýšení, s rychlostními limity a typy komunikací) jsou převzata z mapových podkladů tzv. Vodíkové mapy, spravované CDV.
- *Množství přepravovaného vodíku:* Hmotnost nákladu, která ovlivňuje celkovou hmotnost soupravy.

Klíčové výstupy modelu:

- Celková spotřeba energie/paliva pro danou trasu.
- Celkové náklady na přepravu.

4.1.2 Digitální model prvků výroby, komprese a uskladnění vodíku (model 2)

Model slouží k detailní matematické simulaci elektrochemických a termodynamických procesů spojených s výrobou zeleného vodíku prostřednictvím elektrolýzy vody a jeho následným uskladněním. Model umožňuje uživatelům analyzovat chování celého řetězce od elektrolýzéry až po vysokotlaký sklad, přičemž integruje vědecké principy, jako jsou Faradayovy zákony, Nernstova rovnice či Butler-Volmerova rovnice. Díky modulární architektuře podporuje simulaci různých technologií (PEM, alkalické, SOEC) a je schopen dynamicky modelovat proměnlivé provozní podmínky, což je klíčové například při napájení z kolísajících obnovitelných zdrojů energie. Model a jeho API je podrobněji popsáno v popisu výsledku TN02000007//003N-V06 tohoto dílčího projektu (Novotný a kol., 2024a).

Klíčové vstupy modelu:

- *Typ elektrolyzéru:* Volba konkrétní technologie (PEM, alkalický, SOEC), která určuje specifické fyzikální vlastnosti a výpočetní algoritmy.
- *Elektrické veličiny:* Napětí (V) a proud (A) aplikované na elektrolytický článek, které přímo ovlivňují množství vyrobeného vodíku.
- *Provozní podmínky:* Teplota (°C) a tlak (atm), při kterých proces probíhá, mající vliv na rovnovážné napětí a celkovou energetickou náročnost.
- *Průtok vody:* Množství vody (l/s) dodávané do systému pro zajištění reakce a chlazení.
- *Zdroj energie:* Specifikace typu napájení (stálý, solární či větrný zdroj) pro posouzení stability a nákladů výroby a průběh dodávek v případě nestabilních zdrojů energie.
- *Pokročilá technická nastavení:* Parametry jako ohmický odpor (Ω), výměnná proudová hustota (A/cm^2) a přenosový koeficient pro přesné modelování ztrát a kinetiky reakcí.

Klíčové výstupy modelu:

- *Výroba vodíku:* Celkový objem (l) a hmotnost (kg) vyprodukovaného vodíku za definovaný čas simulace.
- *Spotřeba energie:* Celkové množství elektrické energie (kWh) spotřebované elektrolyzérem a kompresory.
- *Účinnost:* Procentuální vyjádření efektivity procesu v čase jako poměr mezi ideálním stavem a reálným provozem se zahrnutím ztrát.
- *Provozní napětí:* Skutečné napětí (V) v čase, dosahované v průběhu provozu za daných podmínek.
- *Data o kompresi a uskladnění:* Informace o aktuálním příkonu kompresoru, teplotách média během vícestupňového stlačování a aktuální kapacitě naplnění tlakových nádob.

4.1.3 Model vodíkové plnicí stanice (model 3)

Tento model simuluje energetické, provozní a ekonomické parametry vodíkové plnicí stanice (VPS) na základě definovaného profilu poptávky. Umožňuje analyzovat, jak konfigurace stanice ovlivňuje její výkon a provozní náklady. Implementace modelu poskytuje definované programové rozhraní s klíčovými funkcemi pro získání seznamu podporovaných konfigurací, jejich změnu a pro spuštění samotného výpočtu. Model a jeho API je podrobněji popsáno v popisu výsledku TN02000007//003N-V07 (Novotný a kol., 2024b).

Klíčové vstupy modelu:

- *Požadované plnicí tlaky:* 350 bar, 700 bar.
- *Profil poptávky:* Celkový denní výdej vodíku a harmonogram plnění jednotlivých vozidel (klíčový vstup z modelu 4).
- *Způsob zásobování:* Např. ze středotlakého nebo vysokotlakého zásobníku.
- *Technické parametry:* Konfigurace kompresoru a zejména rozhodnutí o nutnosti a parametrech chlazení vodíku. Rychlé plnění na 700 bar vyžaduje chlazení na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ s příkonem chladičového zařízení až 150 kW, což představuje významnou energetickou a nákladovou položku. Model musí umožnit analýzu tohoto kompromisu mezi rychlostí obsluhy a celkovou energetickou náročností stanice.

Klíčové výstupy modelu:

- Komplexní výsledky simulace zahrnující energetické, provozní a ekonomické ukazatele provozu VPS.

4.1.4 Digitální model vodíkového dopravního mikrogridu (model 4)

Tento model digitálně simuluje dopravní provoz v rámci vodíkového ostrovního řešení. Představuje softwarové zapouzdření mikro simulátoru Eclipse SUMO (Simulation of Urban Mobility) (Lopez a kol., 2018), který umožňuje provádět prostorově spojitě a časově diskrétní simulace pohybu jednotlivých vozidel v konkrétních, předem kalibrovaných lokalitách (k dispozici je např. Děčín, Poděbrady či Česká Kamenice). Model dokáže simulovat dynamické chování flotil pro široké spektrum služeb – od městské hromadné dopravy přes svoz odpadu až po logistiku retailu – a zohledňuje vzájemné interakce mezi vodíkovými a konvenčními vozidly v reálném čase. Model poskytuje detailní dopravní data, která následně slouží jako základ pro navazující výpočty energetické náročnosti, ekonomické efektivity a celkové spotřeby vodíku v daném mikrogridu. Model a jeho API je podrobněji popsáno v popisu výsledku TN02000007//003N-V03 (Hrubeš a kol., 2024).

Klíčové vstupy modelu:

- *Identifikátor dopravní sítě:* Volba konkrétní lokality z databáze předem vytvořených a kalibrovaných modelů měst, které obsahují geometrii komunikací a pravidla provozu.
- *Konfigurace dopravních služeb:* Výběr typů služeb zahrnutých do simulace (např. IZS, technické služby, individuální doprava) a definice procentuálního zastoupení vodíkových vozidel v těchto flotilách.
- *Definice tras a vozidel:* Buď interně definované trasy a jízdní řády, nebo externě zadané sekvence GPS souřadnic; model rovněž vyžaduje technické parametry vozidel (zrychlení, hmotnost, délka), pokud nejsou vybrána z předdefinované sady.
- *Časový horizont simulace:* Volba období, pro které simulace běží (typicky 24 hodin pracovního dne), s možností výběru výhledových scénářů pro roky 2030 nebo 2050.
- *Jízdní styl řidiče:* Možnost nastavení chování řidičů, které ovlivňuje dynamiku jízdy a následnou spotřebu (úsporná, normální či agresivní jízda).

Klíčové výstupy modelu:

- *Tripinfo údaje:* Podrobné záznamy o každé jednotlivé jízdě, zahrnující čas odjezdu a příjezdu, celkové trvání cesty, ujetou vzdálenost a čas strávený čekáním.
- *Telemetrická data v čase:* Sekvence pozic vozidla (x, y, z), jeho okamžitá rychlost, úhel natočení a sklon vozovky v každém kroku simulace.
- *Environmentální dopady:* Výpočet absolutního množství emisí znečišťujících látek (CO₂, NO_x, HC a prachové částice PM) vyprodukovaných celou flotilou.
- *Energetická a ekonomická bilance:* Sumarizace celkové spotřeby paliva (přepočtená na vodíkový ekvivalent) a mikroekonomické vyčíslení provozních nákladů simulovaného konceptu.

- *Charakteristiky dopravní zátěže:* Data o intenzitě dopravy a složení vozového parku na konkrétních silničních úsecích (hranách) sítě v průběhu času.

4.1.5 Matematicko-digitální modely vodíkových vozidel (model 5)

Tento model slouží k detailní simulaci provozu a spotřeby energie koncových uživatelů vodíku – tedy flotily vozidel, která jsou provozována v dopravním konceptu, modelovaném v minulém odstavci. Model a jeho API je podrobněji popsáno v popisu výsledku TN02000007//003N-V02 (Štětina a kol., 2024b).

Klíčové vstupy modelu:

- *Typy vozidel:* Parametry různých typických vodíkových vozidel – osobní automobil, autobus, lehké nákladní vozidlo, těžké nákladní vozidlo.
- Definice trasy jsou přebírány ze simulace dopravního konceptu.

Klíčové výstupy modelu:

- *Časový harmonogram a množství spotřebovaného vodíku* pro každé vodíkové vozidlo ve flotile.
- *Agregovaný profil spotřeby*, který slouží jako klíčový vstup pro model vodíkové plnicí stanice (model 3).

4.1.6 Model degradace palivových článků (model 6)

Model představuje empiricky orientovaný simulační modul, jehož cílem je kvantifikace postupného poklesu výkonu palivového článku v závislosti na reálných provozních podmínkách. Na rozdíl od fyzikálně detailních modelů je tento model založen výhradně na analýze pozorovaných provozních dat a jejich statistickém vyhodnocení, což umožňuje jeho aplikaci i v případech, kdy nejsou k dispozici detailní informace o vnitřní struktuře nebo materiálových vlastnostech článku.

Klíčové vstupy modelu:

- *Parametry palivového článku:* Celkové stáří palivového článku a jeho aktuálně dostupný výkon (kW).
- *Provozní historie:* Ujeté kilometry a doba provozu, reprezentující kumulativní míru využití palivového článku.
- *Styl jízdy:* Kategorizovaný nebo kvantifikovaný ukazatel dynamiky provozu na škále 1 až 4 (defenzivní až velmi dynamická jízda), který ovlivňuje intenzitu degradačních procesů.

Klíčové výstupy modelu:

- *Odhad míry degradace:* Kvantifikovaný pokles výkonu palivového článku v průběhu modelovaného období, vyjádřený relativně a absolutně vůči počátečnímu stavu.
- *Aktuální dostupný výkon:* Odhad maximálně dostupného výkonu palivového článku na konci simulovaného období.

Logické propojení těchto modelů, kde výstup jednoho slouží jako vstup pro druhý, přímo definuje klíčové funkční požadavky na samotný dashboard, které jsou rozebrány v následující kapitole.

4.2 Funkční požadavky

Tato kapitola transformuje popsanou architekturu a cíle do souboru konkrétních funkčních požadavků. Tyto požadavky specifikují, jaké konkrétní operace a funkce musí systém umět poskytovat uživateli, aby naplnil svůj strategický účel – tedy umožnit komplexní a systémovou analýzu vodíkových řešení.

4.2.1 Správa scénářů a konfigurací

Systém musí umožňovat uživateli vytvářet, ukládat, spravovat a znovu načítat komplexní simulační scénáře. Scénář je definován jako ucelená sada parametrů, která popisuje celé ostrovní řešení. Musí obsahovat veškeré vstupní parametry pro všechny tři integrované modely, například:

- Definice flotily (pro simulace mikrogridu v modelu 4): Počet a typy vozidel, přiřazení specifických tras nebo jízdních cyklů.
- Konfigurace VPS (pro model 3): Volba plnicích tlaků, kapacity zásobníků a technologie chlazení.
- Logistika zásobování (pro model 1): Výběr typu zásobovacího vozidla a definice trasy od zdroje vodíku k skladu vodíku a VPS.

Tato funkce je klíčová pro srovnávací analýzy, kde uživatel může snadno modifikovat jeden parametr a sledovat jeho dopad na celý systém.

4.2.2 Provedení a orchestrace simulací

Dashboard musí být schopen na pokyn uživatele spustit a řídit (orchestrovat) sekvenci simulací napříč integrovanými modely. Logický sled operací musí odpovídat reálným závislostem v systému:

1. *Generování poptávky:* Spuštění modelu 4 (Digitální model vodíkového dopravního mikrogridu) pro nasimulování provozu definované flotily. Výstupem jsou podklady pro model 5 (vodíková vozidla) a detailní časový profil poptávky po vodíku během dne.
2. *Simulace provozu VPS:* Automatické předání vygenerovaného profilu poptávky jako vstupu do modelu 3 (Model vodíkové plnicí stanice) a spuštění jeho simulace. Výstupem jsou energetické a provozní parametry stanice.
3. *Simulace logistiky:* Na základě agregovaných výstupů z modelu 2 (především z celkového denního výdeje vodíku) se po zohlednění lokální výroby vodíku určí požadovaná frekvence a objem zásobovacích jízd. S těmito parametry se následně spouští model 1 (Energeticko-nákladový model vozidla pro zásobování) pro přesnou kvantifikaci nákladů a energetické náročnosti logistiky.
4. *Stárnutí vodíkových článků:* Na základě simulace provozu z modelu 4 lze modelem 6 vyhodnotit namáhání palivových článků vozidel a modelovat jejich stárnutí v čase. Lze tak vyhodnotit dobu, po kterou bude článek možné aktivně využívat.

4.2.3 Vizualizace a agregace výsledků

Klíčovou funkcí dashboardu je agregovat a prezentovat výsledky ze všech tří simulací v přehledné a srozumitelné formě. Uživatel nesmí být zahlcen surovými daty, ale musí dostat jasné vizuální podklady pro rozhodování. Požadavky zahrnují:

- *Grafické výstupy:* Zobrazení kumulativních i okamžitých spotřeb energie, paliva a nákladů v čase.
- *Souhrnné tabulky:* Prezentace klíčových výkonnostních ukazatelů (KPI) pro celý systém, včetně systémových metrik, které lze spočítat pouze kombinací dat ze všech modelů, jako jsou:
 - Celkové náklady na ujetý kilometr koncové flotily (včetně amortizovaných nákladů na logistiku a provoz VPS).
 - Celková energetická účinnost řetězce "well-to-wheel" v rámci ostrovního řešení.
- *Mapové podklady:* Vizualizace tras jak pro koncová vozidla, tak pro zásobovací logistiku.
- *Srovnávací pohledy:* Možnost zobrazit výsledky dvou a více scénářů vedle sebe pro snadné porovnání.

4.2.4 Uživatelské rozhraní (UI)

Uživatelské rozhraní musí být navrženo jako intuitivní, interaktivní a plně webové. Na základě analýzy GUI dílčích modelů musí jednotné rozhraní dashboardu umožňovat:

- Snadný výběr a konfiguraci parametrů (např. výběr vozidel a tras z předdefinovaných seznamů).
- Přehlednou navigaci mezi správou scénářů, spouštěním simulací a vizualizací výsledků.
- Responzivní design, který zajistí konzistentní a efektivní práci na různých zařízeních bez nutnosti instalace jakéhokoliv softwaru.

Praktické uplatnění těchto funkčních požadavků bude nyní ilustrováno na konkrétních případech užití.

5 Klíčové případy užití (Use Cases)

Případy užití demonstrují, jak budou definované funkční požadavky aplikovány v praxi k řešení reálných analytických a plánovacích úloh. Tyto scénáře popisují typické interakce uživatele s dashboardem a ilustrují jeho přínos pro strategické rozhodování.

5.1 Plánování přechodu městské autobusové dopravy na vodík

Cíl: Městský dopravní podnik chce analyzovat techno-ekonomickou proveditelnost a provozní dopady nahrazení flotily 20 dieselových autobusů novými vodíkovými autobusy typu Hyundai ELEC CITY. Cílem je zjistit celkové denní provozní náklady a požadavky na infrastrukturu.

Kroky v dashboardu:

A. Uživatel vytvoří nový scénář s názvem „MHD vodíkové autobusy“.

B. Dopravní poptávka

1. V sekci simulace dopravního konceptu (model 4) ověří definici vozidel typu „Autobus“ zda odpovídá danému uvažovanému typu (pokud již není v definici vozidel přímo uveden) a zvolí jej pro další práci
2. V sekci simulace dopravního konceptu vybere z nabízených lokalit takovou, která velikostí přibližně odpovídá uvažovanému městu
3. Přiřadí typickou denní linku (délku trasy a frekvenci obsluhy) podle svého záměru.
4. Spustí simulaci flotily, čímž získá přesný harmonogram a objem poptávky po vodíku během 24 hodin.

C. Plnění vodíkem: V sekci VPS (model 3) nakonfiguruje plnicí stanici tak, aby dokázala obsloužit tuto poptávku (např. plnění na 350 bar, dostatečná kapacita pro plnění a podobně).

D. Výroba vodíku: V sekci výroba vodíku (model 2) nastaví typ elektrolyzáru a jeho základní parametry, včetně zdroje energie, jeho volba může ovlivnit množství dodávané elektrické energie, a tedy i množství vyrobeného vodíku. Spustí simulaci výrobního procesu, která určí, zda je elektrolyzáru s danými parametry schopen poskytnout požadované množství vodíku v požadovaném čase.

E. Dovoz vodíku

Pokud výroba nepostačuje a není možno ji zvýšit, v parametrech modelu 1 pro logistiku vybere typ dopravního vozidla (například „Nákladní automobil s návěsem“ pro maximální objem H₂). Nastaví frekvenci zásobování tak, aby celková bilance vodíku v ostrovním řešení nebyla záporná a pomocí vodíkové mapy CDV definuje trasu z nejbližšího produkčního centra.

F. Skladování vodíku

1. Modul skladování vodíku (část modelu 2) přebírá hmotnosti skladovaného vodíku z modulu výroby vodíku i z modulu zásobování. Dále přebírá harmonogram denních odběrů z modulu VPS.
2. Uživatel zde definuje parametry skladu a kompresního systému.

3. Po spuštění simulace modul vyhodnotí, zda je pro daný požadavek výdeje vodíku schopen sklad fungovat a jakou lze očekávat energetickou náročnost pro uskladnění.

G. Shrnutí celého scénáře:

1. Celý scénář je potom shrnut ve formě přehledné tabulky a grafů, udávajících rozpad pořizovacích a provozních nákladů a energetickou náročnost celého konceptu.

Očekávaný výstup: Dashboard poskytne souhrnný report obsahující, mimo jiné:

- Celkovou denní spotřebu vodíku (v kg) a elektrické energie (v kWh) pro celou flotilu a VPS.
- Celkové denní náklady na provoz (náklady na vodík + náklady na logistiku).
- Klíčové požadavky na kapacitu VPS (např. potřebný výkon kompresoru, velikost zásobníků).
- Požadovanou frekvenci a objem zásobovacích jízd.

5.2 Srovnávací analýza logistiky zásobování

Cíl: Provozovatel plnicí stanice potřebuje rozhodnout, zda je pro zásobování na trase dlouhé 150 km nákladově efektivnější využít standardní nákladní automobil, nebo investovat do větší soupravy s návěsem.

Kroky v dashboardu:

- A. Deaktivace zbytných modelů:** Uživatel na dashboardu deaktivuje všechny moduly kromě modulu Zásobování.
- B. Základní scénář:**
 1. Uživatel vytvoří nový scénář s názvem „Logistika – Standard“.
 2. V parametrech modelu 1 pro logistiku vybere jako typ vozidla „Nákladní automobil“
 3. Definuje trasu z požadovaného distribučního centra
 4. Nastaví frekvenci zásobování tak, aby celková hmotnost přepravovaného vodíku odpovídala požadované hmotnosti.
 5. Provede simulaci vodíkového mikrogridu, která bude v tomto případě zahrnovat pouze zásobování vodíkem.
- C. Alternativní scénář**
 1. Uživatel duplikuje scénář „Logistika – Standard“ jako „Logistika – Návěs“.
 2. V parametrech modelu 1 změní typ vozidla na „Nákladní automobil s návěsem“, případně upraví jeho parametry. Všechny ostatní parametry zůstanou identické.
 3. Provede druhou simulaci vodíkového mikrogridu, která bude v tomto případě zahrnovat pouze zásobování vodíkem. Výsledky simulace se uloží do aktivního scénáře.
- D. Porovnání scénářů:** Uživatel v uživatelském rozhraní dashboardu vybere možnost porovnat scénáře a porovná obě varianty z technického i ekonomického hlediska.

Očekávaný výstup: Přímý srovnávací pohled, který poskytne jasný podklad pro investiční rozhodnutí. Dashboard přehledně zobrazí tabulku nebo graf, kde budou vedle sebe porovnány klíčové ukazatele pro obě varianty:

- Náklady na palivo/energii na jednu jízdu.
- Jednotkové náklady na 1 kg dopraveného vodíku (Kč/kg).
- Počet jízd potřebných k pokrytí měsíční poptávky.
- Celkové měsíční náklady na logistiku.



Tyto případy užití pokrývají hlavní zamýšlené způsoby využití dashboardu a tvoří praktický základ pro jeho detailní technický návrh a implementaci.

6 Rizika spojená s tvorbou a provozem podpůrného softwarového nástroje

Identifikace a správné řízení rizik jsou klíčové pro úspěšnou realizaci a dlouhodobou udržitelnost takto komplexního a ambiciózního softwarového projektu. Analýza odhalila několik významných rizikových oblastí.

6.1 Technologická a modelová komplexita

Nejvýznamnější riziko spočívá ve složitosti integrace heterogenních modelů. Software musí propojit fyzikální modely popisující dynamiku vozidla, termodynamické procesy v plnicí stanici a logistické plánování tras s ekonomickými výpočty. Tento úkol vyžaduje úzkou spolupráci a hluboké expertní znalosti z více odlišných vědních a technických oborů.

6.2 Kalibrace a validace modelů

Přesnost a důvěryhodnost softwaru je přímo úměrná kvalitě dat použitých pro jeho kalibraci. Největší výzvou je získání dostatečného množství dat z reálného provozu vodíkových technologií. Jak bylo zmíněno, dlouhodobá provozní data pro většinu typů vodíkových vozidel a plnicích stanic jsou buď nedostupná, nebo neveřejná. Bez těchto dat je validace modelů a ověření přesnosti simulací mimořádně obtížné.

6.3 Proměnné ekonomické faktory

Ekonomická část modelu je z podstaty vystavena vysoké míře nejistoty. Výsledky ekonomických analýz mohou být významně ovlivněny faktory, které jsou mimo kontrolu projektu. Mezi tyto faktory patří zejména vysoká volatilita budoucí ceny zeleného vodíku, nepředvídatelný vývoj pořizovacích nákladů vozidel a technologií, a neustále se měnící legislativní rámec a dotační podmínky na národní i evropské úrovni.

6.4 Riziko zastarávání modelů a parametrů

Vodíkové technologie se nacházejí ve fázi rychlého vývoje. Model, který dnes přesně popisuje parametry dostupného vozidla nebo komponenty plnicí stanice (s technickou či morální životností 10–12 let), může být za několik let zastaralý. Aby si software udržel relevanci, musí být navržen jako vysoce modulární a snadno aktualizovatelný systém, který umožní průběžné doplňování databází o nové technologie a parametry.

Vědomé řízení těchto rizik prostřednictvím modulární architektury a systematického sběru dat bude předpokladem pro úspěšnou realizaci projektu. I přes uvedené výzvy má vyvíjený software potenciál stát se klíčovým nástrojem pro strategické plánování, optimalizaci investic do vodíkové mobility a snižování jejich rizik. Může tak významně přispět k akceleraci přechodu na bezemisní dopravu v České republice i v širším regionálním měřítku.

7 Popis SW

Předkládaný podpůrný softwarový nástroj je koncipován jako centralizovaný webový dashboard, jehož primárním účelem je sloužit jako analytická a simulační platforma pro metodiku rozvoje ostrovních vodíkových řešení. Strategický význam tohoto nástroje spočívá v jeho schopnosti integrovat komplexní vědecko-technické výpočty do přehledného a interaktivního uživatelského prostředí. Zvolené návrhové principy – především modularita, standardizovaná konektivita a flexibilní datové struktury – jsou klíčové pro dosažení hlavních cílů projektu: vytvoření udržitelného, rozšiřitelného a uživatelsky přívětivého systému pro podporu rozhodování v oblasti vodíkové mobility.

7.1 Klíčové principy

Základním stavebním kamenem softwaru je modularita. Tento přístup byl zvolen jako strategická nutnost pro úspěšnou integraci technologicky odlišných a nezávisle vyvíjených vědeckých modelů. Záměrně odděluje jednotlivé výpočetní modely, jako je energeticko-nákladový model vozidla nebo model vodíkové plnicí stanice, do samostatných, nezávislých komponent. Tato architektura přináší zásadní výhody:

- *Technologická flexibilita:* Umožňuje bezproblémovou integraci modelů vytvořených v různých programovacích jazycích a prostředích, jako jsou Python (např. pro model vodíkové plnicí stanice) nebo Matlab (energeticko-nákladový model vozidla od VUT).
- *Budoucí rozšiřitelnost:* Nové simulační modely nebo datové zdroje lze do systému přidávat jako další moduly bez nutnosti zasahovat do stávajícího jádra aplikace.
- *Snadná údržba a udržitelnost:* Dílčí komponenty mohou být aktualizovány nebo nahrazeny nezávisle na zbytku systému, což výrazně zjednodušuje správu a prodlužuje životní cyklus celého řešení.

Díky modularitě se systém stává flexibilní platformou schopnou adaptace na budoucí vývoj technologií a rozšiřování analytických potřeb.

7.2 Datové struktury a výstupy

Pro efektivní uchovávání stavu, vstupních parametrů a výsledků simulací nástroj využívá přehledné a osvědčené datové struktury. Jedná se primárně o:

- *Datové objekty (dataclasses):* Slouží k definici strukturovaných datových objektů, jejichž hlavním účelem je uchovávat data, nikoli implementovat složitou logiku. Díky jejich použití můžeme snadno formalizovat a validovat vstupy i výstupy jednotlivých komponent dashboardu a snadno je použít i v dalších nástrojích celého ekosystému.
- *Slovníkové struktury (dictionary-like structures):* Ideální pro reprezentaci komplexních, hierarchicky členěných vstupních parametrů, předávaných v neutrální formě textových JSON řetězců mezi komponentami aplikace.
- *Numerické vektory a matice:* Používají se pro efektivní zpracování a ukládání časových řad (např. profily jízdních cyklů vodíkových vozidel nebo profily výroby obnovitelné energie) a vícerozměrných dat, jako jsou motorové mapy (např. výkonnostní mapy motorů vozidel).

Tyto struktury umožňují efektivně reprezentovat široké spektrum energetických, provozních a ekonomických výsledků simulací. Pro další zpracování, reporting nebo offline analýzu je zajištěna možnost exportu výstupních dat do standardizovaných formátů CSV a JSON.

7.3 Konektivita a integrace

Komunikace mezi jednotlivými softwarovými komponentami je zajištěna prostřednictvím moderního a standardizovaného aplikačního programovacího rozhraní (API).

- *REST/OpenAPI*: Pro komunikaci mezi webovým dashboardem (front-end) a výpočetními komponentami (back-end) je využíváno rozhraní typu REST, definované podle specifikace OpenAPI. Praktická implementace rozhraní definuje klíčové funkce pro spuštění dílčích výpočtů nebo pro načtení dostupných konfigurací.
- *Propojení s externími službami Vodíkové mapy ČR*: Klíčovou součástí systému je nutnost propojení s externím mapovým modulem, konkrétně s Vodíkovou mapou České republiky (<https://h2mapa.cdv.cz/>) vytvořenou Centrem dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV, 2023). Tento modul poskytuje data nezbytná pro výpočet zásobovacích tras, což je jedna z hlavních funkcí celého nástroje.

Tento koncepční rámec je realizován prostřednictvím pečlivě navržené vícevrstvé systémové architektury.

7.4 Architektura systému

Softwarový nástroj je postaven na moderní vícevrstvé architektuře, která logicky odděluje jednotlivé funkční celky systému. Tato struktura byla zvolena s ohledem na zajištění vysoké míry škálovatelnosti, bezpečnosti a snadné údržby. Oddělení zodpovědností mezi jednotlivými vrstvami bylo navíc strategickou odpovědí na potřebu integrace heterogenních vědeckých modelů vyvíjených nezávislými týmy v různých technologiích (Python, Matlab). Architektura se skládá z uživatelského rozhraní, komunikačního jádra, výpočetního jádra a datové vrstvy.

7.4.1 Uživatelské rozhraní (Front-end)

Uživatelské rozhraní je realizováno jako on-line webový dashboard, který je přístupný prostřednictvím standardního webového prohlížeče. Pro jeho implementaci byl zvolen moderní technologický stack HTML, React a TypeScript: Kombinace těchto technologií umožňuje vytvořit dynamické, plně interaktivní a uživatelsky přívětivé prostředí. React zajišťuje efektivní práci s komponentami a stavem aplikace, zatímco TypeScript přidává typovou bezpečnost a zlepšuje robustnost a udržitelnost kódu. Uživatelé tak mohou intuitivně zadávat vstupní parametry, konfigurovat simulační scénáře a přehledně vizualizovat výsledky.

Zdrojový kód front-endu je kompilován a spravován pomocí standardního nástroje npm.

7.4.2 Komunikační jádro (Middleware)

Komunikační jádro plní roli prostředníka mezi uživatelským rozhraním a samotnými výpočetními moduly. Zajišťuje zpracování požadavků od uživatelů, jejich předání příslušným výpočetním modelům a následné doručení výsledků zpět do dashboardu.

- *Technologie na straně klienta:* V prohlížeči je pro komunikaci s API využíván JavaScript a standardní komunikační knihovny pro obsluhu HTTP požadavků.
- *Technologie na straně serveru:* Serverová část je postavena na jazyce Python s využitím minimalistického webového frameworku Flask. Flask slouží k obsluze REST/OpenAPI rozhraní, přijímá požadavky z front-endu, volá příslušné výpočetní skripty a formátuje jejich výstupy do odpovědí API.

7.4.3 Výpočetní jádro (Back-end)

Výpočetní jádro je tvořeno souborem samostatných, specializovaných a vědecky podložených modelů, které provádějí samotné simulace. Jádro je tvořeno modely, vytvořenými v rámci dílčích výstupů projektu odevzdávaných v letech 2024–2025.

V souladu s principem modularity je jádro technologicky heterogenní. Primárně se využívá Python (např. pro model vodíkové plnicí stanice), ale specializované modely, jsou implementovány v prostředí Matlab a zpřístupněny přes dedikované rozhraní. Právě tato různorodost podtrhuje význam zvolené architektury s REST/OpenAPI komunikací, umožňující bezproblémovou integraci těchto odlišných technologií.

7.4.4 Datová vrstva

Datová vrstva má v rámci architektury na starosti persistentní (trvalé) ukládání dat. Její zodpovědností je správa konfiguračních dat, uživatelem zadaných vstupních parametrů pro jednotlivé simulace a také ukládání výsledků těchto simulací pro pozdější analýzu, srovnání nebo export.

Z hlediska technické realizace je datová vrstva postavena na relační databázi, která slouží jako centrální úložiště persistentních dat dashboardu. Relační schéma je navrženo tak, aby oddělovalo stabilní referenční data (např. katalogy vozidel, základní technologické konfigurace a metadata modelů) od dynamických dat vznikajících při práci uživatele (uživatelské scénáře, vstupní parametry výpočtů, stavové informace a výsledky simulací). Tento přístup umožňuje konzistentní správu dat, jejich verzování a dlouhodobou udržitelnost struktury databáze i při postupném rozšiřování funkcionality nástroje.

Specifickým rysem datové vrstvy je práce se strukturovanými daty ve formátu JSON, která jsou využívána zejména pro ukládání vstupních parametrů simulovaných scénářů a výstupů jednotlivých výpočetních modulů. Tento způsob ukládání umožňuje flexibilně zachytit heterogenní datové struktury pocházející z různých dílčích modelů DP003N bez nutnosti častých zásahů do databázového schématu. Datová vrstva tak kombinuje výhody relačního přístupu (integrita, vazby, dotazovatelnost) s výhodami schémově volnějším datovým strukturám.

Datová vrstva je přístupná výhradně prostřednictvím aplikační vrstvy (API) a není přímo vystavena uživatelskému rozhraní. Tento princip zajišťuje konzistenci dat, centralizovanou validaci vstupů a kontrolu přístupových práv. Současně vytváří předpoklady pro budoucí rozšíření nástroje, například o pokročilejší analytické funkce, dlouhodobé ukládání historických scénářů nebo napojení na externí analytické a reportovací nástroje.

7.5 Funkční požadavky

Tato sekce popisuje klíčové schopnosti a funkce, které musí dashboard poskytovat koncovému uživateli, aby plnohodnotně naplnil svůj cíl jako efektivní podpůrný nástroj pro strategické plánování a analýzu v oblasti vodíkové mobility. Funkce jsou navrženy s důrazem na intuitivní ovládání a maximální přínos pro rozhodovací procesy.

Níže jsou uvedeny klíčové funkční požadavky na dashboard z pohledu uživatele:

7.5.1 FR01: Správa simulačních scénářů

Uživatel musí mít možnost snadno vytvářet, ukládat a spravovat různé konfigurační scénáře. To zahrnuje definici různých typů vozidel (osobní, nákladní, autobusy) a detailní nastavení parametrů plnicích stanic, jako jsou potřebné plnicí tlaky (350 bar, 700 bar), typ stanice (podniková/veřejná) nebo způsob zajištění vodíku (středotlaký zásobník, vysokotlaký zásobník, vlastní výroba).

7.5.2 FR02: Interaktivní zadávání vstupů

Nástroj musí poskytovat intuitivní grafické rozhraní pro zadávání a modifikaci všech vstupních parametrů pro jednotlivé modely. Tím se eliminuje nutnost manuální úpravy konfiguračních souborů a zpřístupňuje se nástroj i méně technicky zdatným uživatelům.

7.5.3 FR03: Spouštění a monitoring simulací

Dashboard musí obsahovat funkce pro spuštění výpočtů na základě zvoleného scénáře. Uživatel by měl mít možnost sledovat stav a průběh probíhajících simulací.

7.5.4 FR04: Vizualizace výsledků

Jednou z klíčových funkcí je schopnost přehledně vizualizovat výstupní data. To zahrnuje zobrazení energetických, provozních a ekonomických parametrů pomocí interaktivních grafů (např. kumulativní spotřeba paliva/vodíku v závislosti na čase nebo okamžitý potřebný výkon pohonu), tabulek a mapových podkladů.

7.5.5 FR05: Integrace s mapovými podklady

Nástroj musí umožňovat plánování a optimalizaci zásobovacích tras. Tato funkcionality je realizována napojením na vodíkovou mapu, která poskytuje simulačním modelům klíčové vstupní údaje o trase, jako jsou Délka úseku [m], Maximální povolená rychlost [km/h], Kumulativní stoupání [m] a Typ vozovky.

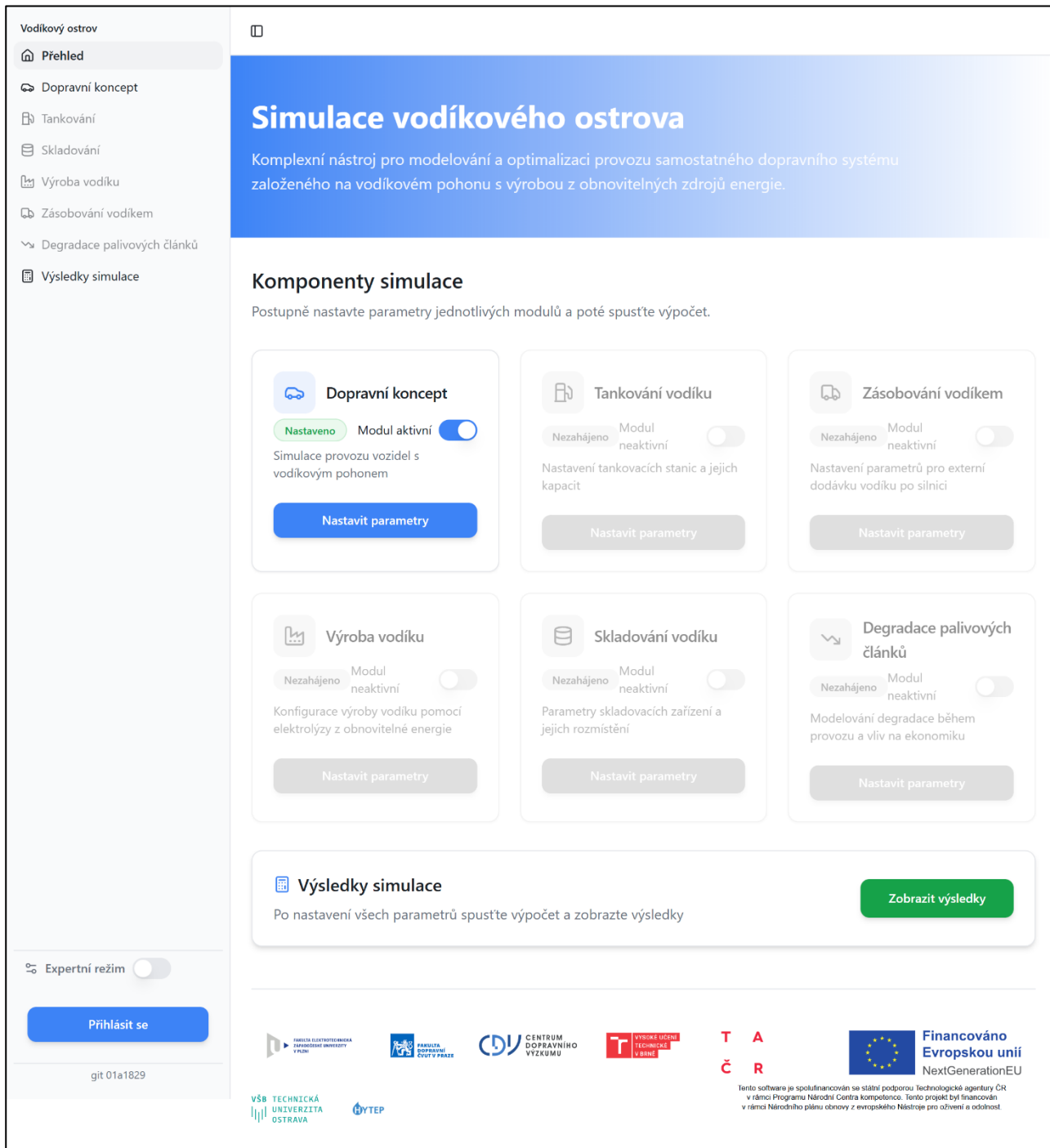
7.5.6 FR06: Export dat

Uživatel musí mít možnost exportovat výsledky simulací do standardizovaných datových formátů CSV a JSON. Tím je zajištěna možnost jejich dalšího zpracování v externích nástrojích, využití pro reporting nebo hlubší off-line analýzu.

7.6 Uživatelské rozhraní a ovládání aplikace

Uživatelské rozhraní podpůrného softwarového nástroje je realizováno jako webová aplikace dostupná na adrese <https://nahyc.fd.cvut.cz/> respektive <https://nahyc.fel.zcu.cz/> (viz Obr. 1).

Aplikace je navržena pro provoz v běžných moderních internetových prohlížečích a nevyžaduje instalaci žádného specializovaného softwaru na straně uživatele. Tento přístup zajišťuje snadnou dostupnost nástroje, možnost jeho využití napříč různými platformami a současně umožňuje průběžný rozvoj a aktualizaci funkcionality bez zásahu do uživatelského prostředí.



Vodíkový ostrov

- Přehled
- Dopravní koncept
- Tankování
- Skladování
- Výroba vodíku
- Zásobování vodíkem
- Degradace palivových článků
- Výsledky simulace

Simulace vodíkového ostrova

Komplexní nástroj pro modelování a optimalizaci provozu samostatného dopravního systému založeného na vodíkovém pohonu s výrobou z obnovitelných zdrojů energie.

Komponenty simulace

Postupně nastavte parametry jednotlivých modulů a poté spusťte výpočet.

Dopravní koncept

Nastaveno Modul aktivní ☒

Simulace provozu vozidel s vodíkovým pohonem

Nastavit parametry

Tankování vodíku

Nezahájeno Modul neaktivní ☐

Nastavení tankovacích stanic a jejich kapacit

Nastavit parametry

Zásobování vodíkem

Nezahájeno Modul neaktivní ☐

Nastavení parametrů pro externí dodávku vodíku po silnici

Nastavit parametry

Výroba vodíku

Nezahájeno Modul neaktivní ☐

Konfigurace výroby vodíku pomocí elektrolýzy z obnovitelné energie

Nastavit parametry

Skladování vodíku

Nezahájeno Modul neaktivní ☐

Parametry skladovacích zařízení a jejich rozmístění

Nastavit parametry

Degradace palivových článků

Nezahájeno Modul neaktivní ☐

Modelování degradace během provozu a vliv na ekonomiku

Nastavit parametry

Výsledky simulace

Po nastavení všech parametrů spusťte výpočet a zobrazte výsledky

Zobrazit výsledky

Expertní režim ☐

Přihlásit se

git 01a1829

VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA BYTPE KATEDRA ELEKTROTECHNIKY PRAHA KATEDRA DOPRAVNÍHO SYSTÉMU V PRAZE CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU VÝZKUMNÝ ÚSTAV ŽELEZNÍ DOPRAVY TČR

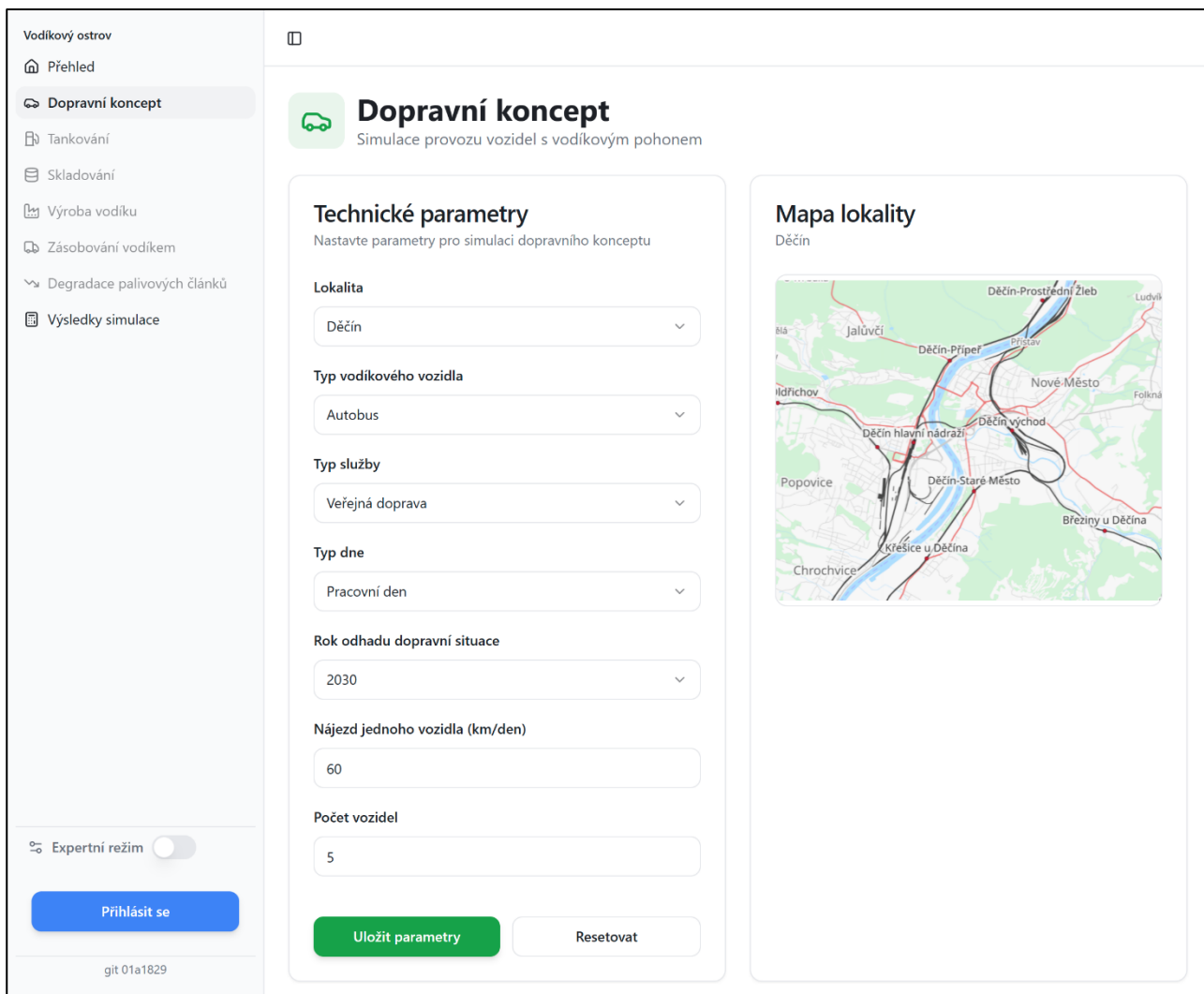
Financováno Evropskou unií NextGenerationEU

Tento software je spolufinancován ze státní podpory Technologické agentury ČR v rámci Programu Národního centra kompetencí. Tento projekt byl financován v rámci Národního plánu obnovy z evropského Nástroje pro udržitelnou a odolnost.

OBRÁZEK 1: HLAVNÍ PRACOVNÍ OBRAZOVKA WEBOVÉ APLIKACE PODPŮRNÉHO SOFTWARE

Uživatelské rozhraní plní roli integrační vrstvy nad jednotlivými výpočetními a datovými komponentami. Je koncipováno jako řídicí a prezentační rozhraní, které uživateli umožňuje postupně definovat vstupní scénáře, spouštět výpočty, sledovat jejich průběh a interpretovat výsledky v jednotném prostředí. Logika rozhraní vychází z typického pracovního postupu při návrhu a hodnocení ostrovních vodíkových řešení a je strukturována do několika navazujících kroků.

Po vstupu do aplikace je uživateli zpřístupněno hlavní pracovní rozhraní, které umožňuje po přihlášení založení nového výpočetního scénáře nebo práci s již existujícím scénářem. V rámci konfigurace scénáře přihlášený uživatel postupně zadává nebo volí vstupní parametry související s řešeným vodíkovým konceptem. Jedná se zejména o volbu relevantních dílčích modelů, základní provozní charakteristiky, parametry dopravy vodíku, výroby, skladování a spotřeby, případně vazby na geoprostorová data prostřednictvím mapové služby.



Vodíkový ostrov

- Přehled
- Dopravní koncept**
- Tankování
- Skladování
- Výroba vodíku
- Zásobování vodíkem
- Degradace palivových článků
- Výsledky simulace

Dopravní koncept
Simulace provozu vozidel s vodíkovým pohonem

Technické parametry
Nastavte parametry pro simulaci dopravního konceptu

Lokalita
Děčín

Typ vodíkového vozidla
Autobus

Typ služby
Veřejná doprava

Typ dne
Pracovní den

Rok odhadu dopravní situace
2030

Nájezd jednoho vozidla (km/den)
60

Počet vozidel
5

Mapa lokality
Děčín

Mapa lokality zobrazuje mapu Děčína s vyznačenými místy: Děčín-Prostřední Záb, Děčín-Přípeř, Děčín hlavní nádraží, Děčín východ, Děčín-Staré Město, Křešice u Děčína, Chrochvice, Popovice, Jalůvčí, Nové Město, Folkná, Breziny u Děčína, Ludvík, a Bla. Mapa ukazuje i silnice a železnici.

☐ Expertní režim

Přihlásit se

git 01a1829

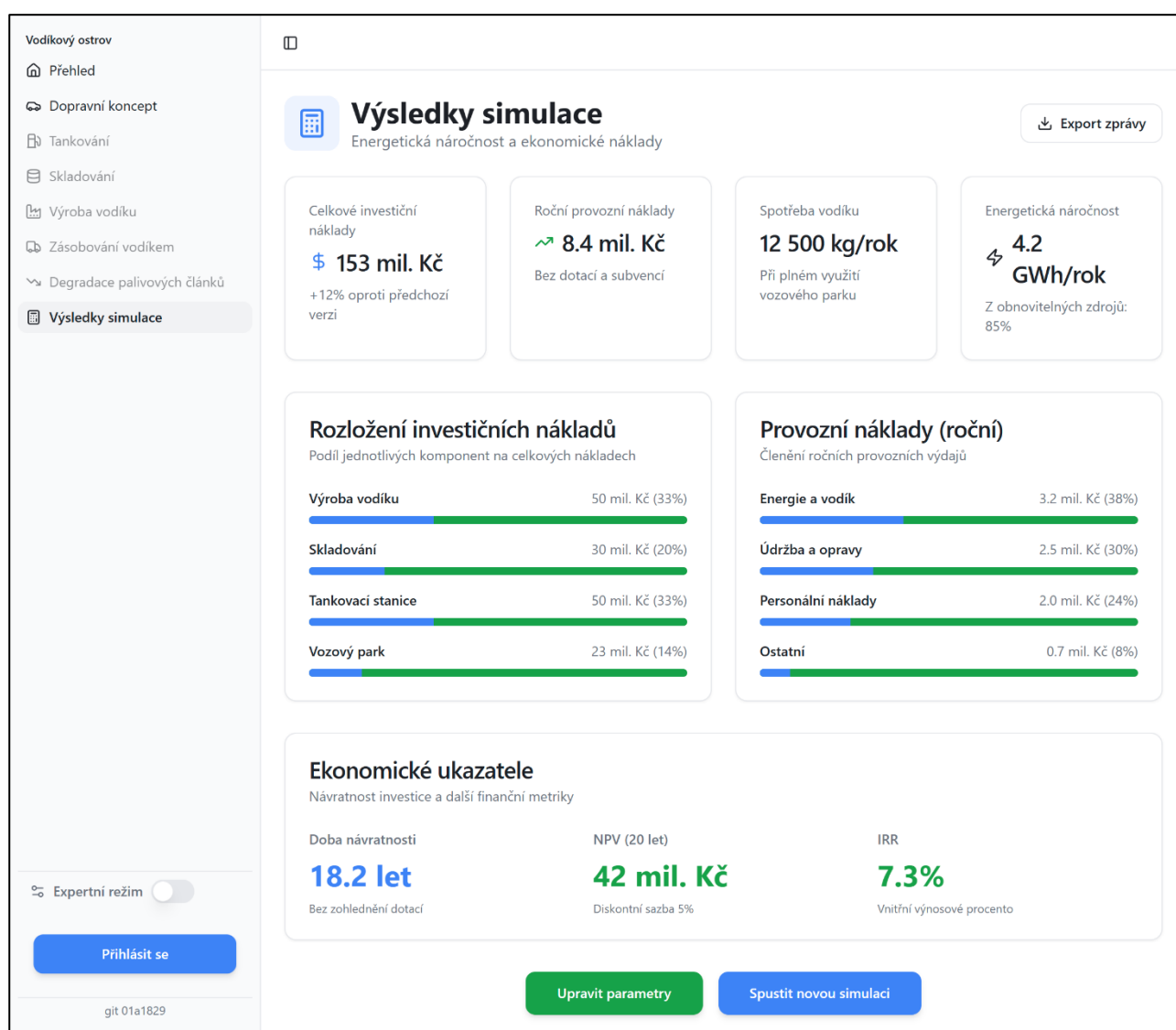
Uložit parametry **Resetovat**

OBRÁZEK 2: UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ PRO KONFIGURACI VSTUPNÍCH PARAMETRŮ VÝPOČETNÍHO SCÉNÁŘE

Zadávání vstupních dat je realizováno pomocí přehledných formulářových prvků (výběrová pole, číselné vstupy, přepínače), které jsou navrženy tak, aby minimalizovaly možnost chybného zadání,

viz Obr. 2. Uživatelské rozhraní průběžně provádí základní kontrolu formální správnosti vstupních hodnot a jejich vzájemné konzistence. V případech, kde to odpovídá charakteru modelu, jsou uživateli nabídnuty předdefinované hodnoty nebo typické rozsahy parametrů vycházející z podkladů a výsledků dílčích projektů DP001 a DP003N.

Po dokončení konfigurace scénáře uživatel iniciuje výpočet prostřednictvím rozhraní aplikace. Samotný výpočet probíhá na serverové straně a uživatelské rozhraní v této fázi zajišťuje informování o stavu výpočtu. Po jeho dokončení jsou výsledky prezentovány přímo v aplikaci formou strukturovaných výstupů (viz Obr. 3). Tyto výstupy zahrnují zejména přehledové tabulky, grafická znázornění klíčových energetických, provozních a ekonomických veličin a souhrnné indikátory umožňující rychlé porovnání jednotlivých variant řešení.



OBRÁZEK 3: PŘÍKLAD VIZUALIZACE VÝSLEDKŮ VÝPOČETNÍHO SCÉNÁŘE V UŽIVATELSKÉM ROZHRAŇÍ APLIKACE

Celkové ovládání aplikace je navrženo tak, aby bylo srozumitelné i pro uživatele bez detailní znalosti vnitřní struktury jednotlivých výpočetních modelů, přičemž současně umožňuje pokročilým uživatelům detailní parametrizaci a cílenou práci s jednotlivými komponentami.

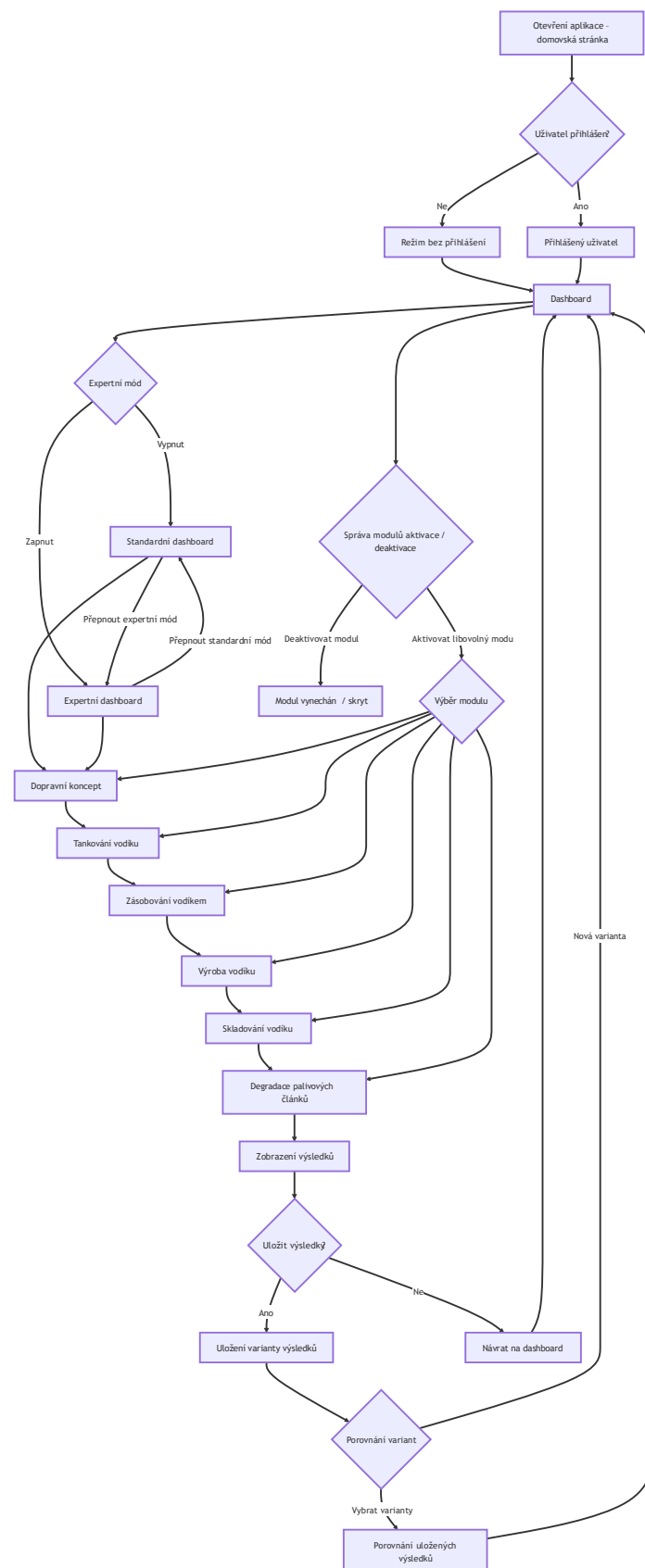
7.7 Programátorská dokumentace

Programátorská dokumentace k výsledku V05 „Podpůrný softwarový nástroj pro metodiku rozvoje ostrovních vodíkových řešení“ slouží jako systematický popis vnitřní struktury aplikace, jejích hlavních softwarových komponent a vzájemných vazeb mezi prezentační (dashboardovou) a aplikační (API) vrstvou. V rámci této technické zprávy ji shrnujeme pouze na úrovni základního přehledu struktury a klíčových částí kódu. Podrobné popisy modulů, datových struktur, aplikačních rozhraní, pracovních toků a rozhraní k externím službám jsou součástí samostatné vývojové dokumentace, jež je součástí příloh k tomuto dokumentu.

7.7.1 Vývojový diagram práce s dashboardem

Vývojový diagram na Obr. 4 znázorňuje logický tok simulace. Ten zahrnuje:

1. **Volitelné přihlášení uživatele:** Nepřihlášení uživatelé nemohou ukládat výsledky a výsledky navzájem porovnávat různé varianty realizace.
2. **Použití jednotlivých modulů:** Lze samostatně i v sekvenci
 - a. **Inicializace parametrů modulu:** Načtení vstupních dat zadaných uživatelem a kontrola jejich validity.
 - b. **Simulační smyčku nebo smyčky:** Iterativní výpočty klíčových modelů v rámci modulů „Dopravní koncept“, „Tankování vodíku“, „Výroba vodíku“, „Zásobování vodíkem“, „Skládování vodíku“ a „Degradace palivových článků“.
 - c. **Přehled dílčích výsledků:** Každý modul dodává výsledky, jež mohou být použity jako vstupní parametry dalších modulů
3. **Vizualizaci celkových výsledků:** Shrnutí výsledků ve formě grafů a tabulek s možností exportu a komparativní analýzy.
4. **Ukončení simulace:** Uložení výsledků a jejich připravení pro export nebo další analýzu v externích nástrojích.



OBRÁZEK 4: VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRÁCE S DASHBOARDEM

7.7.2 Struktura a klíčové části kódu

Předkládaný výsledek je koncipován jako dvouvrstvá aplikace, tvořená (i) webovým vodíkovým dashboardem určeným pro interakci s uživatelem a (ii) navázaným funkčním aplikačním rozhraním (API), které zajišťuje výpočetní a integrační funkce. Architektura je navržena modulárně tak, aby umožňovala postupné rozšiřování o další modely a snadnou integraci s externími službami.

Vodíkový dashboard (webová aplikace)

Dashboard představuje prezentační a integrační vrstvu celého nástroje. Je realizován jako webová aplikace s důrazem na přehlednost, scénářový způsob práce a oddělení uživatelské logiky od výpočetního jádra.

Klíčové části kódu dashboardu zahrnují následující komponenty:

- *Prezentační vrstvu (frontend)*: komponenty uživatelského rozhraní zajišťující zadávání vstupních parametrů scénáře, volbu modelovaných technologií (výroba, doprava, skladování, spotřeba) a vizualizaci výsledků ve formě grafů, tabulek a souhrnných indikátorů.
- *Řídící logiku scénářů*: kód zodpovědný za sestavení výpočetního scénáře, validaci vstupů a orchestraci jednotlivých kroků výpočtu (sekvence volání dílčích modelů).
- *Datovou vrstvu dashboardu*: struktury pro dočasné uchovávání vstupních dat, mezivýsledků a výstupů simulací, včetně podpory jejich opakovaného zobrazení a exportu.
- *Komunikační adaptér*: část kódu zajišťující komunikaci s backendovým API a s externí mapovou službou, včetně předávání parametrů tras a vozidel.

Funkční API (middleware vrstva)

Aplikační rozhraní tvoří výpočetní a integrační jádro tohoto výsledku. Je navrženo jako sada jednoznačně definovaných služeb, dostupných prostřednictvím REST rozhraní, a odděluje vlastní implementaci modelů od uživatelského rozhraní.

Klíčové části kódu API zahrnují:

- *Rozhraní služeb (endpointy)*: definice API metod pro spouštění výpočtů (např. energetická a ekonomická náročnost tras, spotřeba vodíku, provozní bilance), pro poskytování katalogových dat (vozidla, technologie) a pro návrat strukturovaných výsledků.
- *Integrační logiku modelů*: kód zajišťující napojení na jednotlivé dílčí modely vzniklé v rámci DP003N (vozidla, doprava, mikrogrid, výroba a plnění vodíku) a jejich koordinované vyhodnocení v rámci jednoho scénáře.
- *Datové struktury a formáty*: jednotné interní reprezentace vstupů a výstupů (typicky strukturovaná data ve formátu JSON), umožňující snadné rozšíření o další parametry bez zásahu do rozhraní.
- *Bezpečnostní a provozní mechanismy*: základní kontrola konzistence dat, časových razítek a oprávnění volání v případě integrace s externími aplikacemi.

Vazba dashboardu a API

Dashboard a API jsou navrženy jako logicky oddělené, avšak těsně provázané komponenty. Dashboard funguje jako klient API a neobsahuje vlastní výpočetní modely; veškeré numerické a simulační výpočty probíhají na základě pokynů API voláním vlastního výpočetního back-endu z middleware. Tento přístup zvyšuje přehlednost a udržitelnost kódu, umožňuje nezávislý vývoj uživatelského rozhraní a výpočetních modelů a vytváří předpoklad pro budoucí využití API i mimo vlastní dashboard (např. externí aplikace, mapové nástroje CDV, analytické platformy projektových partnerů).

8 Popis ověření funkčnosti SW

Ověření funkčnosti podpůrného softwarového nástroje bylo zaměřeno na prověření správné činnosti webového dashboardu jako integrační a aplikační vrstvy nad výpočetními modely vyvinutými v rámci dílčího projektu DP003N. Testování se nesoustředilo na verifikaci samotných fyzikálních a matematických modelů jednotlivých komponent vodíkového ostrova, které jsou ověřovány samostatně v rámci příslušných pracovních balíčků, ale na ověření jejich správné integrace, dostupnosti prostřednictvím aplikačních rozhraní a korektního chování celého systému z pohledu uživatele.

Ověření funkčnosti bylo rozděleno do tří hlavních oblastí: technická validace platformy, testování uživatelského rozhraní a ověření práce s daty včetně jejich exportu a přenositelnosti do externích nástrojů.

8.1 Technická validace

Technická validace byla zaměřena na ověření stability, robustnosti a provozní spolehlivosti dashboardu jako webové aplikace, která zprostředkovává výpočty realizované externími modely a službami. Vzhledem k charakteru softwaru jako integrační vrstvy byly hlavními ověřovanými aspekty zejména komunikace mezi komponentami, chování při nestandardních stavech a výkonnostní charakteristiky.

V rámci technické validace byly provedeny následující typy testů:

- **Testy komunikace s výpočetními komponentami.** Byla ověřena správná funkce REST/OpenAPI rozhraní pro volání jednotlivých modelů, včetně správného předávání vstupních parametrů, přijímání výsledků a jejich mapování do interních datových struktur dashboardu. Testování zahrnovalo jak synchronní volání výpočetních služeb, tak scénáře s delší dobou výpočtu.
- **Testy odolnosti vůči chybovým stavům.** Bylo ověřeno chování aplikace při nedostupnosti externí výpočetní služby, při neúplných nebo nekonzistentních vstupních datech a při přerušení síťové komunikace. Dashboard v těchto případech poskytuje uživateli jednoznačnou informaci o stavu výpočtu a nedochází k nekontrolovanému pádu aplikace ani ke ztrátě uživatelského kontextu.
- **Zátěžové a výkonové testy.** Byla sledována odezva systému při opakovaném spouštění výpočtů, při práci s větším množstvím simulačních scénářů a při souběžném využití více uživateli. Testy potvrdily, že architektura aplikace je schopna zvládat typické scénáře využití odpovídající předpokládanému nasazení nástroje v analytické a plánovací praxi.
- **Testy dlouhodobého běhu.** Dashboard byl provozován v režimu dlouhodobého běhu s opakovanými výpočty a ukládáním výsledků. Nebyly pozorovány úniky paměti ani degradace výkonu, které by omezovaly praktické využití nástroje.

8.2 Testování uživatelského rozhraní

Testování uživatelského rozhraní bylo zaměřeno na ověření použitelnosti dashboardu z pohledu cílových skupin uživatelů, zejména analytiků, projektantů a odborných pracovníků veřejné správy.

Cílem nebylo provádět formální uživatelské studie, ale ověřit, že rozhraní umožňuje efektivní práci s nástrojem bez nutnosti detailní znalosti vnitřní struktury modelů.

Testování zahrnovalo zejména:

- **Ověření intuitivnosti ovládání.** Byla posuzována srozumitelnost struktury aplikace, logika kroků při zadávání vstupních parametrů a čitelnost prezentovaných výsledků. Testy probíhaly na základě předem definovaných scénářů (např. návrh ostrovního řešení s lokální výrobou vodíku, posouzení variant zásobování, změna parametrů infrastruktury).
- **Testování typických uživatelských scénářů (use cases).** Byly ověřeny kompletní pracovní postupy od zadání vstupních dat přes spuštění výpočtu až po interpretaci výsledků. Důraz byl kladen na plynulost přechodů mezi jednotlivými částmi dashboardu a na jednoznačnou vazbu mezi vstupy a odpovídajícími výstupy.
- **Responzivita a dostupnost rozhraní.** Dashboard byl testován na různých typech zařízení a velikostech obrazovky. Byla ověřena korektní funkce rozhraní v běžných webových prohlížečích a zachování čitelnosti a funkčnosti ovládacích prvků při změně rozlišení.
- **Srozumitelnost výstupů.** Byla posuzována přehlednost grafů, tabulek a dalších vizualizačních prvků, zejména z hlediska podpory rozhodování a porovnávání variantních scénářů.

8.3 Integrace dat a export

Ověření integrace dat a exportních funkcí bylo zaměřeno na schopnost dashboardu efektivně pracovat s daty v průběhu celého životního cyklu simulačního scénáře – od zadání vstupů až po předání výsledků do dalších analytických nástrojů.

Testování zahrnovalo následující oblasti:

- **Import uživatelských vstupních dat.** Byla ověřena možnost zadávání a opakovaného využití vstupních parametrů pro výrobu energie, spotřebu vodíku a konfiguraci infrastruktury. Dashboard umožňuje konzistentní práci s těmito daty napříč jednotlivými výpočty a scénáři.
- **Správa simulačních scénářů.** Byla testována funkčnost ukládání, načítání a opakovaného vyhodnocování simulačních scénářů. Ověření potvrdilo, že uživatel může pracovat s více variantami řešení a systematicky je porovnávat.
- **Export výsledků.** Byla ověřena správná funkce exportu výstupních dat do běžně používaných formátů (zejména CSV a strukturované datové formáty), které umožňují další zpracování výsledků v externích aplikacích, jako jsou tabulkové procesory nebo výpočetní a simulační nástroje (např. MS Excel, MATLAB).
- **Přenositelnost dat.** Testy potvrdily, že exportovaná data jsou jednoznačně strukturovaná, dokumentovatelná a přenositelná do dalších nástrojů bez nutnosti dodatečných úprav, což podporuje využití dashboardu jako součásti širšího analytického ekosystému.

9 Umístění SW

Podpůrný softwarový nástroj pro metodiku rozvoje ostrovních vodíkových řešení je zpřístupněn uživatelům formou webové aplikace provozované jako centrální služba. Zvolený způsob distribuce reflektuje charakter výsledku, jeho roli v rámci softwarového ekosystému DP003N i cílové skupiny uživatelů, mezi které patří odborná veřejnost, akademické instituce, zástupci veřejné správy a v omezené míře také průmysloví partneři.

Webová forma umožňuje okamžitý přístup k nástroji bez nutnosti lokální instalace specializovaného softwaru, zajišťuje jednotné výpočetní prostředí pro všechny uživatele a zároveň usnadňuje průběžnou aktualizaci jednotlivých modelů i uživatelského rozhraní. Tento přístup je zvláště důležitý vzhledem k tomu, že dashboard plní roli integrační vrstvy nad dílčími modely vznikajícími v rámci DP003N, které se v průběhu řešení projektu dále vyvíjejí a zpřesňují.

Aplikace je dostupná v základním režimu bez nutnosti registrace, což umožňuje její využití pro demonstrační, edukační a orientační analytické účely. Volitelná registrace uživatele rozšiřuje funkcionalitu nástroje, zejména o možnost ukládání a opakovaného načítání dříve vytvořených scénářů a výpočtů. Tento mechanismus zároveň vytváří technický předpoklad pro případné budoucí rozšíření služby o pokročilejší funkce, například podporu dlouhodobých studií, rozšířené exporty dat nebo specializované analytické nástroje, aniž by to bylo nezbytné pro základní využití výsledku.

Zdrojový kód softwaru není veřejně distribuován a je spravován v interním repozitáři řešitelského týmu. Tento přístup byl zvolen s ohledem na povahu výsledku jako služby (Software as a Service), na potřebu zachovat konzistenci implementovaných modelů a na ochranu know-how vzniklého v rámci projektu. Software jako celek není šířen formou licencovaného balíčku; jeho využití je realizováno výhradně prostřednictvím provozované webové služby. Tento model odpovídá zamýšlenému aplikačnímu scénáři výsledku, kdy je kladen důraz na metodickou podporu rozhodování a na jednotné používání validovaných modelů, nikoliv na distribuci samostatného softwarového produktu.

Takto zvolené umístění a způsob zpřístupnění softwaru podporují dlouhodobou udržitelnost výsledku, jeho další rozvoj a možnost integrace do širších informačních systémů, a zároveň minimalizují bariéry jeho praktického využití v kontextu metodiky rozvoje ostrovních vodíkových řešení.

10 Způsob využití

Podpůrný nástroj pro metodiku rozvoje ostrovních vodíkových řešení je v rámci ekosystému NAHYC-m koncipován jako integrační a prezentační vrstva nad souborem dílčích matematických a simulačních modelů vzniklých v projektu DP003N. Nástroj plní funkci jednotného vstupního bodu, který propojuje modely výroby vodíku, jeho komprese a skladování, přepravy, plnicí infrastruktury, vodíkových vozidel a dopravních mikrogridů.

Z architektonického hlediska je dashboard navržen jako modulární webová aplikace, která komunikuje s jednotlivými výpočetními jádry prostřednictvím standardizovaných rozhraní (REST/OpenAPI). Tím je zajištěna jednak znovupoužitelnost jednotlivých modelů mimo samotný dashboard, jednak možnost jejich postupného rozšiřování či nahrazování bez zásahu do uživatelské vrstvy. Výsledek tak neplní roli „monolitického“ nástroje, ale spíše koordinační platformy, umožňující syntézu výstupů různých odborných domén do jednoho konzistentního analytického rámce.

10.1 Využití v akademickém prostředí

V akademickém prostředí lze nástroj využít především jako výukovou a výzkumnou platformu. Pro výuku umožňuje demonstraci komplexních vazeb mezi jednotlivými částmi vodíkového řetězce (výroba – distribuce – spotřeba) na realistických scénářích ostrovních řešení. Studenti technických i ekonomických oborů mohou pracovat s parametrickými studiemi, porovnávat varianty technického návrhu a hodnotit jejich energetické, environmentální a ekonomické dopady.

Ve výzkumu slouží nástroj jako experimentální prostředí pro scénářové analýzy, citlivostní studie a ověřování hypotéz týkajících se chování vodíkových systémů v podmínkách omezené infrastruktury. Díky otevřené architektuře je možné nástroj využít i jako integrační rámec pro nové výzkumné modely vyvíjené mimo původní projekt DP003N, například v navazujících doktorských či aplikačních projektech.

10.2 Využití ve státní správě a samosprávě

Pro orgány státní správy a samosprávy představuje výsledek podpůrný analytický nástroj pro strategické a koncepční rozhodování. Nástroj umožňuje hodnotit vhodnost nasazení ostrovních vodíkových řešení v konkrétních lokalitách, a to s ohledem na místní dopravní poptávku, dostupnost obnovitelných zdrojů energie, prostorová omezení i ekonomické aspekty.

Využití je relevantní zejména při přípravě strategických dokumentů (např. regionální energetické koncepce, plány udržitelné mobility, akční plány dekarbonizace) a při posuzování investičních záměrů podporovaných z veřejných zdrojů. Dashboard umožňuje transparentní porovnání variant a poskytuje kvantifikované podklady pro rozhodování, aniž by vyžadoval detailní znalost jednotlivých fyzikálních modelů na straně uživatele.

10.3 Využití v průmyslovém prostředí

V průmyslovém prostředí je nástroj využitelný jako předprojektový a koncepční analytický nástroj. Provozovatelé energetických zařízení, logistické společnosti, výrobci technologií či integrátoři systémů jej mohou využít k rychlému posouzení proveditelnosti vodíkových ostrovních řešení, dimenzování klíčových komponent a identifikaci kritických míst návrhu.

Významnou přidanou hodnotou je možnost propojení technických výstupů s ekonomickými ukazateli, což umožňuje posuzovat nejen technickou funkčnost, ale i rámcovou ekonomickou udržitelnost navrhovaných řešení. Nástroj může sloužit jako komunikační most mezi technickými týmy, managementem a externími partnery, případně jako podpůrný nástroj při přípravě nabídek a projektové dokumentace v raných fázích projektů.

10.4 Možnosti další integrace do nadřazených systémů

Díky důrazu na otevřená rozhraní a jasně definovanou architekturu je podpůrný nástroj připraven k integraci do širších informačních a rozhodovacích systémů. Možná je zejména:

- integrace do energetických a dopravních digitálních dvojčat měst a regionů,
- napojení na GIS a mapové služby pro pokročilé prostorové analýzy,
- propojení se systémy pro plánování infrastruktury a investic ve veřejném sektoru,
- integrace do podnikových analytických platforem (např. pro hodnocení CAPEX/OPEX scénářů).

Výsledek „Podpůrný nástroj pro metodiku rozvoje ostrovních vodíkových řešení“ je koncipován nikoli jako izolovaný software, ale jako otevřený stavební prvek širšího ekosystému digitálních nástrojů podporujících rozvoj vodíkových technologií v technické, institucionální i aplikační praxi.

11 Seznam příloh

11.1 Uživatelská příručka případně manuál

Uživatelská příručka je také dostupná on-line na adrese:

https://www.cistadoprava.cz/files/NAHYC_DP003N-V5-Uzivatelaska_prirucka.pdf

11.2 Videosoubor se záznamem funkčnosti

Videozáznam použití aplikace je dostupný také on-line na adrese:

https://www.cistadoprava.cz/files/NAHYC_DP003N-V5-Podpurny_SW.mp4

12 Seznam obrázků

Obrázek 1: Hlavní pracovní obrazovka webové aplikace podpůrného softwarového nástroje	28
Obrázek 2: Uživatelské rozhraní pro konfiguraci vstupních parametrů výpočetního scénáře.....	29
Obrázek 3: Příklad vizualizace výsledků výpočetního scénáře v uživatelském rozhraní aplikace	30
Obrázek 4: Vývojový diagram práce s Dashboardem	32

13 Reference

Argonne National Laboratory (2022). Hydrogen Delivery Scenario Analysis Model (HDSAM), version 4.0. Dostupné z <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hdsam>.

Bush, B., Penev M., Melaina M., Zuboy J. (2017). Hydrogen Financial Analysis Scenario Tool (H2FAST). Spreadsheet Tool User's Manual. National Renewable Energy Lab. (NREL), USA.

Centrum dopravního výzkumu v. v. i. (2023). Vodíková mapa ČR [online]. Brno: CDV. Dostupné z <https://www.cistadoprava.cz/mapy/h2/>.

Elgowainy, A., Reddi, K., & Brown, D. (2015). Hydrogen Delivery Scenario Analysis Model (HDSAM), V3.0.

Elgowainy, A., Reddi K., Brown D., Rustagi N., Ringer M., Mintz M. (2017) Hydrogen refueling station analysis model (HRSAM). Argonne National Laboratory. Dostupné z: <https://hdsam.es.anl.gov/> (cit. 20.12.2025).

Elgowainy, A., Reddi K., Brown D., Rustagi N., Ringer M., Mintz M. (2015) Hydrogen delivery scenario analysis model (HDSAM). Argonne National Laboratory.

Hrubeš P., Koleník V., Novotný, S., Bouchner P., Přikryl J., Vahalík B. (2024) Digitální model vodíkového dopravního mikrogridu. Software. České vysoké učení technické v Praze.

Lopez, P. A., Behrisch M., Bieker-Walz L., Erdmann J., Flötteröd Y.-P., Hilbrich R., Lücken L., Rummel J., Wagner P., Wießner E. (2018). Microscopic traffic simulation using sumo. In *21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC)*, pp. 2575-2582. IEEE.

National Renewable Energy Laboratory & UL Solutions, 2024. HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) – software pro modelování mikrogridů [software]. HOMER Energy. Dostupné z: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html> (cit. 20.12.2025).

Novotný, S., Bouchner P., Přikryl J., Vahalík B. (2024a) Digitální model prvků výroby, komprese a uskladnění vodíku. Software. České vysoké učení technické v Praze.

Novotný, S., Bouchner P., Přikryl J., Vahalík B. (2024b) Digitální model prvků plnicí infrastruktury. Software. České vysoké učení technické v Praze.

OECD (2015) *Frascati manuál 2015: Doporučená praxe pro sběr a vykazování údajů o výzkumu a vývoji* [metodika]. Česká verze dostupná na webu Technologické agentury ČR. Dostupné z: <https://tacr.gov.cz/dokumenty/frascati-manual> (cit. 26. 1. 2026).

Penev, M., Saur G., Hunter C., Zuboy J. (2018) H2A: Hydrogen production model: Version 3.2018 user guide. Uživatelská příručka. US Department of Energy.

Sandia National Laboratories. (2025). Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) [software]. Sandia Energy, Sustainable Transportation, Hydrogen Safety, Codes and Standards Program. Dostupné z <https://energy.sandia.gov/programs/sustainable-transportation/hydrogen/hydrogen-safety-codes-and-standards/hyram/> (cit. 20.12.2025).

Štětina, J., Charvát P., Zálešák M., Přikryl J., Vahalík B. (2024a) Energeticko-nákladový model vozidla pro zásobování plnicích stanic. Software. Vysoké učení technické v Brně.

Štětina, J., Charvát P., Zálešák M., Přikryl J., Vahalík B. (2024b) Matematicko-digitální modely vodíkových vozidel. Software. Vysoké učení technické v Brně.

Technologická agentura České republiky (2025) MET-12: Specifikace požadavků poskytovatele na výsledky výzkumu, vývoje a inovací (verze 3) [metodika]. Praha:TAČR. Dostupné z: <https://tacr.gov.cz/aktualizace-met-12-nova-pravidla-pro-vysledky-vyzkumu-a-vyvoje/> (cit. 21.12.2025)