

Felhasználói Kézikönyv

Zöld Hidrogén a Villamosenergia-rendszerben

Üzleti modell

Tartalomjegyzék

A modell célja és áttekintése	3
A modell felhasználói felülete.....	4
A modell felépítése és működése	5
Hidrogén előállítási modellrész.....	6
Hidrogén tárolási modellrész.....	8
Hidrogén tüzelőanyag-cellás villamos energia előállítási modellrész.....	9
100% hidrogén üzemű gázturbinás villamos energia előállítási modellrész	11
Teljes folyamatra vonatkozó műszaki eredmények.....	12
Gazdasági modellrész.....	12
A modellezhető forgatókönyvek összefoglalása.....	14
A modell használata	15
Az eredmények értelmezése, a modell korlátai	16
Bővítési lehetőségek	17
Rövidítések, kifejezések jegyzéke	18

A modell célja és áttekintése

A Zöld Hidrogén a Villamosenergia-rendszerben elnevezésű üzleti modell célja a hidrogén mint megújuló villamos energia tároló eszköz magas szintű műszaki és gazdasági modellezése. A modell lehetővé teszi a hidrogén alapú villamosenergia-tárolási projektek műszaki hatékonyságának, valamint beruházási és működési költségeinek elemzését, továbbá a visszanyerhető zöld energia mennyiségének és önköltségének számítását. A modell a teljes értékláncra kiterjed, magában foglalja a zöld hidrogén előállítását és az ehhez szükséges villamos energia megtermelését, a hidrogén tárolását, valamint visszaalakítását villamos energiává. Az egyes értéklánc elemek mentén lehetőséget ad a releváns technológiai megoldások közötti választásra, továbbá több hidrogén alkalmazási forgatókönyvet is vizsgál, így módon lehetőséget teremt a zöld energia tárolási projektek széles skálájának elemzésére. A modell elsődlegesen azon felhasználók számára készült, akik a zöld hidrogén alapú villamosenergia-tárolás hatékonyságát és megvalósíthatóságát vizsgálják, ehhez kapcsolódóan különböző villamosenergia-tárolási és -termelési forgatókönyveket elemeznek, össze kívánják hasonlítani az elérhető technológiai megoldásokat, illetve demonstrációs vagy pilot projektek előkészítésével foglalkoznak, esetleg saját villamos energia igényeik fedezését célzó beruházás indításához készítenek előzetes megvalósíthatósági tanulmányt.

A modell a zöld villamos energia hidrogén alapú tárolásának három alapvető forgatókönyvét elemzi. Mindegyik esetében a hidrogén előállítása közvetlenül kapcsolódó PV erőművel, a napelemes termelésnek megfelelően történik, a felhasználása során pedig adott időszakon belül egyenletesen kerül sor a villamos energia termelésére.

1. **A napon belüli forgatókönyv célja éjszakai zöld áram biztosítása.** Ehhez a nap folyamán előállított hidrogén, maximum néhány órás tárolást követően, még aznap este visszaalakításra kerül, ezáltal egyenletes éjszakai zöld áramot biztosítva.
2. **A napok közötti forgatókönyv célja zöld áram biztosítása a megújuló energiatermelés szempontjából kedvezőtlen időjárású napokon.** Ehhez a hidrogén előállítása folyamatosan zajlik, viszont felhasználása csak szakaszosan, néhány napos időközönként valósul meg. Az addig megtermelt mennyiség, maximum néhány napos tárolást követően, egy teljes nap folyamán kerül visszaalakításra, így módon egyenletes egész napos zöld áramot biztosítva.
3. **A szezonális forgatókönyv célja zöld áram biztosítása az alacsony megújuló energiatermeléssel jellemezhető téli időszakban.** Ehhez a hidrogén előállítása az április elejétől szeptember végéig tartó időszakban folyamatosan történik, a felhasználására pedig október elejétől március végéig kerül sor. A megtermelt mennyiség visszaalakítására, több hónapos tárolást követően, a felhasználási időszakban folyamatosan és egyenletesen kerül sor, ezáltal egész napos zöld áramot biztosítva.

A zöld hidrogén előállítása elektrolizálóval történik, melyhez a villamos energiát PV erőmű biztosítja. A hidrogén tárolása a napon belüli és a napok közötti forgatókönyvek esetén sűrített gáz formájában, nyomástartó edény alkalmazásával valósul meg, míg a szezonális forgatókönyv esetén kimerült szénhidrogén mezőben történő geológiai tárolásra kerül sor. A hidrogén visszaalakítása villamos energiává tüzelőanyag-cellával és 100% hidrogén üzemanyagú gázturbina alkalmazásával történik.

A modell bemeneti adatait az értékláncban alkalmazott technológiák, illetve azok műszaki és gazdasági paraméterei adják. A vezérlő paraméterek az elektrolizáló technológiája és kapacitása, a naperőmű kapacitása, valamint a tüzelőanyag-cella technológiája. A műszaki és gazdasági számításokhoz szükséges többi bemeneti adat premissza formájában adott. A modell eredményei tároláshoz és villamosenergia-termeléshez szükséges elemek méretezése, az előállított hidrogén és a megtermelhető villamos energia mennyisége, a projekt megvalósításához szükséges beruházási és

üzemeltetési költségek, valamint a teljes átalakítási folyamat hatékonysága és a termelt villamos energia önköltsége.

Az üzleti modell Excelben készült.

A modell felhasználói felülete

A modell egészét (premissák és input adatok, vezérlés, műszaki és gazdasági modellrészek, eredmények) egyetlen Excel fájl tartalmazza, melynek különböző munkalapjain találhatóak a modell egyes részei, moduljai. Az egyes munkalapokat és tartalmukat a következő fejezet részletezi.

A modellezéshez használt input paraméterek beállítása a „Vezérlő” munkalapon tehető meg. A vezérelhető input cellákat sárga háttérszín jelöli. Megadható a hidrogén előállításához használt naperőmű és elektrolizáló kapacitása, valamint kiválasztható az elektrolizáló és a tüzelőanyag-cella technológiája. A vezérlő inputok és a beállított premissák alapján a modell automatikusan számítja a vizsgált forgatókönyvek mentén a tároló, a tüzelőanyag-cella és a gázturbina kapacitását, így ezek közvetlenül nem vezérelhetők.

Műszaki input paraméterek			
Villamosenergia-termelés			
Megújuló energia termelés módja	PV		
Kapacitás	MW _{AC}	20	
Degradáció	% / év	0,56%	
Hidrogén előállítás			
Elektrolizáló típusa			
Kapacitás	PEM elektrolizáló	MW	10
Minimális teljesítmény	%		5%
H ₂ előállítás energiája	kWh / kg H ₂		55
Degradáció	% / év		1%
Hidrogén tárolás			
Rövid távú tárolási megoldás		Sűrített (nyomástartó edény)	
Minimum tárolási igény	%	10%	
Tárolási veszteség	%	0,0%	
Energetikai hatékonyság	LHV %-a	95%	
Hosszú távú tárolási megoldás		Kimerült szénhidrogén mező	
Minimum tárolási igény	%	20%	
Tárolási veszteség	%	2%	
Energetikai hatékonyság	LHV %-a	80%	
VE előállítás hidrogénből			
Villamosenergia előállítás típusa		PEM TC	
VE előállítás H ₂ igénye	kg H ₂ / kWh		0,06
TC villamos energia igénye	kWh / kg H ₂		0,1
Degradáció	% / év		1%
Villamosenergia előállítás típusa		Gázturbina - 100% H ₂	
Gázturbina hatásfoka	%		45%
Input gáz H ₂ aránya	%		100%
GT villamos energia igénye	kWh / kg H ₂		0,03

A modell vezérlő felülete

A modell eredményeinek részletezését a „Vezérlő” munkalap tartalmazza. Ezen minden, a modell által kalkulált műszaki és pénzügyi eredmény megtalálható, a vizsgált forgatókönyvek mentén. Az eredmények és vezérlő inputok együttes megtekinthetősége támogatja az elemzett konstrukció finomhangolását és az egyes forgatókönyvek részletes összehasonlítását.

Műszaki eredmények			Napok közötti H ₂ tárolás			Szezonális H ₂ tárolás		
Napon belüli H ₂ tárolás			Napok közötti H ₂ tárolás			Szezonális H ₂ tárolás		
Hidrogén előállítás és tárolás			Hidrogén előállítás és tárolás			Hidrogén előállítás és tárolás		
Villamosenergia-termelés			Villamosenergia-termelés			Villamosenergia-termelés		
Éves VE termelés	MWh	27 640	Éves VE termelés	MWh	27 640	Éves VE termelés	MWh	27 640
H ₂ előállításra fordított VE	MWh	23 653	H ₂ előállításra fordított VE	MWh	23 653	H ₂ előállításra fordított VE	MWh	16 335
Hasznosított PV termelés	%	86%	Hasznosított PV termelés	%	86%	Hasznosított PV termelés	%	59%
Nem hasznosított VE	MWh	3 988	Nem hasznosított VE	MWh	3 988	Nem hasznosított VE	MWh	11 305
Hidrogén előállítás			Hidrogén előállítás			Hidrogén előállítás		
Éves H ₂ előállítás	kg	430 047	Éves H ₂ előállítás	kg	430 047	Éves H ₂ előállítás	kg	297 006
Elektrolizáló kihasználtsága	%	27%	Elektrolizáló kihasználtsága	%	27%	Elektrolizáló kihasználtsága	%	19%
Hidrogén tárolás			Hidrogén tárolás			Hidrogén tárolás		
Tárolási igény (effektív kapacitás)	kg	1 979	Tárolási igény (effektív kapacitás)	kg	5 752	Tárolási igény (effektív kapacitás)	kg	297 006
Szükséges tároló kapacitás	kg	2 198	Szükséges tároló kapacitás	kg	6 391	Szükséges tároló kapacitás	kg	371 258
Tárolás energiaigénye	MWh	716	Tárolás energiaigénye	MWh	716	Tárolás energiaigénye	MWh	1 978
Tárolási veszteség	kg	0	Tárolási veszteség	kg	0	Tárolási veszteség	kg	5 940
VE előállítás tüzelőanyag-cella alkalmazásával			VE előállítás tüzelőanyag-cella alkalmazásával			VE előállítás tüzelőanyag-cella alkalmazásával		
VE előállítás hidrogénből			VE előállítás hidrogénből			VE előállítás hidrogénből		

Részlet a modell műszaki eredményeket részletező felületéről

Pénzügyi eredmények											
Napon belüli H2 tárolás				Napok közötti H2 tárolás				Szezonális H2 tárolás			
VE előállítás tüzelőanyag-cella alkalmazásával											
CAPEX	EUR	55 697 618		CAPEX	EUR	51 501 060		CAPEX	EUR	44 489 076	
PV	EUR	20 000 000		PV	EUR	20 000 000		PV	EUR	20 000 000	
Elektrolizáló	EUR	18 000 000		Elektrolizáló	EUR	18 000 000		Elektrolizáló	EUR	18 000 000	
Tároló	EUR	1 209 154		Tároló	EUR	3 515 069		Tároló	EUR	3 712 577	
Tüzelőanyag-cella	EUR	16 488 464		Tüzelőanyag-cella	EUR	9 985 991		Tüzelőanyag-cella	EUR	2 776 500	
OPEX az első évben	EUR	1 069 998		OPEX az első évben	EUR	997 597		OPEX az első évben	EUR	858 344	
PV	EUR	350 000		PV	EUR	350 000		PV	EUR	350 000	
Elektrolizáló	EUR	360 000		Elektrolizáló	EUR	360 000		Elektrolizáló	EUR	360 000	
Tároló	EUR	30 229		Tároló	EUR	87 877		Tároló	EUR	92 814	
Tüzelőanyag-cella	EUR	329 769		Tüzelőanyag-cella	EUR	199 720		Tüzelőanyag-cella	EUR	55 530	
Előállított villamos energia ára				Előállított villamos energia ára				Előállított villamos energia ára			
Tüzelőanyag-cellával termelt VE	EUR / MWh	909		Tüzelőanyag-cellával termelt VE	EUR / MWh	830		Tüzelőanyag-cellával termelt VE	EUR / MWh	1 027	
VE előállítás gázturbina alkalmazásával											
CAPEX	EUR	45 732 056		CAPEX	EUR	45 465 567		CAPEX	EUR	42 810 971	

Részlet a modell pénzügyi eredményeket részletező felületéről

A modell felépítése és működése

A modell egészét egyetlen Excel fájl tartalmazza, melynek munkalapjain a következő modulok (adatok, inputok, kalkulációk, eredmények) találhatók:

Munkalap	Tartalom
Vezérlő	Vezérlő inputok Beállított inputokhoz kapcsolódó premisszák Részletes műszaki eredmények Részletes gazdasági eredmények
Eredmények	Vezetői összefoglaló a műszaki eredményekről Vezetői összefoglaló a gazdasági eredményekről
H2 előállítás	H2 előállítási modellrész , órás bontás: - PV alapú villamosenergia-termelési görbe (premissza) - Termelt villamos energia mennyisége - Előállított H2 mennyisége Kalkulációkhoz szükséges premisszák a „Vezérlő” munkalapról
H2 tárolás	H2 tárolási modellrész , órás bontás, vizsgált forgatókönyvenként: - Betárolt H2 - H2 igény - Kitárolt H2 - Tárolás vesztesége - Tárolás villamos energia igénye Kalkulációkhoz szükséges premisszák a „Vezérlő” munkalapról
TC modell	Tüzelőanyag-cellás H2 felhasználási modellrész , napi bontás, vizsgált forgatókönyvenként: - H2 felhasználás - Termelt villamos energia - Tüzelőanyag-cella villamos energia igénye - Tüzelőanyag-cella működési óraszám - Tüzelőanyag-cella szükséges kapacitása Kalkulációkhoz szükséges premisszák a „Vezérlő” munkalapról

GT modell	100% H2 üzemű gázturbinás H2 felhasználási modellrész , napi bontás, vizsgált forgatókönyvenként: ▪ H2 felhasználás ▪ Termelt villamos energia ▪ Gázturbina villamos energia igénye ▪ Gázturbina működési órászáma ▪ Gázturbina szükséges kapacitása Kalkulációkhoz szükséges premisszák a „Vezérlő” munkalapról
Gazdasági modell	Gazdasági modellrész , éves bontásban, a működés 10 éves időtartamára vonatkozóan, vizsgált forgatókönyvenként: ▪ CAPEX ▪ OPEX az első évben és az üzleti modellezés időtartam alatt (10 év működés) ▪ Előállított villamos energia költsége Kalkulációkhoz szükséges premisszák a „Pénzügyi premisszák” munkalapról
Műszaki premisszák	H2 mennyiségi és energetikai jellemzői közötti átváltási arányok Technológiai opciók műszaki premisszái: ▪ PV ▪ Elektrolizáló (PEM, alkáli) ▪ Tároló (nyomástartó tartály, kimerült szénhidrogén mező) ▪ Tüzelőanyag-cella (PEM, szilárd-oxidos, olvadék-karbonátos) ▪ Gázturbina (100% H2 üzem)
Pénzügyi premisszák	Gazdasági modellezés időszaka Makrogazdasági premisszák: ▪ Infláció ▪ Árfolyamok (EUR/HUF, USD/HUF) Technológiai opciók pénzügyi premisszái – OPEX és CAPEX: ▪ PV ▪ Elektrolizáló (PEM, alkáli) ▪ Tároló (nyomástartó tartály, kimerült szénhidrogén mező) ▪ Tüzelőanyag-cella (PEM, szilárd-oxidos, olvadék-karbonátos) ▪ Gázturbina (100% H2 üzem)

Hidrogén előállítási modellrész

A hidrogén előállítási modellrész („H2 előállítás” munkalap) célja a termelt hidrogén mennyiségének meghatározása, illetve ehhez kapcsolódóan a termelt és felhasznált villamos energia mennyiségének számítása. A modellrész egy évre vonatkozóan, órás bontásban tartalmazza az adatokat.

A modellrész bemenő adatai

Bemenő adat	Leírás	Forrása a modellben
Minta PV termelés	Napelemes villamosenergia-termelés mennyiségének jellemző hazai adatsora (1 MW _{AC} PV jellemző termelési görbéje)	H2 előállítási modellrész

EL: Minimális teljesítmény	Az elektrolizáló működésbe lépésének teljesítmény küszöbe, a H2 termeléshez minimálisan szükséges villamos-energia input figyelembe vételéhez.	Műszaki premissza
EL: Energia-igény	Az elektrolizáló H2 előállításához szükséges villamos energia igénye, a termelt H2 mennyiségének meghatározásához.	

A modellrész vezérlő paraméterei

A modellrészhez hivatkozásként tartalmazza a kapcsolódó vezérlő paramétereket, ezzel támogatva a kalkulációk áttekinthetőségét. A paraméterek a „Vezérlő” munkalapon állíthatók.

Technológia	Vezérlő paraméter	Leírás
PV	Kapacitás (AC oldali)	A modellezett PV erőmű AC oldali kapacitása, a napelemes villamosenergia-termelési görbe meghatározásához.
Elektrolizáló	Technológia	Az elektrolizáló technológiája, a megfelelő műszaki premisszák kiválasztásához. ▪ PEM ▪ Alkáli
	Kapacitás	Az elektrolizáló kapacitása a termelt villamos energia felhasználásának és az előállított H2 mennyiségének meghatározásához.

A modellrész eredményei

Eredmény	Leírás	Eredmény felhasználása
Termelt hidrogén	Az előállított H2 mennyisége, órás bontású éves időszorként.	H2 tárolási modellrész felhasználja
Éves VE termelés	A PV naperőmű által termelt villamos energia éves mennyisége	Modellezés végeredménye
H2 előállításra fordított VE	Az elektrolizáló által hasznosított (naperőművi) villamos energia éves mennyisége	
Hasznosított PV termelés	A PV naperőmű által megtermelt villamos energiából az elektrolizáló által hasznosított mennyiség aránya	
Nem hasznosított VE	Az elektrolizáló által fel nem vett, nem hasznosuló (naperőművi) villamos energia éves mennyisége	
Éves H2 előállítás	A megtermelt H2 éves mennyisége	
Elektrolizáló kihasználtsága	Az elektrolizáló kapacitásának éves szintű kihasználtsága, az előállított és a maximálisan előállítható H2 mennyiségének aránya	

A modellrész működése

A H2 előállítási modellrész éves szintű, órás bontású adatokkal kalkulál. Az elvégzett kalkulációs lépések a következők:

Ssz.	Kalkulációs lépés	Kalkuláció leírása
1	PV erőmű által megtermelhető villamos energia mennyiségének számítása	Beállított PV kapacitás alapján, a minta PV termelési premissza adatok skálázásával
2	Elektrolizáló által felvett villamos energia mennyiségének számítása	Elektrolizáló kapacitása és minimális teljesítménye alapján, az elérhető villamos energia mennyiségéből*
3	Elektrolizáló által fel nem vett villamos energia mennyiségének számítása	PV erőmű által termelt és elektrolizáló által felvett villamos energia különbségeként*
4	Termelt hidrogén mennyiségének számítása	Elektrolizáló műszaki premissza alapján, a hidrogén termeléshez szükséges fajlagos energiaigény felhasználásával

* Az elektrolizáló működését a villamosenergia-termelés irányítja, a kihasználtsága minden órában a felhasználható villamos energia mennyisége szerint alakul. Amennyiben adott órában az elektrolizáló nem vagy csak részlegesen képes felvenni az elérhető villamos energiát (a naperőművi termelés nem éri el a minimális teljesítményt vagy meghaladja az elektrolizáló kapacitását), kihasználatlan PV termelés keletkezik.

Hidrogén tárolási modellrész

A hidrogén tárolási modellrész („H2 tárolás” munkalap) célja az egyes vizsgált forgatókönyvek esetén a szükséges tárolói kapacitás, valamint a tárolás energiaigényének és a kitarolható hidrogén mennyiségének meghatározása, illetve ehhez kapcsolódóan a tárolói veszteség számítása. A modellrész egy évre vonatkozóan, órás bontásban tartalmazza az adatokat, mindhárom forgatókönyv esetén.

A modellrész bemenő adatai

Bemenő adat	Leírás	Forrása a modellben
Termelt hidrogén	Az előállított H2 mennyisége, órás bontású éves időszorként.	H2 előállítási modellrész
Hidrogén igény	A H2 felhasználás mennyisége (tárolás során fellépő veszteség figyelembe vétele nélkül), az adott forgatókönyvnek megfelelő, órás bontású éves időszorként.	H2 tárolási modellrész
Minimum tárolási igény	Tároló megfelelő, biztonságos működéséhez szükséges minimális tárolói töltöttségi szint.	Műszaki premissza
Energetikai hatékonyság	Tárolás teljes energiaigénye, a betárolt mennyiség alapján.	
Veszteség	Tárolás során jelentkező veszteség, a betárolást követően nem visszanyerhető hidrogén aránya.	
Technológia	A tárolás technológiáját a vizsgált forgatókönyv határozza meg.* - Nyomástartó edény (sűrített gáz): napon belüli és napok közötti alkalmazás esetén - Kimerült szénhidrogén mező: szezonális tárolás esetén	Adottság

* Az alkalmazott technológia a tárolási igény jellege, az elérhető tárolási megoldások technológiai és gazdasági jellemzői, valamint a hazai adottságok alapján került kiválasztásra az egyes forgatókönyvekhez.

A modellrész vezérlő paraméterei

A modellrész nem vezérelhető, az eredmények a bemenő adatok (inputok és premissák) alapján automatikusan kalkulálódnak.

A modellrész eredményei

A modell minden vizsgált forgatókönyv esetén automatikusan, egyidőben kalkulálja az eredményeket.

Eredmény	Leírás	Eredmény felhasználása
H2 kitárolás	A felhasználás céljából kitárolt H2 mennyisége, figyelembe véve a tárolói veszteséget, órás bontású éves időszorként.	TC és GT modellrész felhasználja
Szükséges tároló kapacitás	Szükséges minimális tároló kapacitás a termelt hidrogén teljeskörű eltárolásához, figyelembe véve a minimális nyomás követelményt.	Modellezés végeredménye
Tárolás energiaigénye	Tároláshoz felhasznált teljes villamos energia éves mennyisége.	
Tárolási veszteség	Tárolás során jelentkező hidrogén veszteség éves mennyisége.	

A modellrész működése

A H2 tárolási modellrész éves szintű, órás bontású adatokkal kalkulál. A számítások minden forgatókönyvre egyidejűleg, azonos módszertan szerint történnek. Az elvégzett kalkulációs lépések a következők:

Ssz.	Kalkulációs lépés	Kalkuláció leírása
1	Betárolt hidrogén mennyiségének számítása	Termelt hidrogén mennyisége alapján, a teljes termelés betárolásra kerül
2	Hidrogén igény meghatározása	Forgatókönyvenként eltérő módszertan szerint (részletesen lsd. „A modellezhető forgatókönyvek összefoglalása” fejezet)
3	H2 tároló töltöttség számítása	Előző óra tároló töltöttségét korrigálva az adott órai betárolt hidrogén mennyiség és hidrogén igény különbségével
4	H2 kitárolás számítása	Hidrogén igény és veszteség premissza alapján
5	Szükséges tároló kapacitás számítása	Maximális H2 tároló töltöttség alapján, figyelembe véve az adott tárolói technológiára vonatkozó minimális nyomás követelmény premisszát
6	Tárolás energiaigényének számítása	Betárolt hidrogén mennyisége alapján, a tárolás energiaigénye műszaki premissza felhasználásával

Hidrogén tüzelőanyag-cellás villamos energia előállítási modellrész

A hidrogén tüzelőanyag-cellás villamos energia előállítási modellrész („TC modell” munkalap) célja az egyes vizsgált forgatókönyvek esetén a tüzelőanyag-cellás technológiával előállítható villamos energia meghatározása, illetve ehhez kapcsolódóan a tüzelőanyag-cella kapacitásának és kihasználtságának számítása. A modellrész egy évre vonatkozóan, napi bontásban tartalmazza az adatokat, mindhárom forgatókönyv esetén.

A modellrész bemenő adatai

Bemenő adat	Leírás	Forrása a modellben
Felhasznált H2	A felhasznált H2 mennyisége, a kitárolt H2 mennyisége alapján, napi bontású éves időszaként.	H2 tárolási modellrész
VE előállítás H2 igénye	A tüzelőanyag-cella által villamos energia előállítás céljából felhasznált hidrogén mennyisége.	Műszaki premissza
TC villamos energia igénye	A tüzelőanyag-cella működése közben felhasznált villamos energia mennyisége (önfogyasztás).	
TC működési órászáma	A tüzelőanyag-cella napi működési órászáma, forgatókönyvnek megfelelően.	TC modellrész

A modellrész vezérlő paraméterei

A modellrész paraméterezése a „Vezérlő” munkalapon állítható.

Technológia	Vezérlő paraméter	Leírás
Tüzelőanyag-cella	Technológia	A tüzelőanyag-cella technológiája, a megfelelő műszaki premisszák kiválasztásához. ▪ PEM TC ▪ Szilárd-oxidos TC ▪ Olvadék-karbonátos TC

A modellrész eredményei

A modell minden vizsgált forgatókönyv esetén automatikusan, egyidőben kalkulálja az eredményeket.

Eredmény	Leírás	Eredmény felhasználása
Termelt villamos energia	A hidrogén felhasználásával előállított villamos energia mennyisége, órás bontású éves időszaként.	Modellezés végeredménye
Tüzelőanyag-cella kapacitás	Szükséges tüzelőanyag-cella kapacitás a forgatókönyv szerint rendelkezésre álló hidrogén teljeskörű felhasználásához.	
Tüzelőanyag-cella kihasználtság	A tüzelőanyag-cella kapacitásának éves szintű kihasználtsága, az előállított és a maximálisan előállítható villamos energia mennyiségének aránya.	
TC villamos energia igénye	Tüzelőanyag-cella működéséhez felhasznált teljes villamos energia éves mennyisége (önfogyasztás).	

A modellrész működése

A hidrogén tüzelőanyag-cellás villamos energia előállítási modellrész éves szintű, napi bontású adatokkal kalkulál. A számítások minden forgatókönyvre egyidejűleg, azonos módszertan szerint történnek. Az elvégzett kalkulációs lépések a következők:

Ssz.	Kalkulációs lépés	Kalkuláció leírása
1	Termelt villamos energia mennyiségének számítása	Felhasznált H2 mennyiségéből, a VE előállítás H2 igény premissza alapján

2	Tüzelőanyag-cella villamos energia igényének számítása	Termelt villamos energia mennyiségéből, a TC villamos energia igény premissza alapján
3	Adott napon szükséges TC kapacitás számítása	Adott napi termelt villamos energia mennyiség és a tüzelőanyag-cella működési óraszám hányadosaként
4	Szükséges TC kapacitás meghatározása	Maximális napi szükséges tüzelőanyag-cella kapacitás

100% hidrogén üzemű gázturbinás villamos energia előállítási modellrész

A 100% hidrogén üzemű gázturbinás villamos energia előállítási modellrész („GT modell” munkalap) célja az egyes vizsgált forgatókönyvek esetén a gázturbinás technológiával előállítható villamos energia meghatározása, illetve ehhez kapcsolódóan a gázturbina kapacitásának és kihasználtságának számítása. A modellrész egy évre vonatkozóan, napi bontásban tartalmazza az adatokat, mindhárom forgatókönyv esetén.

A modellrész bemenő adatai

Bemenő adat	Leírás	Forrása a modellben
Felhasznált H2	A felhasznált H2 mennyisége, a kitárolt H2 mennyisége alapján, napi bontású éves időszorként.	H2 tárolási modellrész
Gázturbina hatásfoka	A gázturbina által előállított villamos energia mennyisége és a felhasznált hidrogén energiatartalma (LHV alapon) közötti arány.	Műszaki premissza
GT villamos energia igénye	A gázturbina működése közben felhasznált villamos energia mennyisége (önfogyasztás)	
GT működési órászáma	A gázturbina cella napi működési órászáma, forgatókönyvnek megfelelően.	GT modellrész

A modellrész vezérlő paramétere

A modellrész nem vezérelhető, az eredmények a bemenő adatok (inputok és premisszák) alapján automatikusan kalkulálódnak.

A modellrész eredményei

A modell minden vizsgált forgatókönyv esetén automatikusan, egyidőben kalkulálja az eredményeket.

Eredmény	Leírás	Eredmény felhasználása
Termelt villamos energia	A hidrogén felhasználásával előállított villamos energia mennyisége, órás bontású éves időszorként.	Modellezés végeredménye
Gázturbina kapacitás	Szükséges gázturbina kapacitás a forgatókönyv szerint rendelkezésre álló hidrogén teljeskörű felhasználásához.	
Gázturbina kihasználtság	A gázturbina kapacitásának éves szintű kihasználtsága, az előállított és a maximálisan előállítható villamos energia mennyiségének aránya.	
GT villamos energia igénye	Gázturbina működéséhez felhasznált teljes villamos energia éves mennyisége (önfogyasztás).	

A modellrész működése

A 100% hidrogén üzemű gázturbinás villamos energia előállítás modellrész éves szintű, napi bontású adatokkal kalkulál. A számítások minden forgatókönyvre egyidejűleg, azonos módszertan szerint történnek. Az elvégzett kalkulációs lépések a következők:

Ssz.	Kalkulációs lépés	Kalkuláció leírása
1	Felhasznált H ₂ energiatartalmának számítása	Felhasznált H ₂ mennyiségéből, átváltással (kWh / kg, LHV)
2	Termelt villamos energia mennyiségének számítása	Felhasznált H ₂ energiatartalmából, a gázturbina hatékonyság premissza alapján
3	Gázturbina villamos energia igényének számítása	Termelt villamos energia mennyiségéből, a GT villamos energia igény premissza alapján
4	Adott napon szükséges GT kapacitás számítása	Adott napi termelt villamos energia mennyiség és a gázturbina működési óraszám hányadosaként
5	Szükséges GT kapacitás meghatározása	Maximális napi szükséges gázturbina kapacitás

Teljes folyamatra vonatkozó műszaki eredmények

A modell mindhárom forgatókönyv esetén, a tüzelőanyag-cellás és gázturbinás hidrogén felhasználási módra nézve meghatározza a teljes átalakítási folyamat – PV naperőművi villamosenergia-termelés, hidrogén előállítás elektrolizálóval, hidrogén tárolás, illetve villamos energia előállítás hidrogén felhasználásával – műszaki kulcsmutatóit.

A teljes átalakítási folyamatra vonatkozó eredmények

Az eredmények kalkulációja a „Vezérlő” munkalapon történik.

Eredmény	Leírás
Átalakítás hatékonysága	A hidrogén előállításához használt villamos energia és a felhasználása során megtermelt villamos energia mennyiségének aránya. A mutató nem veszi figyelembe a tárolás és felhasználás során felmerülő villamos energia igényt (önfogyasztásokat).
Teljes folyamat hatékonysága	A hidrogén előállításához, tárolásához és felhasználásához használt villamos energia és a folyamat eredményeként megtermelt villamos energia mennyiségének aránya. A mutató figyelembe veszi a folyamat teljes villamos energia igényét.
Veszteségek	A teljes átalakítási folyamat során felmerülő veszteségek: ■ Tüzelőanyag-cella vagy gázturbina villamos energia igénye ■ Tárolás villamos energia igénye ■ Tárolás során felmerülő H₂ veszteség

Gazdasági modellrész

A gazdasági modellrész („Gazdasági modell” munkalap) célja a hidrogén villamosenergia-rendszerbeli alkalmazási projekt CAPEX és OPEX igényének meghatározása, valamint a végeredményként előállított villamos energia költségének számítása, az egyes forgatókönyvek mentén, a kiválasztott hidrogén technológiai paraméterektől függően. A modellrész tíz évre vonatkozóan, éves bontásban tartalmazza az adatokat.

A modellrész bemenő adatai

Bemenő adat	Leírás	Forrása a modellben
Kapacitás adatok	Az egyes technológiai egységek vezérelt vagy számított kapacitás adatai, melyek a beruházási költségek meghatározásához szükségesek. - PV kapacitása - Elektrolizáló kapacitása - Tároló kapacitása - Tüzelőanyag-cella kapacitása - Gázturbina kapacitása	H ₂ előállítási, tárolási és felhasználási modellrészek
CAPEX premisszák	Kapacitás alapú fajlagos CAPEX adatok az egyes technológiai egységekhez: - PV CAPEX - Elektrolizáló CAPEX - Tároló CAPEX - Tüzelőanyag-cella CAPEX - Gázturbina CAPEX	Pénzügyi premisszák
OPEX premisszák	CAPEX százalékában kifejezett OPEX adatok az egyes technológiai egységekhez: - PV OPEX - Elektrolizáló OPEX - Tároló OPEX - Tüzelőanyag-cella OPEX - Gázturbina OPEX	
Infláció	Az infláció alakulására vonatkozó premisszák, éves bontásban.	
Termelt villamos energia	A hidrogén felhasználásával előállított villamos energia éves mennyisége, mind a tüzelőanyag-cellás, mind a gázturbinás felhasználás alapján.	TC modellrész és GT modellrész
Degradációs premisszák	Éves degradáció (teljesítmény csökkenés) mértéke adatok az egyes technológiai egységekhez: - PV - Elektrolizáló - Tüzelőanyag-cella	Műszaki premisszák

A modellrész vezérlő paraméterei

A modellrész nem vezérelhető, az eredmények a bemenő adatok (inputok és premisszák) alapján automatikusan kalkulálódnak.

A modellrész eredményei

A modell minden vizsgált forgatókönyv esetén automatikusan, egyidőben kalkulálja az eredményeket, a tüzelőanyag-cellás és a gázturbinás hidrogén felhasználásra egyaránt.

Eredmény	Leírás	Eredmény felhasználása
CAPEX	A hidrogén villamosenergia-rendszerbeli alkalmazási projekt CAPEX igénye.	Modellezés végeredménye
OPEX az első évben	A hidrogén villamosenergia-rendszerbeli alkalmazási projekt OPEX igénye a működés első évében.	

Előállított villamos energia költsége	A hidrogén villamosenergia-rendszerbeli alkalmazási projekt keretében – adott technológiai opciók, műszaki és gazdasági paraméterek mellett – előállítható villamos energia költsége.	
--	---	--

A modellrész működése

A gazdasági modellrész tíz éves időtávon, éves bontású adatokkal kalkulál. A számítások minden forgatókönyvre egyidejűleg, azonos módszertan szerint történnek, a tüzelőanyag-cellás és a gázturbinás hidrogén felhasználásra egyaránt. Az elvégzett kalkulációs lépések a következők:

Ssz.	Kalkulációs lépés	Kalkuláció leírása
1	Teljes CAPEX meghatározása	A vezérelt és a kalkulált kapacitás adatok, valamint a CAPEX premisszák alapján. A CAPEX egésze a működést megelőző évben jelentkezik.
2	Első év OPEX meghatározása	A számított CAPEX adatok és az OPEX premisszák alapján, a működés első évében.
3	OPEX meghatározása a működés teljes időtartamára vonatkozóan	Az első év OPEX értékéből kiindulva évről évre, az adott évi inflációval növelve.
4	Termelt villamos energia mennyiségének meghatározása a működés teljes időtartamára vonatkozóan	A termelt villamos energia mennyiségéből kiindulva (a működés első évében érvényes bázis mennyiség) évről évre, a releváns technológiák degradációs premisszái alapján csökkentve.
5	Előállított villamos energia árának számítása	A CAPEX és a működés időtartama alatt összesített OPEX, valamint a működés időtartama alatt előállított összes villamos energia mennyiségének hányadosa.

Ssz.	Kalkulációs lépés	Kalkuláció leírása
1	Felhasznált H2 energiatartalmának számítása	Felhasznált H2 mennyiségéből, átváltással (kWh / kg, LHV)
2	Termelt villamos energia mennyiségének számítása	Felhasznált H2 energiatartalmából, a gázturbina hatékonyság premissza alapján
3	Gázturbina villamos energia igényének számítása	Termelt villamos energia mennyiségéből, a GT villamos energia igény premissza alapján

A modellezhető forgatókönyvek összefoglalása

A modell a zöld villamos energia hidrogén alapú tárolásának három alapvető forgatókönyvét elemzi.

- A napon belüli forgatókönyv célja éjszakai zöld áram biztosítása.** Ehhez a nap folyamán előállított hidrogén, maximum néhány órás tárolást követően, még aznap este visszaalakításra kerül, ezáltal egyenletes éjszakai zöld áramot biztosítva.
- A napok közötti forgatókönyv célja zöld áram biztosítása a megújuló energiatermelés szempontjából kedvezőtlen időjárású napokon.** Ehhez a hidrogén előállítása folyamatosan zajlik, viszont felhasználása csak szakaszosan, néhány napos időközönként valósul meg. Az addig megtermelt mennyiség, maximum néhány napos tárolást követően, egy teljes nap folyamán kerül visszaalakításra, így módon egyenletes egész napos zöld áramot biztosítva.

3. A szezonális forgatókönyv célja zöld áram biztosítása az alacsony megújuló energiatermeléssel jellemezhető téli időszakban. Ehhez a hidrogén előállítása az április elejétől szeptember végéig tartó időszakban folyamatosan történik, a felhasználására pedig október elejétől március végéig kerül sor. A megtermelt mennyiség visszaalakítására, több hónapos tárolást követően, a felhasználási időszakban folyamatosan és egyenletesen kerül sor, ezáltal egész napos zöld áramot biztosítva.

	1. Napon belüli alkalmazás	2. Napok közötti alkalmazás	3. Szezonális alkalmazás
Cél	Éjszakai zöld áram szolgáltatása	Zöld áram szolgáltatása a megújuló energiatermelés szempontjából kedvezőtlen időjárású napokon	Zöld áram szolgáltatása az év alacsony megújuló energiatermeléssel jellemezhető időszakban
Hidrogén előállítás	- Egész évben - Napelemes energiatermelésnek megfelelően	- Egész évben - Napelemes energiatermelésnek megfelelően	- Április elejétől szeptember végéig, nap folyamán folyamatosan - Napelemes energiatermelésnek megfelelően
Hidrogén felhasználás	- Éjszaka folyamán, 19-24 óra között - Aznap előállított H₂ egészét felhasználva, egyenletesen	- Háromnapos időközönként, egész nap - Megelőző napokban előállított H₂ egészét felhasználva, egyenletesen	- Október elejétől március végéig folyamatosan, egész nap - Termelési időszakban előállított H₂ egészét felhasználva, egyenletesen
Hidrogén tárolás	- Néhány órás tárolás - Nyomástartó tartály alkalmazásával, sűrített gáz formájában	- Néhány napos tárolás - Nyomástartó tartály alkalmazásával, sűrített gáz formájában	- Több hónapos tárolás - Geológiai tárolás, kimerült szénhidrogén mezőben

A modellben vizsgált forgatókönyvek összefoglalása

A modell használata

A modell használata a vezérlő paraméterek beállításával és a kapott eredmények vizsgálatával történik. Lehetőség van továbbá a kapcsolódó műszaki és pénzügyi premisszáknak felülírására, ezzel frissítve a modell kalkulációt az aktuális piaci helyzet és technológiai paraméterek alapján.

Vezérlő paraméterek beállítása

A vezérlő paraméterek beállítása a „Vezérlő” munkalapon lehetséges. A változtatható inputok a következők: PV kapacitása; elektrolizáló technológiája és kapacitása; tüzelőanyag-cella technológiája; gázturbina hatásfoka. A vezérlő input mezők sárga háttérrel jelöltek.

Jelmagyarázat:

állítható paraméter

Műszaki input paraméterek								
Villamosenergia-termelés			Hidrogén tárolás			VE előállítás hidrogénből		
Megújuló energia termelés módja	PV		Rövid távú tárolási megoldás	Nyomástartó tartály		Villamosenergia előállítás típusa	PEM TC	
Kapacitás	MW _{ac}	20	Minimum tárolási igény	%	10%	VE előállítás H ₂ igénye	kg H ₂ / kWh	0,06
Degradáció	% / év	0,56%	Tárolási veszteség	%	0,0%	TC villamos energia igénye	kWh / kg H ₂	0,1
Hidrogén előállítás			Energetikai hatékonyság	LHV %-a	95%	Degradáció	% / év	1%
Elektrolizáló típusa	PEM elektrolizáló		Hosszú távú tárolási megoldás	Kimerült földgáz mező		Villamosenergia előállítás típusa	Gázturbina - 100% H ₂	
Kapacitás	MW	10	Minimum tárolási igény	%	20%	Gázturbina hatásfoka	%	45%
Minimális teljesítmény	%	5%	Tárolási veszteség	%	2%	Input gáz H ₂ aránya	%	100%
H ₂ előállítás energiaigénye	kWh / kg H ₂	55	Energetikai hatékonyság	LHV %-a	80%	GT villamos energia igénye	kWh / kg H ₂	0,03
Degradáció	% / év	1%						

Vezérelhető paraméterek

Premisszáknak felülírása

A piaci és technológiai környezet megváltozása esetén a műszaki premisszáknak felülírására a „Műszaki premisszáknak”, a pénzügyiek felülírására pedig a „Pénzügyi premisszáknak” munkalapon van lehetőség. A modell által felhasznált premisszáknak sárga háttérrel rendelkeznek, a felülírásakor ezeket szükséges frissíteni. A vezérelhető inputok celláinak háttérre szürke, ezek a „Vezérlő” munkalapon módosíthatók,

a premissák munkalapjain csak hivatkozásként jelennek meg. A kalkulációk eredményeként előálló értékek cellájának háttere kék, ezek a modell céljaiból kifolyólag nem inputként kerülnek felhasználásra, hanem kalkulálódnak. A háttér nélküli cellák olyan, adottságként kezelt premissákat tartalmaznak, melyeknek a modell felépítésében van jelentős szerepük (pl. modellezett időtáv meghatározása). Ezek elsősorban információt közölnek, a felülírásuk nincs hatással a kalkulációkra. Amennyiben a piaci és technológiai fejlemények hatására jelentős változás áll be ezen paraméterekben, a modell nagyobb léptékű frissítése vagy teljesen új modell kialakítása szükséges.

Gázturbina						
	Kapacitás	Hatásfok	Villamos energia igény kWh / kg H ₂	Bekeverési arány vol%	Kihasználtság %	Élettartam év
Gázturbina - 100% H ₂	MW	%	0,03	100%		10

Példa az egyes premissza típusokra

(sárga: szükség esetén felülírható; szürke: vezérelhető; kék: számított eredmény; fehér: adottság)

Az eredmények értelmezése, a modell korlátai

Az üzleti modell magas szinten vizsgálja és mutatja be a hidrogén villamosenergia-rendszerbeli alkalmazási lehetőségének műszaki és gazdasági jellegzetességeit. Ebből kifolyólag elsősorban előkészítő és megalapozó funkciót tölt be, ezzel támogatva mély és részletes elemzések elkészítésének, illetve konkrét megvalósítási projekt konstrukciók előzetes vizsgálatának elindításához. Ezen modellezési megközelítésből kifolyólag az eredmények értelmezése, következtetések megfogalmazása során figyelembe kell venni a modell célját és korlátait. Ezek megnyilvánulnak a technológiai paraméterek, a méretezési korlátok és a pénzügyi premissák formájában, valamint ezek időtállóságában.

Működés és technológiai paraméterek egyszerűsítése

A modell az egyes villamosenergia-rendszerben alkalmazható hidrogén technológiákat magas szinten, általános keretek között modellezi, vagyis leegyszerűsíti azokat. Az egyes technológiáknak a modellben leképezett műszaki működése és az alkalmazott technológiai paraméterek általánosak, a nemzetközi szakirodalom és a hazai tapasztalatok alapján meghatározott legfontosabb tényezőkre és jellemző adatokra épül. A modell nem terjed ki az egyes technológiák részletes működési jellemzőire és integrációs feltételeire, melyek egy konkrét projekt megvalósítása esetén nagy jelentőséggel bírnak és alaposan vizsgálándók. A különböző gyártók által kínált berendezések műszaki jellemzői széles skálán mozognak. Emiatt várhatóan eltérnek a modellben alkalmazott premissáktól, melyek nem egy-egy konkrét eszköz adatait mutatják, hanem a piacon elérhető megoldások általános jellemzőit. Egy konkrét projekt megvalósításának előzetes vizsgálatához meghatározott gyártók és berendezések adataival szükséges a modellezést elvégezni.

Méretezési korlátok

A modellben minden esetben megtörténik az egyes technológiai megoldások méretezése, vezérelhető input vagy kalkulált eredmény formájában. Ezek azonban nem feltétlenül felelnek meg a gyakorlatban elérhető vagy megvalósítható technológiai méreteknak. Az inputok megadása és a számított eredmények értelmezése során fontos figyelembe venni, hogy a vizsgált technológiák esetén milyen jellemző méret tartományban érhetők el berendezések a piacon, valamint milyen méreteken léteznek működő vagy kivitelezés alatt álló projektek a nemzetközi környezetben. A modellben alkalmazott műszaki és pénzügyi premissák az egyes technológiák jellemző alkalmazási méretének

általános paramétereit tükrözik. Szélsőséges – a jellemzőnél jelentősen kisebb vagy nagyobb – méretek esetén ezen premisszák nem érvényesek, a felülírásuk szükséges a modellezési eredmények értelmezéséhez és következtetések levonásához.

Pénzügyi premisszák változékonysága

A modell a hidrogén technológiák villamosenergia-rendszerbeli alkalmazásának költségeit – és ezeken keresztül a termelt villamos energia árát – a nemzetközi szakirodalom és a hazai tapasztalatok alapján meghatározott, általános premisszák alapján számítja. A piacon a különböző gyártók által kínált konkrét berendezések, technológiai megoldások pénzügyi jellemzői széles skálán mozognak. Emiatt várhatóan eltérnek a modellben alkalmazott premisszáktól, melyek nem egy-egy konkrét eszköz adatait mutatják, hanem a piacon elérhető megoldások általános költségeit. Egy konkrét projekt megvalósításának előzetes vizsgálatához meghatározott gyártók és berendezések adataival szükséges a modellezést elvégezni.

Paraméterek időtállósága

A hidrogén technológiák és a villamosenergia-rendszerben történő alkalmazásuk folyamatos fejlődésen megy át napjainkban a nagyfokú érdeklődésből, az intenzív kutatás-fejlesztési tevékenységből, az üzleti szereplők aktivitásából és az indított projektek növekvő számából kifolyólag. Az elkövetkező években számos változásra lehet számítani a piacon elérhető technológiákban és azok jellemzőiben, műszaki és gazdasági téren egyaránt. Emiatt a modell időtállósága csak rendszeres felülvizsgálat esetén, a piaci és technológiai változások követésével és a modell frissítésével biztosítható.

Bővítési lehetőségek

Az elemzési igények megváltozása esetén a modell könnyen bővíthető új forgatókönyvek vagy technológiák hozzáadásával.

Új technológiák hozzáadása

Új technológiák hozzáadásához a következő lépések elvégzése szükséges:

Ssz.	Lépés	Érintett munkalapok	Leírás
1.	Új technológia műszaki és pénzügyi premisszáinak hozzáadása	Műszaki premisszák Pénzügyi premisszák	Az egyes munkalapokon, a megfelelő technológiai csoportokban új sor hozzáadása és premissza értékek rögzítése.
2.	Vezérlő felület frissítése	Vezérlő	A vezérlő munkalapok technológia választó legördülő listájának frissítése, majd a kapcsolódó input és premissza mezők képletezésének frissítésével a megfelelő hivatkozás

Új forgatókönyvek hozzáadása

Új forgatókönyvek hozzáadásához a modell működésének teljeskörű ismerete szükséges. Új forgatókönyvek hozzáadásához a következő lépések elvégzése szükséges:

Ssz.	Lépés	Érintett munkalapok	Leírás
1.	Tárolói működés modellezése	H2 tárolás	A hidrogén igény meghatározása, majd ebből és a betárolásból kiindulva a tároló töltöttség szintjét meghatározó számítás elkészítése és képletezése, végül a kitárolás meghatározása.
2.	TC működésének modellezése*	TC modell	A tárolói modellrész eredményeiből a felhasznált hidrogén mennyiségének átvétele, majd a termelt villamos energia mennyiség számítása, végül a napi működési óraszám meghatározása, a meglévő forgatókönyvekkel azonos módszertan szerint.
3.	GT működésének modellezése*	GT modell	A tárolói modellrész eredményeiből a felhasznált hidrogén mennyiségének átvétele, majd a termelt villamos energia mennyiség számítása, végül a napi működési óraszám meghatározása, a meglévő forgatókönyvekkel azonos módszertan szerint.

Rövidítések, kifejezések jegyzéke

A modellben gyakran használt rövidítések:

PV	Fotovoltaikus / Napelemes
VE	Villamos energia
TC	Tüzelőanyag-cella
GT	Gázturbina
LHV	Alsó fűtőérték (low heating value)
HHV	Felső fűtőérték (high heating value)