

Preoblikovanje ekonomske upravičenosti jedrske energije

Poglobljena analiza stroškov in tveganj malih modularnih reaktorjev v primerjavi z velikimi elektrarnami



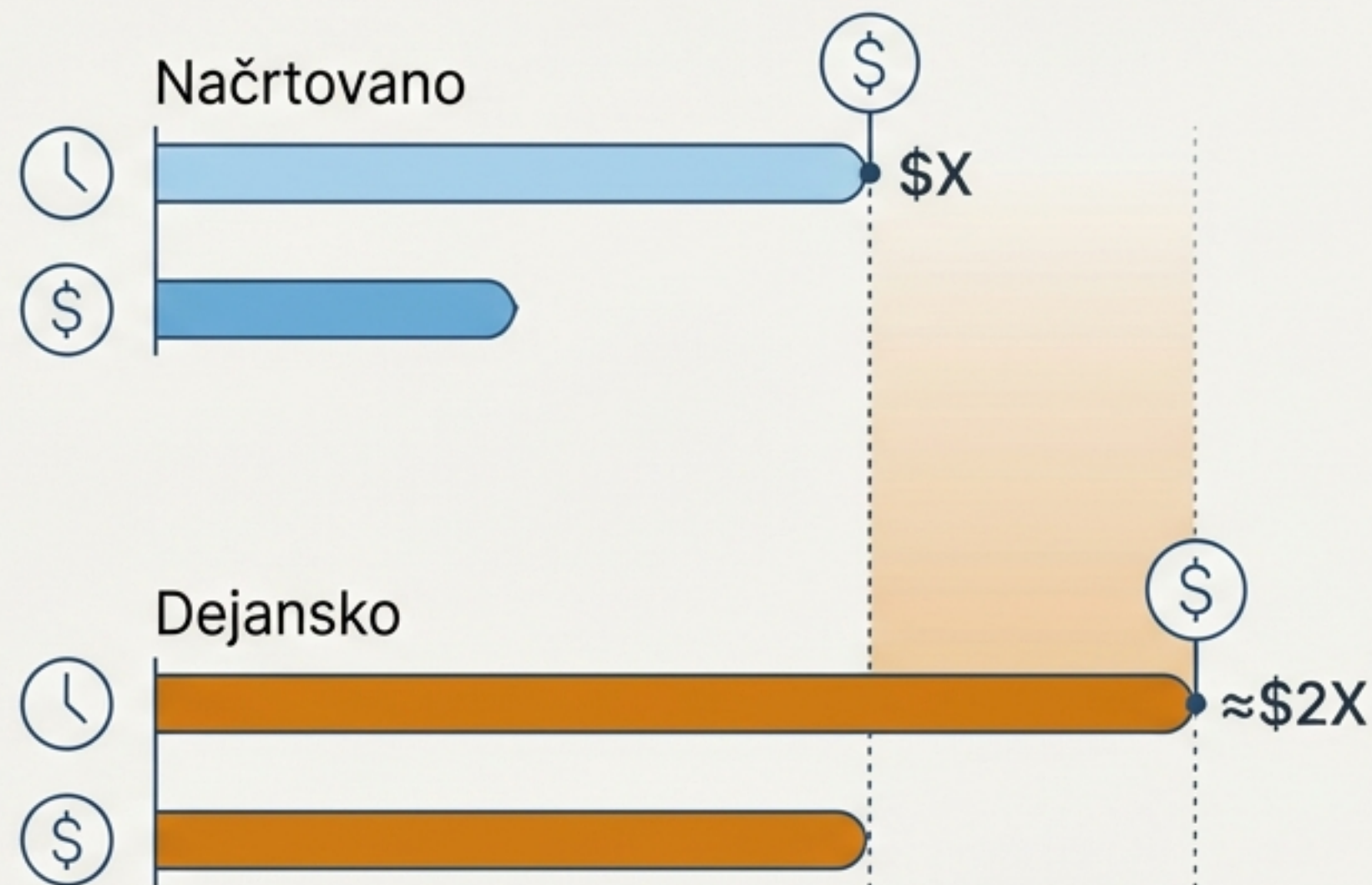
Na podlagi študije "Capital cost estimation for advanced nuclear power plants," W.R. Stewart & K. Shirvan, MIT. Renewable and Sustainable Energy Reviews 155 (2022).

Temeljni izziv jedrske energije so stroški

Prve te vrste (FOAK) jedrske elektrarne, zgrajene v zadnjih 20 letih v ZDA in Evropi, so v povprečju za **2-krat** presegle proračun in časovni načrt.

Veliki jedrski projekti so postali neobvladljivi megaprojekti, ki jih pestita slabo vodenje in preveč zapletena zasnova.

Posledica: finančna tveganja so postala nesprejemljiva za investitorje in nosilce politik.



Rešitev industrije: Mali modularni reaktorji

SMR-ji naj bi bili ekonomsko konkurenčnejši zaradi petih ključnih dejavnikov, ki naj bi odpravili težave velikih projektov:



1. Več enot in učenje

Serijska proizvodnja omogoča hitro učenje in zniževanje stroškov.



2. Povečana tovarniška proizvodnja

Premik dela z gradbišča v nadzorovano tovarniško okolje.



3. Krajši čas gradnje

Hitrejša postavitev in hitrejši donos naložbe.



4. Poenostavitev zasnove

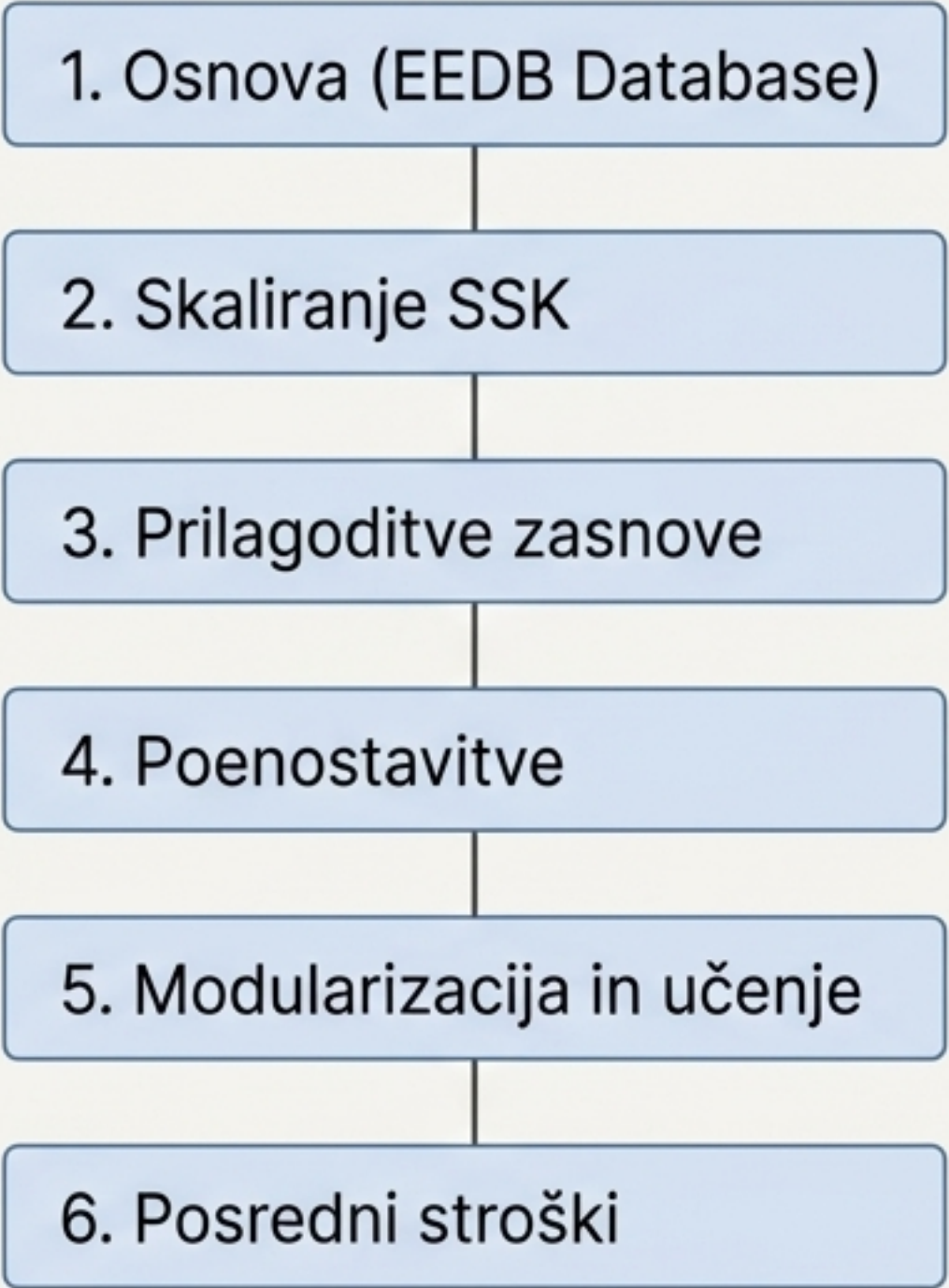
Pasivni varnostni sistemi in integrirane komponente zmanjšujejo kompleksnost.



5. Časovna usklajenost enot

Možnost postopnega dodajanja zmogljivosti glede na rast povpraševanja.

Analiza, ki temelji na podatkih, ne na predpostavkah



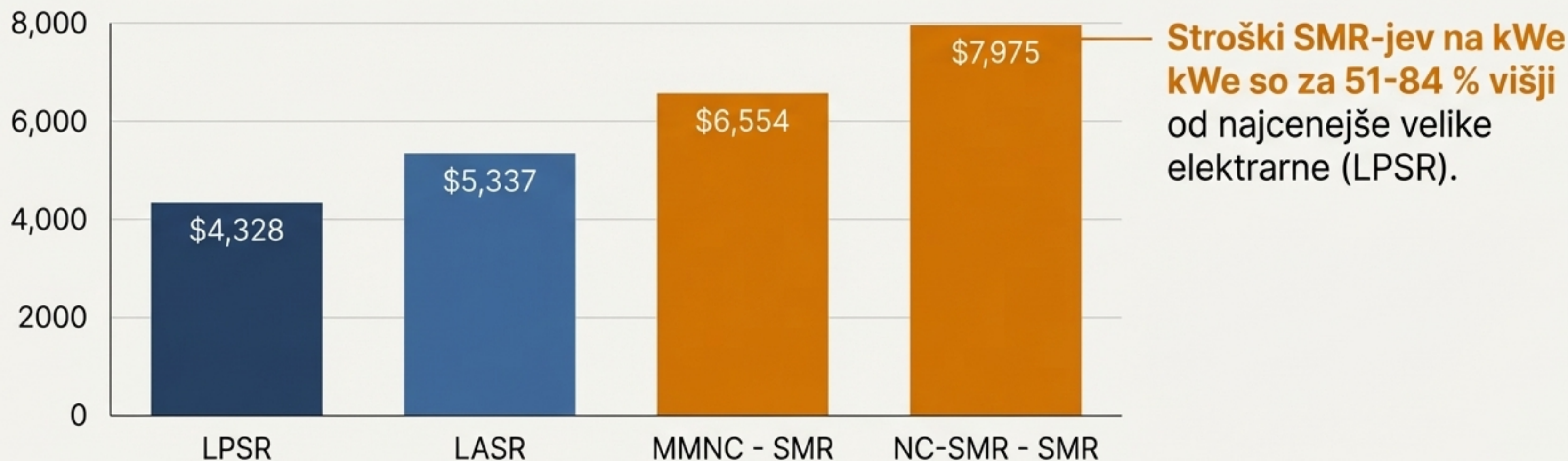
Naša ocena temelji na podrobni "bottom-up" metodologiji, ki primerja štiri referenčne zasnove reaktorjev na podlagi več kot 200 struktur, sistemov in komponent (SSK).

Oznaka	Opis
LPSR	Velik reaktor s pasivno varnostjo (podobno AP1000)
LASR	Velik reaktor z aktivno varnostjo (podobno APR1400)
MMNC	Večmodulni iPWR z naravno cirkulacijo (podobno NuScale)
NC-SMR	SMR z naravno cirkulacijo (podobno Holtec SMR-160)

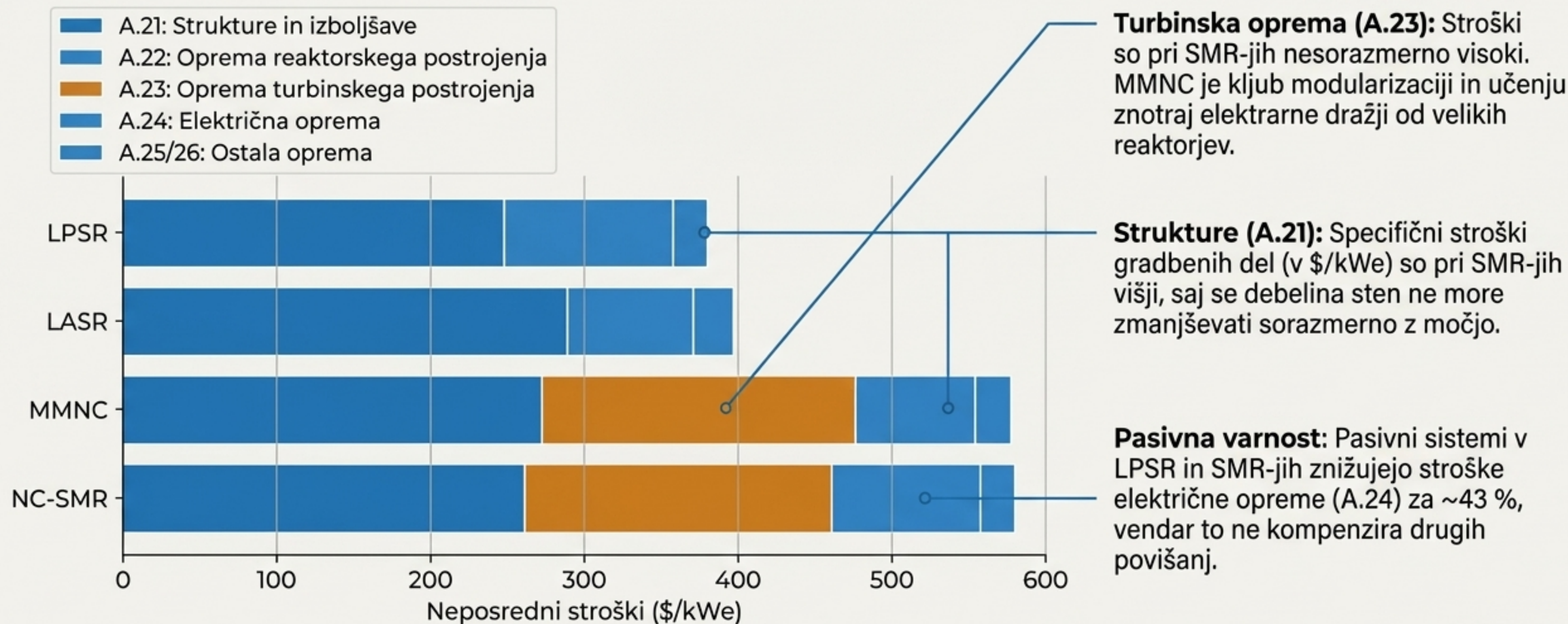
Presenečenje: Manjši reaktorji so na začetku bistveno dražji

Analiza neposrednih stroškov gradnje (*overnight cost*) prvih te vrste (FOAK) elektrarn pokaže, da SMR-ji zaradi izgube ekonomije obsega niso cenejši na enoto moči.

Neposredni stroški gradnje FOAK (\$/kWe)

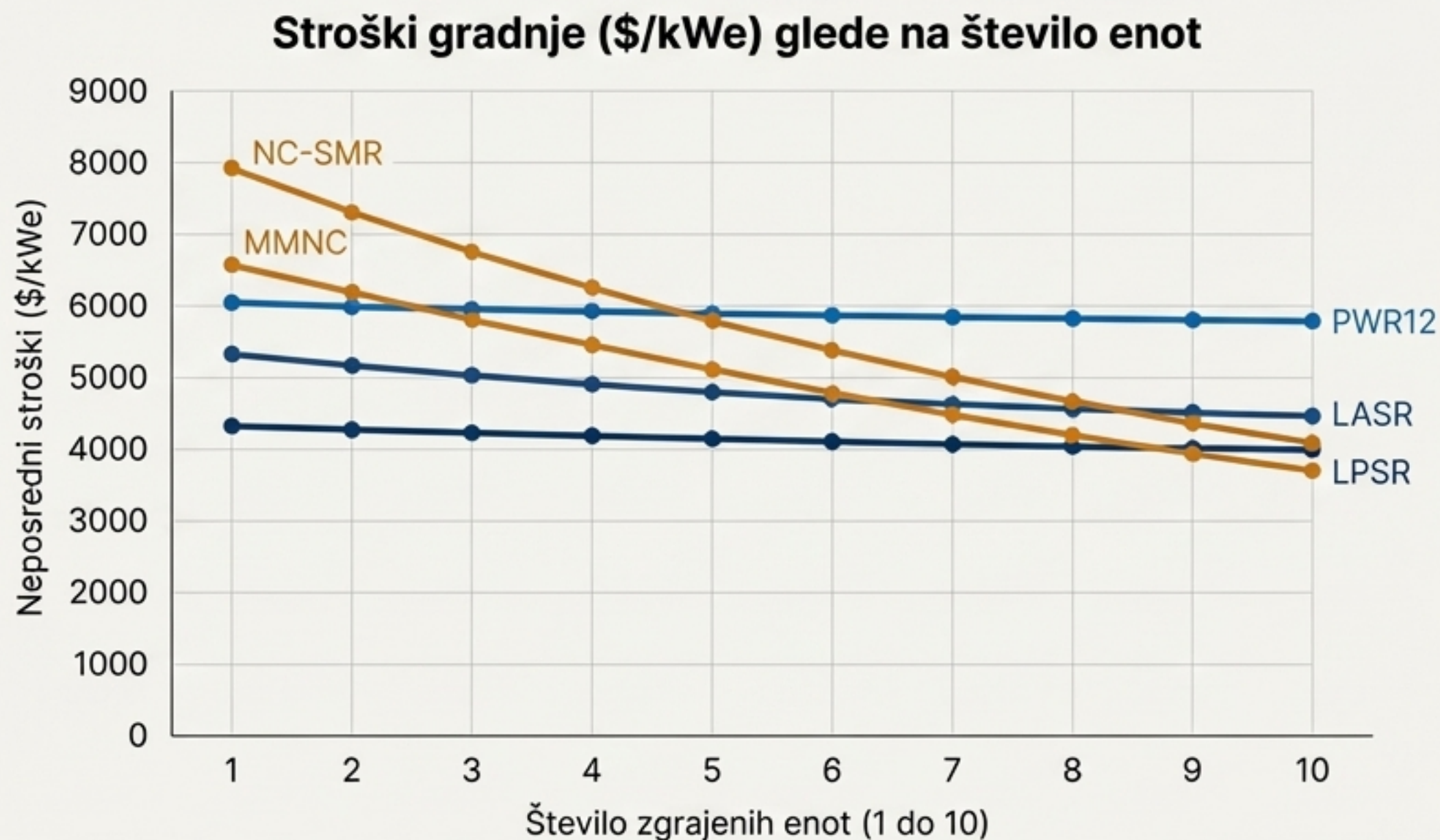


Kje nastanejo stroški? Izguba ekonomije obsega prevlada nad poenostavitvami.



Začetna cena ni celotna zgodba. Prava prednost SMR-jev je v hitrosti učenja.

Medtem ko imajo veliki reaktorji nižje začetne stroške, imajo SMR-ji z visoko stopnjo modularizacije bistveno strmejšo krivuljo učenja.



Znižanje stroškov pri 10. enoti

Veliki reaktorji (LPSR, LASR):
~31 % (~\$1500/kWe)

SMR-ji (MMNC, NC-SMR):
~36 % (~\$2500/kWe)

Čeprav SMR-ji ne postanejo absolutno cenejši, se razlika v ceni bistveno zmanjša.

Mehanika učenja: Tovarna proti gradbišču

Učenje ni enotno. Največji potencial za znižanje stroškov je pri delu na gradbišču, ki ga modularizacija seli v učinkovitejše tovarniško okolje.

Potencial znižanja stroškov (FOAK -> NOAK)

Tovarniški stroški:	-3%
Stroški materiala:	-27%
Ure dela na gradbišču:	-45%

Modelirane stopnje učenja



Tovarna: 16% (iz izkušenj drugih industrij)



Delo na gradbišču: 13.1%



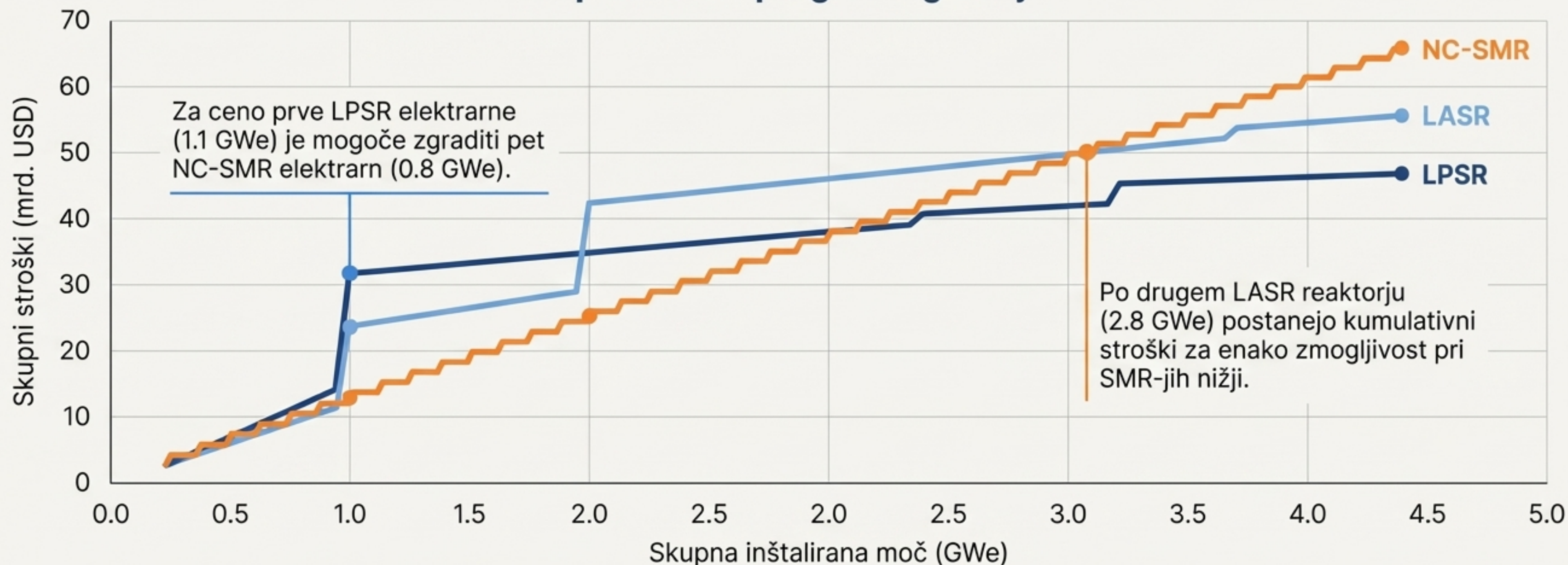
Material: 7.1%

SMR-ji so zasnovani tako, da maksimalno izkoristijo kategorijo z najvišjo stopnjo učenja – delo.

Ne sprašujmo, koliko stane en reaktor, temveč koliko stane izgradnja 1 GWe zmogljivosti.

Pri analizi **skupnih stroškov programa** postanejo **manjše**, postopne naložbe v SMR-je **konkurenčne velikim**, enkratnim naložbam v klasične elektrarne.

Skupni stroški programa gradnje



Skriti strošek ambicije: Zakaj megaprojekti propadajo

Ekonomske primerjave so nepomembne, če projekt preseže proračun za 100 %, kot se je zgodilo pri Vogtle. Ključni dejavnik ni optimizacija stroškov, temveč obvladovanje tveganj.



Velikost projekta

Skupni stroški nad 1.5
mrd. USD.



Nova metoda gradnje

Uporaba nepreizkušenih
tehnik na terenu (npr. jekleni
kompoziti).



Trajanje gradnje

Veliko število ur dela na
gradbišču pomeni večjo
izpostavljenost zamudam.



Nizka stopnja modularizacije

Visoka odvisnost od dela
na gradbišču.

NC-SMR je edina zasnova, ki se strukturno izogne pasti megaprojekta

Medtem ko so vsi veliki reaktorji in celo večmodulni SMR-ji po definiciji megaprojekti, enojni NC-SMR ostaja pod kritičnim pragom tveganja, zlasti glede absolutnega obsega dela na gradbišču.

Faktor tveganja	LPSR	LASR	MMNC	NC-SMR
FOAK stroški > 1.5 mrd. USD				
Nova metoda gradnje				
Ure dela na gradbišču (milijoni)	 17.7	 36.3	 17.0	 5.2
% dela, prestavljenega s terena	 Nizka	 Nizka	 29%	 22%

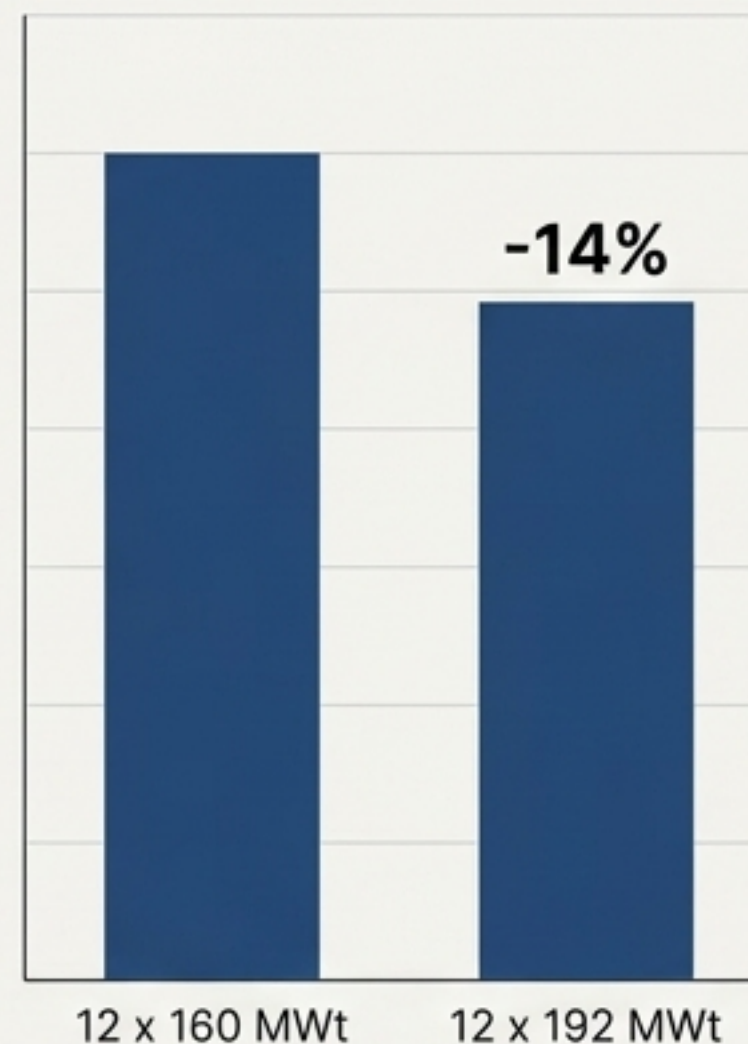
Študija ugotavlja, da SMR-ji kljub modularizaciji še vedno zahtevajo več ur dela na gradbišču na kWe kot veliki reaktorji. Ključna prednost NC-SMR je absolutno manjše število ur.

Strateška prilagodljivost: Optimizacija moči za potrebe trga

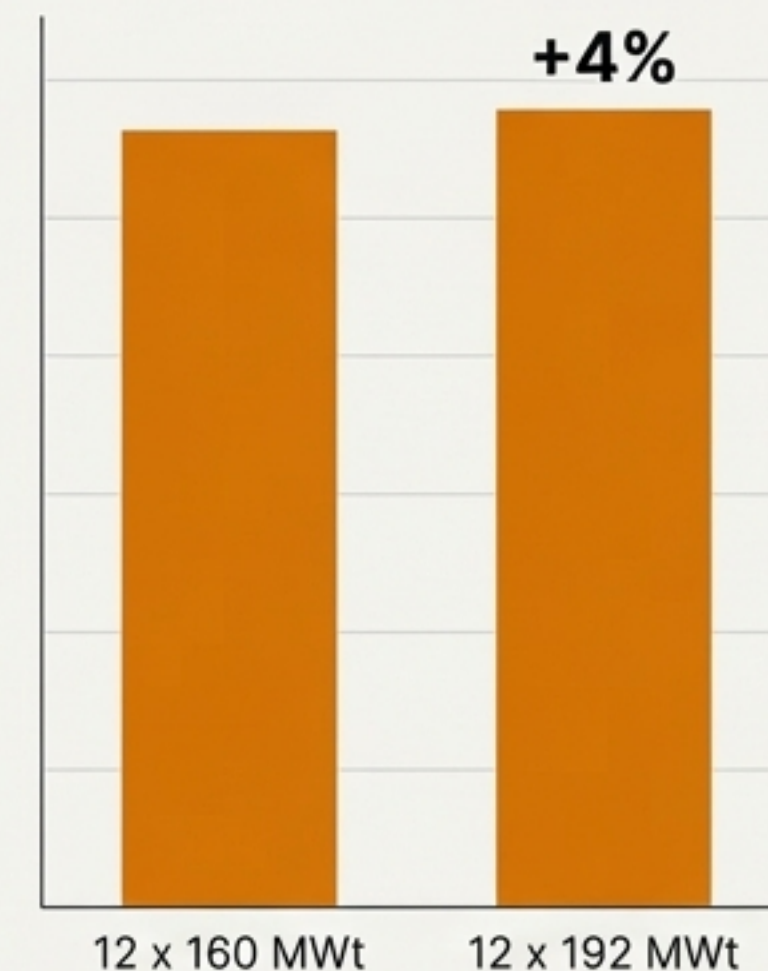
Modularnost ne pomeni le cenejše gradnje, temveč tudi zmožnost prilagajanja izdelka. Povečanje moči modula za 20 % je znižalo specifične stroške za 14 %, medtem ko se je skupni strošek elektrarne povečal le za 4 %.

Ta stopnja optimizacije omogoča prilagajanje ponudbe specifičnim finančnim in energetskim potrebam naročnika, kar pri velikih reaktorjih ni mogoče.

Specifični stroški (\$/kWe)



Skupni stroški elektrarne (\$M)



Nova investicijska teza za jedrsko energijo

Vprašanje ni, »Kateri reaktor je najcenejši?«, temveč »Kateri reaktor ponuja najodpornjšo pot do uvajanja brezogljene energije?«.

- 1. Začetna cena je zavajajoča:** FOAK SMR-ji so dražji na enoto moči. Njihova vrednost ni v nizki ceni, temveč v obvladovanju tveganj.
- 2. Učenje je ključno:** SMR-ji zmagujejo zaradi hitrega učenja, ki ga omogoča serijska proizvodnja in modularizacija. To znižuje stroške in povečuje predvidljivost.
- 3. Izogibanje megaprojektom je strategija:** Manjši absolutni stroški in krajši čas gradnje NC-SMR-jev strukturno zmanjšujejo izpostavljenost katastrofalnim prekoračitvam stroškov, ki so ohromile industrijo.



SMR-ji ne zmagujejo pri ceni, temveč pri predvidljivosti in napredku.