

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV ŘÍZENÍ A EKONOMIKY PODNIKU



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ekonomické porovnání pozemních konstrukcí pro fotovoltaické
panely

Economic comparison of ground structures for photovoltaic panels

AUTOR: Lukáš Váňa

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.

PRAHA 2023



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Váňa** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **502364**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav řízení a ekonomiky podniku**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technicko-ekonomická komparativní analýza pozemních konstrukcí pro fotovoltaické elektrárny

Název bakalářské práce anglicky:

Technical-economic comparative analysis of ground structures for photovoltaic power plants

Pokyny pro vypracování:

Úvod - motivace k volbě tématu, cíl a dílčí úkoly práce
Teoretická východiska - základní technické principy a prvky FVE, typy konstrukcí, klíčové nákladové a výnosové faktory FVE, metody pro hodnocení investičních projektů
Návrhová část - popis metodiky, volba vhodných indikátorů hodnocení ekonomické efektivity a jejich výpočet pro specifickou případovou studii
Závěr - zhodnocení a doporučení

Seznam doporučené literatury:

FOTR, Jiří a Ivan SOUČEK. Investiční rozhodování a řízení projektů: jak připravovat, financovat a hodnotit projekty, řídit jejich riziko a vytvářet portfolio projektů. Praha: Grada, 2011. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-3293-0.
LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.
GINSBERG, Michael. Solar photovoltaic power optimization: enhancing system performance through operations, measurement and verification. New York: Routledge/Earthscan, 2020. ISBN 9781351172042.
CHEMIŠINEC, Igor. Obchod s elektřinou. Praha: Conte, c2010. ISBN 978-80-254-6695-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D. ústav řízení a ekonomiky podniku FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **29.02.2024**

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26.4.2023
Datum převzetí zadání

Váňa
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Práce se zabývá porovnáním 4 typů pozemních konstrukcí pro fotovoltaické elektrárny, konkrétně fixní, 1-osé sledování bez sklonu panelu, 1-osé sledování se sklonem panelu a dvouosé sledování v podmínkách České republiky. Porovnání probíhá v energetickém, nákladovém a výnosovém stupni v závislosti na využití pozemku. Simulace energetického výnosu je provedena pomocí programu PV-SOL, nákladovost je hodnocena pomocí metody LCOE a ziskovost je počítána ze spotových cen elektřiny.

Klíčová slova

fotovoltaika, pozemní konstrukce, PV-SOL, fixní systémy, jednoosé natáčecí systémy, dvouosé natáčecí systémy, optimalizace, využitelnost pozemku, dotace, ekonomická návratnost

Annotation

The thesis deals with the comparison of 4 types of ground structures for photovoltaic power plants, namely fixed, 1-axis tracking without panel tilt (HSAT), 1-axis tracking with panel tilt (TSAT) and two-axis tracking in the conditions of the Czech Republic. The comparison takes place in terms of energy, cost and revenue depending on the use of the land. The energy yield simulation is performed using the PV-SOL program, the cost effectiveness is evaluated using the LCOE method, and the profitability is calculated from the spot electricity prices.

Keywords

photovoltaic, ground structures, PV-SOL, fixed mounting, single axis tracker, TSAT, HSAT, dual axis tracker, optimalization, GCR, subsidy, economic return

Poděkování

Chtě bych poděkovat pan Ing. Miroslavu Žilkovi Ph.D za vedení práce a firmě 25energy s.r.o. za poskytnutí programu PV-Sol.

Obsah

1. Úvod	1
2. Základní technické a fyzikální principy	1
2.1. Princip fotovoltaického článku	2
2.2. Elektrické charakteristiky fotovoltaických článků	3
2.3. Sluneční záření	4
3. Komponenty FVE	5
3.1. Fotovoltaické panely	6
3.1.1. Half-cut technologie	6
3.1.2. Bifacialita	6
3.2. Střídač	6
3.2.1. Řetězový střídač	7
3.2.2. Centrální střídač	7
3.2.3. Dimenzování střídačů	7
3.3. Konstrukce pro FVE	8
3.3.1. Střešní konstrukce	8
3.3.1.1. Konstrukce pro pálenou/betonovou tašku	8
3.3.1.2. Konstrukce pro trapézový / falcovaný plech	9
3.3.1.3. Konstrukce pro střechu z hydroizolační fólie	10
3.3.2. Pozemní konstrukce	10
3.3.2.1. Fixní konstrukce	11
3.3.2.2. Konstrukce s jednoosým sledováním	12
3.3.2.3. Konstrukce s dvouosým sledováním	14
4. Faktory výnosnosti	15
4.1. Energetické	15
4.1.1. Záření na modul	15
4.1.2. Ztráty	16
4.1.3. Degradace panelu	16
4.2. Ekonomické	17
4.2.1. Náklady na výstavbu a demontáž FVE	17
4.2.2. Provozní náklady na FVE	19
4.2.3. Variabilní náklady	20

4.2.4. Cena elektřiny	20
4.2.5. Náklady na pozemek	20
4.2.6. Dotace na FVE	21
4.2.7. Diskontní sazba	21
5. Metodika	22
5.1. Stanovení optimálních parametrů konstrukce	22
5.2. LCOE	22
5.3. Stanovení ceny elektřiny	23
6. Případová studie	24
6.1. Fixní konstrukce	24
6.1.1. Energetická analýza	24
6.1.2. Nákladová analýza LCOE	25
6.1.3. Ekonomická analýza	27
6.2. Konstrukce HSAT	29
6.2.1. Energetická analýza	29
6.2.2. Nákladová analýza LCOE	30
6.2.3. Ekonomická analýza	31
6.3. Konstrukce TSAT	33
6.3.1. Energetická analýza	33
6.3.2. Nákladová analýza LCOE	34
6.3.3. Ekonomická analýza	35
6.4. 2-osá konstrukce	37
6.4.1. Energetická analýza	37
6.4.2. Nákladová analýza LCOE	38
6.4.3. Ekonomická analýza	39
6.5. Porovnání jednotlivých variant	41
6.5.1. Energetické porovnání	41
6.5.2. Porovnání LCOE	41
6.5.3. Porovnání dynamické návratnosti	42
6.5.4. Porovnání ziskovosti	44
7. Závěr	47
Reference	48

Seznam obrázků.....	51
Seznam tabulek	52
Seznam příloh.....	53

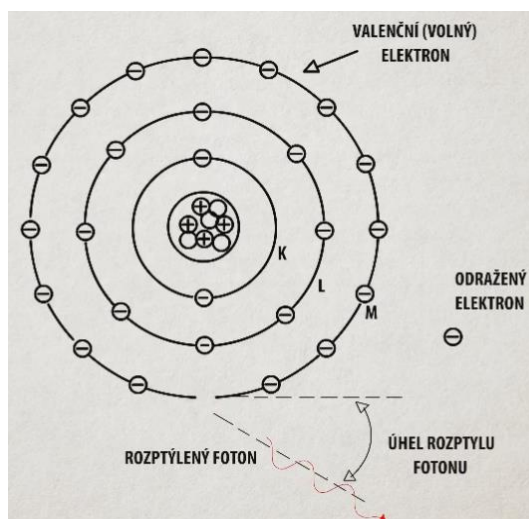
1. Úvod

Výstavba fotovoltaických elektráren na území České republiky v posledních letech stoupá, a to zejména díky zvýšení ekonomické návratnosti, která je podpořena cenovými výkyvy silové elektřiny a dotační podporou. Mezi výhody tohoto zdroje patří relativně snadná výstavba, vysoká míra škálovatelnosti, téměř nulové emise při provozu a možnost decentralizovat výrobu elektrické energie. Oproti tomu má fotovoltaika nevýhody v podobě nerovnoměrné výrobě, náchylnosti na počasí a vysokých nároků na plochu. Nároky na plochu se dají zmírnit využitím již zastavěné plochy, například instalací fotovoltaické elektrárny na střechy budov nebo instalací na místa, které nejsou vhodná pro jiné využití, jako jsou brownfieldy. Tato řešení jsou vhodná pro menší až středně velké instalace řádově desítky až stovky kWp. Při uvažování o větší instalaci s řádem jednotek až tisíců MWp je třeba uvažovat s umístěním panelů na zem. Cílem této práce bude ekonomické porovnání těchto konstrukcí a určení řešení pro optimalizaci ziskovosti pozemní fotovoltaické elektrárny.

2. Základní technické a fyzikální principy

Fotoelektrický jev byl poprvé popsán Heinrichem Hertzem v roce 1887. Při dopadu světla na povrch látky, foton předá svou energii. Pokud vlnová délka světla λ je dostatečně malá, pak frekvence ν a tím i energie, kterou záření po dopadu předá elektronu, mohou dosáhnout hodnoty potřebné k uvolnění elektronu z vazby v obalu atomu. Tuto energii, nutnou k uvolnění elektronu, nazýváme ionizační energie. Velikost této energie, kterou elektrony potřebují k tomu, aby se uvolnily z látky, se také nazývá fotoelektrická bariéra. Pokud elektronům dodáme dostatečnou energii, můžeme tuto bariéru překonat. Minimální frekvence, při níž fotony dodávají elektronům energii potřebnou k překonání fotoelektrické bariéry, se označuje jako prahová frekvence. [1]

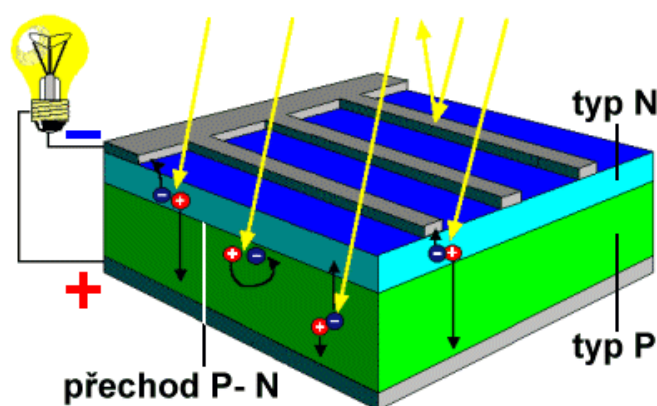
Rozlišujeme dva typy fotoefektu: vnější a vnitřní. V případě vnějšího fotoelektrického jevu dochází k uvolnění elektronů z vodivostního pásu kovového krystalu a samotný krystal opouštějí. V polovodičích může být pod vlivem elektromagnetického záření ovlivněn přeskok elektronů mezi energetickými hladinami, což zvyšuje vodivost. Tento jev se nazývá vnitřní fotoelektrický jev. [1]



Obr. 1 Princip fotoelektrického jevu

2.1. Princip fotovoltaického článku

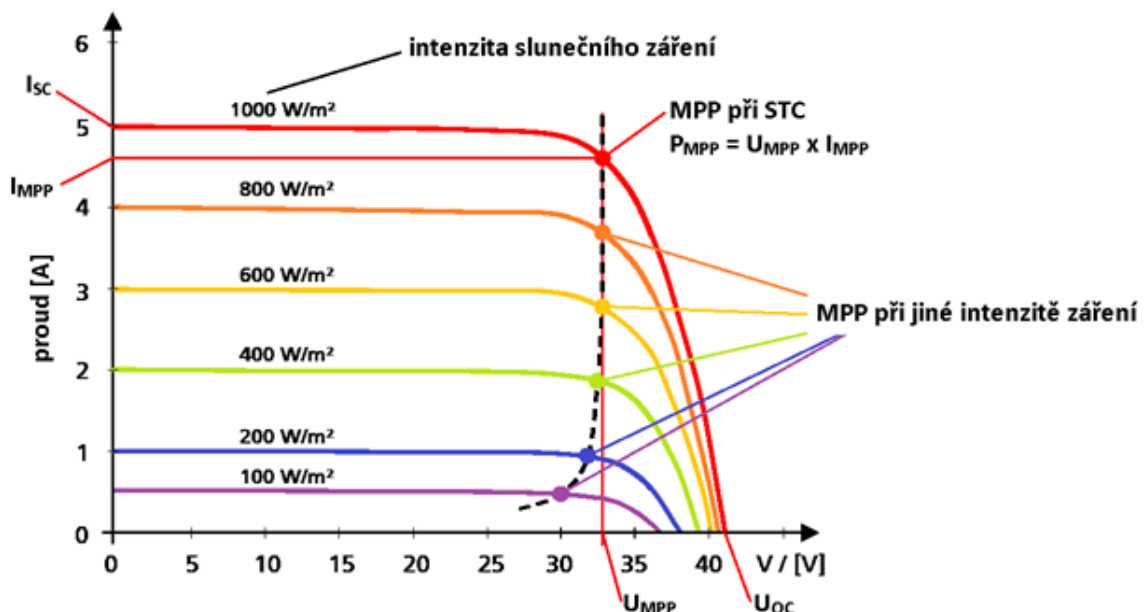
Hlavní komponentou fotovoltaické elektrárny je fotovoltaický panel, který se skládá z fotovoltaických článků. Solární článek je druh polovodičové diody, která je vyrobena z tenkého křemíkového plátku s vodivostí typu P a polovodičovou vrstvou typu N nahoře oddělenou P-N přechodem. Osvětlením článku vznikne v polovodiči vnitřní fotoelektrický jev a v polovodiči se z krystalové mřížky začnou uvolňovat záporné elektrony, což vytváří stejnosměrné napětí na P-N přechodu. Toto napětí je u křemíkových článků obvykle 0,5V. Energie ze světla se přeměňuje přímo na elektrickou energii. Připojením vodičů k článku a jeho připojením k zátěži se kladné a záporné náboje vyrovnávají a obvodem teče elektrický proud (stovky miliampér). Sériově-paralelním propojením článků vznikne panel. Napětí na tomto panelu dosahuje desítek voltů a jednotek ampér. [2]



Obr. 2 Princip fotovoltaického článku

2.2. Elektrické charakteristiky fotovoltaických článků

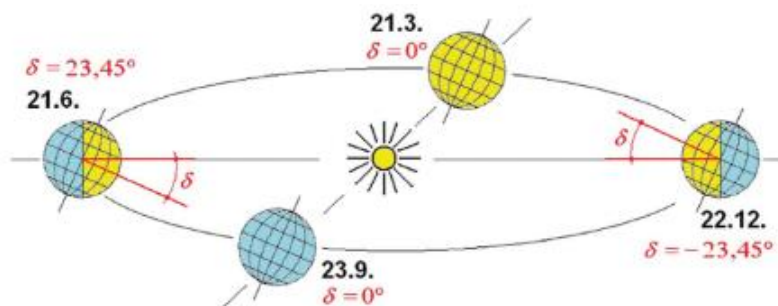
Praktické využití jakéhokoli zdroje energie zahrnuje tři klíčové veličiny: napětí, proud a vnitřní odpor. V případě fotovoltaických článků (FVČ) je napětí především závislé na použitém polovodiči. Proud při nulovém napětí (na krátko) se odvíjí od intenzity dopadajícího záření. Fotovoltaický článek při stálé intenzitě slunečního záření funguje jako zdroj stálého proudu, jehož intenzita je omezena počtem dopadajících fotonů za jednotku času. Obvykle se článek charakterizuje voltampérovou charakteristikou, tj. závislostí proudu na napětí. U fotovoltaických článků tedy záleží na intenzitě slunečního záření. Samozřejmě, že proud, který teče článkem, závisí na účinnosti - článek s vyšší účinností při stejné intenzitě záření může produkovat větší proud. Důležitý je také vnitřní odpor článku (což má vliv na nežádoucí úbytek napětí). Kromě toho se projevují i jiné vnější vlivy, jako je teplota (vyšší teplota znamená nižší napětí). V praxi nás zajímá především výkon článku, což je součin napětí a proudu. Z tvaru voltampérové charakteristiky vyplývá, že při daných podmínkách (osvětlení, teplota) existuje pouze jedna kombinace napětí a proudu, kdy dosahuje výkon článku svého maximálního hodnoty. Je-li to možné, snažíme se provozovat fotovoltaické články v tomto optimálním pracovním bodu MPP (Maximum Power Point). Výkon panelu se udává ve Wp (Watt peak) a je určen součinem napětí a proudu v bodě MPP při osvětlení 1000 W/m^2 , teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a koeficientu AM 1,5. Výkon za těchto podmínek se nazývá STC (Standard Test Conditions) a jedná se o osvětlení při ideálních podmínkách. V ČR dosahuje panel tohoto výkonu jen několikrát do roka. [1]



Obr. 3 VA charakteristiky FVČ pro různé intenzity slunečního záření

2.3. Sluneční záření

Dráha Země kolem Slunce je elipsovitá, což způsobuje, že vzdálenost mezi Zemí a Sluncem se mění a mění se i intenzita slunečního záření dopadajícího do zemské atmosféry. Průměrná intenzita slunečního záření je definována jako sluneční konstanta, $G_c = 1\,367\text{ W/m}^2$, což je výkon na jednotku plochy kolmý ke směru slunečního záření. Rovina zemského rovníku je vůči rovníku Slunce nakloněna. Tento úhel, nazývaný sluneční deklinace a je v čase proměnný. Nabývá hodnot od $-23,45^\circ$ do $+23,45^\circ$. Nejvyšší hodnotu má v době letního slunovratu a nejnižší v době slunovratu zimního. [3]



Obr. 4 Pozice Země vůči Slunci v průběhu roku

Intenzita slunečního záření je silně ovlivněna zemskou atmosférou. Tento vliv je vyjádřen koeficientem zemské masy AM. Hodnota AM je určena tloušťkou a složením atmosféry při pronikání záření. Závisí také na úhlu dopadajícího záření na Zem a tento úhel je určen vzájemnou polohou Země a Slunce. Označíme-li φ úhel mezi dopadajícím zářením a horizontální rovinou, je možno koeficient atmosférické masy vyjádřit ve tvaru [4]:

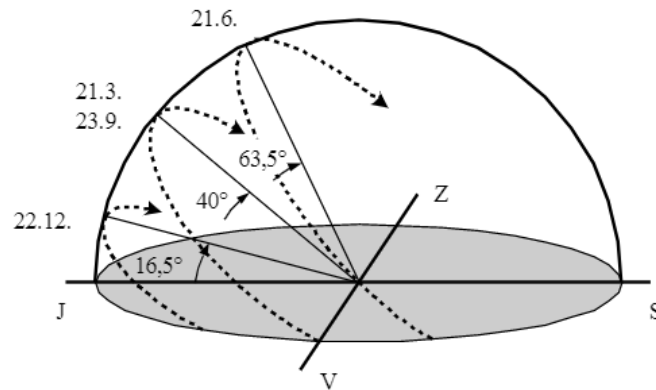
$$AM = \frac{1}{\sin(\varphi)} \quad (1.1)$$

Pro maximální intenzitu záření paprsků dopadající na povrch Země přibližně platí [4]:

$$B_{max} = G_c * 0,7^{AM} \quad (1.2)$$

Část záření se během průchodu atmosférou mnohokrát odrazí a rozptýlí na různých pevných a kapalných částicích, které atmosféra obsahuje. Vzniká tak difúzní záření s intenzitou D, jehož spektrum odpovídá přímému záření. Část záření se také může odrazit od sousedních ploch a tím vznikne tzv. albedo s intenzitou R. Celková intenzita záření se nejčastěji získá jako součet intenzit přímého, difúzního a odraženého záření dopadajícího na plochu. [4]

Vzhledem k vyosení zemské osy je úhel paprsků dopadajících na horizontální rovinu proměnlivý. V poledne při zimním slunovratu je úhel $\varphi = 16,5^\circ$ a při letním slunovratu je $63,5^\circ$ pro podmínky v ČR (50° severní šířky). Ideální sklon panelu v horizontální rovině je kolmý na úhel dopadajících paprsků. Při zimním slunovratu je tedy $90^\circ - 16,5^\circ = 73,5^\circ$ a při letním slunovratu je $90^\circ - 63,5^\circ = 26,5^\circ$. [4]



Obr. 5 Pohyb Slunce po obloze na 50° severní šířky

3. Komponenty FVE

Výstavbu fotovoltaické elektrárny lze rozdělit na hardware, instalaci a soft cost, které dále lze dělit na:

Hardware:

- Panely
- Střídače
- Konstrukce
- Připojení na síť – trafostanice a její příslušenství
- Kabely a jistící prvky (AC i DC)
- Zabezpečení areálu (kamery, plot)
- Monitoring

Instalace:

- Mechanická – montáž konstrukce a panelů
- Elektrická – Instalace kabelů a napojení panelů na síť
- Kontrolní – Stavbyvedoucí a BOZP

Soft cost:

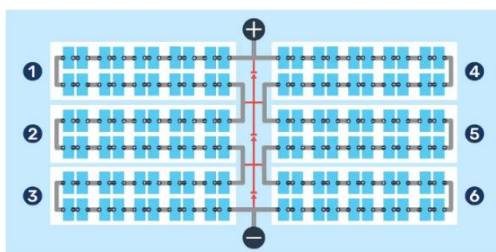
- Návrh systému - Projektová dokumentace
- Inženýring – Stavební povolení
- Administrace dotace
- Marže

3.1. Fotovoltaické panely

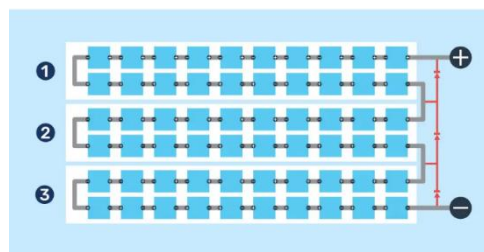
Za posledních 15 let cena fotovoltaických panelů výrazně klesla vlivem zvyšování účinnosti. Nejvyužívanější typ fotovoltaického článku je monokrystalický křemík, který má podíl na celkové produkci 79,8%, 15,2% tvoří ostatní druhy křemíkových článků, zbylých 5 % tvoří články z jiných materiálů. [5] Aktuální účinnost monokrystalických panelů se pohybuje od 21% do 23,6 %. Dalším trendem posledních let jsou technologie half-cut a bifacialita.

3.1.1. Half-cut technologie

Jednotlivé články se rozříznou na polovinu, čímž dojde ke snížení proudu na polovinu a tím i snížení odporu v článcích. Přesunutím sběrné bypass diody doprostřed panelu dojde zároveň k rozdělení řad na polovinu, což zvýší odolnost proti stínění, protože spodní a horní strana modulu jsou na sobě nezávislé. [6]



Obr. 7 Half-cut



Obr. 6 Full-cut

3.1.2. Bifacialita

Bifaciální panel přijímá světlo jak z přední, tak ze zadní strany fotovoltaického panelu. Zdrojem světla, které dopadá na zadní stranu je takzvané albedo, což je světlo odražené od okolních předmětů nebo země. Intenzita tohoto záření je pak závislá na povrchu okolního prostředí. Pro bifaciální moduly je výhodnější menší hustota fotovoltaického pole (GCR). [7] Výnos bifaciálního modulu je o 1-7% vyšší než u monofaciálního. [8]

3.2. Střídač

Střídač je podstatnou komponentou ve fotovoltaickém systému. Mění stejnosměrné napětí (DC) generované fotovoltaickými panely na střídavé (AC), které je v distribuční soustavě (DS). Pokud je střídač připojen na DS musí být synchronizovaný s napětím a frekvencí v síti. Další podstatnou funkcí je sledování MPP na panelech a sběr informací o výrobě FVE. Základní dělení střídačů je do třech kategorií na modulové, řetězcové a centrální střídače. Modulové střídače se připojují přímo na panel a sledují MPP na úrovni jednoho panelu. Vzhledem k vysoké ceně se v současné době příliš nepoužívají (většinou velice malé elektrárny).

3.2.1. Řetězový střídač

Řetězový střídač je v současné době nejrozšířenější typ střídače. Panely se sériově propojují do takzvaných stringů a ty se následně připojí na MPP trackery (MPPT), které jsou součástí střídače. Počet MPPT je dán velikostí střídače. Funkcí MPPT je sledovat MPP ve stringu. Při sériovém propojení panelů vzrůstá napětí v obvodu (stringu) a tím se zmenšují ohmické ztráty. Většina střídačů má maximální vstupní napětí ze stringu 900 až 1000V, což umožňuje připojit velké množství panelů na jednotlivé MPPT. U výkonnějších střídačů lze na jeden MPPT připojit paralelně 2 stringy. Nevýhodou těchto střídačů je náchylnost na různorodou výrobu jednotlivých panelů, která může být způsobena zastínění části stringu, odlišnými parametry panelů nebo odlišným sklonem a orientací jednotlivých panelů. Velikost proudu ve stringu je dána panelem, který generuje nejméně proudu. Při zastínění části panelů klesne jeho proud a MPPT ve střídači vyhodnotí, zda je výhodnější upravit proud celého stringu na tuto hodnotu nebo panel/část panelu odpojit. Tyto problémy se snaží výrobci řešit pomocí bypass diod a half-cut technologie na panelech. Dalším řešením je využití optimizérů. Funkcí optimizéru je sledovat MPP na úrovni 1 nebo 2 panelů podobně jako modulový střídač, pouze s tím rozdílem, že nepřeměňuje DC na AC ale DC na DC. Při poklesu proudu na panelu přemění část napětí na proud a tím vyrovná tuto ztrátu. Panel s odlišnou výrobou poté neomezuje ostatní panely ve stringu a úbytek výkonu je úměrný se zastíněnou částí. Cena takového řešení však zvýší náklady na instalaci této části FVE.

3.2.2. Centrální střídač

Centrální střídače jsou vhodné pro největší instalace v řádech desítek MWp. Panely se zapojí do stringů, podobně jako je tomu u řetězových střídačů, pouze se poté nepřipojují na jednotlivé MPPT ale spojují se paralelně na hodnoty stovek ampér a poté jsou připojeny do střídače. Výhodou je zjednodušení managementu díky menšímu počtu zařízení, které se pohybuje v řádech jednotek maximálně menších desítek oproti stovkám až tisícům řetězových střídačů. Další výhodou jsou menší náklady na jednotku výkonu.

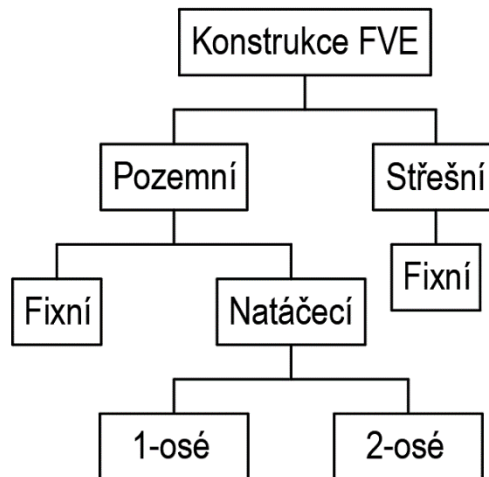
3.2.3. Dimenzování střídačů

Mezi hlavní výstupní parametry střídačů patří napětí a proud, z kterých je odvozen výkon střídače. Jelikož panely po většinu času nedosahují svých nominálních hodnot (STC) je možné nominální hodnoty střídače na AC straně dimenzovat na menší hodnoty než na DC. Maximální připojitelný výkon na DC straně je uveden v technickém listu střídače. Ideální poměr DC/AC je dán sklonem a orientací panelů. Obecně platí, že čím horší mají panely natočení ke slunečním paprskům/čím větší je různorodost orientací tím více můžeme střídač

poddimenzovat. Toto dimenzování má pozitivní dopad na snížení nominálních hodnot jistících prvků a dalších zařízení na AC straně a snížení rezervovaného výkonu v síti, což snižuje náklady na instalaci, aniž by došlo k výraznému snížení výroby. Pro instalace s fixní konstrukcí se poměr výkonů DC/AC pohybuje okolo 1,2 až 1,3 při poklesu roční výroby o 0,5-1%.

3.3. Konstrukce pro FVE

Základní rozdělení konstrukcí pro fotovoltaické panely je znázorněno na obr.6.



Obr. 8 Rozdělení konstrukcí pro fotovoltaické panely

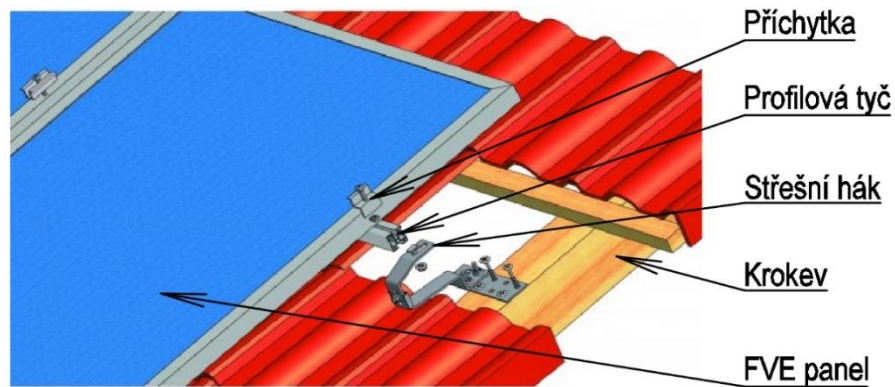
3.3.1. Střešní konstrukce

Střešní konstrukce se dále nechají rozdělit na konstrukce pro šikmé a ploché střechy a na konstrukce se zatížením nebo přímo kotvené do střechy. Natáčecí konstrukce se instalují na střechy velice zřídka, a to kvůli vysokým nárokům na upevnění. Na střeše není většinou možnost dostatečného upevnění, které by bylo bezpečné nejen pro panely ale i pro konstrukci střechy, proto je drtivá většina instalací na střechách provedena pomocí fixních konstrukcí. Materiál střechy je další významný faktor, který ovlivňuje provedení konstrukce. Mezi hlavní materiály střech patří pálená/betonová taška, trapézový/falcový plech a hydroizolační PVC fólie.

3.3.1.1. Konstrukce pro pálenou/betonovou tašku

Střechy, které jsou pokryté taškami mají větší sklon cca 30-45°, což v případě orientace na jih zvyšuje roční produkci energie. Sklon pro největší produkci pro fixní upevnění v podmínkách ČR je cca 35° s jižní orientací. Tašky jsou připevněny na latích, které jsou dále upevněny na nosných krokvicích, rozteče mezi krokvicemi jsou přibližně 1 metr. Pro upevnění panelů jsou používány takzvané střešní háky, které se zasunou pod tašku a následně připevní ke krokvicím. Na tyto háky se poté nasadí hliníkové profilové tyče, ke kterým je

pomocí příchytěk připevněn panel. Sklon panelu je stejný jako sklon střechy. Výhodou této konstrukce je její cena, jednoduchost a instalace, která nezasahuje do krytiny. Konstrukce se využívá nejvíce u rezidenčních instalací, protože krytiny komerčních hal jsou převážně z trapézového plechu nebo hydroizolační fólie.



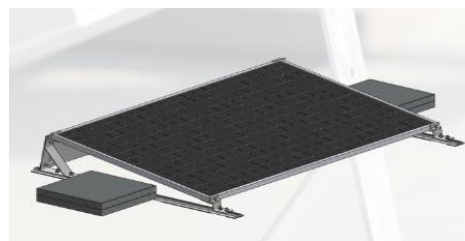
Obr. 9 Střešní konstrukce pro střechu z tašek

3.3.1.2. Konstrukce pro trapézový / falcovaný plech

Trapézový plech se používá pro střešní krytiny průmyslových hal. Sklon střechy je mírný 10-15°, sklon není sice ideální, ale ztráty nejsou tak velké, aby se vyplatila instalovat přídatná konstrukce, která by musela mít rozestupy mezi jednotlivými řadami. Další nevýhodou by byla nutnost dimenzování konstrukce na silný vítr. Panely lze upevnit na střechu několika způsoby buď pomocí závrtných vrtů, na které se následně připevní hliníkový profil nebo přímé uchycení profilu na střeše pomocí textů. V případě střech z falcovaného plechu lze na falc přidělat příchytku, na kterou se následně připevní hliníkový profil. Jedná se o snadné a levné upevnění, nevýhodou u instalace na trapézový plech je narušení krytiny závrtnými vrty a hrozba zatékání do střechy. Částečně se tento problém řeší přidáním těsnění.

3.3.1.3. Konstrukce pro střechu z hydroizolační fólie

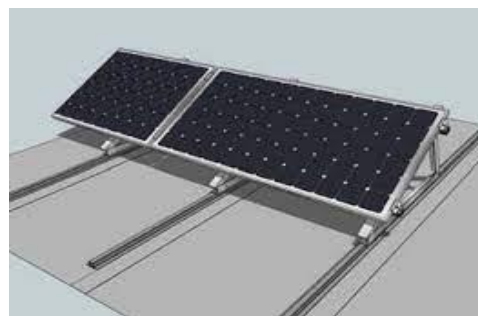
Hydroizolační fólie se používá jak u rezidenčních, tak komerčních střech. Střechy mají buď velice malý sklon nebo jsou rovné. Panely se upevňují na trojúhelníkovou konstrukci, která má sklon 10-15°. Jelikož jsou tyto střechy velice náchylné na zatékání v případě poškození hydroizolace je upevnění provedeno pomocí přitížení betonovými bloky, což zvyšuje nároky na statickou únosnost střechy. V případě, že je nosnost střechy nedostatečná je možné použít hliníkové profily potažené PVC, které jsou přitaveny na hydroizolační fólii. Profil poté slouží ke kotvení trojúhelníkových konstrukcí. Rovná střecha umožňuje natočení panelů na libovolný směr a tím lze optimalizovat poměr vlastní spotřeby. Další využívanou konstrukcí pro optimalizaci vlastní spotřeby je konstrukce východ-západ. Trojúhelníkové konstrukce se dávají v tomto případě zády k sobě a tím se zvýší pokrytá plocha panelů a dojde ke zploštění výroby, což znamená že fotovoltaická elektrárna dodává v průběhu dne rovnoměrnější výkon. Jak již název napovídá panely jsou v tomto případě nakloněny na východ a západ, úhel sklonu je 10°. Tato konstrukce má menší nároky na přitížení od betonových bloků.



Obr. 11 Konstrukce pro rovné střechy zatížená betonovým blokem



Obr. 10 Konstrukce Východ-Západ



Konstrukce přitavená k hydroizolační fólii

3.3.2. Pozemní konstrukce

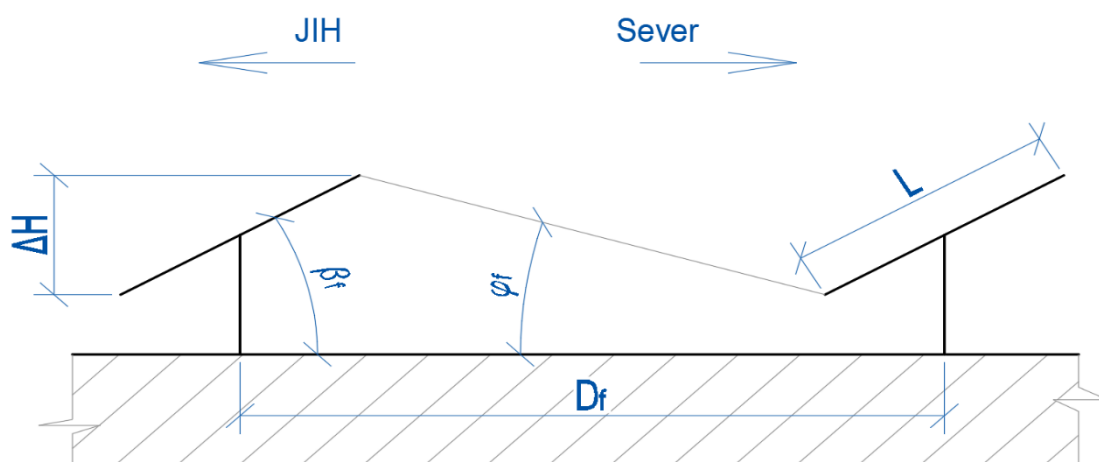
Pozemní konstrukce mají oproti střešním výhodu ve větší tuhosti a širší škále provedení, protože nejsou limitovány tvarem a nosností střech. Hlavní rozdělení pozemních konstrukcí je na fixní a natáčecí, přičemž natáčecí se dále dělí podle os natáčení. Parametry konstrukcí se liší dle jejich typu. Jeden parametr je ovšem společný pro všechny typy a je jím využitelnost pozemku GCR (ground coverage ratio). Tento parametr se vypočítá jako podíl plochy všech panelů a plochy pozemku.

$$GCR = \frac{S_{panelů}}{S_{pozemku}} \quad (3.1)$$

3.3.2.1. Fixní konstrukce

Jedná se o nejjednodušší konstrukci, hlavními parametry je sklon β_f , úhel stínění φ_f a délka fotovoltaického panelu L . Rozestupy D_f , poté lze dopočítat pomocí tohoto vzorce:

$$D_f = L * \left[\frac{\sin(\beta_f)}{\operatorname{tg}(\varphi_f)} + \cos(\beta_f) \right] \quad (3.2)$$



Obr. 12 Geometrie fixní konstrukce

Vzhledem k tomu, že rozestupy ve východo-západním směru jsou velice malé cca 2 cm můžeme rovnici pro využitelnost pozemku GCR zjednodušit na poměr délek L a D_f .

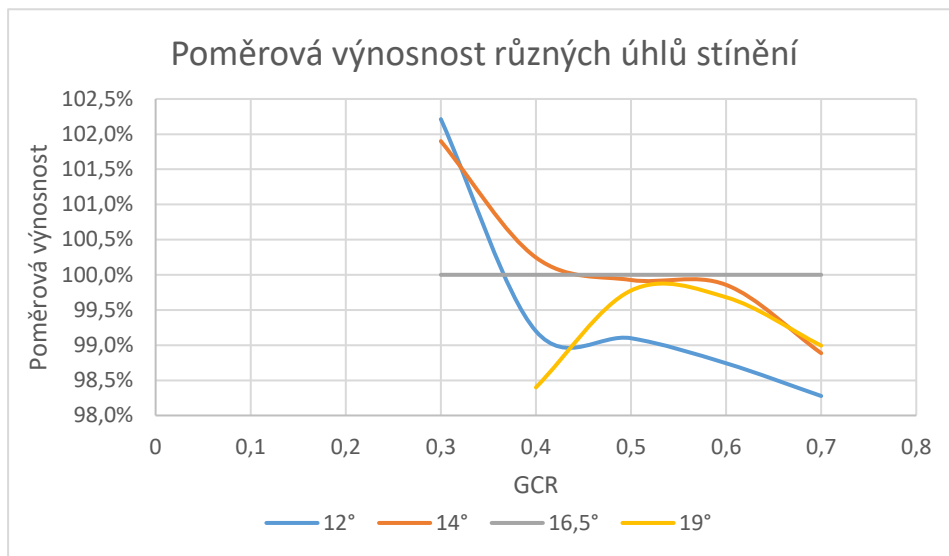
$$GCR = \frac{L}{D_f} = \frac{L}{L * \left[\frac{\sin(\beta_f)}{\operatorname{tg}(\varphi_f)} + \cos(\beta_f) \right]} = \frac{1}{\left[\frac{\sin(\beta_f)}{\operatorname{tg}(\varphi_f)} + \cos(\beta_f) \right]} \quad (3.3)$$

Výsledná rovnice nezávisí na rozměrech panelu, a tudíž je nemusíme uvažovat při následném porovnávání. Úhel φ_f je dle obecné poučky určen jako úhel v poledne zimního slunovratu. V případě ČR je tento úhel $16,5^\circ$. Toto pravidlo jsem ověřil pomocí simulace v programu PV-GIS. Kde byly uvažovány úhly stínění $\varphi_f = 19^\circ, 16,5^\circ, 14^\circ$ a 12° . Při zachování GCR je pro větší úhel stínění φ_f je možno nastavit větší úhel sklonu β_f a naopak, tímto vzniká optimalizační problém, kde se porovnávají ztráty vlivem stínění a ztráty kvůli neoptimálnímu sklonu.

Přepoččet na horizont stínění byl proveden následující rovnicí:

$$\text{horizont}(\alpha) = |\cos(\alpha)| * \varphi_f \quad (3.4)$$

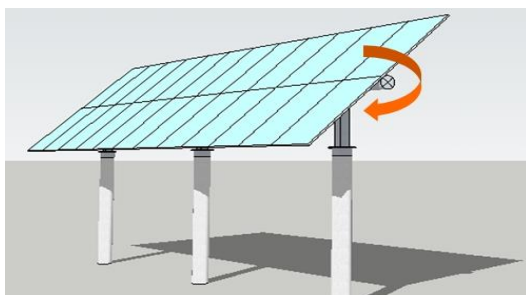
Kde α je azimut slunce během dne. Azimut slunce je definován od severu po směru hodinových ručiček v rozsahu 90-270° (východ-západ) při jižní orientaci je úhel stínění v 90° (východ) nulový a při 180° (jih) maximální tzn. φ_f . Kroky azimutu byly provedeny po 10°.



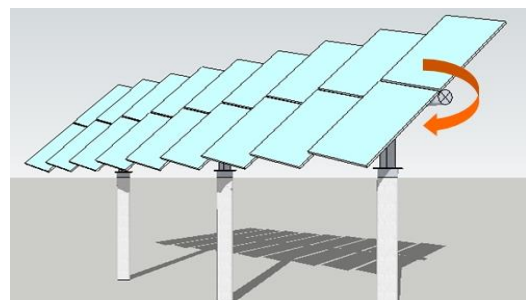
Graf zobrazuje výnosnost jednotlivých úhlů stínění v závislosti na GCR, referenčním bodem je výnosnost při úhlu stínění 16,5°. Z grafu je patrné, že od GCR 0,3 do 0,4 je výnosnost pro úhel 12° až 14° větší než 16,5°, to je dáno tím, že při tomto GCR dochází u úhlu 16,5° k překonání ideálního sklonu (pro jižní orientaci je sklon cca 35°) a tudíž vznikají ztráty jak stíněním, tak nedokonalým úhlem β_f . Pro následující simulace bude tedy použit úhel stínění β_f do bodu ideálního sklonu, a poté se bude zmenšovat úhel stínění.

3.3.2.2. Konstrukce s jednoosým sledováním

Jedná se o středně složitou konstrukci, která má osu sledování jih-sever a sleduje tedy směr východ-západ. Provedení je možné buď bez náklonu na jih takzvaný systém HSAT (horizontal single axis tracker) nebo s náklonem TSAT (tilted single axis tracker).



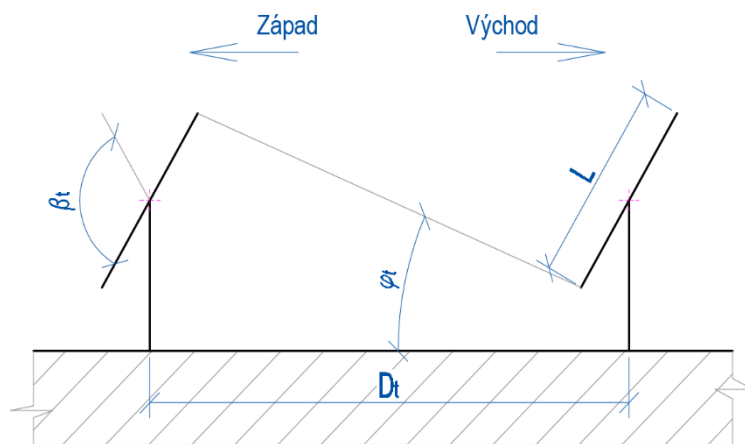
Obr. 13 Systém HSAT



Obr. 14 Systém TSAT

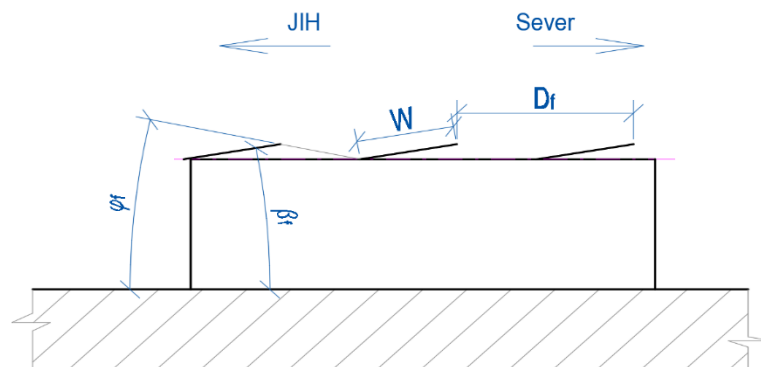
Hlavními parametry konstrukce: sklon panelů β_f , úhel rotace β_t , úhel meziřadového stínění φ_t a úhel mezipanelového stínění φ_f . GCR se poté získá vynásobením GCR_f a GCR_t .

GCR_t je závislé na proměnlivém úhlu φ_t , tudíž pro určení optima by bylo zapotřebí provést simulaci pro všechny kombinace sklonu v rámci roku. Vzhledem k náročnosti tohoto výpočtu bude optimum zjištěno takzvaným backtrackingem. Backtracking se používá pro sledovací algoritmus jednoosých konstrukcí a zabraňuje mezi řadovému stínění pomocí úpravy úhlu sklonu β_t . Simulace výroby energie bude probíhat v programu PV-Sol, který pro jednoosé sledování má parametr GCR_t jakožto vstupní, součástí programu je i backtrackingový algoritmus. Rozsah β_t je u většiny systémů 120° .



Obr. 15 Geometrie konstrukce osa V-Z

GCR_f se určí dle rovnice uvedené pro fixní konstrukce (3.3), délka L je zde nahrazena šířkou W . Úhel mezipanelového stínění φ_f bude uvažován stejný jako pro fixní konstrukci, tedy $16,5^\circ$ do dosažení optimálního sklonu. Pro systém HSAT je GCR_f rovno 1, protože v tomto směru nevznikají žádné mezery.



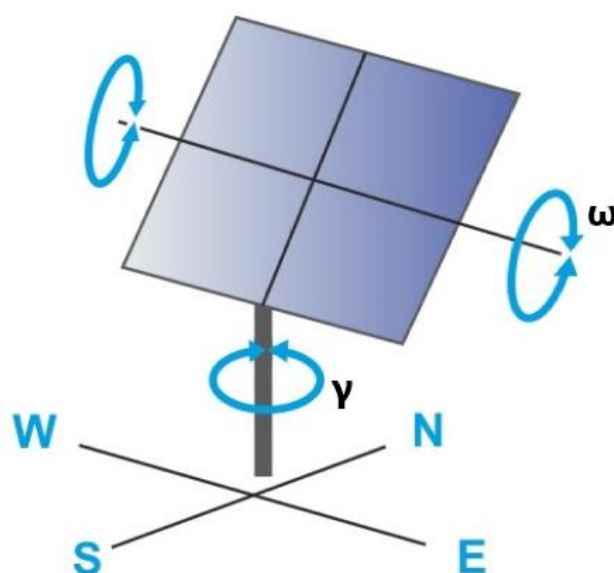
Obr. 16 Geometrie jednoosé konstrukce osa J-S

3.3.2.3. Konstrukce s dvouosým sledováním

Jedná se o nejsložitější typ konstrukce. Hlavními parametry je úhel rotace azimutu γ a úhel rozsahu sklonu ω . Vzhledem ke složitosti optimalizačního algoritmu budou využity výsledky stínění z následující studie [9], která se zabývala stíněním dvouosých systémů v zeměpisných šířkách 0-55°. Studie se zabývá také uspořádáním panelů na konstrukci, nejlepších výsledků dosáhl obdélníkový tvar. Pro ČR bude stínění určeno lineárně vzhledem k severní šířce.

GCR	Lendemarke 55° s.š	Tanger 35,8° s.š	ČR - 50° s.š
0,1	0,7 %	0,6 %	0,68 %
0,2	2,9 %	2,4 %	2,78 %
0,3	6,3 %	4,9 %	5,95 %
0,4	10,5 %	8,0 %	9,88 %

Tabulka 1 Ztráty stíněním pro jednotlivá GCR a lokality



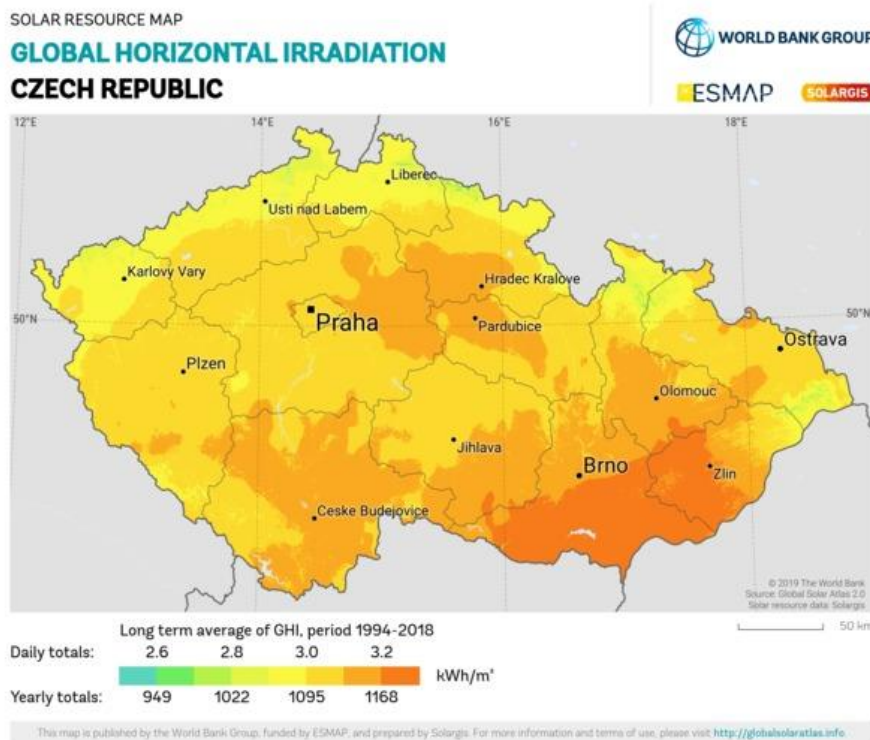
2- Axis Trackers

Obr. 17 Geometrie 2-osé konstrukce

4. Faktory výnosnosti

4.1. Energetické

Hlavním energetickým faktorem je záření, které dopadne na vodorovnou plochu v dané lokalitě za 1 rok. Pro ČR se pohybuje tato hodnota od 949 kWh/m² na severu až po 1168 kWh/m² na jižní Moravě [10].



Obr. 18 Mapa záření pro ČR [10]

4.1.1. Záření na modul

Záření na modul je ovlivněno spektrem dopadajícího světla, albedem, vhodným nakloněním, stíněním a odrazem povrchu. Největší vliv má sklonu modulu a stínění. Stínění je tvořeno stromy, okolními budovami, samotnými panely případně jinými překážkami v krajině. Sklon a orientace modulu závisí na typu konstrukce.

Globální záření - horizontální	1 129,83 kWh/m²	
Odhylka od standardního spektra	-11,30 kWh/m ²	-1,00 %
Odraz od země (Albedo)	10,48 kWh/m ²	0,94 %
Vyrovnění a sklon úrovně modulu	147,43 kWh/m ²	13,06 %
Odstínění, zacolnění	-38,29 kWh/m ²	-3,00 %
Odraz na povrchu modulu	-12,43 kWh/m ²	-1,00 %
Globální záření na modul	1 225,72 kWh/m²	

Obr. 19 Záření na modul - fixní konstrukce se sklonem 25° - Vysočina

4.1.2. Ztráty

Globální záření na modul	1 225,72 kWh/m²	
	1 225,72 kWh/m ²	
	x 4714,973 m ²	
	= 5 779 231,64 kWh	
FV globální záření	5 779 231,64 kWh	
Znečištění	0,00 kWh	0,00 %
STC konverze (jmenovitá účinnost modulu 21,21 %)	-4 553 431,30 kWh	-78,79 %
FV jmenovitá energie	1 225 800,35 kWh	
Chování za nízké intenzity světla	-2 842,21 kWh	-0,23 %
Odchylka od jmenovité teploty modulu	2 322,78 kWh	0,19 %
Diody	-6 126,40 kWh	-0,50 %
Nesrovnalost/Nesoulad (údaje výrobce)	-24 383,09 kWh	-2,00 %
Nesrovnalost/Nesoulad (zapojení/stínění)	0,00 kWh	0,00 %
FV energie (DC) bez sestupné regulace měničem	1 194 771,42 kWh	
Pokles pod výchozí výkon DC	-120,33 kWh	-0,01 %
Sestupná regulace z důvodu napětového rozsahu MPP	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu max. DC proudu	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu max. DC výkonu	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu max. AC výkonu/cos phi	-18 030,70 kWh	-1,51 %
Přizpůsobení MPP	-1 773,21 kWh	-0,15 %
FV energie (DC)	1 174 847,19 kWh	
Energie na vstupu měniče	1 174 847,19 kWh	
Odchylka vstupního napětí od jmenovitého	-3 411,66 kWh	-0,29 %
Převod DC/AC	-20 196,91 kWh	-1,72 %
Spotřeba v provozní pohotovosti (Střídač)	-226,36 kWh	-0,02 %
Ztráty v kabelech celkem	-34 537,16 kWh	-3,00 %
FV energie (AC) mínus pohotovostní spotřeba	1 116 475,10 kWh	
Energetický výnos FVS (AC síť)	1 116 701,46 kWh	

Obr. 20 Příklad ztrát z programu PV-SOL

Na Obr. 20 jsou znázorněny ztráty z programu PV-SOL. Nejvýznamnější ztráta je vlivem účinnosti panelu a pohybuje se mezi 77-80% u komerčně používaných panelů. Další významné ztráty, které vznikají, tak jsou z nesouladu výrobního modulu, vlivem omezení AC výkonu, převod AC/DC a ztráty v kabelech.

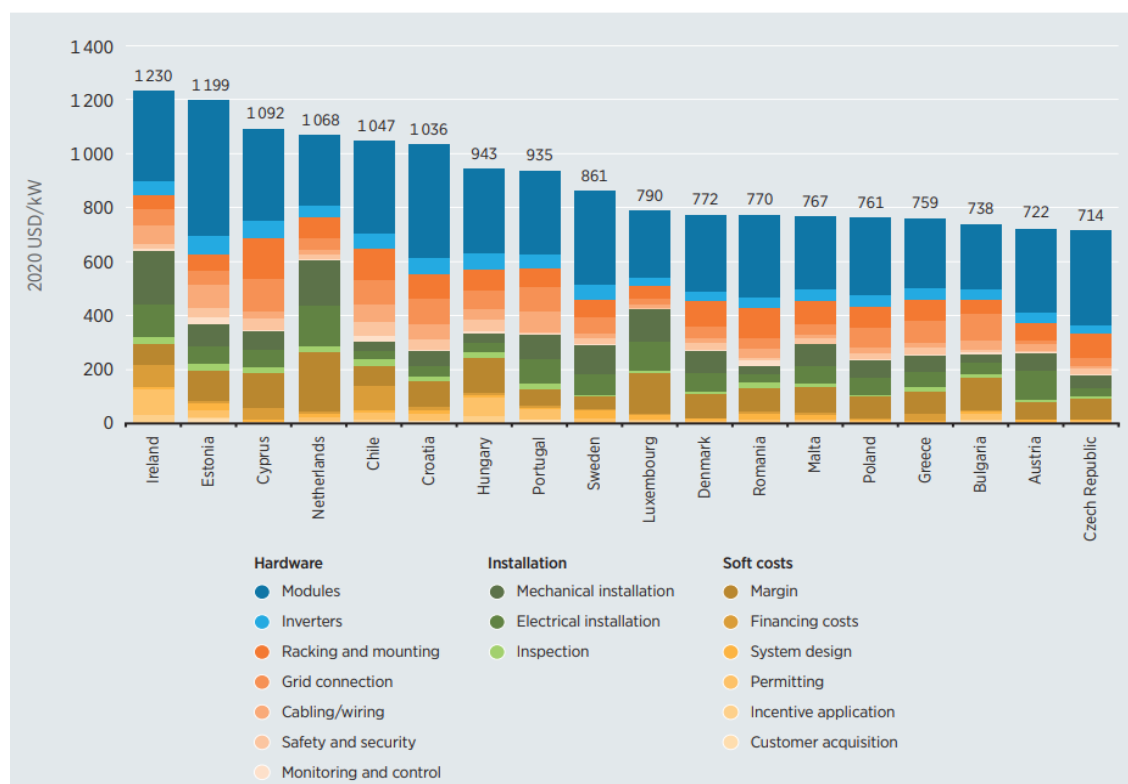
4.1.3. Degradace panelu

Panely v průběhu času vlivem působení slunečního záření ztrácejí svůj výkon. Nejvýraznější ztráta je v prvním roce provozu a dosahuje kolem 2% v závislosti na kvalitě panelu v následujících letech je poté roční úbytek výkonu 0,5-0,6%. Tyto hodnoty uvádí výrobce v datasheetu panelu a ručí za ně ve většině případů 25-30 let.

4.2. Ekonomické

4.2.1. Náklady na výstavbu a demontáž FVE

Náklady na technologii FVE se liší v závislosti na provedení. Výchozím zdrojem pro určení těchto nákladů bude IRENA report z roku 2020 [11], některé ceny ovšem neodráží aktuální tržní stav, proto budou korigovány.

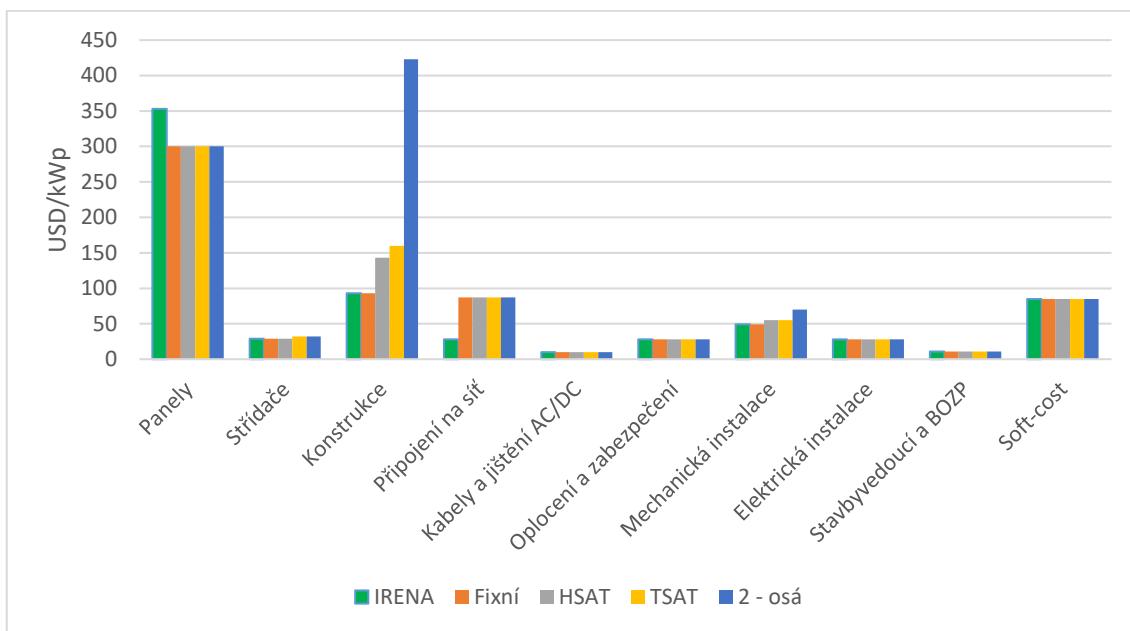


Obr. 21 Cena výstavby FVE v jednotlivých státech – IRENA 2020 [11]

V tabulce č.2 jsou znázorněny ceny, které budou použity pro hodnocení jednotlivých konstrukcí.

Komponenta	Cena \$/kWp				
	IRENA	Fixní	HSAT	TSAT	2 - osá
Panely	353	300	300	300	300
Střídače	29	29	29	32	32
Konstrukce	93	93	143	160	423
Připojení na síť	28	87	87	87	87
Kabely a jištění AC/DC	10	10	10	10	10
Oplocení a zabezpečení	28	28	28	28	28
Mechanická instalace	49	49	55	55	70
Elektrická instalace	28	28	28	28	28
Stavbyvedoucí a BOZP	11	11	11	11	11
Soft-cost	85	85	85	85	85
Celkem	714	720	776	796	1074

Tabulka 2 Ceny jednotlivých provedení

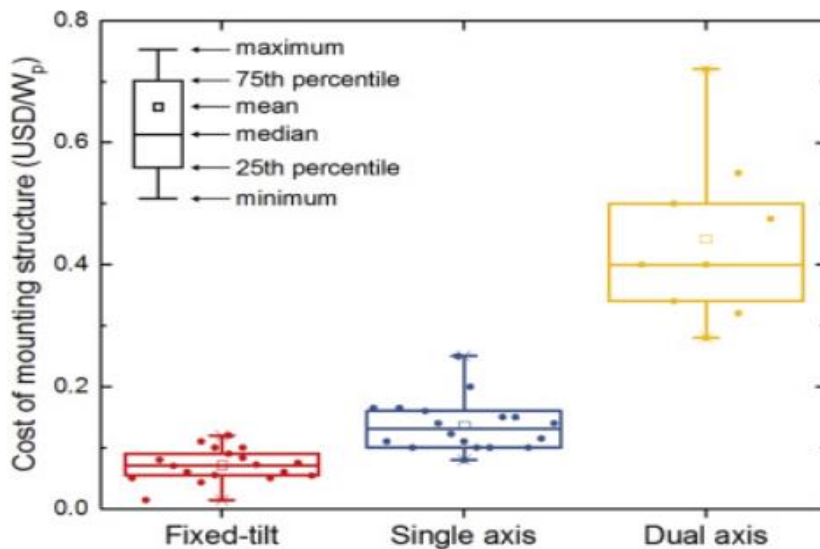


Obr. 22 Korekce položek vzhledem k IRENA REPORTU [11]

Vývoj ceny fotovoltaických panelů má stále klesající tendenci od roku 2020 klesla cena z 0,35 \$/Wp na aktuálních 0,3 \$/Wp. Dále cena bifaciálních modulů je totožná s monofaciálními.

Cena střídačů je shodná jako v IRENA reportu, pro poměr DC/AC = 1,3. U TSAT a 2-osé konstrukce je uvažován poměr DC/AC = 1,2 tudíž i vyšší cena.

Ceny konstrukcí dle další studie z roku 2020 [12] jsou pro fixní konstrukci 0,07\$/Wp, jednoosou konstrukci 0,12\$/Wp a dvouosou konstrukci 0,4 \$/Wp. Irena report uvádí cenu 0,93/Wp pro fixní. První studie uvádí světovou cenu,



Obr. 23 Ceny pozemních konstrukcí dle typu [12]

tudíž pro započtení dopravy do ČR bude uvažováno u všech konstrukcí navýšení ceny o 0,023\$/Wp.

Připojení na síť je dle IRENA reportu uvažováno na 28\$/kWp, což je v případě připojení na vysoké napětí, kdy je potřeba transformátor nereálné. Cena připojení se skládá z transformátoru, jeho příslušenství, trafostanice a rezervovaného výkonu v síti.

Cena za rezervovaný výkon je dle přílohy 8 vyhlášky č. 16/2016 Sb. 800 000 Kč/MW pro připojení s nutností rozšíření distribuční soustavy a 270 000 Kč/MW pro připojení bez této nutnosti. Cena kompletního transformátoru včetně kioskové trafostanice byla pro město Tábor v roce 2016 dle veřejné zakázky [13] 784 300 Kč za 630 kVA trafostanici, což při poměru AC/DC 1,3 odpovídá přibližně 800 kWp. Souhrnná průměrná inflace od roku 2016-2022 je 32,6% dle Českého statistického úřadu [14]. Po započtení inflace a při uvažování připojení s nutností rozšíření bude tedy odhadní cena 1 544 000 Kč za trafostanici pro 800 kWp elektrárnu, což je přibližně 87\$/kWp.

Ostatní ceny jsou přibližně stejné, pouze u mechanické instalace byla navýšena cena pro TSAT systém a 2 osý systém z důvodu náročnosti v případě 2-osého a z důvodu velikosti pro TSAT. Cena demontáže na konci životnosti je zvolena na cenu diskontované montáže.

4.2.2. Provozní náklady na FVE

Roční provozní náklady se aktuálně pohybují mezi 5-8 \$/kWp. Vývoj nákladů je klesající od roku 2010 klesly z 15\$ na 5 \$/kWp. [15] Tyto náklady neobsahují výměnu střídače a motorů otočných systémů, která bude uvažována po 15 letech. Menší GCR a složitější konstrukce budou v případové studii uvažovány jako nejdražší. Naopak větší GCR a jednoduchá konstrukce budou mít náklady nejmenší.

GCR	OPEX [\$/kWp]			
	Fixní	HSAT	TSAT	2-osé
0,1	7,5	7,5	8	8
0,2	7	7,5	7,5	8
0,3	6,5	7	7	7,5
0,4	6	6,5	6,5	7
0,5	5,5	6	-	-
0,6	5,5	6	-	-
0,7	5	5,5	-	-
0,8	5	5,5	-	-
0,9	5	5	-	-

Tabulka 3 - Provozní náklady

4.2.3. Variabilní náklady

Variabilní náklady jsou závislé na množství vyrobené elektřiny, tyto náklady můžeme rozdělit na regulované a neregulované. Mezi regulované náklady patří poplatek za využití sítí, poplatek za systémové služby a poplatek za činnost operátora trhu. Dle věstníku Energetického regulačního úřadu [16] je cena za systémové služby 113,53 Kč/MWh a cena za využití sítí na hladině vysokého napětí v distribuční síti EG.D a.s. 90,51 Kč/MWh. Cena za činnost operátora trhu je zanedbatelná 1,04 Kč/odběrné místo/měsíc. Provoz elektrárny bude uvažován v režimu výrobce první kategorie, který nemusí platit měsíční poplatek za rezervaci výkonu v síti, který je dle věstníku Energetického regulačního úřadu [16] pro hladinu vysokého napětí v distribuční soustavě EG.D a.s. 162 194 Kč/MW/měsíc. Neregulovaná složka variabilních nákladů je cena za přístup k dennímu trhu s elektřinou v případě prodeje za tržní spotové ceny. U menších elektráren se tento poplatek pohybuje od 10-15% z tržní ceny elektřiny. Pro středně velké elektrárny se poté nechá předpokládat cena okolo 5%. Pro největší elektrárny se může již vyplatit zažádat o licenci na prodej elektřiny a být přímým účastníkem trhu.

4.2.4. Cena elektřiny

Výrobce elektřiny uzavírá smlouvu s obchodníkem s elektřinou, který následně elektřinu přeprodává zákazníkovi. Dva nejčastější typy výkupu jsou buď za spotové ceny nebo za fixní cenu. Fixní cena je stanovována na určité období a vychází z aktuální situace na trhu, případně z předpokládané situace. Fixní ceny nejsou veřejné, protože závisí na jednotlivých účastnících trhu, jakou cenu si dohodnou. Tržní cena je stanovována vždy 1 den dopředu operátorem trhu, který ji stanoví podle aktuální nabídky a poptávky, tyto ceny jsou veřejné a volně přístupné na webu operátora trhu [17].

4.2.5. Náklady na pozemek

Cena pozemku závisí na mnoha faktorech nejdůležitější jsou ovšem připojitelnost a realizovatelnost. Připojitelnost závisí na kapacitě sítě a určuje ji distributor. Realizovatelnost závisí na územním plánu obce. Fotovoltaická elektrárna se realizuje na plochách výroby [18], v ideálním případě je v územním plánu zanesena výroba z obnovitelných zdrojů energie. Pokud pozemek není v územním plánu veden jako zastavitelný nebo jeho charakter využití neumožňuje instalaci FVE je možné zažádat o změnu územního plánu, nicméně jedná se o zdoluhavý proces. Dalšími faktory jsou členitost pozemku, sklon, tvar, dostupnost, přístup k ostatním inženýrským sítím, velikost, celistvost a lokalita. V závislosti na těchto parametrech poté pozemky stojí desítky až stovky Kč/m².

Dalším případem může být situace, kdy firma uvažující o výstavbě FVE již pozemek vlastní a nevyužívá. V tomto případě jsou náklady na pozemek téměř nulové. Pro zjednodušení budou v případové studii voleny náklady formou ročního nájmu ve výši 5% hodnoty pozemku.

4.2.6. Dotace na FVE

Dotace na podporu obnovitelných zdrojů elektřiny jsou v dnešní době jedna z hlavních motivací pro jejich výstavbu. Dotace může poskytnout zlepšení ekonomické efektivity až o polovinu. Pro rok 2022/2023 byly vypsány pro oblast soukromého sektoru 2 výzvy. Rozlišení těchto výzev bylo výkonové do a nad 1 MWp. Do 1 MWp byla dotace pro pozemní instalace určena následujícím vzorcem, kde P_{inst} je instalovaný výkon elektrárny v kWp [19]:

$$Dotace(P_{inst}) = 0,35 * (-1092 * \ln(P_{inst}) + 28657) * P_{inst} \quad (4.1)$$

Při uvažování velikosti 1 MWp je výše dotace 291€/kWp. Nad 1 MWp si dotaci určoval sám žadatel, přičemž byly financovány projekty dle efektivity.

4.2.7. Diskontní sazba

Pro hodnocení dlouhodobé investice je nutné použít diskontovanou sazbu. Aktuální úrokové sazby v ČR jsou nejvyšší za posledních 20 let. Lombardní sazba, což je sazba, za kterou půjčuje ČNB ostatním bankám [20] je na 8%.



Obr. 24 Vývoj 2T Repo sazby

Pro FVE projekt tedy lze uvažovat v prvních letech sazbu mezi 9-10%. Sazby jsou na takto vysoké úrovni vlivem inflace, která ovšem v posledních měsících klesá a aktuální výhled ČNB pro rok 2024 je inflace na úrovni 2%. Sazba pro německé FVE byla v roce 2017 na 4,57%. [21] Z těchto důvodů volím v prvním roce diskontní sazbu 10% a pro následující období volím sazbu 6%.

5. Metodika

Energetické vstupy budou získány pomocí programu PV-SOL. Hodnocení bude rozděleno na 3 stupně, který jsou energetická efektivnost s jednotkou kWh/kWp/rok. Druhým stupněm bude nákladové hodnocení pomocí metody LCOE a třetím stupněm bude ekonomická výnosnost a určení návratnosti.

5.1. Stanovení optimálních parametrů konstrukce

Konstrukce může při stejných GCR mít různé parametry sklonu a úhlu stínění. Parametry fixní konstrukce budou pro jednotlivá GCR stanoveny dle kapitoly 3.3.2.1. HSAT konstrukce bude využívat optimalizaci pomocí backtrackingu. TSAT konstrukce bude kombinovat postup u fixní a HSAT konstrukce. Pro Dvouosý systém budou využity data ze studie, která se zabývala optimální rozložení této konstrukce. Stanovení ztrát stíněním proběhlo v této studii pro 4 místa, přičemž nejbližší jsou města Lendemarke (55° s.š.) a Tanger (35,8° s.š.). [9] Stínění pro případovou studii se stanoví lineárně vzhledem k severní šířce hodnoceného místa.

5.2. LCOE

Pro hodnocení investic v oblasti energetiky je nejčastěji využívaná metoda LCOE (Levelized Cost of Energy), která vychází z metody ČSH (čistě současné hodnoty). Oproti této metodě ovšem není nutné znát cash flow v jednotlivých letech, které se může v průběhu času výrazně lišit v závislosti na ceně elektřiny. LCOE je ukazatel nákladové efektivity, který umožňuje porovnat různé technologie, které mají stejný produkt. U fotovoltaických elektráren je produktem pouze elektrická energie tudíž do výpočtu není třeba zahrnovat energetické zisky dalších typů energie jako je tomu například u uhelných elektráren, které produkují odpadní teplo.

Jedná se o metodu, při které jsou porovnávány náklady vůči vyprodukované energii. Jelikož je elektřina generována v průběhu let, je nutné přenést tuto hodnotu do současnosti (podobně jako u ČSH) pomocí diskontní sazby.

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t + M_t}{1+r^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{1+r^t}} \quad (5.1)$$

Vzorec pro LCOE fotovoltaické elektrárny, kde n = životnost elektrárny, I_t = investice v roce t , M_t = údržba v roce t , E_t = vyprodukovaná elektřina v roce t a r = diskontní sazba. Výsledkem jsou poté vážené náklady na jednotku energie (€/kWh).

Nevýhodou této metody je, že nic neříká o průběhu výroby v rámci roku, měsíce popřípadě dne.

5.3. Stanovení ceny elektřiny

Pro stanovení návratnosti projektu je nutné znát cenu elektřiny. V posledních letech je ovšem tato cena velice volatilní, z tohoto důvodu volím stanovení ceny elektřiny metodou scénářů, kde bude volen optimistický, pesimistický a reálný scénář. Zdrojem budou výsledky krátkodobého trhu s elektřinou v ČR v hodinových intervalech, které budou následně spárovány s hodinovými daty výroby. Váženým průměrem bude poté stanovena průměrná roční cena.

Pro pesimistický scénář je volen rok 2020, kdy probíhala koronavirová krize a byl celkový útlum ekonomiky. Optimistický scénář bude rok 2022, kdy probíhala energetická krize. Pro reálný scénář je volena první polovina roku 2023 a druhá polovina roku 2021, tedy období před a po energetické krizi.

6. Případová studie

Zdrojem dat o záření je meteorologická stanice Kramolín se souřadnicemi N 49° 34' 47'', E 15° 4' 48''. Pro hodnocení je vybrán panel Canadian Solar CS7L-600MB-AG jako zástupce bifaciálního panelu a Canadian Solar CS7L-600MS pro monofaciální panely, účinnost obou panelů na přední straně je 21,2%. Simulace pro Fixní a HSAT konstrukce bude provedena v rozsahu 0,1-0,9 GCR, pro TSAT a 2-osý systém bude rozsah 0,1-0,4 GCR. Ztráty na kabelovém vedení a trafostanici jsou voleny 3%. Životnost elektrárny je uvažována na 30 let.

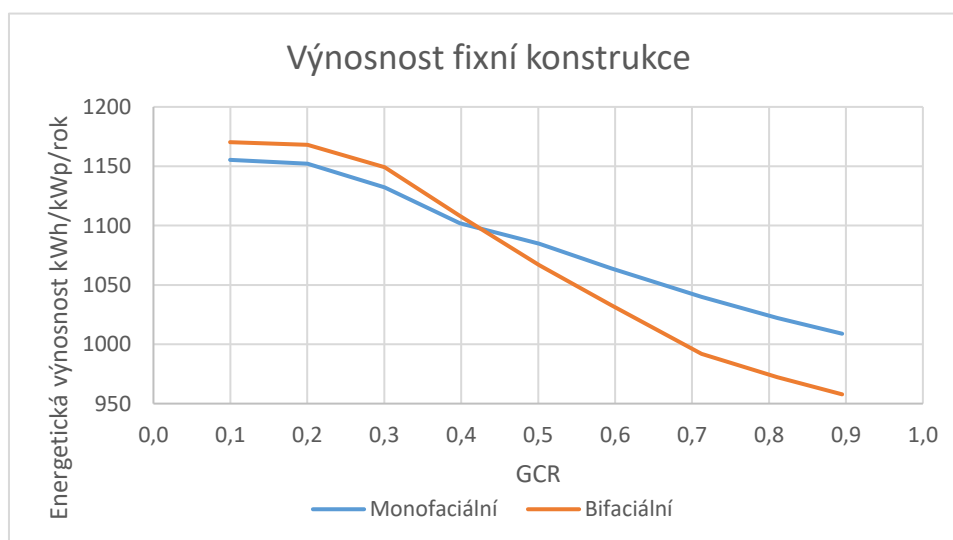
6.1. Fixní konstrukce

6.1.1. Energetická analýza

Simulace bude provedena pro azimut 180° (jižní orientace). Ztráty stíněním jsou určeny horizontem dle rovnice 3.4.

GCR	Azimut [°]	φ_f [°]	β_f [°]	En. Výnos - Monofaciální [kWh/kWp/rok]	En. Výnos - Bifaciální [kWh/kWp/rok]
0,1	180	3,56	35	1155,4	1170,3
0,2	180	7,83	35	1152,1	1168,2
0,3	180	12,87	35	1132,1	1149,2
0,4	180	16,5	29	1102,1	1108,3
0,5	180	16,5	18	1084,6	1066,6
0,6	180	16,5	12	1063,9	1033
0,7	180	16,5	7	1039,9	992
0,8	180	16,5	4	1022,2	972,3
0,9	180	16,5	2	1008,9	957,8

Tabulka 4 Parametry energetické analýzy pro fixní konstrukci



Obr. 25 Graf energetické výnosnosti fixní konstrukce

Energetický výnos pro bifaciální a monofaciální moduly se liší v závislosti na GCR, pro vyšší GCR mají lepší výsledky monofaciální panely naopak pro nižší GCR jsou výhodnější bifaciální panely. Vzhledem ke stejné ceně obou typů panelů bude pro LCOE hodnocení uvažováno od 0,1-0,4 GCR s bifaciálními panely a od 0,5-0,9 GCR s monofaciálními panely.

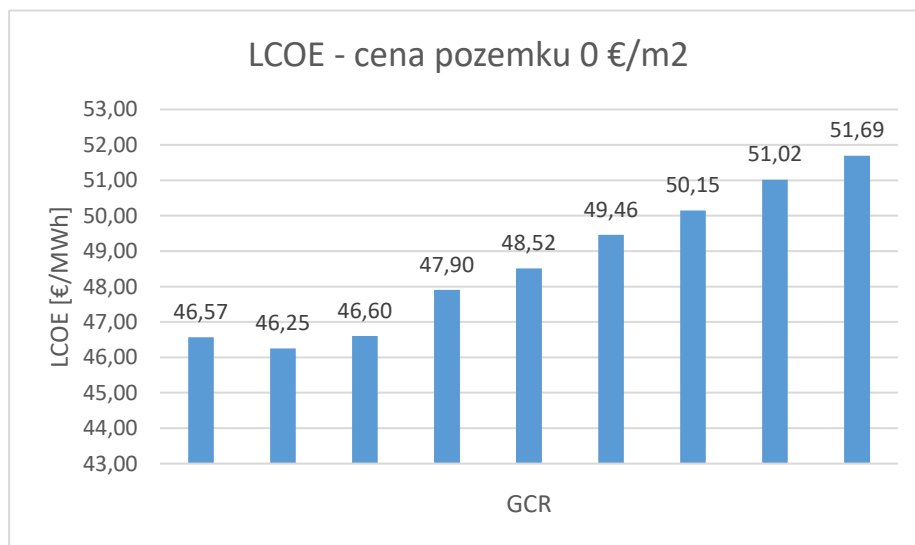
6.1.2. Nákladová analýza LCOE

Vstupní parametry pro analýzu LCOE jsou zobrazeny v tabulce 5. V 15 roce je uvažována výměna střídačů.

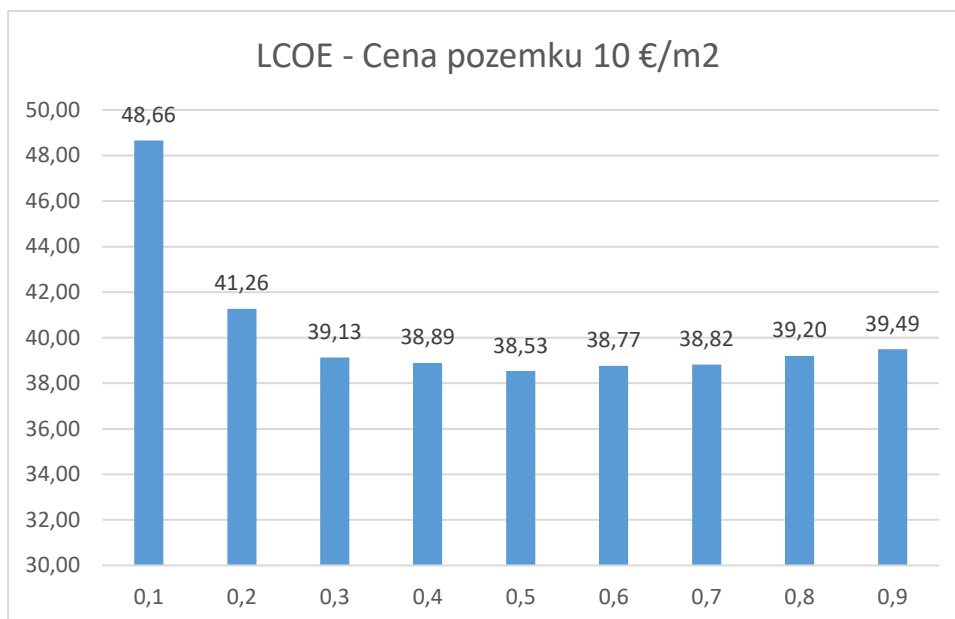
Vstupní parametry	
Investice [€/kWp]	638,00
Dotace [€/kWp]	291,00
Diskontní faktor	9%
Diskontní faktor po 3 letech	6%
Výroba v modelovém roce [MWh]	viz. en analýza
GCR	0,1-0,9
Cena pozemku [€/m ²]	0 ; 10,00
Roční náklady na údržbu [€/kWp]	viz. Tabulka č.3
Náklady v 15 roce [€/kWp]	29,00
Náklady v 30 roce [€/kWp]	49,00
Degradace panelu v 1 roce	2,00%
Degradace panelu ve 2 a dalším roce	0,55%
Účinnost panelu	21,20%
Výkon panelu [kWp]	0,60
Kurz EUR/USD	1,12
Kurz EUR/CZK	24,00

Tabulka 5 Vstupní parametry LCOE analýzy pro fixní konstrukci

Analýza byla zpracována pro 2 situace. První uvažuje cenu pozemku 0€/m² a druhá 10 €/m², náklady na pozemek jsou 5% z jeho hodnoty.



Obr. 26 LCOE pro fixní konstrukci bez nákladů na pozemek

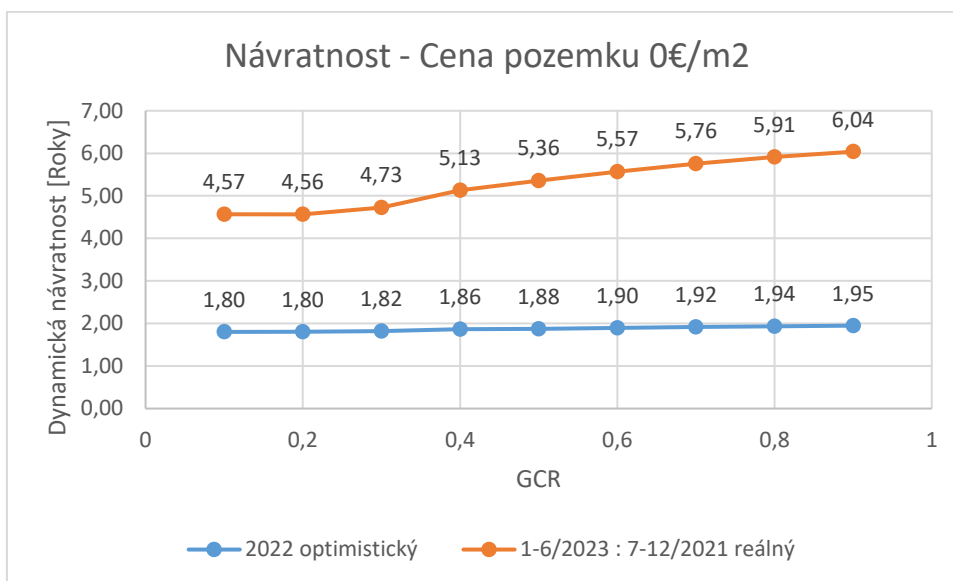


Obr. 27 LCOE pro fixní konstrukci s náklady na pozemek

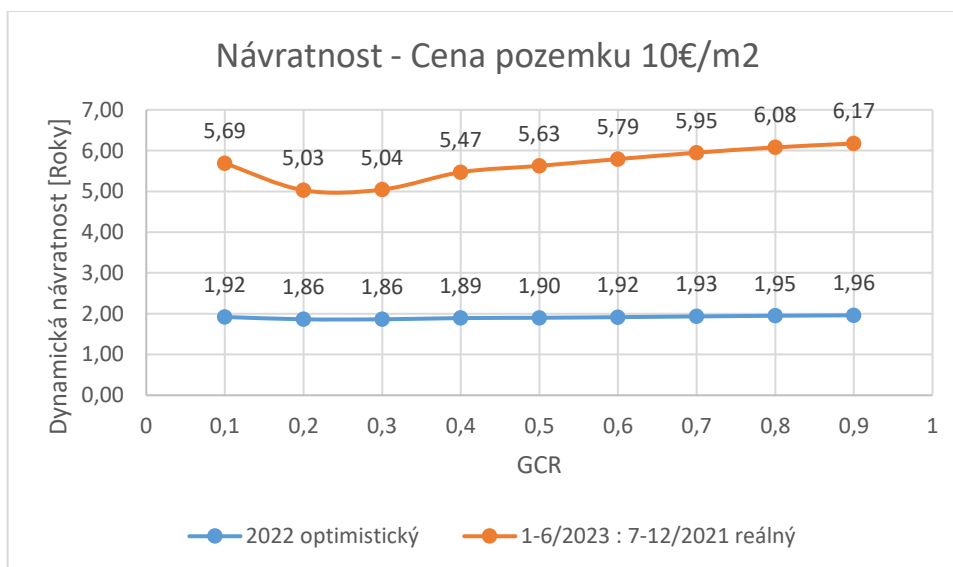
Vliv ceny pozemku má významný vliv hlavně při menších GCR, bez nákladů na pozemek je nejmenší LCOE při 0,2 GCR naopak po započtení nákladů na pozemek je nejmenší LCOE při 0,5 GCR, zde je patrný význam využití pozemku. Horší sklon z hlediska energetického zisku vynahradí ušetřené místo na pozemku. S rostoucí cenou pozemků se bude poté nejnižší LCOE posouvat k větším GCR.

6.1.3. Ekonomická analýza

Návratnost investice kombinuje, jak vliv LCOE, tak průměrné tržní ceny. Pro pozemek s předpokládanou cenou 10€/m² je nejkratší dobou pro splacení investice hodnota 0,2-0,3 GCR. Optimistický scénář je méně závislý na tržní ceně než reálný scénář. Rozdíl v návratnosti u reálného scénáře je přes 1 rok naopak u optimistického scénáře je rozdíl v měsících. Pro pesimistický scénář se investice nevrátí vůbec. Při uvažování nulové ceny pozemku je poté nejkratší návratnost pro GCR 0,1-0,2.

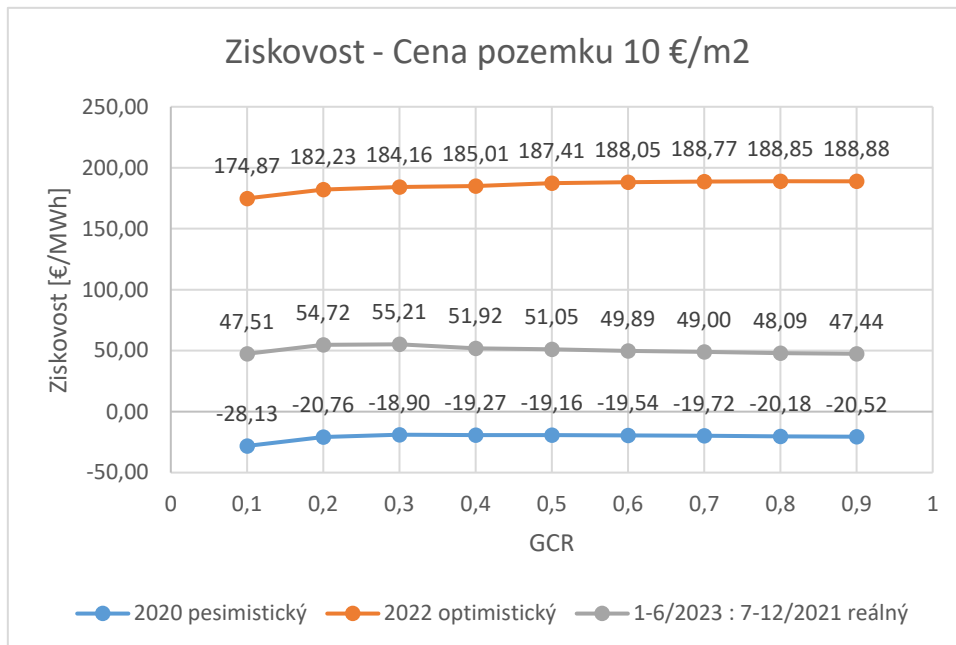


Obr. 28 Návratnost fixní konstrukce při ceně pozemku 0€/m²

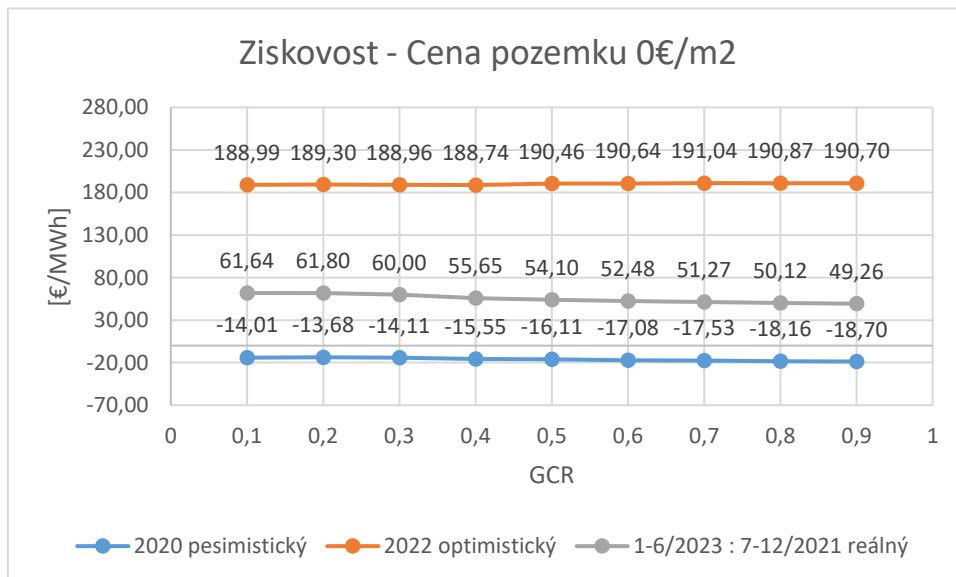


Obr. 29 Návratnost fixní konstrukce při ceně pozemku 10€/m²

Ziskovost za celou dobu životnosti při započtení nákladů na pozemek je v případě optimistického scénáře nejvyšší pro hodnotu GCR 0,9. Reálný scénář má nejvyšší ziskovost v hodnotě GCR 0,3 a pesimistický scénář je nejméně ztrátový při GCR 0,3. Bez započtení ceny pozemku vychází nejvyšší ziskovost obdobně.



Obr. 31 Ziskovost fixní konstrukce při ceně pozemku 10€/m²



Obr. 30 Ziskovost fixní konstrukce při ceně pozemku 0€/m²

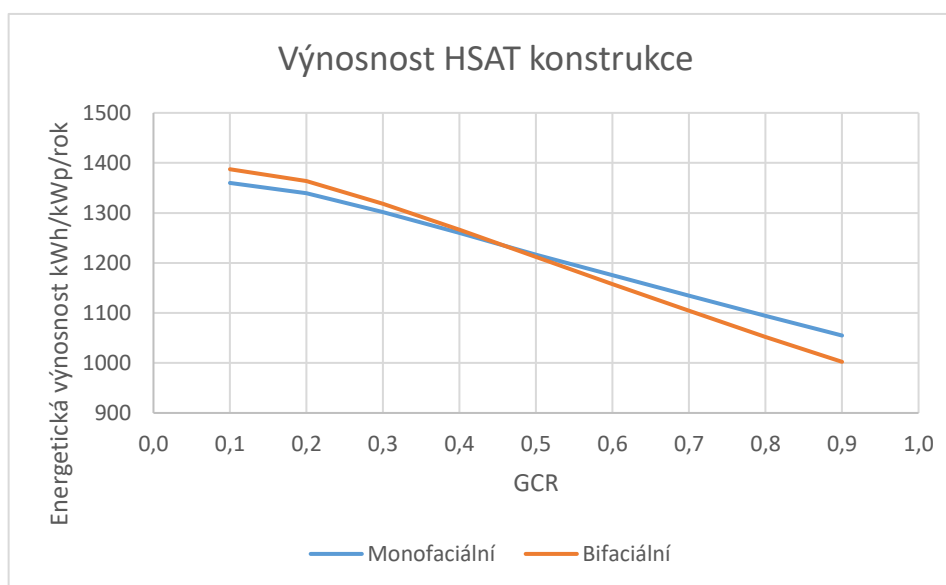
6.2. Konstrukce HSAT

6.2.1. Energetická analýza

Simulace bude provedena pro azimut 90-270° (Orientace Východ - Západ). Ztráty stíněním jsou určeny backtrackingovým algoritmem, rozsah rotace je 120°.

GCR	GCR _f	GCR _t	β_t [°]	Monofaciální [kWh/kWp/rok]	Bifaciální kWh/kWp/rok
0,1	1	0,1	120	1359,9	1387,3
0,2	1	0,2	120	1339,3	1363,5
0,3	1	0,3	120	1301,7	1318,3
0,4	1	0,4	120	1259,7	1266,2
0,5	1	0,5	120	1216,7	1211,9
0,6	1	0,6	120	1175,2	1157,9
0,7	1	0,7	120	1134,6	1104,4
0,8	1	0,8	120	1094,3	1051,9
0,9	1	0,9	120	1054,8	1002,2

Tabulka 6 Parametry energetické analýzy pro HSAT konstrukci



Obr. 32 Graf energetické výnosnosti HSAT konstrukce

Vliv bifaciálních modulů je obdobný jako u fixní konstrukce pro vyšší GCR mají lepší výsledky monofaciální panely naopak pro nižší GCR jsou výhodnější bifaciální panely. Volím stejný postup jako u fixní konstrukce pro LCOE hodnocení. Od 0,1-0,4 GCR budou uvažovány bifaciálními panely a od 0,5-0,9 GCR monofaciální panely.

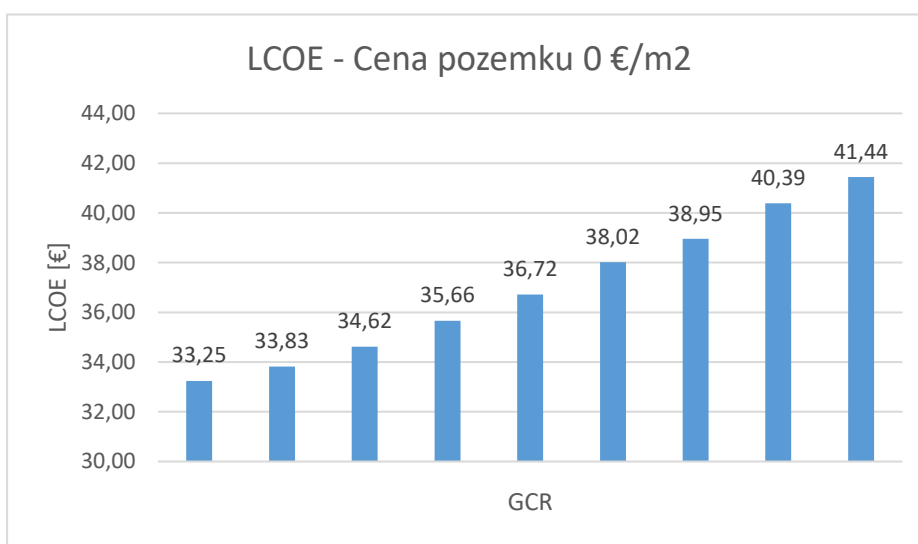
6.2.2. Nákladová analýza LCOE

Vstupní parametry pro analýzu LCOE jsou zobrazeny v tabulce 7. V 15 roce je uvažována výměna střídačů a motorů sledovacího systému.

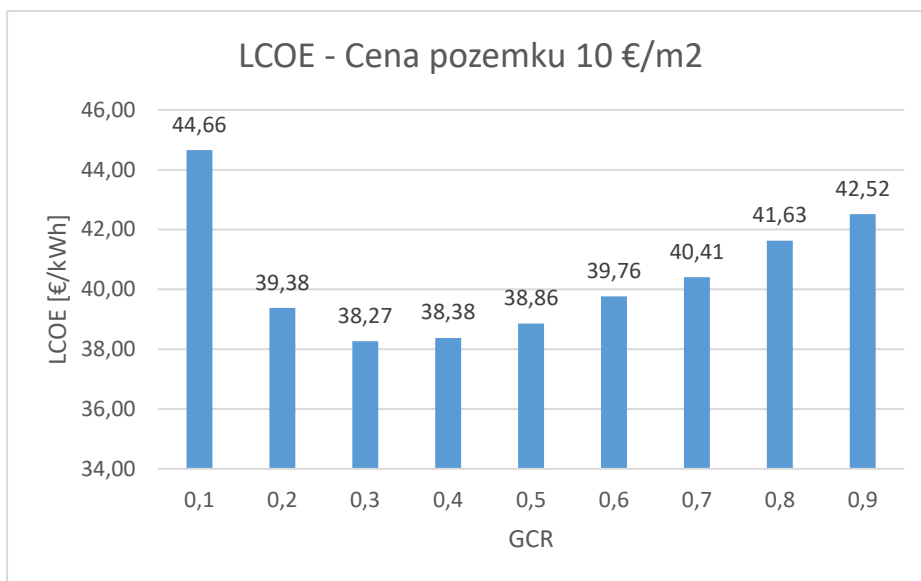
Vstupní parametry	
Investice [€/kWp]	693,00
Dotace [€/kWp]	291,00
Diskontní faktor	9%
Diskontní faktor po 3 letech	6%
Výroba v modelovém roce [MWh]	viz. en analýza
GCR	0,1-0,9
Cena pozemku [€/m ²]	0; 10,00
Roční náklady na údržbu [€/kWp]	viz. Tabulka č.3
Náklady v 15 roce [€/kWp]	39,00
Náklady v 30 roce [€/kWp]	49,00
Degradace panelu v 1 roce	2,00%
Degradace panelu ve 2 a dalším roce	0,55%
Účinnost panelu	21,20%
Výkon panelu [kWp]	0,60
Kurz EUR/USD	1,12
Kurz EUR/CZK	24,00

Tabulka 7 Vstupní parametry LCOE analýzy pro HSAT konstrukci

LCOE analýza byla zpracována opět pro 2 situace. První uvažuje cenu pozemku 0€/m² a druhá 10 €/m², náklady na pozemek jsou 5% z jeho hodnoty.



Obr. 33 LCOE pro HSAT konstrukci bez nákladů na pozemek

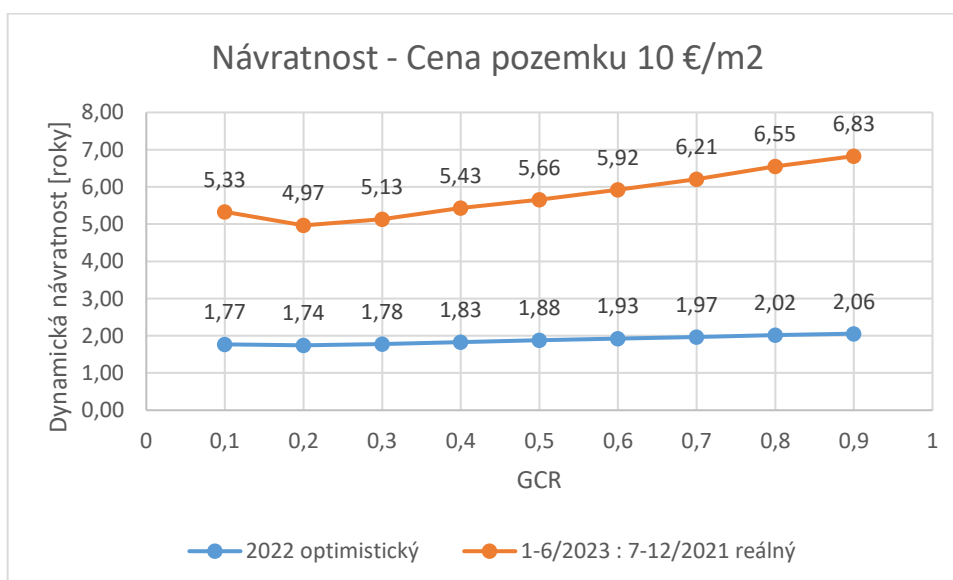


Obr. 34 LCOE pro HSAT konstrukci s náklady na pozemek

Vliv ceny pozemku má významný vliv hlavně při menších GCR, bez nákladů na pozemek je nejmenší LCOE při 0,1 GCR naopak po započtení nákladů na pozemek je nejmenší LCOE při 0,3 GCR, zde je patrný význam využití pozemku.

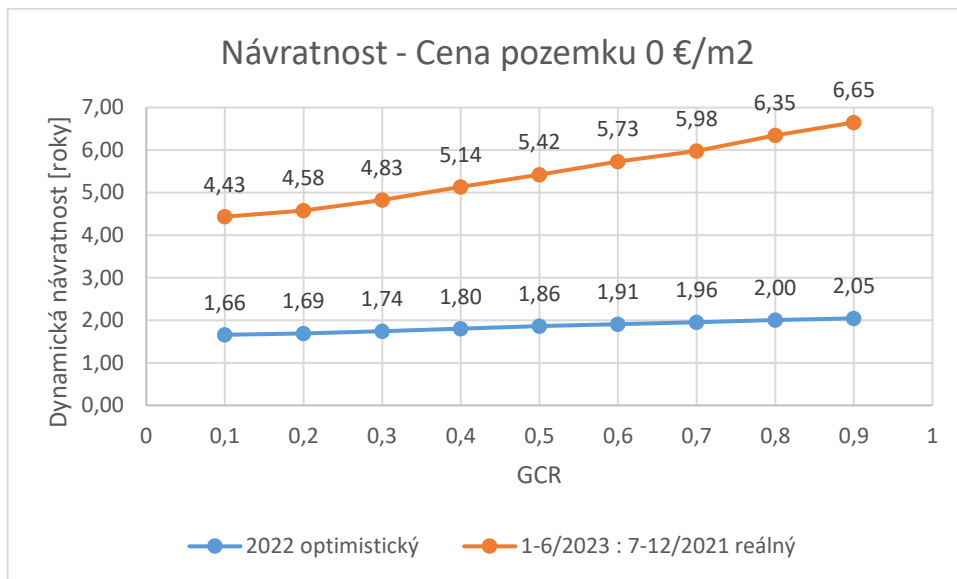
6.2.3. Ekonomická analýza

Nejkratší dynamická návratnost je pro GCR 0,2, při uvažování ceny pozemku 10 €/m². Rozdíl mezi nejdelší a nejkratší návratností je přibližně 1,8 roku u reálného scénáře, optimistický scénář je s rozdílem jednotek měsíců.



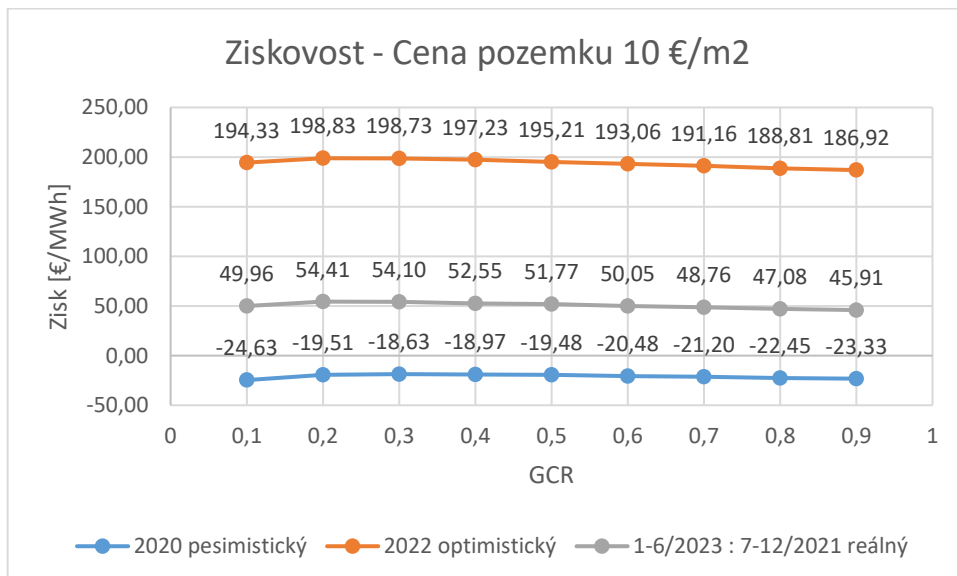
Obr. 35 Návratnost HSAT konstrukce při ceně pozemku 10€/m²

V případě ceny pozemku 0€/m² je návratnost se zvyšujícím se GCR rostoucí s rozdílem 2,2 roku pro realistický scénář a 0,4 roku pro optimistický scénář. Návratnost pesimistického scénáře není.



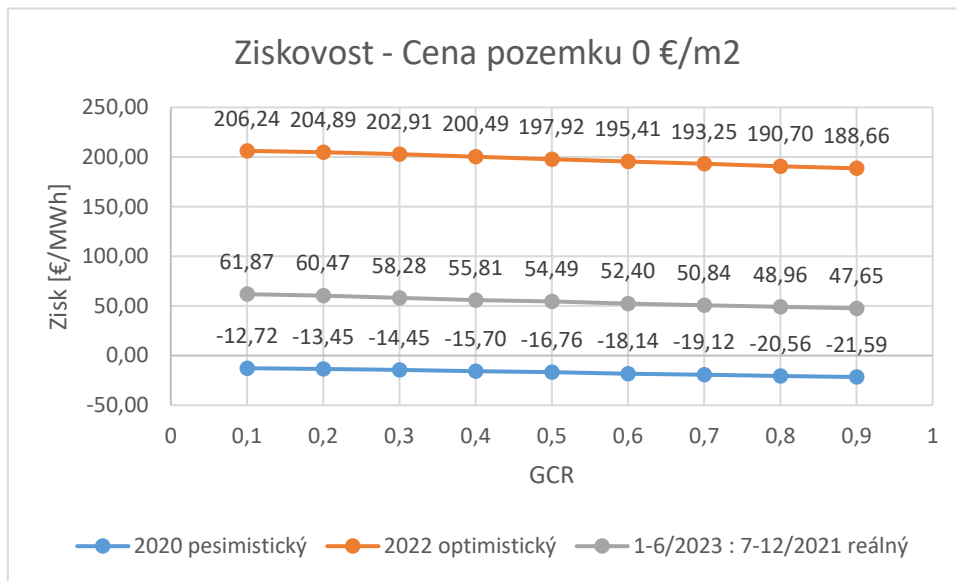
Obr. 36 Návratnost HSAT konstrukce při ceně pozemku 0€/m²

Nejvyšší ziskovosti s uvažovanou cenou pozemku 10€/m² dosahuje konstrukce HSAT při GCR 0,2 ve všech scénářích, u pesimistického scénáře se při GCR 0,2 dosáhne nejmenší ztráty.



Obr. 37 Ziskovost HSAT konstrukce při ceně pozemku 10€/m²

Při uvažování ceny pozemku 0 €/m² ziskovost s rostoucí GCR klesá.



Obr. 38 Ziskovost HSAT konstrukce při ceně pozemku 0€/m²

6.3. Konstrukce TSAT

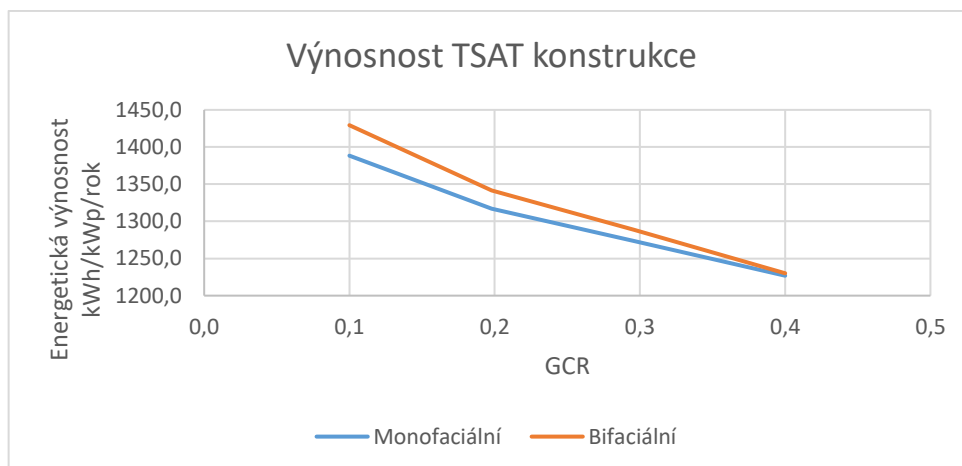
6.3.1. Energetická analýza

Simulace bude provedena pro azimut 90-270° (Orientace Východ - Západ).

Analýza pro konstrukci TSAT bude provedena v rozsahu 0,1-0,4 GCR.

GCR	GCR _f	GCR _t	β _t [°]	φ _f [°]	β _f [°]	Monofaciální [kWh/kWp/rok]	Bifaciální [kWh/kWp/rok]
0,1	0,25	0,4	120	10,2	35,0	1388,4	1429,4
0,2	0,66	0,3	120	16,5	9,0	1316,9	1341,4
0,3	0,74	0,4	120	16,5	6,0	1273,7	1288,5
0,4	0,8	0,5	120	16,5	4,3	1226,8	1230,1

Tabulka 8 Parametry energetické analýzy pro TSAT konstrukci



Obr. 39 Graf energetické výnosnosti TSAT konstrukce

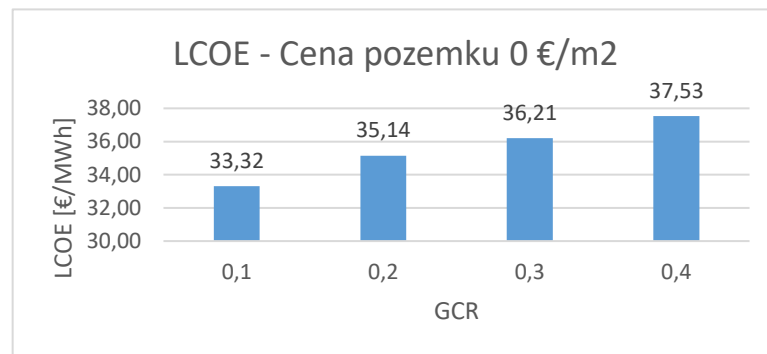
Bifaciální panely vykazují vyšší energetickou výnosnost ve všech GCR. V dalších analýzách budou tedy uvažovány vstupní hodnoty z bifaciálních panelů.

6.3.2. Nákladová analýza LCOE

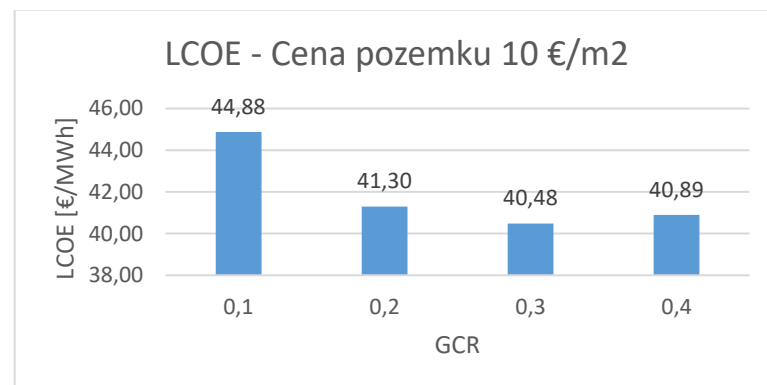
Vstupní parametry pro analýzu LCOE jsou zobrazeny v tabulce 9. V 15 roce je uvažována výměna střídačů a motorů sledovacího systému.

Vstupní parametry	
Investice [€/kWp]	711,00
Dotace [€/kWp]	291,00
Diskontní faktor	9%
Diskontní faktor po 3 letech	6%
Výroba v modelovém roce [MWh]	viz. en analýza
GCR	0,1-0,4
Cena pozemku [€/m ²]	0;10
Roční náklady na údržbu [€/kWp]	viz. Tabulka č.3
Náklady v 15 roce [€/kWp]	52,00
Náklady v 30 roce [€/kWp]	55,00
Degradace panelu v 1 roce	2,00%
Degradace panelu ve 2 a dalším roce	0,55%
Účinnost panelu	21,20%
Výkon panelu [kWp]	0,60
Kurz EUR/USD	1,12
Kurz EUR/CZK	24,00

Tabulka 9 Vstupní parametry LCOE analýzy pro TSAT konstrukci



Obr. 41 LCOE pro TSAT konstrukci bez nákladů na pozemek

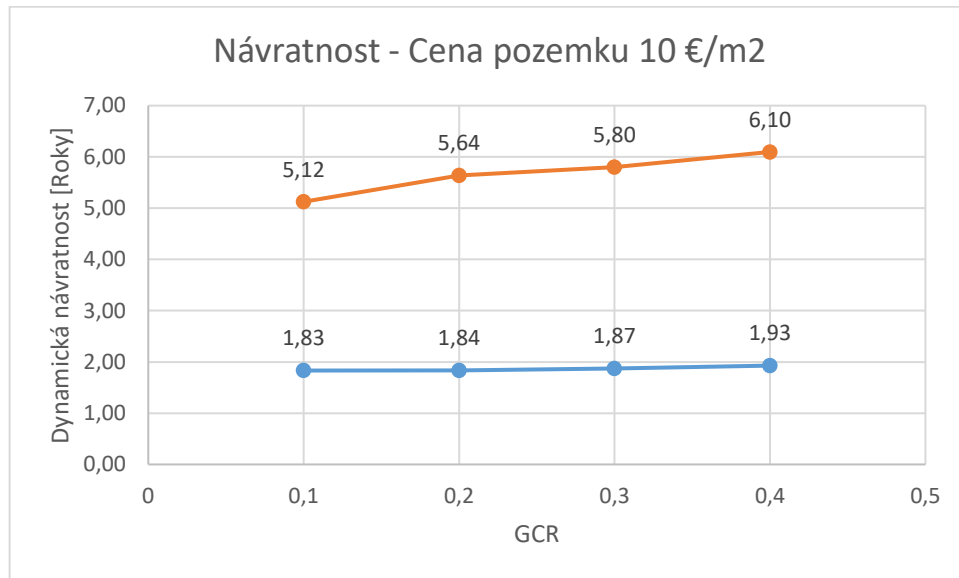


Obr. 40 LCOE pro TSAT konstrukci s náklady na pozemek

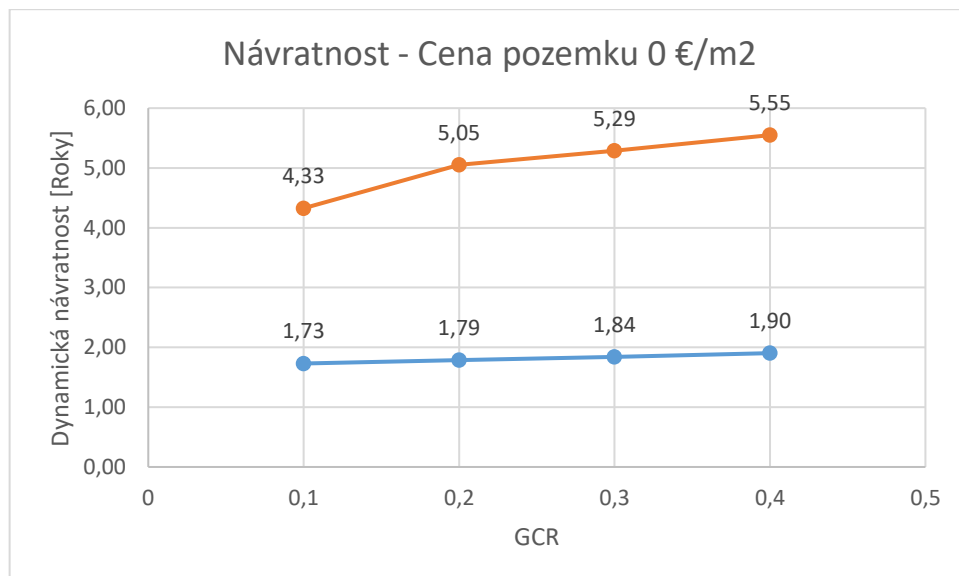
Výsledky LCOE simulace mají obdobný průběh jako fixní a HSAT konstrukce, nejmenší LCOE je při uvažování ceny pozemku 10 €/m² při 0,3 GCR. Bez uvažování nákladů na pozemek je LCOE rostoucí se zvyšujícím GCR.

6.3.3. Ekonomická analýza

Návratnost je v obou případech rostoucí se zvyšujícím se GCR.

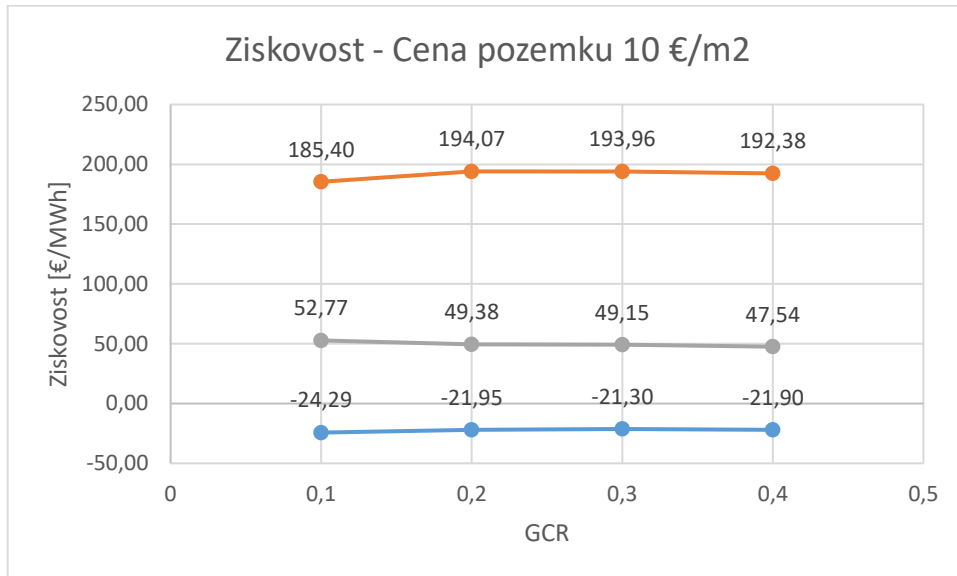


Obr. 42 Návratnost TSAT konstrukce při ceně pozemku 10€/m²

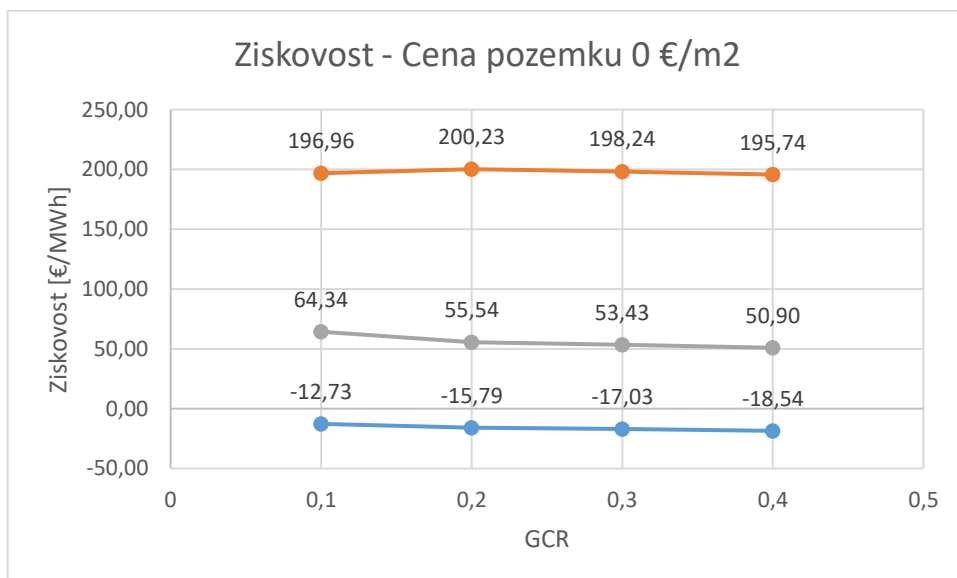


Obr. 43 Návratnost TSAT konstrukce při ceně pozemku 0€/m²

Ziskovost je u reálného scénáře nejvyšší při GCR 0,1 a poté klesá v obou případech. Optimistický scénář má nejvyšší ziskovost v GCR 0,2. Pesimistický scénář při ceně pozemku 0€/m² má nejmenší ztrátu při GCR 0,1 naopak v případě započtení nákladů na pozemek je nejmenší ztráta v GCR 0,4.



Obr. 44 Ziskovost TSAT konstrukce při ceně pozemku 10€/m²



Obr. 45 Ziskovost TSAT konstrukce při ceně pozemku 0€/m²

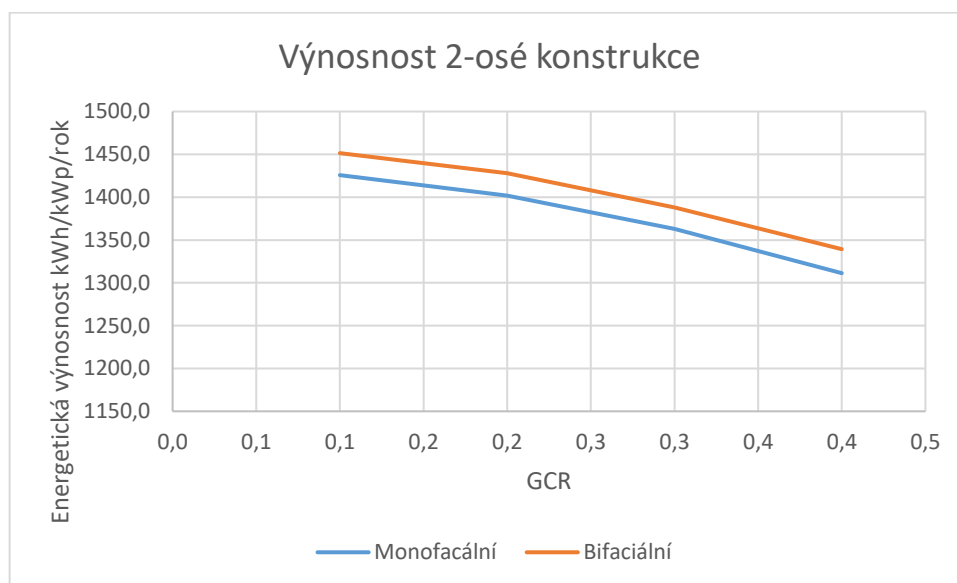
6.4. 2-osá konstrukce

6.4.1. Energetická analýza

Simulace bude provedena pro rozsah azimutu $\gamma = 0-180^\circ$ a úhel rozsahu sklonu $\omega = 0-35^\circ$. Analýza pro konstrukci TSAT bude provedena v rozsahu 0,1-0,4 GCR.

GCR	Ztráty zastíněním	Monofacální	Bifaciální
0,1	0,68%	1425,7	1451,4
0,2	2,78%	1401,8	1427,9
0,3	5,95%	1362,9	1388,1
0,4	9,88%	1311,3	1339,3

Tabulka 10 Parametry energetické analýzy pro 2-osou konstrukci



Obr. 46 Graf energetické výnosnosti 2-osé konstrukce

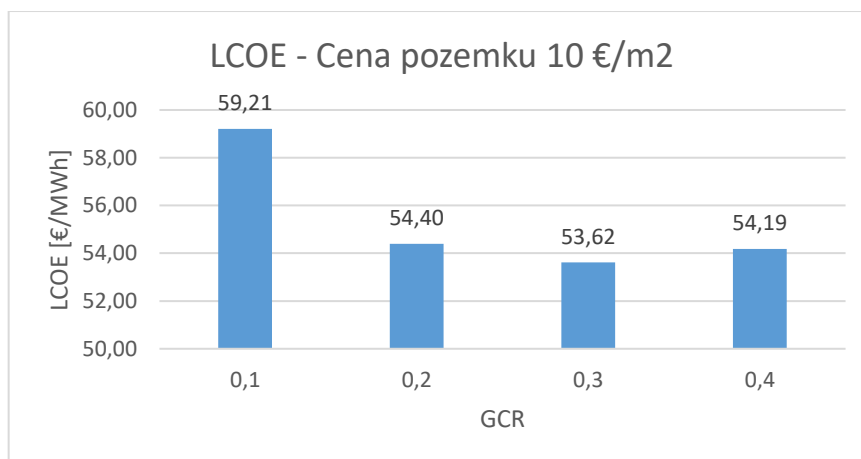
Bifaciální panely vykazují vyšší energetickou výnosnost ve všech GCR. V dalších analýzách budou tedy uvažovány vstupní hodnoty z bifaciálních panelů.

6.4.2. Nákladová analýza LCOE

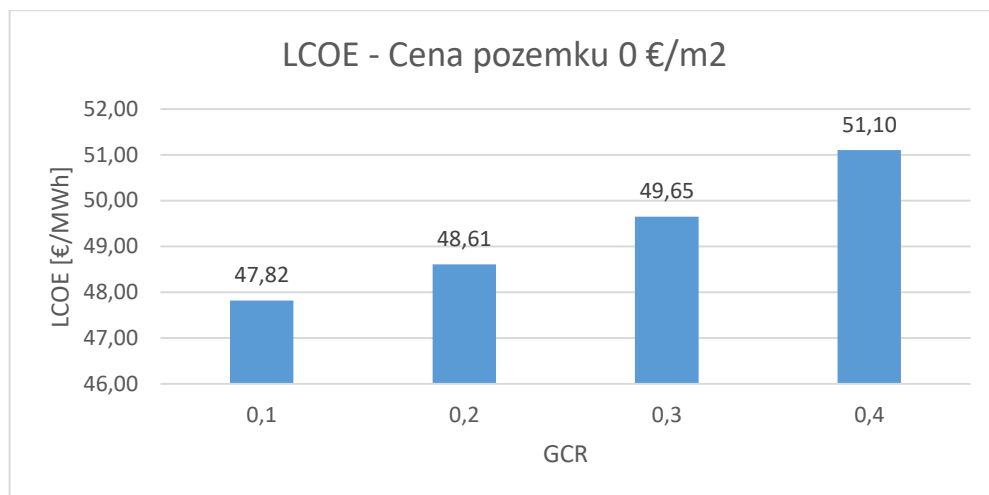
Vstupní parametry pro analýzu LCOE jsou zobrazeny v tabulce 11. V 15 roce je uvažována výměna střídačů a motorů sledovacího systému.

Vstupní parametry	
Investice [€/kWp]	959,00
Dotace [€/kWp]	291,00
Diskontní faktor	9%
Diskontní faktor po 3 letech	6%
Výroba v modelovém roce [MWh]	viz. en analýza
GCR	0,1-0,4
Cena pozemku [€/m ²]	0;10
Roční náklady na údržbu [€/kWp]	viz. Tabulka č.3
Náklady v 15 roce [€/kWp]	57,00
Náklady v 30 roce [€/kWp]	70,00
Degradace panelu v 1 roce	2,00%
Degradace panelu ve 2 a dalším roce	0,55%
Účinnost panelu	21,20%
Výkon panelu [kWp]	0,60
Kurz EUR/USD	1,12
Kurz EUR/CZK	24,00

Tabulka 11 Vstupní parametry LCOE analýzy pro 2-osou konstrukci



Obr. 47 LCOE pro 2-osou konstrukci s náklady na pozemek

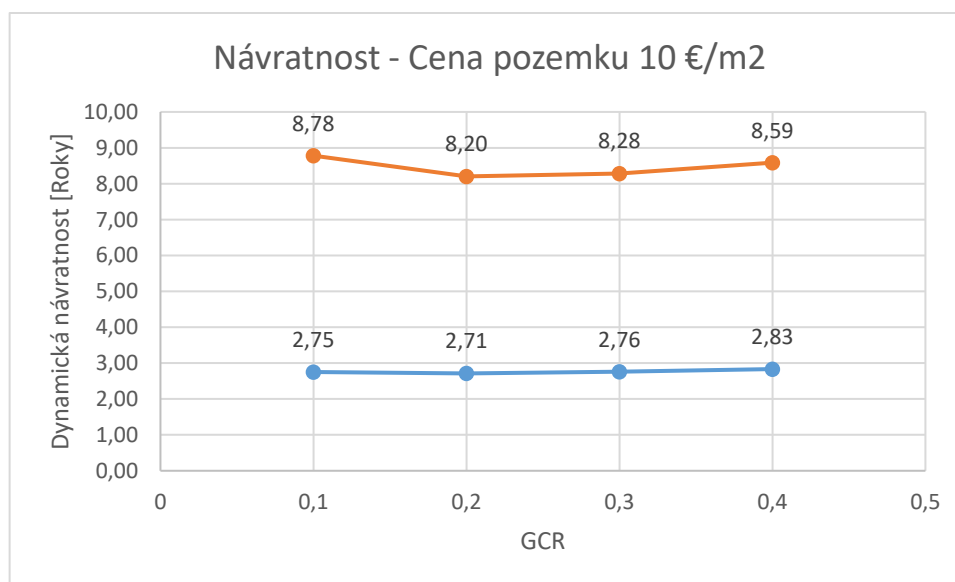


Obr. 48 LCOE pro 2-osou konstrukci bez nákladů na pozemek

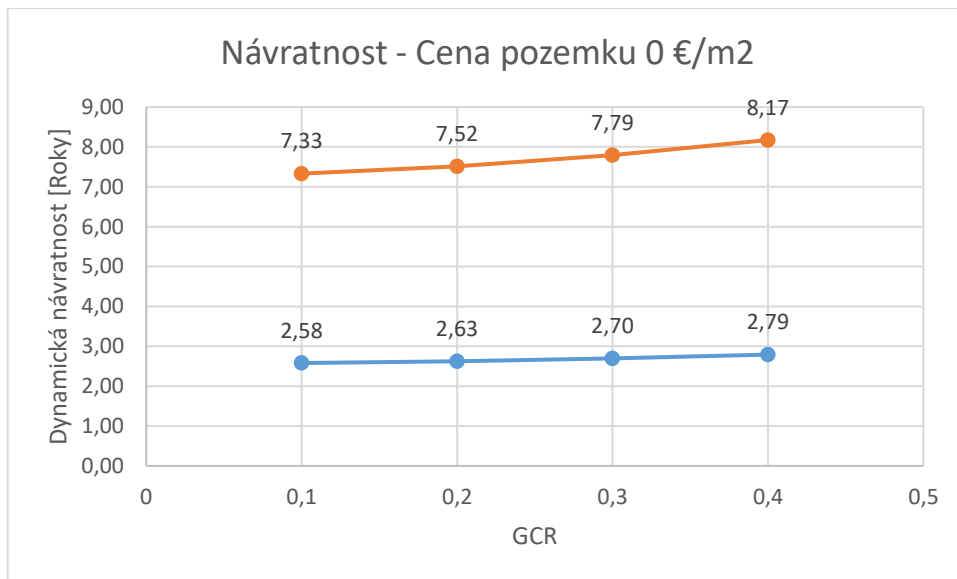
Hodnoty LCOE jsou výrazně vyšší oproti předchozím konstrukcím, nejnižší hodnota v případě neuvažování nákladů na pozemek je 47,82 €/MWh, pro případ s uvažováním nákladů na pozemek je nejnižší hodnota při GCR 0,1, a to 53,62 €/MWh. Za tímto výrazným vzrůstem je nákladná konstrukce 2-osého systému.

6.4.3. Ekonomická analýza

Návratnost je v případě nulových nákladů na pozemek rostoucí se zvyšujícím se GCR, při úvaze těchto nákladů je nejkratší návratnost při 0,2 GCR.

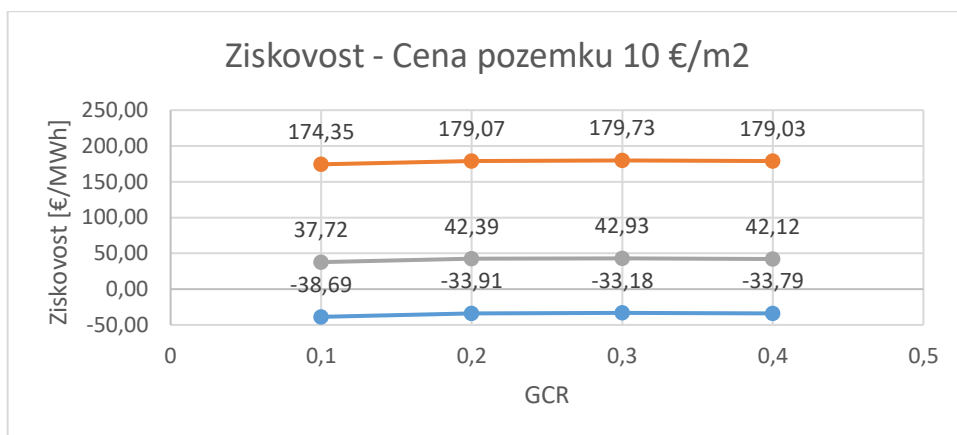


Obr. 49 Návratnost 2-osé konstrukce při ceně pozemku 10€/m2

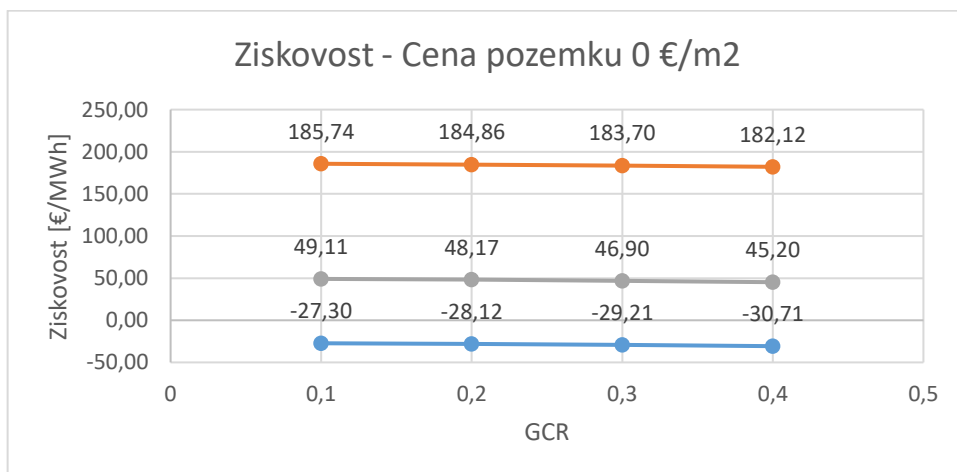


Obr. 50 Návratnost 2-osé konstrukce při ceně pozemku 0€/m²

Ziskovost v případě uvažování 0 €/m² klesá s rostoucím GCR. V případě 10€/m² je ziskovost nejmenší při GCR 0,1 a poté je stabilní.



Obr. 51 Ziskovost 2-osé konstrukce při ceně pozemku 10€/m²

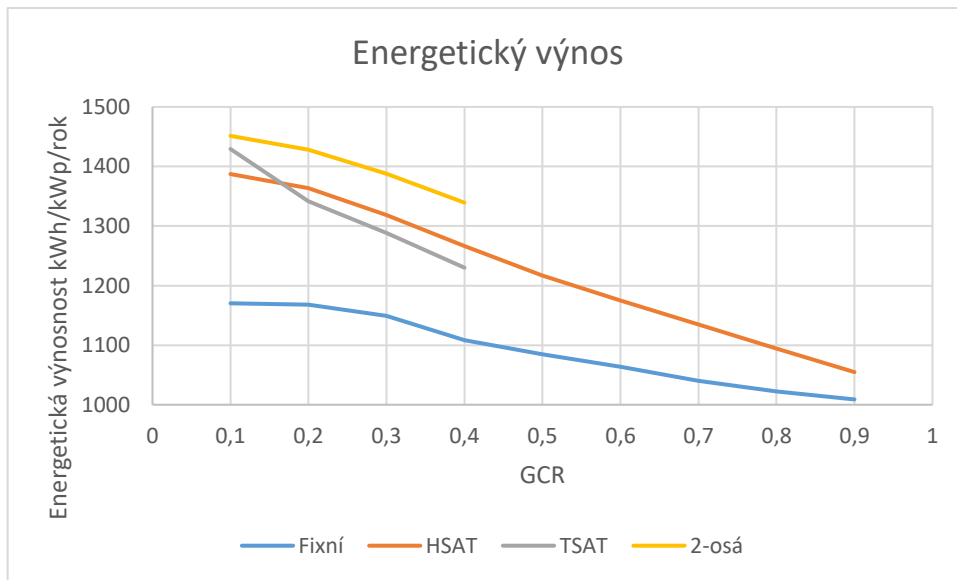


Obr. 52 Ziskovost 2-osé konstrukce při ceně pozemku 0€/m²

6.5. Porovnání jednotlivých variant

6.5.1. Energetické porovnání

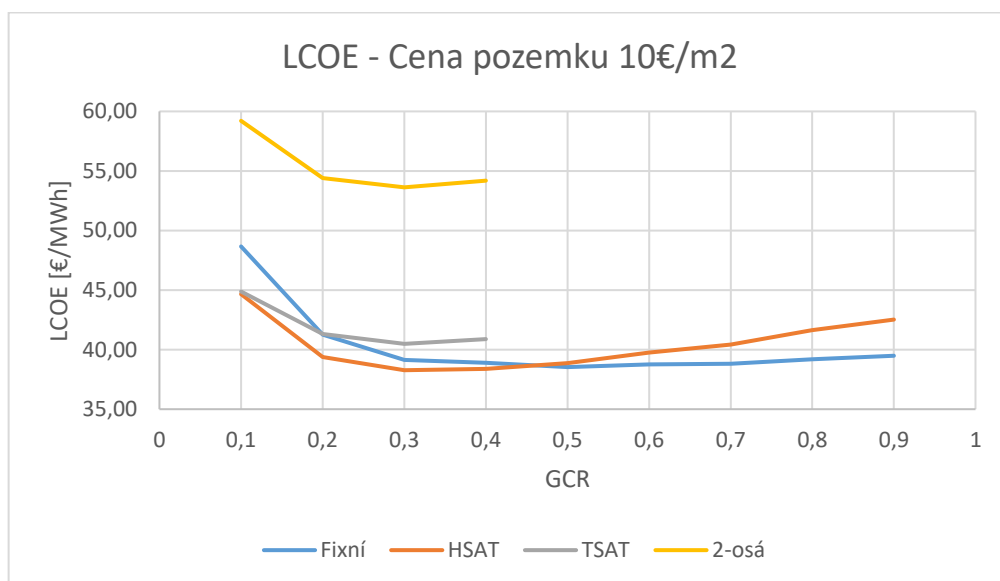
Pro energetické porovnání jsou brány nejlepší dosažené hodnoty při jednotlivých GCR, pro GCR 0,1-0,4 jsou uvažovány bifaciální panely od 0,5-0,9 jsou uvažovány monofaciální.



Obr. 53 Energetické porovnání

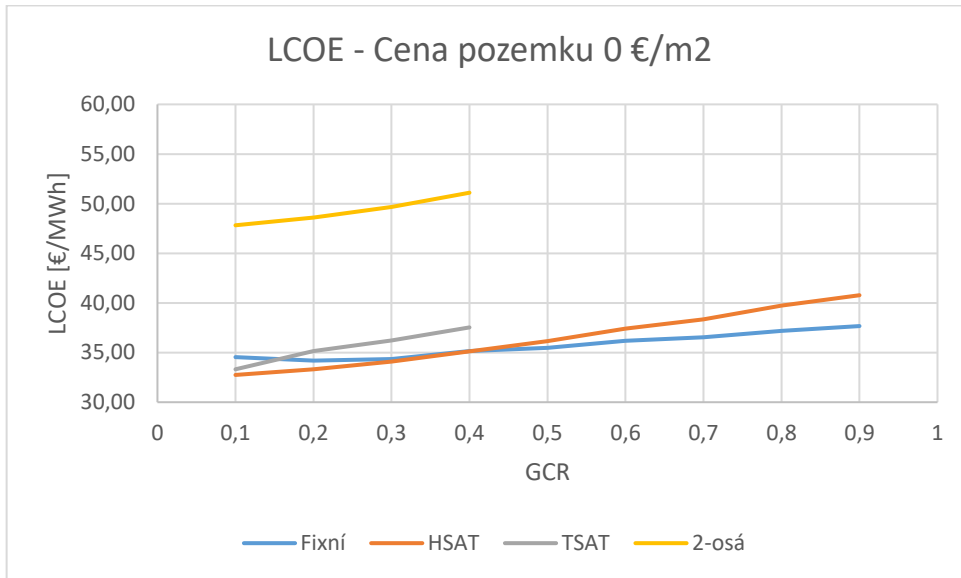
Z porovnání vychází nejlépe 2-osá konstrukce, poté při nižších GCR je konstrukce TSAT, pro GCR 0,2 a výše má druhý nejvyšší výnos konstrukce HSAT, fixní konstrukce dosahuje nejmenšího energetického zisku.

6.5.2. Porovnání LCOE



Obr. 54 Porovnání LCOE - cena pozemku 10€/m2

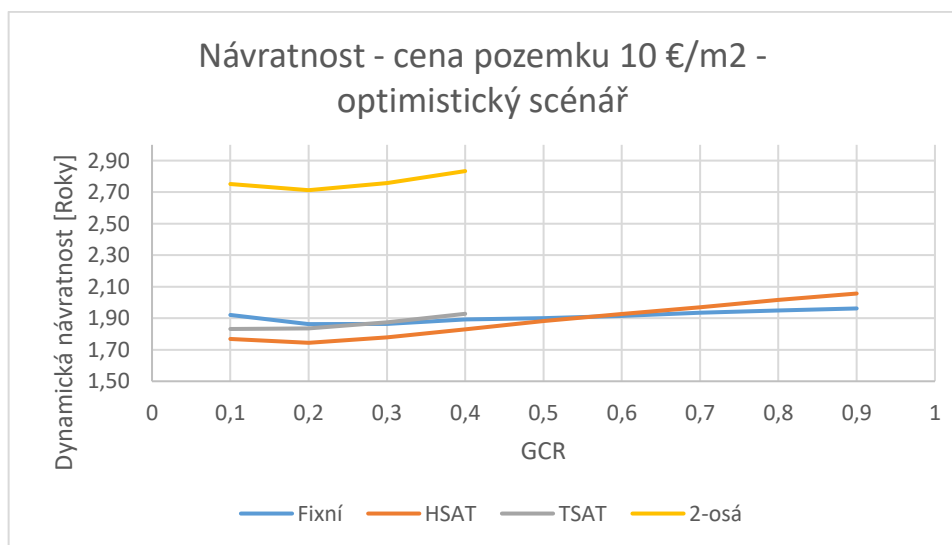
Při úvaze ceny pozemku 10 €/m² jsou dosaženy nejnižší náklady pro HSAT konstrukci při GCR 0,3. HSAT konstrukce má nejmenší vážené náklady ze všech konstrukcí až do bodu 0,4-0,5 GCR poté tyto náklady rostou strměji a nejnižších hodnot nabývá fixní konstrukce. Dvouosá konstrukce má největší náklady ve všech uvažovaných GCR. TSAT konstrukce má srovnatelné náklady s HSAT konstrukcí při GCR 0,1.



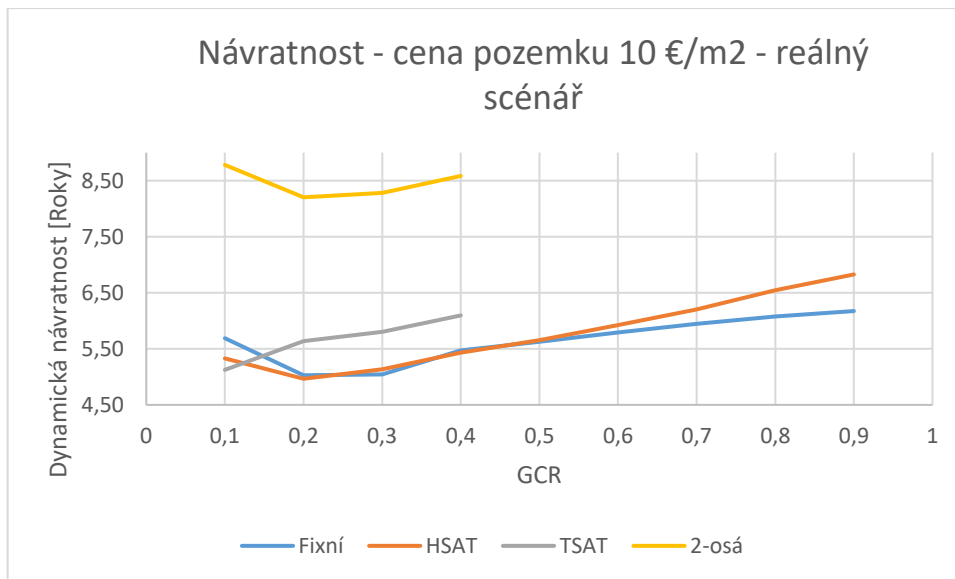
Obr. 55 Porovnání LCOE - cena pozemku 0€/m²

Nejnižší náklady při uvažování ceny pozemku 0€/m² mají konstrukce HSAT a TSAT v GCR=0,1. Dvouosá konstrukce má opět nejvyšší náklady ve všech uvažovaných GCR. Průsečík HSAT konstrukce a fixní konstrukce se posunul z 0,4-0,5 GCR na 0,3-0,4 GCR.

6.5.3. Porovnání dynamické návratnosti



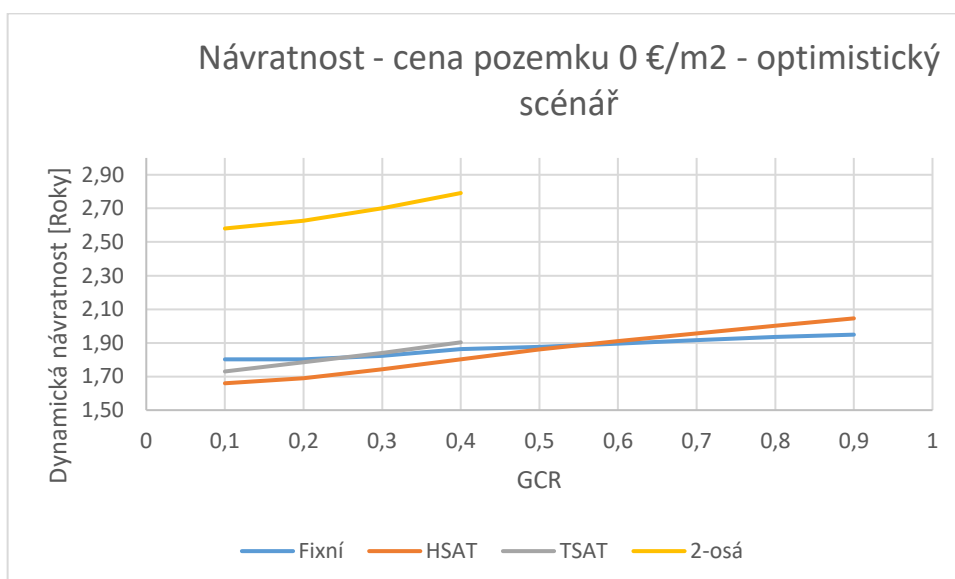
Obr. 56 Návratnost pro optimistický scénář - cena pozemku 10 €/m²



Obr. 57 Návratnost pro reálný scénář - cena pozemku 10 €/m²

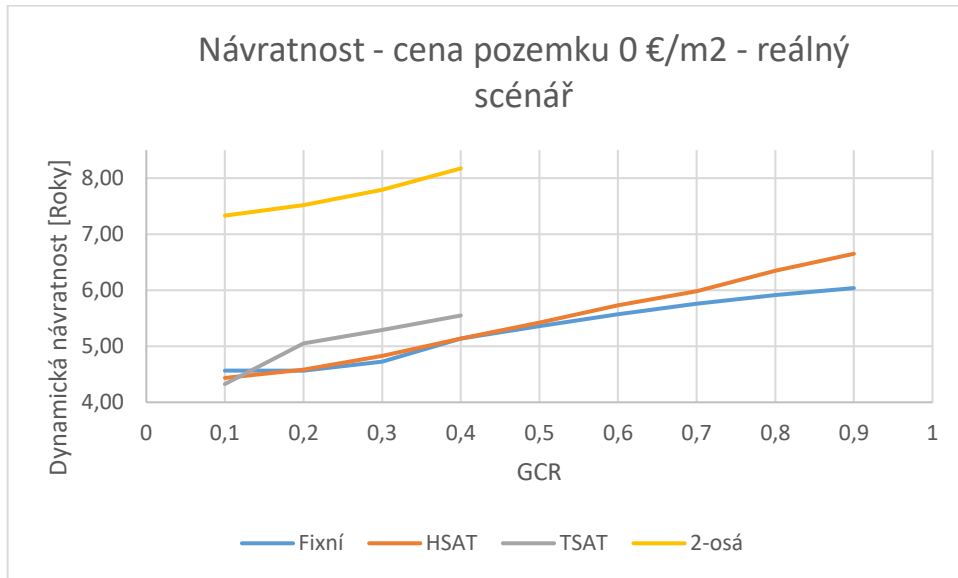
Návratnost u optimistického scénáře je nejkratší pro HSAT konstrukci v rozmezí 0,1-0,55 GCR, poté má nejkratší návratnost fixní konstrukce, rozdíly jsou ovšem velice malé v jednotkách měsíců. Návratnost TSAT konstrukce roste se zvyšujícím se GCR. Dvouosá konstrukce má návratnost přibližně o rok horší než ostatní konstrukce.

Při uvažování reálného scénáře je návratnost HSAT a fixní konstrukce stejná v rozsahu 0,2 – 0,5 GCR, poté má fixní konstrukce kratší návratnost. TSAT konstrukce má nejnižší návratnost ze všech konstrukcí při GCR=0,1, poté se návratnost pouze prodlužuje. Dvouosá konstrukce má téměř 2x delší návratnost než HSAT nebo fixní konstrukce.



Obr. 58 Návratnost pro optimistický scénář - cena pozemku 0 €/m²

Návratnost pro optimistický scénář při uvažování nulové ceny za pozemek má stejný průběh (pouze posunut o několik desetín níže) jako při uvažování ceny pozemku 10 €/m². Důvodem je relativně krátká doba návratnosti od 1,6 do 2 let, při které se nájemné tolik neprojeví.

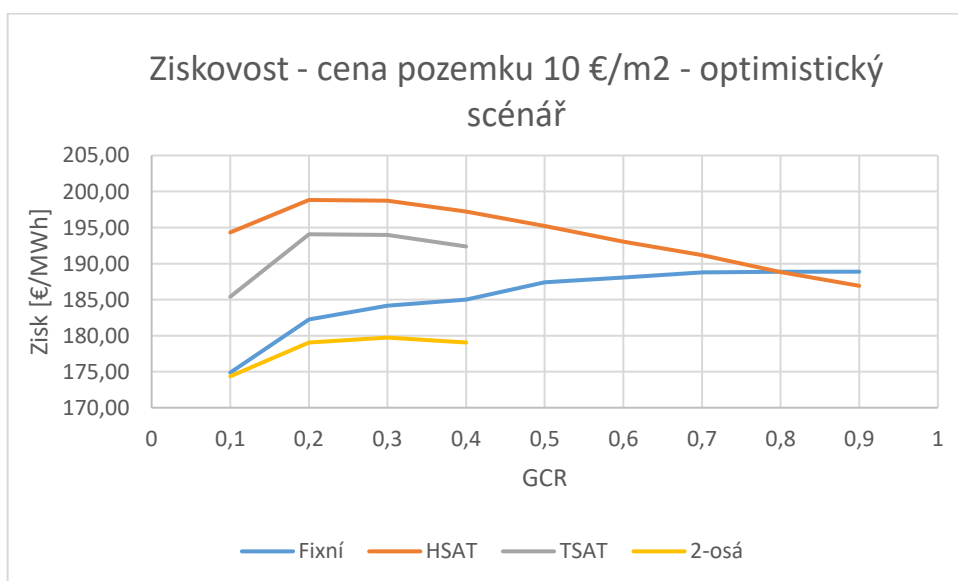


Obr. 59 Návratnost pro reálný scénář - cena pozemku 0 €/m²

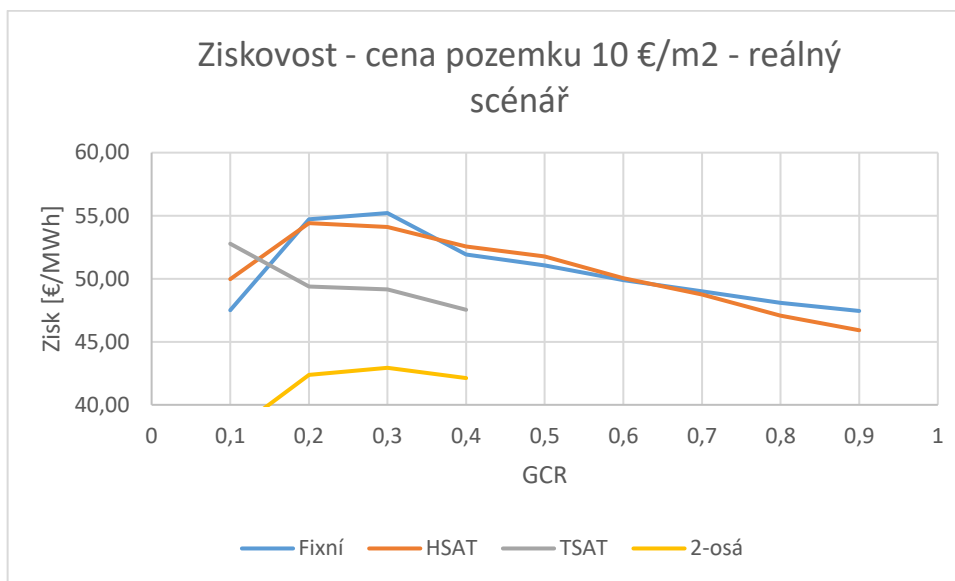
Průběh reálného scénáře Při uvažování ceny pozemku 0€/m² je obdobný jako při uvažování ceny pozemku 10 €/m² s rozdílem v GCR=0,1 kde je nyní nejkratší návratnost jak pro TSAT konstrukci, tak pro fixní a HSAT.

Pesimistický scénář nedosáhne návratnosti pro žádný druh konstrukce.

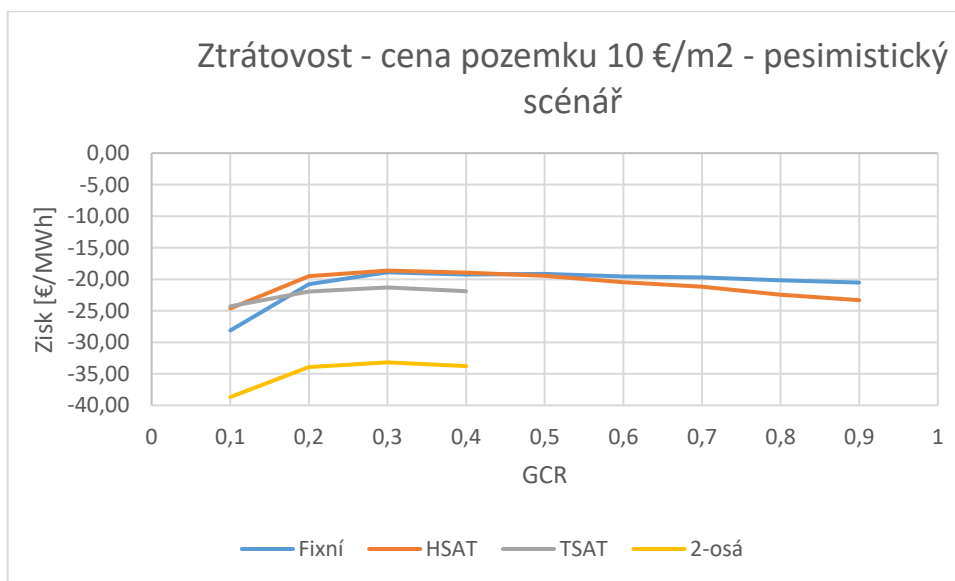
6.5.4. Porovnání ziskovosti



Obr. 60 Ziskovost pro optimistický scénář - cena pozemku 10 €/m²



Obr. 61 Ziskovost pro reálný scénář - cena pozemku 10 €/m2

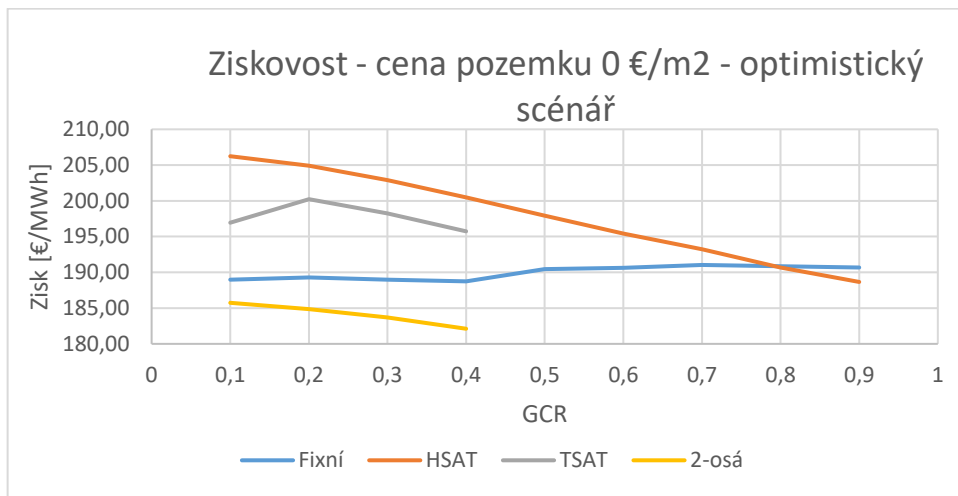


Obr. 62 Ztrátovost pro pesimistický scénář – cena pozemku 10 €/m2

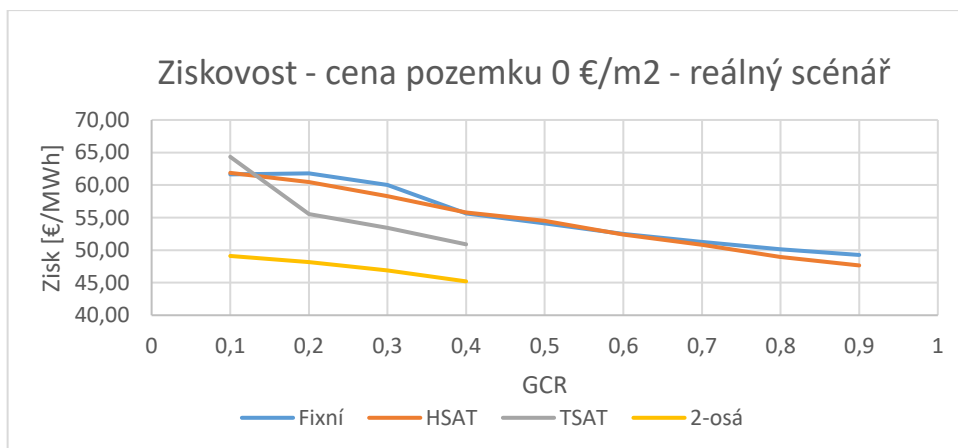
Při ceně pozemku 10 €/m2 je v případě optimistického scénáře nejziskovější HSAT konstrukce s maximem v GCR 0,2-0,3. Fixní konstrukce je nejziskovější až pro GCR 0,9. TSAT konstrukce má druhou největší ziskovost v rozsahu 0,1-0,4. Dvousá konstrukce má nejhorší ziskovost v celém uvažovaném rozsahu.

Pro reálný scénář je ziskovost při GCR 0,1 největší u TSAT konstrukce, maximum ovšem nabývá fixní konstrukce při GCR 0,3. Fixní a HSAT konstrukce mají velice podobné průběhy, které se výrazněji liší pouze při nižších a vyšších GCR. Ziskovost TSAT konstrukce s rostoucím GCR klesá. Dvousá konstrukce opět vykazuje nejhorší výsledky.

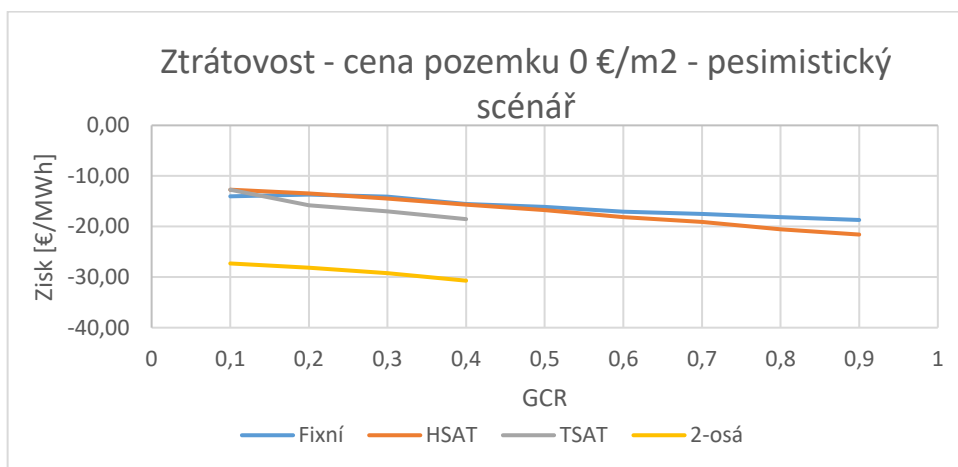
Pesimistický scénář nedosahuje kladných hodnot ziskovosti v žádném z uvažovaných případů. Nejmenší ztrátu má fixní a HSAT konstrukce, které mají opět velice podobný průběh.



Obr. 63 Ziskovost pro optimistický scénář – cena pozemku 0 €/m²



Obr. 64 Ziskovost pro reálný scénář – cena pozemku 0 €/m²



Obr. 65 Ztrátovost pro pesimistický scénář – cena pozemku 0 €/m²

7. Závěr

Práce se zabývala porovnáním různých typů konstrukcí pro fotovoltaické systémy v podmínkách České republiky. Hlavním faktorem bylo využití pozemku GCR. Konstrukce byly porovnávány nejdříve z hlediska energetické výnosnosti, kde bylo nejvýnosnější variantou dvouosá konstrukce. Poté následovaly další 2 stupně hodnocení, a to z hlediska nákladovosti a ziskovosti. Po zahrnutí LCOE a ziskovost byla dvouosá konstrukce nejméně výhodnou. Žádná z konstrukcí nebyla zisková při pesimistické scénáři. Při menších nákladech na pozemek je nejziskovější varianta konstrukce TSAT při $GCR=0,1$. Fixní a HSAT konstrukce mají z hlediska ziskovosti podobný průběh. Optimistický scénář zvyšuje ziskovost HSAT konstrukce díky vyšší průměrné ceně na denním trhu. Pro minimalizaci nákladů LCOE je vhodnější volit HSAT konstrukci v rozmezí 0,1-0,4 GCR. Od 0,5 GCR je LCOE menší pro fixní konstrukci.

Reference

1. Ing. Ladislav Chmel, Ing. Ivo Hamerník. *Fotovoltaika, fototermika*. Brno : Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz; 2016, 2014.
2. ČEZ a.s. Solární (fotovoltaické) články . *Skupina ČEZ*. [Online] ČEZ a.s. [Citace: 12. Únor 2023.]
<https://www.cez.cz/eede/content/microsites/solarni/k32.htm>.
3. doc. Ing. Jan Kaňka, Ph.D. Deklinace Slunce v průběhu desetiletí. *časopis Světlo*. [Online] FCC Public, 7. Únor 2012. [Citace: 12. Únor 2023.]
<http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/deklinace-slunce-v-prubehu-desetileti--568>.
4. Prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc., Staněk, Ing. Kamil a Wolf, Ing. Petr. Fotovoltaické systémy. *DOCPLAYER*. [Online] 15. Duben 2011. [Citace: 12. Únor 2023.] <https://docplayer.cz/10537342-Fotovoltaicke-systemy.html>.
5. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Fraunhofer. *Photovoltaic Report*. [Online] 21. Únor 2023. [Citace: 1. Červenec 2023.]
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.
6. SolarReviews. What is half-cut solar cell technology. *SolarReviews*. [Online] 23. Srpen 2021. [Citace: 1. Červenec 2023.]
<https://www.solarreviews.com/blog/half-cut-solar-cell-technology-explained>.
7. Bifacial PV technology: technical considerations. *DVN*. [Online] DVN . [Citace: 1. Červenec 2023.] <https://www.dnv.com/article/bifacial-pv-technology-technical-considerations-186095>.
8. Rodríguez, Laura. Bifacial modules: the future of solar PV? A comprehensive guide on financial and technical performance of the next hot thing in solar. *RatedPower*. [Online] 24. Leden 2022. [Citace: 1. Červenec 2023.]
<https://ratedpower.com/blog/bifacial-modules/>.
9. Adam R. Jensen, Ioannis Sifnaios, Simon Furbo, Janne Dragsted. Self-shading of two-axis tracking solar collectors: Impact of field layout, latitude, and aperture shape. *ScienceDirect*. [Online] 1. Duben 2022. [Citace: 14. Červenec 2023.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X22001207>.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.02.023>.

10. Solar resource maps of Czech Republic. *SOLARGIS*. [Online] Solargis Americas Inc. [Citace: 14. Červenec 2023.] <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/czech-republic>.
11. IRENA. RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2020. *IRENA*. [Online] 2021. [Citace: 1. Červenec 2023.] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf?rev=c9e8dfcd1b2048e2b4d30fef671a5b84. ISBN 978-92-9260-348-9.
12. Carlos D. Rodríguez-Gallegos, Haohui Liu, Oktoviano Gandhi 1, Jai Prakash Singh, Vijay Krishnamurthy, Abhishek Kumar, Joshua S. Stein, Shitao Wang, Li Li, Thomas Reindl, Ian Marius Peters. Global Techno-Economic Performance of Bifacial and Tracking Photovoltaic Systems. *ScienceDirect*. [Online] 3. Červen 2020. [Citace: 2. Červenec 2023.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435120301884#fig7>. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.005>.
13. Kompletní dodávka betonové kioskové trafostanice VN/NN s připojením do stávajícího rozvaděče plaveckého bazénu v Táboře. *Tábor*. [Online] město Tábor, 22. Leden 2016. [Citace: 16. Červenec 2023.] <https://www.taborcz.eu/kompletni-dodavka-betonove-kioskove-trafostanice-vn-nn-s-pripojenim-do-stavajiciho-rozvadece-plaveckeho-bazenu-v-tabore/ds-2267>.
14. Inflace - druhy, definice, tabulky. *Český statistický úřad*. [Online] 23. Květen 2023. [Citace: 15. Červenec 2023.] https://www.czso.cz/csu/czso/mira_inflace.
15. H, Wisner Ryan, Mark, Bolinger a Joachim, Seel. Benchmarking Utility-Scale PV Operational Expenses and Project Lifetimes. *eScholarship*. [Online] Červen 2020. <https://escholarship.org/uc/item/2pd8608q>.
16. ENERGETICKÝ REGULAČNÍ VĚSTNÍK 15/2022. *Energetický regulační úřad*. [Online] 10. Březen 2023. [Citace: 15. Červenec 2023.] <https://www.eru.cz/energeticky-regulacni-vestnik-152022>.
17. OTE. *Krátkodobý trh s elektřinou*. [Online] [Citace: 15. Červenec 2023.] <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh>.
18. Ministerstvo pro místní rozvoj. Co je potřeba pro umístění, povolení a kolaudaci solárních panelů (FVE). *Ministerstvo pro místní rozvoj*. [Online] Leden 2014. [Citace: 18. Červenec 2023.] <https://www.mmr.cz/cs/ministerstvo/stavebni-pravo/stanoviska-a->

metodiky/uzemni-rozhodovani-a-stavebni-rad/umisten-povoleni-kolaudace-fve.

19. Text výzvy RES+ č. 1/2022. *Státní fond životního prostředí*. [Online] 5. Září 2022. [Citace: 18. Červenec 2023.]

<https://www.sfzp.cz/dokumenty/detail/?id=2809>.

20. Lombardní sazba. *Komerční banka*. [Online] Komerční banka a.s., 2023. [Citace: 15. Červenec 2023.] <https://www.kb.cz/cs/podpora/slovník/vyrazyzacinajici-na-l/lombardni-sazba>.

21. Salvo, Francesca, a další. Economic Valuation of Ground Mounted Photovoltaic Systems. *ResearchGate*. [Online] Červen 2017. [Citace: 15. Červenec 2023.]

https://www.researchgate.net/publication/317635603_Economic_Valuation_of_Ground_Mounted_Photovoltaic_Systems. 10.3390/buildings7020054.

Seznam obrázků

Obr. 1 Princip fotoelektrického jevu	2
Obr. 2 Princip fotovoltaického článku	2
Obr. 3 VA charakteristiky FVČ pro různé intenzity slunečního záření	3
Obr. 4 Pozice Země vůči Slunci v průběhu roku	4
Obr. 5 Pohyb Slunce po obloze na 50°severní šířky	5
Obr. 6 Full-cut	6
Obr. 7 Half-cut	6
Obr. 8 Rozdělení konstrukcí pro fotovoltaické panely	8
Obr. 9 Střešní konstrukce pro střechu z tašek	9
Obr. 10 Konstrukce Východ-Západ	10
Obr. 11 Konstrukce pro rovné střechy zatížená betonovým blokem	10
Obr. 12 Geometrie fixní konstrukce	11
Obr. 13 Systém HSAT	12
Obr. 14 Systém TSAT	12
Obr. 15 Geometrie konstrukce osa V-Z	13
Obr. 16 Geometrie jednoosé konstrukce osa J-S	13
Obr. 17 Geometrie 2-osé konstrukce	14
Obr. 18 Mapa záření pro ČR [10]	15
Obr. 19 Záření na modul - fixní konstrukce se sklonem 25° - Vysočina.....	15
Obr. 20 Příklad ztrát z programu PV-SOL.....	16
Obr. 21 Cena výstavby FVE v jednotlivých státech – IRENA 2020 [11]	17
Obr. 22 Korekce položek vzhledem k IRENA REPORTU [11].....	18
Obr. 23 Ceny pozemních konstrukcí dle typu [12]	18
Obr. 24 Vývoj 2T Repo sazby	21
Obr. 25 Graf energetické výnosnosti fixní konstrukce	24
Obr. 26 LCOE pro fixní konstrukci bez nákladů na pozemek.....	25
Obr. 27 LCOE pro fixní konstrukci s náklady na pozemek.....	26
Obr. 28 Návratnost fixní konstrukce při ceně pozemku 0€/m ²	27
Obr. 29 Návratnost fixní konstrukce při ceně pozemku 10€/m ²	27
Obr. 30 Ziskovost fixní konstrukce při ceně pozemku 0€/m ²	28
Obr. 31 Ziskovost fixní konstrukce při ceně pozemku 10€/m ²	28
Obr. 32 Graf energetické výnosnosti HSAT konstrukce	29
Obr. 33 LCOE pro HSAT konstrukci bez nákladů na pozemek	30
Obr. 34 LCOE pro HSAT konstrukci s náklady na pozemek	31
Obr. 35 Návratnost HSAT konstrukce při ceně pozemku 10€/m ²	31
Obr. 36 Návratnost HSAT konstrukce při ceně pozemku 0€/m ²	32
Obr. 37 Ziskovost HSAT konstrukce při ceně pozemku 10€/m ²	32
Obr. 38 Ziskovost HSAT konstrukce při ceně pozemku 0€/m ²	33
Obr. 39 Graf energetické výnosnosti TSAT konstrukce	33
Obr. 40 LCOE pro TSAT konstrukci s náklady na pozemek.....	34

Obr. 41 LCOE pro TSAT konstrukci bez nákladů na pozemek	34
Obr. 42 Návratnost TSAT konstrukce při ceně pozemku 10€/m2	35
Obr. 43 Návratnost TSAT konstrukce při ceně pozemku 0€/m2	35
Obr. 44 Ziskovost TSAT konstrukce při ceně pozemku 10€/m2	36
Obr. 45 Ziskovost TSAT konstrukce při ceně pozemku 0€/m2	36
Obr. 46 Graf energetické výnosnosti 2-osé konstrukce	37
Obr. 47 LCOE pro 2-osou konstrukci s náklady na pozemek	38
Obr. 48 LCOE pro 2-osou konstrukci bez nákladů na pozemek	39
Obr. 49 Návratnost 2-osé konstrukce při ceně pozemku 10€/m2	39
Obr. 50 Návratnost 2-osé konstrukce při ceně pozemku 0€/m2	40
Obr. 51 Ziskovost 2-osé konstrukce při ceně pozemku 10€/m2	40
Obr. 52 Ziskovost 2-osé konstrukce při ceně pozemku 0€/m2	40
Obr. 53 Energetické porovnání	41
Obr. 54 Porovnání LCOE - cena pozemku 10€/m2	41
Obr. 55 Porovnání LCOE - cena pozemku 0€/m2	42
Obr. 56 Návratnost pro optimistický scénář - cena pozemku 10 €/m2	42
Obr. 57 Návratnost pro reálný scénář - cena pozemku 10 €/m2	43
Obr. 58 Návratnost pro optimistický scénář - cena pozemku 0 €/m2	43
Obr. 59 Návratnost pro reálný scénář - cena pozemku 0 €/m2	44
Obr. 60 Ziskovost pro optimistický scénář - cena pozemku 10 €/m2	44
Obr. 61 Ziskovost pro reálný scénář - cena pozemku 10 €/m2	45
Obr. 62 Ztrátovost pro pesimistický scénář – cena pozemku 10 €/m2	45
Obr. 63 Ziskovost pro optimistický scénář – cena pozemku 0 €/m2	46
Obr. 64 Ziskovost pro reálný scénář – cena pozemku 0 €/m2	46
Obr. 65 Ztrátovost pro pesimistický scénář – cena pozemku 0 €/m2	46

Seznam tabulek

Tabulka 1 Ztráty stíněním pro jednotlivá GCR a lokality	14
Tabulka 2 Ceny jednotlivých provedení	17
Tabulka 3 - Provozní náklady	19
Tabulka 4 Parametry energetické analýzy pro fixní konstrukci	24
Tabulka 5 Vstupní parametry LCOE analýzy pro fixní konstrukci	25
Tabulka 6 Parametry energetické analýzy pro HSAT konstrukci	29
Tabulka 7 Vstupní parametry LCOE analýzy pro HSAT konstrukci	30
Tabulka 8 Parametry energetické analýzy pro TSAT konstrukci	33
Tabulka 9 Vstupní parametry LCOE analýzy pro TSAT konstrukci	34
Tabulka 10 Parametry energetické analýzy pro 2-osou konstrukci	37
Tabulka 11 Vstupní parametry LCOE analýzy pro 2-osou konstrukci	38

Seznam příloh

Příloha č.1 – Excel výpočtový nástroj