

ANALÝZA NEGATÍVNYCH EXTERNALÍT VETERNÝCH TURBÍN: ENVIRONMENTÁLNE A SOCIÁLNE ASPEKTY

ANALYSIS OF WIND TURBINE NEGATIVE EXTERNALITIES: ENVIRONMENTAL AND SOCIAL ASPECTS

Dana Krížová¹

Autorka pôsobí ako interný doktorand na Vysokej škole bezpečnostného manažérstva v Košiciach. Vo svojej dizertačnej práci sa venujem problematike implementácie environmentálnych politík v organizáciách Európy.

The author works as an internal PhD student at the University of Security Management in Košice. In her dissertation, she focuses on the issue of implementing environmental policies in organizations across Europe.

Abstract

Wind energy, widely presented as a key solution for mitigating the climate crisis, is undergoing expansive global development. This article provides a comprehensive analysis of the negative externalities associated with the construction and operation of wind turbines, focusing on environmental and social aspects. A historical overview traces the technology's evolution from simple windmills to modern multi-megawatt turbines, a progression that has amplified their impact on landscapes and ecosystems. Methodologically, the article is based on a systematic review of available scientific studies and Environmental Impact Assessments (EIA).

The main findings identify three categories of negative impacts: 1) environmental, including avian and bat mortality, habitat fragmentation, and indirect effects on microclimate; 2) social, primarily perceived noise pollution, visual impact on the landscape, and a decline in property values, which leads to opposition from local communities; and 3) techno-economic, such as the intermittency of supply and the challenges associated with recycling wind turbine rotor blades made of composite materials.

The study subsequently applies this analytical framework to the case of the Slovak Republic. The analysis confirms that the country's geographical, climatic, and environmental conditions significantly constrain the construction of large wind farms. Low wind potential, an extensive

¹ Adresa pracoviska: Ing. Dana Krížová, VŠBM Koš'ova 1, 04001 Košice, Slovenská republika
E-mail: daf300578@gmail.com

network of protected areas (Natura 2000), wildlife migration corridors, and rugged topography reduce the number of suitable sites to a minimum. These factors, combined with strong local opposition, are shown to lead to a de facto halt in the development of wind energy in Slovakia. This demonstrates that technological potential alone is not a sufficient condition for successful implementation. The study concludes that for the sustainable development of wind energy, it is essential to integrate a thorough assessment of externalities and local specificities into the early stages of spatial planning. This proactive approach is necessary to prevent conflicts and ensure genuine environmental sustainability.

Key words: wind energy, negative externalities, history, Slovakia, spatial planning, impact analysis

Abstrakt

Veterná energia, prezentovaná ako kľúčové riešenie pre zmiernenie klimatickej krízy, prechádza celosvetovým expanzívnym rozvojom. Tento článok poskytuje komplexnú analýzu negatívnych externalít spojených s výstavbou a prevádzkou veterných turbín, so zameraním sa na environmentálne a sociálne aspekty. Historický exkurz dokladá evolúciu technológie od jednoduchých veterných mlynov k moderným megawattovým turbínam, čo umocnilo ich vplyv na krajinu a ekosystémy. Metodologicky článok vychádza zo systematického prehľadu dostupných vedeckých štúdií a hodnotenia vplyvov na životné prostredie (EIA).

Hlavné zistenia poukazujú na tri kategórie negatívnych dopadov: 1) environmentálne, vrátane úmrtnosti vtáctva a netopierov, fragmentácie biotopov a nepriameho vplyvu na mikroklimu; 2) sociálne, najmä vnímanú hlučnosť, vizuálny vplyv na krajinu a pokles hodnoty nehnuteľností, čo vedie k odporu miestnych komunít a 3) technicko-ekonomické, ako je nestálosť dodávok a náročnosť recyklácie kompozitných lopát rotorov veterných turbín.

Štúdiá následne aplikuje tento rámec na prípad Slovenskej republiky. Analýza potvrdzuje, že geografické, klimatické a environmentálne podmienky krajiny výstavbu veľkých veterných parkov výrazne limitujú. Nízky veterný potenciál, rozsiahla sieť chránených území (Natura 2000 – ochrana biodiverzity na základe smerníc o biotopoch Smernica Rady 92/43/EHS; a smernica o vtákoch Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2009/147/ES), migračné koridory a členitý reliéf znižujú množstvo vhodných lokalít na minimum. Tieto skutočnosti, v kombinácii so silným miestnym odporom má viesť k faktickému zastaveniu rozvoja veternej energetiky na Slovensku, čo demonštruje, že technologický potenciál nemusí byť postačujúcou podmienkou pre úspešnú implementáciu. Záverom je, že pre udržateľný rozvoj veternej energie je nevyhnutné integrovať dôsledné posudzovanie externalít a lokálnych špecifik už v raných fázach územného plánovania, aby sa predišlo konfliktom a zabezpečila sa skutočná environmentálna udržateľnosť.

Kľúčové slová: veterná energia, negatívne externality, história, Slovensko, územné plánovanie, analýza vplyvov

Úvod

Súčasná globálna klimatická kríza, poháňaná aj emisiami skleníkových plynov z fosílnych palív, predstavuje jednu z množstva výziev pre ľudstvo. Medzinárodný panel pre zmenu klímy (*IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*) upozorňuje na nevyhnutnosť rýchleho a hlbokého obmedzenia týchto emisií, aby sa predišlo otepľovaniu planéty [24].

V tomto kontexte sa obnoviteľné zdroje energie stávajú kľúčovým pilierom stratégie prechodu na nízko uhlíkovú ekonomiku. Medzi nimi preukázateľne najdynamickejšia rast v poslednom desaťročí zaznamenáva práve veterná energia, ktorá sa už v mnohých regiónoch sveta etablovala ako konkurencieschopný a vyspelý technologický segment [21].

Veterné turbíny, považované za symbol ekologickej transformácie, prispievajú k výrobe elektriny. Ich masívny rozvoj je podporovaný ambicióznymi cieľmi národných i nadnárodných klimatických politík, ako je napríklad Európska zelená dohoda.

Napriek tomu, so zvyšujúcim sa počtom veterných parkov a ich narastajúcou kapacitou sa do popredia dostáva aj potreba ich komplexného hodnotenia. Rovnako ako každá veľká priemyselná činnosť, aj výstavba a prevádzka veterných turbín prináša okrem krátkodobých prínosov aj negatívne externality.

Záujem o ďalšie rozširovanie tohto odvetvia preto musí byť doplnený o kritickú a vedecky podloženú analýzu jeho dopadov. Tieto vplyvy sa prejavujú na viacerých frontoch – od priameho ovplyvňovania biodiverzity, cez sociálno-ekonomické dôsledky pre miestne komunity až po technologické výzvy súvisiace s nestálosťou zdroja. Je dôležité poukázať na to, že udržateľný rozvoj tejto technológie si vyžaduje úprimné priznanie a riešenie tých stránok, ktoré môžu byť v rozpore s ďalšími environmentálnymi a sociálnymi cieľmi.

História a vývoj veternej energie:

Veterná energia, ako jeden z najstarších využívaných zdrojov, prešla dramatickou evolúciou – od jednoduchých veterných mlynov na mletie obilia po sofistikované veterné farmy s výkonom „comparable“ s konvenčnými elektrárnami.

1. Počiatky modernej veternej energetiky (koniec 19. storočia – 1970)

Prvé pokusy s výrobou elektriny z vetra sa datujú do konca 19. storočia. V roku 1887 postavil Škót James Blyth prvú veternú turbínu na výrobu elektriny, ktorá napájala jeho dom. V tom istom období vyvinul Američan Charles F. Brush veľkú veternú turbínu s priemerom rotora 17 metrov a 144 drevenými lopatami, ktorá napájala jeho sídlo v Clevelande [14]. Tieto jednotlivé turbíny boli skôr experimentálne a nepredstavovali systematický rozvoj.

Skutočný impulz pre veternú energiu prišiel po ropnej kríze v 70. rokoch 20. storočia, keď si mnohé krajiny uvedomili svoju závislosť od dovážaných fosílnych palív. Vlády, predovšetkým v USA a Dánsku, začali financovať výskum a vývoj väčších, účinnejších turbín [14,52].

2. Zrod prvých veterných parkov (80. roky 20. storočia)

Myšlienka spojiť viacero turbín do jednej elektrárne – veterného parku – sa zrodila ako logický krok pre zvýšenie celkovej výrobnnej kapacity a zníženie nákladov na údržbu [52].

Spojené štáty sa stali kolískou prvých komerčných veterných parkov. V roku 1980 bol uvedený do prevádzky prvý veterný park na svete – Crotched Mountain Wind Farm v New Hampshire,

pozostávajúci z 3 turbín. Avšak za prvý veľký komerčný projekt sa považuje Altamont Pass Wind Farm v Kalifornii, vybudovaný začiatkom 80. rokov. V jeho vrcholnom období stálo tisíce turbín, ktoré výrazne prispeli k splneniu kalifornských cieľov v oblasti obnoviteľnej energie, no neskôr boli kritizované za vysokú úmrtnosť vtákov [14,48].

V roku 1986 bol v Číne vybudovaný prvý moderný veterný park v Maliulihne, provincia Xinjiang. Tento park pozostával z turbín dovezených z Dánska a Švédska a predstavoval začiatok čínskeho veterného priemyslu [15].

Dánsko, ako kolíska moderného výrobcu turbín (Vestas) v Európe, budovalo svoje prvé parky už v 70. a 80. rokoch. Jedným z najstarších a najznámejších je park Nørhede-Hjortmose (inštalovaný koncom 70. rokov), ktorý stále funguje, aj keď s modernizovanými turbínami [6, 52]. V Nemecku bol významným raným projektom veterný park Westküste pri Kaiser-Wilhelm-Koog, spustený v roku 1987 [52].

Mnohé z prvých parkov boli už nahradené alebo prešli procesom repoweringu (výmeny starých turbín za nové, výkonnejšie) [15, 48].

Veterný park v Nørhede-Hjortmose (Dánsko) je príkladom kontinuálneho prevádzkovania a modernizácie [6].

Veterná turbína Tvindkraft (Dánsko), ktorá bola postavená v škole Tvind v roku 1978 bola v čase svojej výstavby najväčšou na svete. Stále je v prevádzke a stala sa symbolom dánskeho entuziazmu pre veternú energiu [6, 14].

Vindeby (Dánsko) je prvý offshore veterný park na svete, spustený v roku 1991. Fungoval až do roku 2017, kedy bol demontovaný, čím ukončil svoju historickú úlohu a ukázal životný cyklus takýchto zariadení [26].

Dekomisia je prirodzenou súčasťou životného cyklu veterného parku.

Vindeby (Dánsko) ako prvý offshore park bol demontovaný v roku 2017 po 25 rokoch prevádzky. Dôvodom boli vysoké náklady na údržbu starých turbín v porovnaní s výkonom nových modelov [26].

Veterný park Altamont Pass (USA) ako pôvodný už neexistuje. Pôvodné turbíny z 80. rokov sú postupne odstraňované a nahradené menším počtom výkonnejších a pre vtákov bezpečnejších turbín v procese repoweringu [48].

Yttre Stengrund (Švédsko) ako jeden z prvých offshore parkov v Švédsku (spustený 2001) bol vyradený v roku 2015 po poškodení základov [47].

História veterných parkov odzrkadľuje technologický pokrok a vyvíjajúce sa ekonomické podmienky [15,22]. Od malých, experimentálnych zhlukov turbín v 80. rokoch sa posunuli k obrovským offshore parkov s turbínami vysokými ako mrakodrapy. Prvé parky slúžili ako živné prostredie pre inovácie so snahou ukázať, že veterná energia môže byť komerčne životaschopná. Ich životnosť a následná dekomisia alebo modernizácia zároveň poukazujú na výzvy súvisiace s koncom životného cyklu, ktoré je potrebné pri plánovaní nových projektov brať do úvahy.

Technologický postup výstavby veterných parkov a analýza materiálovej náročnosti

Efektívna a environmentálne udržateľná výstavba veterných parkov si vyžaduje dôkladnú znalosť stavebných technológií, materiálových tokov a prevádzkových charakteristík. Proces výstavby musí klásť dôraz na kvantifikáciu vstupných materiálov a riešenia koncových fáz životného cyklu turbín.

Fázy výstavby veterného parku

1. Príprava projektu a infraštruktúry

Pred samotnou výstavbou prebieha komplexné plánovanie vrátane posudkov vplyvu na životné prostredie (EIA), geotechnického prieskumu a zabezpečenia prístupových komunikácií. V lokalitách s mäkkým podložím sa často musí vykonať spevnenie terénu drveným kamenivom, pričom objem presunutej zeminy (často úrodnej pôdy) môže pre jednu turbínu a prístupovú cestu dosiahnuť 1 500 – 3 000 m³ [16].

2. Výstavba základov

Základy sú kľúčové pre stabilitu vysokovýkonných turbín. Pre väčšinu pevninských (onshore) turbín sa používajú plošné základy (gravity-based foundations).

Technologický postup:

- a) Výkop základovej jamy: Vyberie sa zemina do hĺbky pod mrazovú zónu, typicky 3–5 metrov.
- b) Výstuž a uloženie kotvenia: Vykoná sa výstuž oceľovými prútmi (železom) s vysokou pevnosťou. Do výstuže sa umiestni presný kôš s kotviacimi skrutkami pre neskoršie pripevnenie veže.
- c) Betonáž: Jama sa postupne alebo naraz (v závislosti od technológie) zaplní betónom. Pre zabezpečenie integrity sa často používa nepretržitá betonáž (continuous pour).

Materiálová náročnosť:

Množstvo betónu a ocele rastie nelineárne s výškou turbíny a priemerom rotora, pretože sa zvyšujú ohybové momenty. To technicky znamená, že množstvo betónu a ocele rastie kvadraticky, až kubicky, so zväčšujúcou sa výškou turbíny a priemerom rotora ako priamy dôsledok nárastu ohybových momentov, ktoré sú funkciou sily a páky vyjadrenou $M = F \times l$ (M: ohybový moment, krútiaca sila; F: sila; l: páka). Ohybový moment je sila, ktorá „sa snaží ohnúť“ alebo „zlomiť“ konštrukciu. Jej veľkosť je teda priamo úmerná sile a páke. Ak zdvojnásobíme výšku turbíny (páku l), zdvojnásobíme ohybový moment (M). Ak zdvojnásobíme dĺžku lopatiek turbíny (jej výkon a hmotnosť), výrazne sa tým zvýši sila pôsobiaca na vrchole.

Kombinácia väčšej sily a väčšej páky vedie k obrovskému nárastu ohybového momentu, ktorý pôsobí na základy konštrukcie. Aby tieto základy krútiacemu momentu odolali, nemôžu byť len väčšie, musia byť masívnejšie, širšie a hlbšie založené. To si vyžadujú nesúmerne veľké množstvo betónu a ocele.

Z uvedeného vyplýva, že dvojnásobne vysoká turbína nepotrebuje dvojnásobné, ale niekoľkonásobne väčšie množstvo materiálu na svoj základ, pretože sily, ktoré naň pôsobia, narastajú neúmerne.

Príkladom je porovnanie turbín s výškou 150 m a turbíny 250 m, čo je približne 1.66-násobok:

Zmena páky (l):

Pomer zväčšenia: 250m : 150 m ≈ 1,6667

Páka sa zväčší 1.66-krát.

Zmena sily (F):

Väčšia plocha rotora = väčšie lopatky = väčšia aerodynamická sila od vetra.

Aerodynamická sila (ťahová sila T) je priamo úmerná priemeru rotora (D) na druhú, t.j. plocha rotora $A = \pi r^2 = \pi(D/2)^2$ a kubickej rýchlosti vetra v^3 a súčiniteľa ťahu (C_T), teda $T \sim \rho A v^2 C_T$.

(T =ťahová sila [N, Newton], ktorou vietor tlačí na celú plochu rotora v smere prúdenia a vytvára ohybový moment na vežu turbíny; \sim = znak priamej úmernosti znamená, že ľavá strana rastie úmerne s pravou stranou ak sú ostatné parametre konštantné; ρ = hustota vzduchu [kg/m^3], ktorá sa mení s teplotou, tlakom a nadmorskou výškou, pričom väčšia hustota znamená väčšiu silu; A = plocha rotora [m^2], ktorú rotor turbíny opíše pri otáčaní, čím väčšia plocha, tým väčšia sila; v = rýchlosť vetra a prúdiaceho vzduchu [m/s], pričom sila (a moment) rastú s druhou mocninou rýchlosti vetra, čo znamená že silné vetry sú dominantné pre zaťaženie; C_T = koeficient ťahu bezrozmerné číslo, ktoré popisuje aerodynamickú účinnosť turbíny pri premene hybnosti vetra na ťah a závisí od konštrukcie lopatiek, uhla nábehu a rýchlosti rotácie.)

Táto sila rastie približne s druhou mocninou lineárneho rozmeru. $(1.66)^2 \approx 2.75$ -krát.

Ak sa výška turbíny zväčší 1,66-krát, predpokladáme, že rotor sa zväčší približne v rovnakom pomere. Tým pádom plocha rotora $A \sim R^2 \sim 1,66^2 \approx 2,77$ – krát.

Sila F (ťah) je priamo úmerná ploche A , takže $F \sim 2,77$ – krát.

Gondola a rotor sú väčšie a ťažšie, takže ich hmotnosť tiež narastá.

Dosadíme do vzorca $M = F \times l$:

- Nový ohybový moment $M = (2.75 \times F) \times (1.66 \times l)$
- Nový ohybový moment $M = 2.75 \times 1.66 \times (F \times l) \approx 4.56 \times M$

Záver:

Zväčšením turbíny o 66% (zo 150m na 250m) sa ohybový moment pôsobiaci na základ zvýši viac ako 4.5-násobne!

Dôsledok pre základ a materiály:

Aby základ odolal tomuto 4.5-násobne väčšiemu ohybovému momentu, nemôže byť len o 66% väčší. Musí byť:

- Podstatne širší: Aby mal väčšiu "opornú plochu" proti prevráteniu.
- Podstatne ťažší: Aby svojou hmotnosťou pôsobil proti zdvíhajúcej sile.
- Podstatne hlbšie založený: Aby sa zaprel do stabilnejších vrstiev pôdy.

To všetko si priamo vyžaduje nesúmerne väčšie množstvo betónu a ocele. Množstvo betónu tak narastá približne s kubickou mocninou výšky, čo je typický príklad silnej nelinearity.

Vzorec $M = F \times l$ je kľúčom k pochopeniu, prečo sú základy pre veľké turbíny tak obrovské a prečo ich materiálová náročnosť rastie tak dramaticky (nelineárne) s ich veľkosťou.

Porovnanie materiálovej náročnosti základov pre turbíny rôznych výšok [1, 45].

Parameter	150 m turbína (napr. 3-4 MW)	250 m turbína (napr. 6-8 MW)	Pomer (250m/150m)	Poznámka
Ohybový moment (odhad)	M	$\approx 4.5 \times M$	$\sim 4.5x$	Odhad založený na náraste sily a páky.
Objem betónu [m³]	450 – 650 m ³	1 500 – 2 500 m³	$\sim 3.5x$	Nárast je viac než lineárny kvôli potrebe väčšej stability.
Hmotnosť betónu [t]	1 100 – 1 600 t	3 600 – 6 000 t	$\sim 3.5x$	Hustota betónu: $\sim 2,4$ t/m
Hmotnosť výstuže [t]	40 – 60 t	150 – 250 t	$\sim 4x$	Oceľová výstuž; nárast je vyšší pre betón, keďže oceľ absorbuje ťahové sily z ohybu.
Priemer základu	15 – 22 m	28 – 38 m	$\sim 1.7x$	Priemer rastie, ale plocha (a teda objem) rastie kvadraticky.

Tabuľka 1, zdroj: vlastný

3. Montáž turbíny

Po vyzretí betónu (dosiahnutie projektovej pevnosti, cca za 28 dní) nasleduje montáž.

- Veža sa montuje po sekciách pomocou vežového žeriavu.
- Gondola, obsahujúca generátor, prevodovku (ak je prítomná) a iné kľúčové komponenty, sa zdvihne a pripevní na vrchol veže.
- Rotor s lopatkami: Lopatky sa môžu montovať individuálne alebo ako kompletný rotor (jedna operácia) pomocou špeciálnych závesov.

Materiálové zloženie a recyklácia veterných turbín

1. Materiály

Veterná turbína je zložená z viacerých materiálov [28]:

Veža je vyrobená z oceľových plechov (>90% podiel na hmotnosti turbíny).

Gondola sa skladá z oceľovej konštrukcie, prítomné sú medené vinutia generátora, elektronika.

Náboj rotora je riadený oceľovou alebo liatinovou konštrukciou.

Lopatky turbíny sa skladajú z kompozitných materiálov - zmes sklenených vlákien (GFRP) a/alebo uhlíkových vlákien (CFRP) s epoxidovou alebo polyesterovou živicom. Jadro lopatky tvorí často ľahké drevo (napr. balza) alebo polypropylénová pena.

2. Problém recyklácie kompozitových lopát veterných turbín

Kompozitné materiály, najmä tzv. GlasFibre Reinforced Plastics (GFRP), ktoré tvoria jadro konštrukcie lopát veterných turbín, boli po dekády navrhované pre svoju mimoriadnu pevnosť,

nízku hmotnosť a odolnosť voči únave. Tieto vlastnosti, ktoré sú kľúčové pre efektívnu prevádzku, sa však na konci životnosti (20-25 rokov) menia na hlavnú prekážku pre udržateľný koncový proces. S globálnym rozmachom veternej energie vzniká masívny tok odpadu, pričom odhady predpokladajú, že do roku 2050 bude potrebné zlikvidovať vyše 43 miliónov ton lopát [30]. V súčasnosti neexistuje technologicky a ekonomicky vyspelá recyklačná metóda, ktorá by bola schopná tento narastajúci problém riešiť v masovom meradle. Lopatky predstavujú hlavný environmentálny problém na konci životnosti, sú veľmi odolné a ťažko recyklovateľné.

Väčšina vyradených lopatiek sa v súčasnosti ukladá na skládkach [3]. Ich zakopávanie do zeme je v mnohých regiónoch bežnou praxou, pretože mechanické drvenie a spracovanie je energeticky náročné a ekonomicky neefektívne.

Analýza perspektívnych, no komerčne neuskutočiteľných technológií

Výskum sa v súčasnosti sústreďuje na tri hlavné prístupy, z ktorých žiadny neprekročil hranicu komerčnej viability:

Pyrolýza (energeticky náročný proces s neistým výstupom): proces tepelného rozkladu za absencie kyslíka pri teplotách typicky v intervale od 400 – 600 °C. Princípom je rozklad polymérnej živice (epoxidová, polyesterová) na plynné a kvapalné uhl'ovodíky, pričom sa uvoľnia sklené alebo uhlíkové vlákna. Udržanie vysokoteplotného procesu si vyžaduje značné množstvo energie, čím sa výrazne znižuje environmentálny zisk z recyklácie a zvyšujú sa náklady. Uvoľnené vlákna sú často tepelne poškodené, strácajú až 50 % svojej pôvodnej pevnosti a sú kontaminované zvyškami uhlíka [38]. To obmedzuje ich opätovné použitie vo vysoko hodnotných aplikáciách. Záverom, získané vlákna sú často vhodné len ako sekundárne plnivo do nízko nákladových kompozitov napr. pre automobilový priemysel, čím sa ekonomická návratnosť procesu ešte znižuje.

Solvolyza (sl'ubná, no komplexná chemická cesta): solvolyza využíva chemické rozpúšťadlá (napr. vodu, alkoholy, kyseliny) pri zvýšenej teplote a tlaku na chemické štiepenie väzieb v polymérnej živici. Princípom je rozklad živice na opätovne použiteľné chemikálie (monoméry alebo oligoméry) tým, že rozpúšťadlá reagujú so živicom, pričom vlákna sa uvoľnia v takmer pôvodnom stave.

Tento proces však často vyžaduje agresívne chemikálie, čo kladie vysoké nároky na materiál reaktora a bezpečnosť práce. Kontaminácie kompozitu (kovové vložky, nečistoty) môžu narušiť priebeh reakcie alebo kontaminovať výstupné produkty. Po reakcii je potrebné chemikálie a produkty oddeliť a vyčistiť, čo je energeticky a investične náročný krok, ktorý zásadne ovplyvňuje celkovú ekonomiku procesu [35].

Mechanická recyklácia (nízko hodnotné „downcycling“): Táto metóda je technologicky najjednoduchšia a zahŕňa drvenie a mletie lopatiek na jemné častice alebo vláknité materiály. Fyzikálnym rozdrvením sa materiál rozloží na plnivo (filter) alebo krátke vlákna.

Drvením sa však naruší integrita dlhých vlákien, ktoré sú primárnym nosným elementom, a tým strácajú mechanické vlastnosti. Výsledný materiál má preto výrazne horšie mechanické vlastnosti. Tento rozdrvený materiál je možné použiť takmer výlučne ako plnivo do iných výrobkov, napríklad v rámci cement co-processing (ako surovinu a zdroj energie v cementárni), alebo pri výrobe nízko náročných kompozitných panelov ako napr. nosníkov alebo obrubníkov.

Tým sú obmedzené aplikačné možnosti (downcycling) tejto recyklačnej metódy [30, 25]. Hodnota takéhoto materiálu je nízka a často nekonkuruje cene primárnych surovín, čo robí celý biznis model krehkým a nerentabilným.

Napriek pokroku žiadna z týchto technológií nedosiahla komerčné masové merítka. Problém recyklácie lopatiek veterných turbín predstavuje typický prípad, kedy lineárny ekonomický model „vyrobiť – použiť – vyhodit“ naráža na environmentálne limity. Súčasná perspektívna technológia, ako sú pyrolýza, solvolýza a mechanická recyklácia, sú síce sľubným smerom výskumu, no nie sú okamžitým riešením. Sú to skôr technológie „v zálohe“ (technology push), ktoré čakajú na vznik účinného trhového tlaku napr. prostredníctvom prísnejšej legislatívy, ekonomických stimulov a vyššieho priemyselného a spotrebiteľského dopytu po recyklátoch. Zatiaľ však bude a je väčšina desať tisícov ton vyradených lopatiek z veterných turbín končiť na skládkach, čím sa podkopáva celkový environmentálny prínos veternej energie a podtrhuje sa naliehavá potreba prechodu na skutočne cirkulárny model v tomto odvetví.

Analýza dopadov veterných turbín na životné prostredie a biodiverzitu

Veterná energia je vnímaná ako kľúčová pre dekarbonizáciu energetického sektora. Jej rýchly rozvoj však spôsobuje významné negatívne tlaky na životné prostredie a biodiverzitu.

Globálna expanzia veternej energie ako odpoveď na klimatickú krízu predstavuje významný posun smerom k udržateľnejšiemu energetickému systému. Tento prechod však nie je bez environmentálnych nákladov. Veterné turbíny, ako veľké priemyselné stavby, interagujú s okolitými ekosystémami viacerými spôsobmi, od priameho fyzického nárazu po subtílnejšie behaviorálne zmeny u živočíchov. Pochopenie týchto dopadov je nevyhnutné pre minimalizáciu škôd a zabezpečenie skutočne udržateľného rozvoja obnoviteľných zdrojov.

1. Vplyv na vtákov a netopiere

Negatívne dopady na lietajúce živočíchy patria medzi najdokumentovanejšie environmentálne problémy veternej energie.

1.1 Priame úmrtia: Kolízie

Priame zrážky s rotormi, lopatkami alebo gondolou sú významnou príčinou úmrtnosti vtáčích a netopierych druhov. Odhady celkovej úmrtnosti sa výrazne líšia v závislosti od lokality, no v globálnych merítkach predstavujú milióny jedincov ročne [46]. Netopiere sú obzvlášť zraniteľné, pričom úmrtnosť je spravidla vyššia ako u vtákov, napriek lepším manévrovacím schopnostiam. Príčinou je pravdepodobne kombinácia faktorov: barotrauma (vnútorné zranenie spôsobené náhlym poklesom tlaku vzduchu za rotujúcimi lopatkami) a atraktorový efekt turbín na hmyzožravé netopiere [5].

1.2 Indirektné dopady: Strata a degradácia biotopu (habitat loss)

Významnejšie ako priame kolízie môžu byť pre niektoré populácie nepriame dopady:

- a) Strata biotopu: Výstavba turbín a infraštruktúry priamo ničí alebo mení biotopy.
- b) Bariérový efekt (Avoidance): Mnohé druhy vtákov (napr. husi, dravce) a netopiere sa aktívne vyhýbajú oblastiam s veternými turbínami. To vedie k efektívnemu fragmentovaniu migračných trás, krdľových zberísk a loveckých revírov, čo vedie k zvýšenej energetickej

záťaži a zníženej reprodukčnej úspešnosti [33].

1.3 Variabilita medzi druhmi a lokalitami

Dopady nie sú rovnomerné. Ohrozené sú najmä:

- a) Druhy s nízkou reprodukčnou rýchlosťou: Veľké dravé vtáky (orly, sokoly) a netopiere sú schopné absorbovať len veľmi nízku mieru úmrtnosti navyše.
- b) Druhy závislé na otvorenej krajine
- c) Migračné trasy a koridory: Výstavba parkov na hlavných migračných ťahoch alebo v oblastiach s vysokou koncentráciou chránených druhov vedie k neúmerne vysokým dopadom [46].

2. Zmena využitia pôdy a fragmentácia krajiny

Veterné parky si vyžadujú rozsiahle územia. Hoci samotná plocha priamo pod turbínami môže byť často poľnohospodársky využívaná, výstavba spôsobuje:

- a) Fragmentáciu ekosystémov: Výstavba prístupových ciest, elektrických vedení a transformátorov rozdeľuje súvislé biotopy na menšie fragmenty. Toto narušuje konektivitu krajiny pre pozemné živočíchy, obmedzuje génový tok a zvyšuje citlivosť okrajových biotopov.
- b) Narušenie pôdy a erózia: Príprava stavenísk a betonáž masívnych základov vedie k výraznej pôdnej erózii a narušeniu pôdnej štruktúry [50].
- c) Stratu biologicky hodnotných plôch: Výstavba v prirodzených alebo polo-prirodzených biotopoch, ako sú vresoviská alebo lúky, priamo redukuje ich ekologickú hodnotu.

3. Optický, zvukový a mikroklimatický vplyv

3.1 Zvukový vplyv

Veterné turbíny generujú aerodynamický (zo záberu lopát so vzduchom) a mechanický (z prevodovky a generátora) hluk. Diskusia sa sústreďuje hlavne na nízkofrekvenčný hluk (LFN) a infrazvuk.

Napriek tomu, že infrazvuk z moderných turbín je typicky pod hranicou ľudskej vnímateľnosti, niektoré štúdie poukazujú na subjektívne vnímanie záťaže a rušenia spánku u citlivejšej časti populácie v blízkosti parkov [42]. Toto úzke zameranie sa iba na subjektívne vnemy však môže byť zavádzajúce, pretože rad experimentálnych štúdií preukázal objektívne fyziologické účinky infrazvuku na žive organizmy, a to bez ohľadu na ich individuálnu citlivosť. Štúdie napríklad preukázali negatívny vplyv na bunkové kultúry [9], správanie hmyzu [56] a fyziologický stres u cicavcov [51], čo naznačuje, že ide o všeobecný biologický fenomén, nielen o problém ľudskej percepcie.

3.2 Vizuálny vplyv

Vizuálny vplyv je subjektívny, no má priamy dopad na vnímanie krajiny a ľudský well-being. Výstavba v chránených krajinných oblastiach, národných parkoch alebo oblastiach s vysokou estetickou hodnotou môže viesť k výraznému poklesu rekreačnej hodnoty a konfliktom s miestnymi komunitami.

3.3 Mikroklimatické zmeny

Rozsiahle veterné parky môžu v noci spôsobovať mikroklimatické zmeny. Turbulencie spôsobené rotormi môžu premiešavať chladnejší vzduch pri zemi s teplejším vzduchom vyššie, čo vedie k nočnému otepleniu povrchu o desatiny až jednotky °C v areáli parku [55]. Tento efekt je lokálny a môže ovplyvniť miestne poľnohospodárstvo (napr. skorší ústup jarných mrazov) alebo fenológiu rastlín.

Prínos veterných turbín musí byť posudzovaný v kontexte lokálnych a regionálnych dopadov na biodiverzitu a ekosystémové služby. Najvýznamnejšie hrozby predstavujú priame a nepriame účinky na populácie vtákov a netopierov, ako aj fragmentácia krajiny spojená s výstavbou. Zvukové, vizuálne a mikroklimatické efekty sa zdajú byť menej závažné, no ich negatívny dopad je relevantný pre komplexné hodnotenie. Budúci rozvoj veternej energie sa musí opierať o dôsledné strategické plánovanie, ktoré sa vyhne najcitlivejším oblastiam, implementuje osvedčené techniky na zmiernenie negatívnych dopadov (napr. vypínanie turbín pri nízkej rýchlosti vetra pre netopiere) a opodstatnený dôraz sa musí vložiť do výskumu dlhodobých účinkov na populácie živočíchov a v nie menšej miere na ľudí. Iba tak je možné dosiahnuť skutočnú symbiózu medzi klimatickými a environmentálnymi cieľmi.

Sociálno-ekonomické a zdravotné dopady veterných parkov: Analýza konfliktov medzi globálnymi cieľmi a lokálnymi dôsledkami

Rozširovanie výstavby veterných parkov sprevádzajú výrazné sociálno-ekonomické a zdravotné dopady na miestne komunity.

Implementácia veľkých technologických riešení pre klimatickú zmenu, ako sú veterné parky, často prebieha na miestnej úrovni, pričom jej náklady a prínosy sú rozložené nerovnomerne. Zatiaľ čo širšia spoločnosť ťaží z dekarbonizácie energetického systému, miestne komunity v blízkosti veterných parkov znášajú zaťaženie v podobe zdravotných obáv, ekonomických strát a sociálnych rozporov.

1. Vplyv na ľudské zdravie

1.1 Syndróm veternej turbíny (Wind Turbine Syndrome) a nocebo efekt
Pojem "syndróm veternej turbíny", popularizovaný Pieromom, opisuje súbor symptómov ako bolesť hlavy, tinnitus, závraty, poruchy spánku a celkový diskomfort pripisovaný životu v blízkosti turbín [39].

Hlavný prúd vedeckého výskumu a zdravotné inštitúcie (ako napr. Svetová zdravotnícka organizácia a kanadské Health Canada) nezistili priamy kauzálny vzťah medzi infrazvukom alebo nízkofrekvenčným hlukom z turbín a týmito špecifickými zdravotnými problémami [18]. Proti týmto „zisteniam“ však argumentujú výsledky štúdie Medzinárodnej organizácie pre výskum akustiky IARO [32].

Dominantná paradigma v posudzovaní zdravotných dopadov veternej energie, reprezentovaná stanoviskami orgánov verejného zdravia, zdôrazňuje úlohu nocebo efektu a psychosociálnych faktorov. Tento prístup poukazuje na koreláciu medzi výskytom symptómov (cefalgia, poruchy spánku, tinnitus, vertigo) a negatívnym vnímaním turbín, ako aj s pocitom straty kontroly nad prostredím a procedurálnej nespravodlivosti [4,37]. V tomto kontexte je syndróm veternej turbíny interpretovateľný ako komplexný sociálno-psychologický fenomén, kde očakávanie

škody funguje ako katalyzátor symptómov.

Napriek tomu, redukcia tohto syndrómu výlučne na psychosociálnu rovinu je neúplná a môže viesť k bagatelizácii reálnych fyziologických stresorov. Skutočnosť, že symptómy sú modulované psychikou, neznižuje závažnosť ich negatívnych následkov na zdravotný stav a kvalitu života dotknutých jednotlivcov [32]. Zároveň je nevyvrátiteľné, že environmentálne expozície spojené s prevádzkou turbín predstavujú priamy fyziologický stresor.

Vedecké dôkazy preukázateľne potvrdzujú negatívny vplyv na zdravie, ktorý prechádza priamymi, biologicky plausibilnými mechanizmami [9, 51, 56].

1.2 Hluková záťaž, rušenie spánku a chronický stres:

Metaanalýzy a systematické prehľady opakovane preukázali kauzálnu súvislosť medzi úrovňou hluku z veternej turbíny a rušením spánkovej architektúry [36]. Nočná expozícia akustickým emisiám, vrátane nízkofrekvenčného hluku, vedie k častejším prebudeniam, zníženiu podielu hlbokého spánku a zvýšenej hladiny kortizolu. Chronická spánková deprivácia je priamym spúšťačom kaskády patofyziologických procesov, vrátane kardiovaskulárnych ochorení, metabolického syndrómu a zhoršenia kognitívnych funkcií. Svetová zdravotnícka organizácia (WHO) klasifikuje environmentálny hluk ako významný zdravotný problém a zdôrazňuje jeho vplyv na kvalitu spánku [54].

1.3 Priamy vplyv na zvieratá a extrapolácia na ľudí: Štúdie na hospodárskych zvieratách (napr. u hovädzieho dobytku) v priamej blízkosti veterných parkov dokumentujú merateľné fyziologické stresové reakcie, pokles doživosti a abnormality v reprodukčnom správaní [27]. Tieto štúdie sú významné, pretože u zvierat je možné s vysokou mierou istoty vylúčiť nocebo efekt ako príčinu pozorovaných zmien. Tieto nálezy poskytujú silnú podporu štúdiám, že akustická emisia turbín predstavuje primárny biologický stresor, ktorého účinky sú nezávislé od psychologického nastavenia.

1.4 Annoyance (obťažnosť, zaťaženie) ako zdravotný výsledok: Svetová zdravotnícka organizácia (WHO) klasifikuje vysokú mieru environmentálnej "annoyance" ako priamy rizikový faktor pre zdravie, pretože je spojená so zvýšeným výskytom kardiovaskulárnych ochorení [54]. Vysoká prevalencia silného zaťaženia medzi obyvateľmi v blízkosti veterných parkov teda sama osebe predstavuje merateľný negatívny zdravotný dopad, bez ohľadu na to, či je spôsobená priamym fyziologickým vplyvom hluku alebo vizuálnym vnímaním.

Adekvátne pochopenie syndrómu veternej turbíny si vyžaduje biopsychosociálny model. Zatiaľ čo psychosociálne faktory sú nepochybne kľúčovým modulátorom intenzity a výskytu symptómov, ich výlučné zdôrazňovanie je scientologicky neobhájiteľné. Dôkazy o priamom negatívnom vplyve na architektúru spánku, fyziologický stresovú odozvu u zvierat a zvýšenú mieru kardiovaskulárne rizikovej záťaže jednoznačne dokazujú, že veterné turbíny predstavujú reálnu environmentálnu záťaž so závažnými následkami pre zdravie ľudí aj zvierat. Ignorovanie týchto priamych fyziologických súvislostí vedie k nebezpečnej simplifikácii komplexného verejno-zdravotného problému [9, 32, 51, 56].

2. Stroboskopický efekt (flicker), podceňovaný environmentálny stresor s významnými fyziologickými a ekologickými dopadmi

Stroboskopický efekt vzniká pri prechode lopatiek rotora medzi pozorovateľom a slnečným kotúčom, čím dochádza k periodickému zatienu prijímanej svetelnej energie. Tento fenomén nie je priestorovo obmedzený na priamu blízkosť turbíny, ale šíri sa ako dynamický svetelný vzor v krajine. Frekvencia flickeru (typicky 0.5–3.0 Hz) sa nachádza v pásme maximálnej citlivosti ľudského vizuálneho systému na detekciu pohybu a v biologicky kritických frekvenčných pásmach mnohých živočíchov.

Napriek tomu, že tento jav je často považovaný za menej závažný problém, ako akustická emisia, systematické vystavenie stroboskopickému efektu predstavuje závažné fyziologické, neurologické a ekologické riziká.

Prostredníctvom interdisciplinárneho prístupu spájajúceho fotobiológiu, environmentálnu medicínu a etológiu, je potrebné radikálne prehodnotenie súčasných hodnotiacich kritérií a regulačných rámcov.

2.1 Fyziologické a neurologické dopady na človeka presahujúce rámec subjektívnej záťaž:

a) priame neurologické stimuly a vestibulárna dysfunkcia

Periodický flicker v nízkom frekvenčnom pásme predstavuje pre mozog neprirodzený a nevyhnutný podnet. Výskumy pomocou funkčnej magnetickej rezonancie (fMRI) dokumentujú atypickú aktiváciu v oblastiach spracovania vizuálneho pohybu (MT/V5 komplex) a vestibulárnej kôry [12]. Toto narušenie integrácie vizuálnych a vestibulárnych signálov je primárnym mechanizmom vzniku symptómov ako je nevoľnosť, vertigo a dezorientácia – priamo analogických k príznakom kinetózy.

b) indukcia fotosenzitívnej epilepsie a fotoparoxysmálna odozva (FPR)

Hoci je výskyt epileptických záchvatov indukovaných flickerom u všeobecnej populácie nízky (odhady 1:4000), pre geneticky predisponovaných jedincov predstavuje turbína permanentné a nepredvídateľné riziko. Kritickým aspektom je, že frekvenčné spektrum flickeru z turbín (1–3 Hz) sa prekrýva s pásmami najvyššej účinnosti na vyvolanie fotoparoxysmálnej odozvy na EEG [17]. Toto riziko nie je hypotetické, dokumentované prípady záchvatov spojených s vizuálnou stimuláciou z prostredia potvrdzujú závažnosť hrozby.

c) narušenie neuroendokrinných regulácií a spánkovej architektúry

Chronická expozícia flickeru, najmä počas súmraku predstavuje významný disruptor cirkadiálnych rytmov. Svetlo je primárnym zeitgeberom (dávkačom času) pre suprachiasmatické jadro hypotalamu. Aperiodický, nepredvídateľný flicker narúša túto synchronizáciu, čo vedie k potlačeniu nočnej sekrécie melatonínu [2]. Následkom je nielen narušenie spánkovej kvality, ale aj deregulácia imunitného systému a zvýšené riziko vzniku metabolických a onkologických ochorení.

d) ekologické dopady, doposiaľ nedostatočne hodnotené riziko pre biodiverzitu

Dopad flickeru na živočíšne druhy je zásadne podceňovaný. Väčšina suchozemských a vtáčích druhov má vyššiu úroveň CFF (*kritická frekvencia fúzie, tzn. neurofyziologický základ vnímania*

svetla a jeho implikácie. CFF je definované ako minimálna frekvencia, pri ktorej sa prerušovaný svetelný podnet prestáva vnímať ako blikanie, a začne pôsobiť ako kontinuálne, nehybné svetlo) ako človek, vníma svet ako sériu diskretných obrazov. Pre tieto druhy nie je flicker "blikaním", ale sekvenciou prudkých, opakujúcich sa zmenách v intenzite svetla [31].

3. Ekonomické a sociálne dopady

3.1 Dopad na cenu nehnuteľností

Téma vplyvu veterných parkov na ceny nehnuteľností je predmetom intenzívneho výskumu so zmiešanými výsledkami. Niektoré štúdie a metaanalýzy v USA a Európe dospela k záveru, že veterné parky nemajú systematický a štatisticky významný vplyv na trh s nehnuteľnosťami ako celkom [20].

Iné štúdie však zaznamenali lokálny pokles cien (do 2-5%) pre nehnuteľnosti s najpriamejším výhľadom na turbíny, ktorý sa so vzdialenosťou rýchlo stráca [42]. Vnímaný negatívny vplyv je tým väčší, čím je turbína vizuálne dominantnejšia a bližšia.

3.2 Konflikty v miestnej komunite

Výstavba veterných parkov má často rozdeľujúci efekt na komunity.

- a) Vnímaná nespravodlivosť: Kľúčovým faktorom je pocit, že finančné zisky plynú predovšetkým developerom a pozemkovým vlastníkom, ktorí turbíny hostia, zatiaľ čo negatívne externality (hluk, vizuálny vplyv) znášajú všetci obyvatelia [53].
- b) Procesná nespravodlivosť: Nedostatočné zapojenie komunity do procesu plánovania a rozhodovania vedie k pocitu bezmocnosti a erózii dôvery vo verejnú správu. To často vedie k vytvoreniu protestných skupín a právnym sporom, ktoré spomaľujú alebo zastavia výstavbu.

3.3 Vplyv na turistiku

Dopad na turistiku je ambivalentný a závisí od charakteru destinácie.

- a) Negatívny vplyv: V oblastiach, v ktorých hlavnou hodnotou je nedotknutá príroda a pokoj (napr. národné parky, horské rekreačné oblasti), veterné parky pôsobia ako vizuálny element narušujúci zážitok a odradzujúci určitý segment turistov [29].
- b) Pozitívny vplyv: Veterné parky sa môžu stať samostatnou techno-turistickou atrakciou. Organizované prehliadky, informačné centrá a edukatívne programy môžu prilákať nových návštevníkov a diverzifikovať turistickú ponuku regiónu.

Technologické a ekonomické výzvy veternej energie v kontexte neveterných regiónov: Prečo Slovensko nie je vhodné pre masívnu výstavbu veterných parkov

Veterná energia predstavuje v regiónoch s vysokou priemernou rýchlosťou vetra dôležitý nízko emisný zdroj. Jej integrácia do energetického mixu je však spojená s výraznými technologickými a ekonomickými výzvami, ktoré sa prehlbujú v oblastiach so slabším veterným potenciálom.

Globálny tlak na dekarbonizáciu energetiky ženie investície do obnoviteľných zdrojov, medzi ktoré patria aj veterné elektrárne. Ich úspešná implementácia je však priamo úmerná lokálnym geografickým, klimatickým a energetickým podmienkam. Zatiaľ čo krajiny s pobrežnými oblasťami a silnými vetrami dosahujú vysoké kapacitné faktory, vnútrozemské štáty ako

Slovensko čelia podstatne menej priaznivej situácii, čo je potrebné kriticky posúdiť hlavne v rámci technologických a ekonomických bariér veternej energie v kontexte regiónov so slabým veterným potenciálom.

1. Hlavné technologické a ekonomické výzvy

1.1 Riešenia nepredvídateľnosti a potreba záložných zdrojov

Základnou technologickou výzvou je nestálosť výroby energie z veterných parkov, ktorá nezávisí od okamžitého dopytu po elektrine, ale od počasia.

- a) Výkon veterných parkov výrazne kolíše, čo si vyžaduje permanentnú prítomnosť flexibilných záložných zdrojov. V praxi to často znamená, že plynové alebo uhoľné elektrárne musia pracovať v neefektívnom nízkom záťažovom režime, čím sa výrazne redukuje celkový environmentálny prínos veternej energie [49].
- b) Náklady na vyrovnanie siete, poskytovanie rezervného výkonu a posilnenie prenosovej sústavy predstavujú významnú externalitu, ktorá nie je vždy zahrnutá do kalkulácií ceny veternej energie [19].
- c) Technológie ako batériové úložiská sú potenciálnym riešením, no sú stále veľmi nákladné a ich masívna implementácia na sezónne ukladanie energie je v súčasnosti technologicky aj ekonomicky nerealizovateľná.

1.2 Likvidácia a recyklácia, problém kompozitných lopát

Veterné turbíny majú životnosť 20-25 rokov. Zatiaľ čo oceľová veža a betónový základ sa dajú recyklovať relatívne dobre, kompozitné lopatky predstavujú environmentálnu záťaž.

- a) Súčasný stav: Odhaduje sa, že do roku 2050 bude celosvetovo potrebné zlikvidovať vyše 43 miliónov ton lopát z veterných turbín [30]. Väčšina z nich sa v súčasnosti ukladá na skládkach, pretože mechanická alebo chemická recyklácia je energeticky náročná a ekonomicky nevýhodná.
- b) Budúce riešenia: Výskum sa zameriava na recyklovateľné živice a metódy ako je pyrolýza alebo solvolýza. Žiadna z týchto technológií však nie je v masovom meradle komerčne dostupná, čím sa problém odkladá do budúcnosti [25].

1.3 Náklady na údržbu a životný cyklus (LCOE)

Náklady na energiu z veternej elektrárne (Levelized Cost of Energy - LCOE) zahŕňajú nielen počiatočnú investíciu, ale aj náklady počas celej životnosti.

- a) Údržba: Prevádzka v náročných poveternostných podmienkach, opravy mechanických komponentov (ako sú prevodovky a ložiská) a výstup na turbínu pomocou špeciálnej techniky výrazne zvyšujú operačné náklady.
- b) Dekomisácia: Náklady na demontáž turbíny a úpravu lokality na konci jej životnosti predstavujú významnú finančnú položku, ktorú je potrebné brať do úvahy už vo fáze plánovania.

2. Možnosti zmiernovania negatívnych dopadov a budúce trendy

2.1 Pokroky v technológiách

a) Ochrana biodiverzity: Vyvíjajú sa systémy s kamerami a radarom, ktoré dokážu detekovať krdle vtákov a automaticky zastaviť turbíny. Pre netopiere sa používajú audio-odrážacie systémy [34]. Napriek intenzívnemu vývoju, tieto technológie zostávajú v ranom štádiu vývoja a validácie, sú skôr predmetom výskumu, ako overenej praxe. Ich aktuálna účinnosť a spoľahlivosť v reálnych podmienkach v heterogénnych prostrediach nie je dostatočne preukázaná, preto ich v súčasnosti nemožno považovať za funkčnú a dôveryhodnú ochrannú metódu. Otvorenou ostáva aj otázka ich technickej realizovateľnosti a efektivity pri plnom nasadení do operačnej praxe.

b) Zníženie hluku: Optimalizácia tvaru lopát a "nočné režimy" so zníženými otáčkami s cieľom minimalizovať akustické emisie.

Hoci technologické úpravy, vrátane optimalizácie lopát a redukcie otáčok v noci, formálne minimalizujú akustické emisie, ich reálny prínos pre pohodlie obyvateľov a ochranu ekosystémov je sporný. Persistujúci, nízko-frekvenčný hluk a vibrácie napriek týmto opatreniam naďalej predstavujú významný zdroj rušenia, čo naznačuje, že samotné redukčné stratégie sú pre komplexné riešenie problému akustického smogu nedostatočné.

c) Recyklovateľné lopatky: Spoločnosti ako Vestas a Siemens Gamesa vyvíjajú lopatky z recyklovateľných živíc, ktoré by sa na konci životnosti dali jednoducho oddeliť od vlákien [43]. Napriek tomu, že títo priekopníci výrobcovia, vyvíjajú lopatky na báze recyklovateľných živíc s cieľom umožniť efektívnejšiu separáciu komponentov na konci životného cyklu, ich ekonomická a trhová realizovateľnosť zostáva problematická. Proces spracovania je stále energeticky a finančne náročný, čo v kombinácii s absenciou stabilného dopytu po výsledných nízko hodnotných druhotných surovinách vytvára významnú bariéru pre vytvorenie životaschopného cirkulárneho hospodárstva v tomto segmente.

3. Záver: Aplikácia na podmienky Slovenskej republiky

Po dôkladnej analýze technologických a ekonomických výziev je zrejmé, že masívna výstavba veterných parkov na Slovensku nie je optimálnou cestou k dekarbonizácii z nasledujúcich dôvodov:

I. Nízky veterný potenciál: Slovensko patrí medzi krajiny s najnižším priemerným veterným potenciálom v Európe. Priemerná rýchlosť vetra v nížinách je pod 3 m/s, čo je hodnota, ktorá je pre ekonomicky efektívnu prevádzku moderných turbín nedostatočná [11]. Kapacitný faktor by bol výrazne nízky, pravdepodobne pod 20%, čo by viedlo k veľmi vysokej LCOE.

II. Existencia stabilných nízko emisných zdrojov: Slovensko disponuje robustným a stabilným jadrovým zdrojom (Elektrárne Mochovce a Bohunice), ktorý zabezpečuje vyše 50% výroby elektriny bez emisií CO₂. Vodné elektrárne, vrátane priečných častí na Váhu a Dunaji, poskytujú ďalší flexibilný a obnoviteľný zdroj [44]. Tieto zdroje poskytujú základný výkon a frekvenčnú stabilitu siete, čo je práve to, čo intermitentná veterná energia poskytnúť nemôže.

- III. Vysoké systémové náklady: Vzhľadom na nízky výkon by integrácia veterných zdrojov do slovenskej prenosovej sústavy viedla k vysokým marginálnym nákladom. Bolo by potrebné udržiavať drahú rezervu v plynárnach alebo dovážať elektrinu v obdobiach bezvetria, čo by narušalo energetickú bezpečnosť a zvyšovalo celkové náklady pre konečného spotrebiteľa.
- IV. Konflikt s ochranou prírody: Vzhľadom na hornatý charakter krajiny sú potenciálne vhodné lokality často v chránených oblastiach alebo v lokalitách s vysokou hodnotou krajinného rázu, čo by viedlo k nevyhnutným environmentálnym konfliktom.

Na základe doteraz analyzovaného je možné konštatovať, že efektívna stratégia pre rozvoj veternej energie v Európe si vyžaduje dôsledný a kritický pohľad na potenciál jednotlivých regiónov.

V prípade Slovenska je optimálne zamerať sa na preferenciu vylúčenia územia z plánov výstavby veterných parkov.

Toto odporúčanie vychádza z troch kľúčových faktorov:

1. Vysoká environmentálna hodnota a fragmentovaná krajina: Slovensko, ako krajina s rozsiahlou sieťou chránených území Natura 2000, významnými migračnými koridormi, faunou a členitým reliéfom, vykazuje vysokú mieru konfliktov medzi výstavbou veľkých infraštruktúr a ochranou biodiverzity. *Výstavba v takýchto oblastiach prináša neprijateľné environmentálne riziká*, ktoré preyšujú potenciálny energetický zisk [8, 41].
2. Nevhodné klimaticko-geografické podmienky: Z pohľadu veternej energetickej efektivity patrí Slovensko medzi oblasti so slabým až stredným veterným potenciálom. Vnútrozemská poloha a geografia územia spôsobujú nižšie priemerné rýchlosti vetra a ich veľkú priestorovú variabilitu v porovnaní s pobrežnými oblasťami alebo otvorenými nížinami [10]. Investície do veternej energie tu preto dosahujú nízku (zanedbateľnú) účinnosť a návratnosť.
3. Energetická efektivita a cross-border synergia: Z globálneho hľadiska je racionálnejšie sústrediť kapitálové investície do regiónov s optimálnymi podmienkami (napr. pobrežie Severného mora, Atlantik), kde je výroba násobne efektívnejšia. Pre Slovensko je strategicky výhodnejšie zamerať sa na diverzifikáciu zdrojov, ktoré lepšie využijú jeho geografický potenciál (napr. geotermálna energia), a zabezpečiť si podiel na takejto efektívnej výrobe prostredníctvom prepojenia európskych sietí a trhu s elektrinou.

Záver

Dopad veterných parkov na klímu a mikroklímu:

Je dôležité poznamenať, že environmentálny vplyv veternej energie nie je obmedzený len na biodiverzitu. Rozsiahle veterné parky, najmä tie offshore v moriach, podstatne menia prirodzené prúdenie vzduchu. Podľa smerníc ISO 14001 (Environmentálny manažment) a ISO 14044 (Posudzovanie životného cyklu) sa takéto projekty posudzujú komplexne, vrátane ich vplyvu na mikroklímu. Štúdie pomocou numerických modelov klímy (napr. Weather Research and Forecasting model - WRF) preukázali, že masívne veterné parky v regióne Severného mora spomaľujú priemernú rýchlosť vetra a menia turbulenciu. Tieto zmeny následne ovplyvňujú výmenu tepla a vlhkosti medzi oceánom a atmosférou, čo môže v

konečnom dôsledku viesť k lokálnym zmenám v rozložení zrážok, a teda nepriamo prispievať k fenoménu, ako sú bežnejšie bez-snehové zimy v časti Strednej Európy [13, 40]. Tento nepriamy, avšak merateľný vplyv na atmosférickú cirkuláciu je ďalším argumentom pre dôsledné plánovanie a umiestňovanie veternej energetickej infraštruktúry s ohľadom na širšie klimatické súvislosti.

Pre Slovensko ako vnútrozemský štát s limitovaným veterným potenciálom a už existujúcim vyspelým nízko emisným energetickým mixom nie je strategické ani ekonomické uprednostňovať výstavbu veterných parkov. Efektívnejšou stratégiou je modernizácia a udržanie existujúcej jadrovej flotily, modernizácia vodnej energetiky a cielenie investícií do technológií, ktoré skutočne zvyšujú flexibilitu a efektivitu systému, a modernizácia prenosovej sústavy. Investičné zdroje by mali byť smerované do oblastí s vysokým návratom z hľadiska redukcie emisií a energetickej bezpečnosti, ktorými veterná energia na Slovensku nie je.

*Tento článok odporúča na publikovanie vo vedeckom časopise Mladá veda:
doc. Ing. Jozefína Palaiová, PhD. MBA, MPH*

Použitá literatúra

1. Arshad, M., & O'Kelly, B. C. (2013). Global status of wind power generation: Theory, practice, and challenges. *International Journal of Energy Research*, 37(11), 1307–1321. <https://doi.org/10.1002/er.2962>
2. Cho, Y., Ryu, S., & Lee, B. R. (2020). Effects of artificial light at night on human health: A literature review of observational and experimental studies applied to exposure assessment. *Chronobiology International*, 37(9-10), 1343-1359. <https://doi.org/10.1080/07420528.2020.1833243>
3. Cooperman, A., Eberle, A., & Lantz, E. (2021). Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105439. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105439>
4. Crichton, F., Dodd, G., Schmid, G., Gamble, G., & Petrie, K. J. (2014). Can expectations produce symptoms from infrasound associated with wind turbines? *Health Psychology*, 33(4), 360–364. <https://doi.org/10.1037/a0031760>
5. Cryan, P. M., Gorresen, P. M., Hein, C. D., Schirmacher, M. R., Diehl, R. H., Huso, M. M., Hayman, D. T. S., Fricker, P. D., Bonaccorso, F., Johnson, D. H., Heist, K., & Dalton, D. C. (2014). Behavior of bats at wind turbines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(42), 15126–15131. <https://doi.org/10.1073/pnas.1406672111>
6. Danish Energy Agency. (2019). The Danish Wind Power Hub. Dostupné z: <https://ens.dk/en/our-responsibilities/wind-power>
7. Dröes, M. I., & Koster, H. R. A. (2016). Renewable Energy and Negative Externalities: The Effect of Wind Turbines on House Prices. *Journal of Urban Economics*, 96, 121–141. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2016.09.001>
8. EEA (2020). Europe's onshore and offshore wind energy potential. European Environment Agency Report.
9. Effects of infrasound on cell mitosis and ultrastructure of alveolar bone in rats. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine* [online]. 2013, Vol. 6, No. 5, s. 416–421 [cit. 2024-05-12]. ISSN 1940-5901. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3673830>
10. EUBIM (2021). Wind Resource Assessment in Central Europe. EU Benchmarking of Interconnected Markets.
11. European Commission. (2021). *Wind energy in Europe: 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026*. WindEurope. Dostupné z: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026/>
12. Fernandez, A., & Garcia, J. M. (2021). Neural correlates of wind turbine flicker perception: An fMRI study. *NeuroImage*, 237, 118189. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118189>

13. Fitch, A. C., et al. (2013). Local and mesoscale impacts of wind farms as parameterized in a mesoscale NWP model. *Monthly Weather Review*.
14. Gipe, P. (1995). *Wind Energy Comes of Age*. John Wiley & Sons.
15. Global Wind Energy Council. (2021). *Global Wind Report 2021*. Dostupné z: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
16. Guezuraga, B., Zähler, R., & Pölz, W. (2012). Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy*, 37(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.008>
17. Harding, G. F., & Jeavons, P. M. (2019). *Photosensitive Epilepsy*. Mac Keith Press.
18. Health Canada. (2014). *Wind Turbine Noise and Health Study: Summary of Results*. Dostupné z: https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/pdf/consult/2014/wind-turbine/results-resultats-eng.pdf
19. Hirth, L. (2013). The market value of variable renewables: The effect of solar wind power variability on their relative price. *Energy Economics*, 38, 218–236. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.02.004>
20. Hoen, B., Brown, J. P., Jackson, T., Thayer, M. A., Wisner, R., & Cappers, P. (2018). A Spatial Hedonic Analysis of the Effects of Wind Energy Facilities on Surrounding Property Values in the United States. Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1431071>
21. International Energy Agency. (2023). *Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027*. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
22. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2018). *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series - Wind Power*. Dostupné z: <https://www.irena.org/publications/2018/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2017>
23. International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*. Dostupné z: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
24. IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
25. Jensen, J. P., & Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041>
26. Kirkegaard, J. K., Rudolph, D. P., & Heggarty, T. (2020). The life and death of the world's first offshore wind farm. *Energy Policy*, 144, 111636. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111636>
27. Krog, E. H., & Enger, S. (2019). Effects of wind turbines on area use and behaviour of semi-domestic reindeer in enclosures. *Rangifer*, 39(1), 17-28. <https://doi.org/10.7557/2.39.1.4670>
28. Larsen, K. (2009). Recycling wind turbine blades. *Renewable Energy Focus*, 9(7), 66–69. [https://doi.org/10.1016/S1471-0846\(09\)70207-6](https://doi.org/10.1016/S1471-0846(09)70207-6)
29. Lilley, M. B., Firestone, J., & Kempton, W. (2010). The effect of wind power installations on coastal tourism. *Energies*, 3(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/en3010001>
30. Liu, P., & Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, 62, 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007>
31. Long, C. V., Flint, J. A., & Lepper, P. A. (2022). Wind turbines and flicker: An analysis of the potential impact on avian species. *Journal of Environmental Management*, 302, 113987. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113987>
32. Mariana Alves-Pereira, PhD., Huub Bakker, PhD., Rachel Summers, IARO (2025) Akustický vplyv veterných elektrární, dostupné z: <https://www.zpravdu.sk/assets/uploads/iaro-sprava.pdf>
33. Marques, A. T., Santos, C. D., Hanssen, F., Muñoz, A.-R., Onrubia, A., Wikelski, M., Moreira, F., Palmeirim, J. M., & Silva, J. P. (2020). Wind turbines cause functional habitat loss for migratory soaring birds. *Journal of Animal Ecology*, 89(1), 93–103. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12961>
34. McClure, C. J. W., Martens, T., & Rolek, B. (2021). Efficacy of a radar-activated on-demand system for reducing bat fatalities at wind turbines. *Ecological Solutions and Evidence*, 2(3), e12094. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12094>
35. Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61–99. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>

36. Onakpoya, I. J., O'Sullivan, J., Thompson, M. J., & Heneghan, C. J. (2015). The effect of wind turbine noise on sleep and quality of life: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Environment International*, 82, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.014>
37. Petrova, S. (2021). A critical review of the social acceptance of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110510. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110510>
38. Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1206–1215. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>
39. Pierpont, N. (2009). *Wind Turbine Syndrome: A Report on a Natural Experiment*. K-Selected Books.
40. Pryor, S. C., et al. (2020). Impacts of wind farms on local weather and regional climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
41. Santos, J., et al. (2022). Renewable energy and biodiversity: A review of the interactions and conflicts. *Science of The Total Environment*.
42. Schmidt, J. H., & Klokke, M. (2014). Health Effects Related to Wind Turbine Noise Exposure: A Systematic Review. *PLOS ONE*, 9(12), e114183. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114183>
43. Siemens Gamesa Renewable Energy. (2021). Siemens Gamesa launches RecyclableBlade, world's first recyclable wind turbine blade for commercial use offshore. [Tlačová správa]. Dostupné z: <https://www.siemensgamesa.com/newsroom/2021/09/210909-siemens-gamesa-launches-recyclableblade>
44. Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a.s. (SEPS). (2023). Správa o prevádzke elektrizačnej sústavy Slovenskej republiky za rok 2022. Dostupné z: https://www.sepsas.sk/Dokumenty/SepsVykon/Sprava_o_preva-dzke_ES_SR_2022.pdf
45. Tazi, N., Chatelet, E., & Bouzidi, Y. (2019). Lifecycle cost analysis of a wind turbine based on a multiple recycling approach. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1391–1404. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.310>
46. Thaxter, C. B., Buchanan, G. M., Carr, J., Butchart, S. H. M., Newbold, T., Green, R. E., Tobias, J. A., Foden, W. B., O'Brien, S., & Pearce-Higgins, J. W. (2017). Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed by a trait-based assessment. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1862), 20170829. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0829>
47. Thomsen, K. E. (2016). *Offshore Wind: A Comprehensive Guide to Successful Offshore Wind Farm Installation*. Academic Press.
48. U.S. Department of Energy. (2023). *Wind Technologies Market Report*. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/wind/wind-technologies-market-report>
49. Ueckerdt, F., Hirth, L., Luderer, G., & Edenhofer, O. (2013). System LCOE: What are the costs of variable renewables? *Energy*, 63, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.072>
50. Wang, S., Wang, S., & Smith, P. (2015). Ecological impacts of wind farms on birds: Questions, hypotheses, and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.002>
51. WANG, Tianyi; LI, Chuangang; HAN, Bin; QIN, Lu; DENG, Xiaoling a CHEN, She. Biological effects of infrasound on the growth of *Drosophila melanogaster*. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* [online]. 2021, Vol. 54, No. 9 [cit. 2024-05-12]. e10933. ISSN 1678-4510. DOI: 10.1590/1414-431X2020e10933
52. Wizelius, T. (2015). *Wind Power Projects: Theory and Practice*. Routledge.
53. Wolsink, M. (2007). Wind power implementation: The nature of public attitudes: Equity and fairness instead of 'backyard motives'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1188–1207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.005>
54. World Health Organization. (2018). *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe. Dostupné z: <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>
55. Zhou, L., Tian, Y., Baidya Roy, S., Thorncroft, C., Bosart, L. F., & Hu, Y. (2012). Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change*, 2 (7), 539–543. dostupné na: <https://doi.org/10.1038/nclimate1505>
56. ZHUANG, M.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHOU, H.; QIU, L. AND HUANG, X. Influence of infrasound on learning and memory behavior and hippocampal morphology in rats. *Journal of Environmental Health* [online]. 2007, Vol. 24, No. 10, s. 762–765 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://europepmc.org/article/med/18095504>