



Universitatea Națională de
Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Scoala Doctorală de
Antreprenariat, Ingineria și
Managementul Afacerilor



Teză de doctorat

Cercetări privind managementul riscului de accident nuclear asupra populației adiacente Centralei Nuclearoelectrice Cernavodă

Doctorand: Savu Ionuț-Cătălin

Coordonator științific: Prof dr. ing. Gheorghe Militaru

Domeniul fundamental: Științe ingineresti

Domeniul de doctorat: Inginerie industrială

București, 2024

CUPRINS

Listă figuri.....	6
Listă tabele.....	10
Abrevieri.....	12
Introducere.....	14
CAPITOLUL 1. Contextul și structura generală a tezei de doctorat.....	17
<i>1.1 Contextul cercetării.....</i>	<i>17</i>
<i>1.2. Importanța și relevanța științifică a temei.....</i>	<i>19</i>
<i>1.3. Necesitatea temei de cercetare abordate.....</i>	<i>19</i>
<i>1.4 Structura tezei de doctorat.....</i>	<i>20</i>
CAPITOLUL 2. Stadiul actual al cercetărilor privind infrastructurile critice.....	27
<i>2.1 Concepte de bază privind infrastructurile critice- definiție, tipologii.....</i>	<i>31</i>
<i>2.2 Tipuri de infrastructuri critice</i>	<i>34</i>
<i>2.2.1 Infrastructuri critice din spațiul fizic.....</i>	<i>35</i>
<i>2.2.2 Infrastructuri critice europene locale, de stat și private.....</i>	<i>38</i>
<i>2.3 Niveluri de alertă.....</i>	<i>40</i>
<i>2.4 Criminalitatea în domeniul nuclear.....</i>	<i>42</i>
<i>2.5 Incidente generate în cadrul centralelor nucleare electrice.....</i>	<i>45</i>
CAPITOLUL 3. Principalele vulnerabilități, amenințări și riscuri specifice infrastructurilor critice din domeniul energiei nucleare.....	47
<i>3.1 Tipuri de risc.....</i>	<i>47</i>
<i>3.2 Probabilitatea și impactul riscului.....</i>	<i>51</i>
<i>3.3 Managementul riscului asociat hazardului.....</i>	<i>54</i>
<i>3.3.1 Pericole naturale.....</i>	<i>55</i>
<i>3.3.2 Accidente.....</i>	<i>57</i>
<i>3.4 Analiza riscului pentru infrastructuri critice.....</i>	<i>58</i>
<i>3.5 Principalele riscuri și urgențe asociate infrastructurilor critice din domeniul energiei nucleare și măsurile necesare pentru protecția lor.....</i>	<i>61</i>

3.6	<i>Securitatea nucleară, protecția la radiații.....</i>	62
3.6.1	<i>Protecția la radiații.....</i>	62
3.6.2	<i>Riscuri generate de deșeurile radioactive și metode de protecție.....</i>	63
3.6.3	<i>Riscuri generate de deșeurile radioactive provenite din accidentele și incidentele nucleare.....</i>	64
3.6.4	<i>Metode de protecție împotriva radiațiilor emise de deșeurile nucleare.....</i>	66
CAPITOLUL 4. Centrala nuclearelectrică Cernavodă și impactul unui posibil accident nuclear asupra populației adiacente.....		68
4.1	<i>Prezentarea centralei nucleare de la Cernavodă.....</i>	68
4.2	<i>Sistemele de securitate ale unei centrale nucleare.....</i>	74
4.3	<i>Zone de planificare în caz de urgență pentru populația adiacentă CNE Cernavodă.....</i>	82
CAPITOLUL 5. Elaborarea matricii de risc pentru o centrală nuclearelectrică cu reactor CANDU.....		90
5.1	<i>Cercetare pentru determinarea elementelor principale ale matricii de risc folosind metoda Focus-Grup.....</i>	90
5.2	<i>Descrierea matricii ACIS.....</i>	97
5.3	<i>Descrierea principalelor caracteristici ale simulatorului CANDU-9.....</i>	99
5.4	<i>Compact simulator display- caracteristici.....</i>	102
5.5	<i>Simulări ale principalelor riscuri pentru un reactor CANDU.....</i>	103
5.5.1	<i>Răspunsul reactorului la modificarea de putere (mod normal).....</i>	103
5.5.2	<i>Răspunsul reactorului și RRS pentru manevre de putere.....</i>	109
5.5.3	<i>Erori și blocaje ale sistemelor de reglare a reactivității.....</i>	112
5.5.4	<i>Coborârea unui banc de bare absorbante.....</i>	115
5.5.5	<i>Blocajul reactorului și recuperarea.....</i>	119
5.5.6	<i>Închiderea reactorului și eliminarea otrăvii (xenonului).....</i>	120
5.6	<i>Observații legate de principalele erori identificate.....</i>	123
5.7	<i>Matricea de criticitate A.C.I.S. aplicată în determinarea criticității pentru CNE Cernavoda.....</i>	126

CAPITOLUL 6 Determinarea măsurilor de reducere a riscului de accident nuclear asupra populației adiacente unei centrale nucleare folosind simulatoarele Hysplit și Rhodos.....133

6.1 Instrumentul HYSPLIT și importanța sa în protecția și optimizarea infrastructurilor critice din domeniul energiei nucleare..... 133

6.2.Transformările recente ale modelului HYSPLIT- transport, dispersie și calculul depunerii.....135

6.3 Interviu de profunzime pentru determinarea datelor de intrare în vederea realizării simulărilor cu programele de prognoză atmosferică Hysplit și Rhodos.....137

6.4 Simulare numerică a dispersiei, transportului, depunerii și dezintegrării radioactive realizată cu HYSPLIT, folosind date de la accidentul nuclear de la Fukushima.....138

6.5.Simulare proprie a accidentului produs la CNE Fukushima - date meteorologice NOAA.....139

6.6.Simularea unui accident nuclear la centrala nuclearelectrică Cernavodă cu ajutorul HYSPLIT și RHODOS.....143

6.7 Simulare I -4h, Cesium-137, CNEC.....147

6.7.1 Model meteorologic 1 (Global- GFS0p25).....147

6.7.2 Model meteorologic 2 (Global GDAS1) cu date între 23:40 UTC 6/28/20 până la 06:00 UTC 6/29/20 (HYSPLIT SPAIN).....154

6.7.3 Model meteorologic 3 (GFS0p25).....155

6.8 Simulare II - 24h, Cesium-137, CNE Cernavodă.....156

6.9 Simulare III - 24h, Cesium-137, CNE Cernavodă.....164

6.10 Simulări comparative cu programele de prognoză Hysplit și cel utilizat de CNE Cernavoda, Rhodos.....170

6.11 Populația afectată de un posibil accident nuclear și impactul asupra acesteia.....176

6.12 Impactul asupra unui accident nuclear la obiective nucleare din zona de conflict, în contextul actual.....188

6.13 Măsurile de tratare a riscului și recalcularea gravității consecințelor în vederea protejării populației adiacente CNE Cernavodă.....198

CAPITOLUL 7. Impactul socio-economic al măsurilor propuse asupra populației adiacente centralei nucleareoelectrice Cernavodă.....	206
7.1 <i>Implicații socio - economice ale utilizării HYSPLIT în mentenanța și optimizarea infrastructurii critice C.N.E. Cernavodă.....</i>	<i>206</i>
7.1.1 <i>Riscul operațional asociat CNE Cernavodă.....</i>	<i>206</i>
7.1.2 <i>Linii directe de îmbunătățire a managementului riscului socio-economic în cadrul C.N.E. Cernavodă.....</i>	<i>207</i>
7.1.3. <i>Creșterea nivelului de cunoștințe al personalului CNE implicat în gestionarea riscurilor.</i>	<i>212</i>
7.1.4. <i>Organizarea și derularea unui exercițiu multianual de autoevaluare a riscurilor în domeniul nuclear.....</i>	<i>213</i>
7.1.5 <i>Revizuirea, recalibrarea și ajustarea periodică a instrumentelor de administrare a riscurilor.....</i>	<i>214</i>
7.2 <i>Consecințele practice ale modificării zonelor de planificare la urgență pentru C.N.E. Cernavodă și modul cum influențează populația adiacentă.....</i>	<i>214</i>
7.3. <i>Prevenire, control și diminuare a riscului prin acțiuni concrete necesare pentru implementarea măsurilor de tartare.....</i>	<i>221</i>
7.4. <i>Costurile măsurilor de prevenire a producerii evenimentelor nedorite și de diminuare a riscurilor identificate asupra populației adiacentă CNE Cernavodă.....</i>	<i>225</i>
7.5 <i>Protecția mediului și împiedicarea contaminării organismului uman.....</i>	<i>228</i>
7.6 <i>Impactul asupra populației afectate și a pagubelor materiale.....</i>	<i>230</i>
Concluzii.....	244
<i>Discuții privind rezultatele cercetării.....</i>	<i>244</i>
<i>Contribuții proprii.....</i>	<i>248</i>
<i>Direcții viitoare ale cercetării.....</i>	<i>250</i>
Lista lucrărilor publicate.....	252
Bibliografie.....	254
Anexa 1.....	263
Evaluarea riscurilor pe bază scenariilor de amenințare.....	263
A.1.1 <i>Date generale.....</i>	<i>263</i>

<i>A.1.2 Stabilirea scenariilor de amenințări majore.....</i>	<i>265</i>
<i>A 1.3. Stabilirea probabilității de producere a scenariilor alese.....</i>	<i>268</i>
<i>A.1.4. Stabilirea gravității consecințelor scenariului propus.....</i>	<i>273</i>
<i>A.1.5. Analiza vulnerabilităților și capabilităților.....</i>	<i>273</i>
<i>A.1.6 Analiza impactului.....</i>	<i>273</i>
Anexa 2 Obiective afectate în zona CNE Cernavodă.....	278
Anexa 3 Calcule ale posibilelor daune materiale în urma unui accident nuclear.....	285
ANEXA 4 Aprobări utilizare simulatoare.....	288

ABREVIERI

A.I.E.A. - Agenția Internațională pentru Energie Atomică

A.R.L. - Air Resources Laboratory, SUA

C.N.C.A.N – Comisia Nucleară pentru Controlul Activităților Nucleare - Autoritatea națională competentă în domeniul nuclear care exercită atribuțiile de reglementare, autorizare și control potrivit Legii 111/1996 privind desfășurarea în siguranță a activităților nucleare, cu modificările și completările ulterioare.

G.E.M. - General Euclidian Model (Model Euclidian general)

G.U.I.- Grafic ușor interface (interfață grafică de utilizator)

H.Y.S.P.L.I.T. – ”Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory”, este un modelul de traiectorie hibridă cu particule hibride integrate langrangian este un model de software care este utilizat pentru a calcula traiectoriile parcelor de aer și depunerea sau dispersia poluanților atmosferici. A fost dezvoltat de către N.O.A.A. și Biroul de Meteorologie din Australia.

ICE - Infrastructură Critică Europeană

ICN- Infrastructură Critică Națională

M.A.I.: - Ministerul Afacerilor Interne

M.P.I.- Message Passing Interface, interfața ce leagă mai multe procesoare

N.O.A.A. - Național Oceanic and Atmospheric Administration, S.U.A, Administrația Națională Oceanică și Atmosferică, dezvoltatorul programului HYSPLIT

O.M.M. - Organizația Meteorologică Mondială

O.R.N.I.S.S. -Oficiul Registrului Național al Informațiilor Secrete de Stat

P.I.C. - Protecția Infrastructurilor Critice

PSO - Planul de Securitate al Operatorului

R.S.M.C. - Centrele Meteorologice Regionale Specializate

INTRODUCERE

În contextul dezvoltării societății actuale, tehnologia nucleară devine din ce în ce mai accesibilă global, atât la nivel de producere de energie, cât și la nivel de cercetare sau armament. Luând în considerare noile amenințări cu impact puternic socio-economic și geopolitic, precum pandemia Covid-19, lipsa consensului mondial în domeniul politicii nucleare, precum și amenințarea nucleară în contextul conflictului din Ucraina, pericolul unei posibile contaminări radioactive crește, indiferent de proveniența sa. Retragera SUA din „Tratatul Forțelor Nucleare Intermediare (INF)” și posibila reluare a testelor nucleare atât de către SUA cât și de alte țări, precum și creșterea numărului de reactoare nucleare în lume, forțează regândirea mijloacelor și normelor de protecție în domeniul nuclear.

În prezenta teză de doctorat a fost propusă o abordare duală, pe de-o parte asupra părții legislative și a analizei de risc pentru infrastructurile critice, inclusiv cele nucleare, iar pe de alta, a părții științifice, cu scopul de a determina un mai bun răspuns în situații de urgență, folosind instrumente de predicție cu o fidelitate mai mare. În prima parte a tezei, studiul s-a axat pe determinarea criticității proceselor unei centrale nucleare și realizarea unei matrici de criticitate cu ajutorul metodologiei ACIS (Analysis of Critical Infrastructural Sectors). A doua parte a studiului a fost dedicată simulărilor de incidente nucleare cu ajutorul programelor HYSPLIT și Rhodos. Acestea prezic comportamentele particulelor și norilor contaminați radioactiv, folosind predicții meteorologice complexe. Rezultatele simulărilor efectuate în contextul apariției fenomenelor meteo extreme în România și a creșterii amenințării nucleare au condus la concluzia că există o nevoie crescută de a moderniza protocoalele de securitate.

Au fost efectuate simulări cu ajutorul programelor de simulare, recreând atât evenimente întâmplătoare, precum accidentul de la Fukushima, cât și simulări noi, o posibilă explozie la centrala de la Cernavodă. S-au folosit diverse hărți meteorologice și au fost rulate simulări pe perioade diferite de timp, luând în considerare fenomene extreme apărute recent în țara noastră. Calculul transportului și al dispersiei de la sursă s-a făcut folosind modelul hibrid lagrangian cu o singură particulă, „*The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*” (Draxler, Hess, 1998).

În simulările obținute cu HYSPLIT, rezultatele sunt alcătuite din patru componente: transportul particulelor la o viteză medie a vântului, o componentă de transport turbulent, epurarea

și dezintegrarea radioactivă și, în final, calculul concentrației particulelor radioactive în aer. Alături de calculele de dispersie, viteză și traiectorie a fost realizată cu ajutorul HYSPLIT o analiză comparativă între simulatoarele folosite la noi în țară, precum FLEXPART și RHODOS.

Cu ajutorul Rhodos și Hysplit au fost obținute, pentru fiecare simulare, numărul populației și localitățile afectate în cazul fiecărui incident simulat și au fost propuse noi măsuri de securitate și răspuns la urgență prin *Planul de securitate al operatorului*. Capacitățile tehnice ale programelor satisfac cerințele U.E., astfel România poate să dezvolte modelele de analiză a dispersiei depunerii și dezintegrării radioactive la capacitate de peste 300 km distanță de sursa poluantă.

Odată cu mărirea razei în care se poate prezice comportamentul particulelor, norilor și precipitațiilor contaminate radioactiv, aplicația principală este de a propune modificarea și îmbunătățirea „zonelor de urgență” din jurul centralelor nucleare, astfel încât România să se alinieze la normele Uniunii Europene și ale IAEA Viena. Această optimizare poate duce la aprobarea de noi măsuri de prevenție în arii nou definite ca fiind la risc, creșterea vitezei răspunsului în caz de situații de urgență nucleară, astfel prevenind posibile contaminări de mediu și pierderi de vieți omenești. Din emergența unor noi zone de planificare de urgență apar consecințe deosebite în plan social (pentru persoanele din zonele vizate) cât și micro și macro economice.

Pentru realizarea obiectivului general al tezei de doctorat au fost realizate mai multe cercetări după cum urmează:

- **Cercetări bibliografice:** „Concepte și tipuri de infrastructuri critice”, „Evaluarea și integrarea amenințării, vulnerabilității și riscului”, „Securitatea nucleară, protecția la radiații, protecția mediului și planul de securitate al operatorului”.
- **Cercetări calitative:** „Simulări ale principalelor riscuri într-o centrală nucleară cu sistem de operare CANDU și matricea de criticitate aferentă”, Instrumentul HYSPLIT- Importanța sa în protecția și optimizarea infrastructurilor critice din domeniul energiei nucleare” , „Simulare de accident nuclear la centrala nuclearelectrică Cernavodă cu ajutorul Hysplit și Rhodos” „Evaluarea de risc pe bază scenariilor de amenințare”

În urma realizării acestor cercetări, au fost obținute mai multe rezultate. Astfel, cercetările realizate în cadrul tezei de doctorat au adus ca elemente de noutate o analiză amănunțită în contextual actual, asupra unei centrale nucleare, accentul fiind pus pe centrala nucleară de la Cernavodă cu ajutorul matricii de criticitate ACIS (Analysis of Critical Infrastructural Sectors –

analiza sectoarelor unei infrastructuri critice) și a celor mai performante programe de dispersie atmosferică (Hysplit și Rhodos), o evaluare performantă a riscurilor centralei nucleare și o determinare a vulnerabilităților actuale, propunerea de mărire a zonelor de răspuns la urgență și propunerea unor măsuri pentru protejarea centralei nucleare și a populației adiacente acesteia în contextul actual.

În urma simulărilor realizate în caz de accident nuclear la centrala nuclearelectrică de la Cernavodă se poate observa suprafața de deplasare și de depunere a particulelor de substanță radioactivă. În zilele în care vitezele vântului în zona centralei de la Cernavodă au fost mai mari, respectiv în caz de cod portocaliu și cod roșu meteorologic, suprafața de deplasare a norului radioactiv cu valori peste normalul acceptat a depășit suprafața zonelor de răspuns în caz de urgență. Totodată, în urma simulărilor a fost observată o deplasare mai rapidă a norului radioactiv în cazul codurilor meteorologice locale de vânt. Astfel, această cercetare pune în evidență o nevoie de mărire a zonelor de răspuns la urgență în caz de accident nuclear și propune modificarea acestora în vederea protecției populației adiacente centralei nucleare de la Cernavodă. Totodată, în contextual social și geopolitic actual evaluarea corectă a riscului și prevenirea devin elemente cheie pentru a asigura reziliența centralei nuclearelectrică de la Cernavodă și pentru a asigura protecția optimă a populației adiacente. Astfel, prin dezvoltarea unor scenarii de amenințare generale și catalogarea corectă a impactului și probabilității de apariție a unui eveniment, utilizând cele mai eficiente programe și metode, teza de doctorat evidențiază principalele riscuri și propune măsuri de tratare a acestora.

Prin urmare, teza de doctorat aduce contribuții importante atât la nivel teoretic, cât și la nivel practic, rezultatele acesteia reprezentând o abordare modernă a riscului în contextul actual, aducând propuneri de modificare a zonelor de răspuns la urgență, precum și măsuri concrete de protecție a populației adiacente centralei nucleare de la Cernavodă.

CAPITOLUL 1 CONTEXTUL ȘI STRUCTURA GENERALĂ A TEZEI DE DOCTORAT

Acest capitol are rolul de crea o imagine de ansamblu asupra tezei de doctorat. Acesta abordează contextul actual, precum și importanța deosebită și relevanța temei de cercetare alese. Totodată, sunt puse în evidență principalele subiecte de interes actual abordate pe parcursul lucrării.

Conceptul de risc se bazează pe potențialul unui pericol în viitor – aproape sau mai departe și este domeniul în care filozofia și statistica se întâlnesc. Riscul reprezintă timpul viitor, spre deosebire de problema reală existentă, care reprezintă timpul prezent. Riscurile sunt evenimente care nu s-au întâmplat încă, pot avea un impact mare sau un impact redus și pot fi negative sau pozitive, și sunt mai probabile sau mai puțin probabile. Se știe deja că aproape orice activitate implică riscuri. Industriile nucleare, aerospațiale, petroliere, feroviare și militare au o istorie lungă de a se ocupa de evaluarea riscurilor. Metodele de evaluare a riscului pot diferi între industrii și dacă se referă la decizii financiare generale sau la evaluarea riscurilor de mediu, ecologice sau de sănătate publică. Scopul este de a elimina riscul, dar ar fi naiv să credem că acest lucru poate fi atins complet, prin urmare ne vom confrunta întotdeauna cu notiunea de risc acceptat. În ultimele decenii a fost pus un accent foarte mare pe stabilirea conceptelor în domeniul infrastructurilor critice, atât la nivel European cât și la nivel mondial. Uniunea Europeană actualizează permanent criteriile și măsurile de securitate propuse pentru protecția infrastructurilor critice Europene. Țările membre au responsabilitatea de a prelucra normele europene și de a le aplica pentru infrastructurile critice naționale. Totodată, domeniul energiei nucleare este unul foarte sensibil, iar actualizarea sistemelor de protecție împotriva erorilor umane sau atacurilor teroriste este obligatoriu.

Obiectivul principal al cercetării

Cercetarea realizată de autor are ca obiectiv principal **reducerea impactului riscului economic și social al unui accident nuclear asupra populației adiacente CNE Cernavodă și redefinirea razelor zonelor de răspuns la urgență**. Din obiectivul principal derivă mai multe obiective specifice, acestea fiind enumerate în continuare.

Obiective specifice

01 Modelarea și simularea proceselor de management al riscurilor specifice infrastructurilor critice în domeniul energiei nucleare cu ajutorul instrumentelor de predicție atmosferică HYSPLIT și Rhodos.

Activitățile specifice pentru realizarea obiectivului propus sunt următoarele:

A1.1 Prezentarea principalelor instrumente de predicție atmosferică și impactul acestora asupra prevenirii unui eveniment critic

A1.2 Identificarea principalelor modificări și diferențe în urma efectuării simulărilor de accident nuclear cu ajutorul programelor de predicție atmosferică Hysplit și Rhodos

A1.3 Identificarea factorilor cheie și de performanță folosiți de aceste programe de prognoză pentru a putea îmbunătăți procesul de prevenire a unui dezastru social și economic în urma unui accident nuclear

02 *Analiza riscurilor privind principale elemente critice ale unei centrale nucleare-electrice evidențiate cu ajutorul matricii ACIS*

Activitățile specifice pentru realizarea obiectivului propus sunt următoarele:

A2.1 Identificarea cadrului de utilizare a matricii ACIS

A2.2 Identificarea principalelor elemente critice pentru o centrală nucleareoelectrică cu reactor tip CANDU

A2.3 Evidențierea celor mai importante riscuri care rezultă în urma realizării matricii ACIS

03 *Crearea unei noi abordări, care include adaptarea EZ actuale (Emergency Zonning-Zone de răspuns la urgență) prin interpretarea rezultatelor simulărilor numerice, folosind programe de prognoză.*

Activitățile specifice pentru realizarea obiectivului propus sunt următoarele:

A3.1 Identificarea standardelor naționale și internaționale actuale aferente zonelor de răspuns la urgență

A3.2 Actualizarea principalelor zone posibil afectate în urma unui accident nuclear la centrala nucleareoelectrică de la Cernavodă

A3.3 Identificarea zonelor optime de răspuns la urgență pentru Centrala nucleareoelectrică de la Cernavodă

04 *Elaborarea măsurilor de intervenție și optimizărilor pentru reducerea impactului generat de riscuri specifice ce vizează infrastructurile critice din domeniul energiei nucleare și răspunsul social și economic la aceste riscuri.*

Activitățile specifice pentru realizarea obiectivului propus sunt următoarele:

A4.1 Evaluarea riscurilor la centrala nucleareoelectrică de la Cernavodă pe baza scenariilor de amenințare

A4.2 Propunerea de soluții în vederea tratării riscului și protejării a populației adiacente

A4.3 Punerea în evidență a situației geo-politice actuale și a relevanței optimizării măsurilor de prevenție în caz de accident nuclear.

În urma realizării acestor cercetări, au fost obținute mai multe rezultate R(i):

R1- Există în continuare posibilitatea de a aduce contribuții privind procesele de management al riscurilor specifice infrastructurilor critice în domeniul energiei nucleare cu ajutorul altor instrumente de predicție atmosferică. Aceasta se datorează faptului că nici unul dintre instrumentele de predicție nu poate acoperi toate dezideratele necesare medierii riscurilor specifice infrastructurilor critice din domeniul energiei nucleare. Acest deziderat s-a realizat cu ajutorul simulărilor combinate Rhodos și Hysplit.

R2 - Prin realizarea simulărilor utilizând aceleași date de intrare cu mai multe programe de simulare atmosferică se pot observa diferențe în exactitatea și gradul de amănunt al rezultatelor finale. În urma acestora, procesul de prevenție poate fi îmbunătățit și astfel, un număr mult mai mare de cetățeni pot fi protejați adecvat în caz de accident nuclear.

R3- Prin utilizarea datelor actualizate cum ar fi vitezele medii ale vântului și direcțiile de orientare și folosirea unor sisteme performante de prognoză ca Hysplit și Rhodos au fost realizate simulări care au pus în evidență zonele afectate, populația și principalele infrastructuri vulnerabile în caz de accident nuclear.

R4 - Pentru a putea avea o amplă perspectivă asupra criticității în domeniul energiei nucleare și în particular asupra tipului de reactor CANDU utilizat în țara noastră a fost aleasă utilizarea matricii de criticitate ACIS.

R5 - Cu ajutorul matricii de criticitate ACIS și a părerilor experților din domeniu au fost ierarhizate criticitățile din fiecare sector al reactorului și au fost observate legăturile dintre principalele riscuri și sectoare și impactul adus de acestea asupra funcționalității centralei nucleare, precum și a riscului de accident nuclear.

R6 - Odată cu ierarhizarea principalelor vulnerabilități care pot duce la un accident nuclear, din cadrul sectorului din care fac parte, matricea ACIS aduce ca noutate interconectarea sectoarelor și ierarhizarea vulnerabilităților la nivelul întregului reactor cuprinzând cele mai periculoase vulnerabilități din toate sectoarele reactorului.

R7 – Au fost prezentate standardele naționale și internaționale pentru o mai bună înțelegere a zonelor de răspuns la urgență în caz de accident nuclear și care este suprafața acoperită de acestea.

R8 – În urma simulărilor realizate cu ajutorul programelor de prognoza atmosferică Hysplit și Rhodos, în condiții meteorologice diferite, se observă suprafața afectată de norul radioactiv, nivelul de radiații al acestuia, precum și depozitarea particulelor pe sol. În cazul codurilor meteorologice de tip cod portocaliu sau cod roșu vitezele medii ale vântului au crescut în ultimii ani, astfel încât suprafața afectată de norul radioactiv este mult mai întinsă într-un interval mai scurt de timp.

R9 - Rezultatele foarte precise datorate unui număr mare de simulări și utilizării celor mai performante programe de prognoză atmosferică, precum și a schimbărilor meteorologice survenite

în ultima perioadă de timp au dus la propunerea unor zone de răspuns la urgență extinse, mărite față de standardele actuale.

R10- Pentru a proteja eficient populația adiacentă centralei nucleare de la Cernavodă trebuie identificate principalele riscuri și vulnerabilități ale centralei în funcție de probabilitatea de apariție și de impactul pe care îl provoacă. Aceasta se poate realiza prin scenarii de amenințare a căror impact în contextul social și geo-politic actual poate fi determinat cu ajutorul matricii de criticitate ACIS și a programelor de prognoză atmosferică.

R11- Au fost propuse soluții eficiente pentru diminuarea și tratarea riscului în vederea protejării centralei nucleare, personalului acesteia, precum și a populației adiacente. Cea mai importantă este mărirea zonelor de răspuns la urgență care poate include mai mulți cetățeni și infrastructuri în atenția și sub protecția autorităților statului.

R12- Totodată au fost analizate principalele riscuri aduse de situația geo-politică actuală și în special de posibilele riscuri generate de un accident nuclear în afara teritoriului suveran al României. Este demonstrată importanța utilizării celor mai noi programe de dispersie atmosferică pentru a putea preveni incidentele și accidente și pentru a putea proteja populația țării.

CAPITOLUL 2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND INFRASTRUCTURILE CRITICE

Înmulțirea, fără precedent, în ultimele decenii a pericolelor și amenințărilor la adresa obiectivelor vitale ale statelor și ale organismelor internaționale, concomitent cu creșterea numărului și vulnerabilității acestora, a condus la apariția și sedimentarea unui nou concept, denumit generic: infrastructură critică. Paradigma „infrastructură critică” a fost folosită, în mod oficial, în iulie 1996, când președintele SUA a decretat „Ordinul executiv pentru protecția infrastructurilor critice”. Astfel, noțiunea de infrastructură critică este definită drept acea „parte din infrastructura națională care este atât de vitală încât distrugerea sau punerea ei în incapacitate de funcționare pot să diminueze grav apărarea sau economia SUA”. Se admitea în acea perioadă că aceasta cuprindea: telecomunicațiile, sistemul de aprovizionare cu electricitate și apă, depozitele de gaze și petrol, finanțele și băncile, serviciile de urgență (medicală, poliție și pompieri), precum și continuitatea guvernării.

Inițiativa de a defini și proteja centrii de referință a fost adoptată de organizațiile internaționale. Astfel, în cadrul Alianței Nord-Atlantice, prin infrastructură critică statele membre înțeleg: „facilități, servicii și sisteme informatice care sunt atât de vitale pentru națiuni, încât scoaterea lor din funcțiune sau distrugerea lor poate avea efecte de destabilizare a securității naționale, economiei naționale, stării de sănătate a populației și asupra funcționării eficiente a guvernului”. Securitatea națională și internațională sunt interconectate și în interdependență de structurile critice ale statelor. Odată cu trecerea timpului vulnerabilitățile acestora au crescut, coroborat cu creșterea și rafinarea mijloacelor de atac asupra lor. În literatura de specialitate există o plenitudine de materiale ce analizează și descriu potențialele modalități de protecție a infrastructurilor critice. Sunt acceptate două constante în ceea ce privește protecția structurilor critice:

- Practic, este imposibil să se asigure protecția 100% a unei infrastructuri critice.
- Nu există o soluție unică, universală pentru rezolvarea acestei probleme.

Mulțimea infrastructurilor critice rămâne totdeauna deschisă și variabilă. Există atâtea infrastructuri critice câte sisteme și procese, dar, pentru a sublinia mai bine această realitate, noi le vom împărți în trei categorii mari, în funcție de unde se situează, în societate sau în spațiul cosmic. Acestea sunt:

- infrastructurile din spațiul fizic;
- infrastructurile din spațiul cosmic;
- infrastructurile din spațiul virtual.

CAPITOLUL 3 PRINCIPALELE VULNERABILITĂȚI, AMENINȚĂRI ȘI RISCURI SPECIFICE INFRASTRUCTURILOR CRITICE DIN DOMENIUL ENERGETICII NUCLEARE

Termenul de risc poate suporta multe definiții și clasificări, astfel, se definește riscul ca „eveniment probabil, generator de pierderi; pericol posibil”. Riscurile pot fi clasificate în funcție de diverse criterii de luat în considerație. Pentru analiza expunerii unei organizații la risc, se impune clasificarea acestora în:

1. Riscuri pe termen lung
2. Riscuri pe termen mediu
3. Riscuri pe termen scurt

Astfel, această clasificare este în strânsă legătură cu strategia, tacticile și politicile organizației respective. În acest context pot fi considerate interconectate și interdependente cu evenimentele, deciziile, acțiunile și circumstanțele în care se găsește organizația respectivă, astfel:

Riscurile pe termen lung sunt riscurile ce au un posibil impact pe o perioadă de câțiva ani, în strânsă legătură cu deciziile majore luate de organizație. Decizia de a lansa un produs nou, etc. *Riscurile pe termen mediu* sunt riscurile care au potențialul impact după ce decizia a fost luată sau evenimentul aducător de risc s-a întâmplat. Sunt în strânsă legătură cu proiectele sau programele nou implementate în organizație. Ex: Riscul asociat cu schimbarea sistemului informatic al organizației. *Riscurile pe termen scurt*, riscuri ce își pot avea probabilul impact imediat după evenimentul sau decizia care aduce riscul. Sunt riscuri precum, riscul de accident, furt etc. Sunt de obicei riscuri asigurabile, deoarece sunt ușor de identificat, controlat și atenuat.

Urgențele care pot apărea la instalațiile din categoria de pregătire pentru urgență (CPU) I și II, precum și în teritoriile CPU V, sunt clasificate astfel:

- a) alertă;
- b) urgență în unitate/instalație;
- c) urgență pe amplasament;
- d) urgență generală.

Urgența pe amplasament la instalațiile din CPU I și II presupune o scădere semnificativă a nivelului de protecție pentru personalul de pe amplasament și pentru populația din vecinătate, din cauza nefuncționării a două sau mai multe niveluri de apărare în adâncime. Urgența generală la instalațiile din CPU I și II reprezintă un risc substanțial de eliberare a materialelor radioactive în atmosferă sau de expunere la radiații, cauzat de eșecul a trei sau mai multe niveluri de apărare în

adâncime, ceea ce impune aplicarea unor măsuri preventive și/sau de urgență în afara amplasamentului, ca ultim nivel de protecție. Activitățile sau practicile din CPU IV pot genera urgențe neașteptate, care pot avea efecte grave asupra sănătății populației. Urgențele rezultate din activitățile sau practicile din CPU IV și CPU VI pot fi declarate urgențe radiologice. Situația de urgență la instalațiile din CPU V reprezintă un risc potențial semnificativ de eliberare de materiale radioactive în atmosferă sau de expunere la radiații, cauzat de defecțiunea barierelor de protecție, justificând implementarea de măsuri urgente de protecție pe teritoriul României. CNCAN este responsabil pentru declararea și clasificarea urgenței în CPU V, pe baza informațiilor primite de la statul în care a avut loc accidentul și/sau prin intermediul IAEA. CNCAN va lua imediat măsuri pentru evaluarea și verificarea incidentului, notificarea părților interesate și activarea răspunsului la nivel național.

Industria nucleară are un risc specific – radiațiile ionizante – care este întâlnit pe tot parcursul activității, de prospectare, exploatare, prelucrarea și transportul combustibilului nuclear, operarea propriu-zisă a reactorului nuclear, gestionarea deșeurilor radioactive, dezafectarea instalațiilor (centralelor) nucleare. Pentru aprecierea valorii evenimentelor nucleare și radiologice și pentru informarea corectă a populației asupra efectelor acestora, a fost creată Scara Internațională a Evenimentelor Nucleare și Radiologice - INES - (The International Nuclear and Radiological Event Scale). Scara INES a fost concepută de un grup de specialiști din domeniul energiei nucleare în anii 1989 – 1990, la solicitarea și sub îndrumarea IAEA (International Atomic Energy Agency), cu scopul de a clasifica și de a evalua nivelul gravității evenimentelor (incidente și accidente) din centralele nucleare. Scara INES, utilizată pentru înțelegerea evenimentelor nucleare, a nivelului de gravitate al acestora, este tot atât de importantă și folositoare, precum sunt și celelalte utilizate pentru înțelegerea altor fenomene fizice.

CAPITOLUL 4 CENTRALA NUCLEAROELECTRICĂ CERNAVODĂ ȘI IMPACTUL UNUI POSIBIL ACCIDENT NUCLEAR ASUPRA POPULAȚIEI ADIACENTE

În prezentul capitol sunt prezentate principalele caracteristici și sisteme ale CNE Cernavodă, precum și principalele obiective de interes din zonele de urgență din jurul centralei. Totodată, sunt identificate afaceri, sate, orașe care pot fi afectate în urma unui accident nuclear.

Centrala nuclearoelectrică Cernavodă este situată în județul Constanța, la aproximativ 2 km sud-est de marginea orașului Cernavodă și la circa 1,5 km nord-est de prima ecluză a canalului navigabil Dunăre-Marea Neagră. Centrala este delimitată la nord de Valea Cișmelei și la sud-vest de drumul județean 223 și linia de cale ferată secundară care asigură accesul în zona industrială și portuară a orașului. Platforma CNE Cernavodă a fost creată prin excavațiile fostei cariere de calcar Ilie Barză, și se află la o altitudine de +16,00 mdMB față de nivelul Mării Baltice. Terenul pe care se află centrala a fost definit prin decretul Consiliului de Stat nr. 15 din 10.01.1979 și este proprietatea S.N.N. SA, conform certificatului de atestare a dreptului de proprietate asupra terenurilor seria M03 nr. 5415/25.04.2000, emis de Ministerul Industriei și Comerțului. Pe amplasamentul CNE Cernavodă se află următoarele instalații nucleare:

- Unitatea 1, care este în exploatare din 2 decembrie 1996;
- Unitatea 2, în exploatare din 1 noiembrie 2007;
- Construcțiile și instalațiile Unităților 3 și 4, care sunt conservate;
- Unitatea 5, a cărei destinație a fost schimbată din centrală nuclear-electrică în suport pentru funcționarea Unităților 1 și 2, precum și pentru viitoarele Unități 3 și 4, conform proiectului pentru clădirea facilităților pentru situații de urgență;
- Depozitul Intermediar de Combustibil Ars (DICA), folosit pentru stocarea intermediară uscată a fasciculelor de combustibil uzat de tip CANDU-6 (uraniu natural) provenit din funcționarea Unităților 1 și 2.

Pentru C.N.E Cernavodă, categoria I de amenințare este relevantă: se aplică instalațiilor, cum ar fi centralele nucleare (NPP), pentru care se postulează evenimente la fața locului, inclusiv evenimente cu probabilitate foarte mică, care ar putea genera efecte deterministe severe, sau pentru care astfel de evenimente au avut loc în facilități similare. Evenimentele la fața locului implică o eliberare atmosferică sau lichidă de material radioactiv sau expunere externă care provine dintr-o locație. Documentul AIEA stabilește numeroase cerințe legate de zonele generice: pe site (la fața locului) și în afara site-ului (în afara zonei). În plus, documentul stabilește cerințe pentru două zone

de urgență în afara amplasamentului: zona de acțiune preventivă (PAZ) și zona de planificare a acțiunilor de protecție urgentă (UPZ) a facilităților din categoriile I și II de amenințare (facilități din categoria II de amenințare sunt, de exemplu unele tipuri de reactoare de cercetare) necesită aranjamente extinse și în afara amplasamentului de urgență. Conform autorităților (SN Nuclearelectrica - SA and ISU Dobrogea, 2018) pentru C.N.E. Cernavodă, aleasă ca studiu de caz în prezentul raport, sunt determinate următoarele EPZ sau zone de planificare de urgență:

- ***Zona PAZ - Zona de acțiune preventivă - 3 km***

Zonă în care acțiunile de protecție urgente se implementează imediat la declararea unei urgențe generale. Stabilită pentru impementarea acțiunilor urgente de protecție și a altor acțiuni de răspuns, înaintea unor eliberări semnificative de material radioactiv pe baza condițiilor din instalație, adică acele condiții care determină declararea stării de urgență generale, în vederea evitării efectelor deterministice severe.

- ***Zona UPZ - Zona de planificare a acțiunilor de protecție urgente –5-25 km.***

Zonă din jurul CNE Cernavodă în care planurile locale pentru urgență prevăd implementarea promptă a acțiunilor de protecție urgente predeterminate, care au fost pregătite din timp. Pentru CPU I și II, este zona care extinde dincolo de PAZ, în care sunt realizate pregătiri pentru inițierea acțiunilor preventive urgente de protecție, a acțiunilor urgente de protecție, și a altor acțiuni de răspuns, dacă este posibil înaintea eliberării unei cantități semnificative de material radioactiv, pe baza condițiilor din instalație (adică acele condiții care determină starea de urgență generală), precum și pentru monitorizarea și evaluarea situației radiologice în afara amplasamentului, în vederea reducerii riscului de efecte stocastice.

- ***Zona EPD* Distanța de planificare extinsă-25-100 km.***

Zonă care se extinde dincolo de UPZ stabilită pentru monitorizarea și evaluarea situației radiologice în afara amplasamentului în vederea identificării zonelor într-o anumită perioadă de timp care ar permite reducerea efectivă a riscului de efecte stocastice, prin implementarea:

a) *Acțiunilor urgente de protecție și a altor acțiuni de răspuns, cum ar fi evacuarea sau prevenirea ingestiei accidentale, la o zi după emisii semnificative*

b) *Acțiunilor timpurii de protecție și a altor acțiuni de răspuns cum ar fi relocarea timp de o săptămână sau o lună după emisii radioactive semnificative.*

Distanța de planificare pentru restricția produselor alimentare și nealimentare (ICPD) 100-300 km față de instalație, la instalațiile din categoria CPU I sau CPU II, este zona care se extinde dincolo de EPD, stabilită pentru desfășurarea acțiunilor de răspuns:

a) Pentru protecția lanțului alimentar și a sistemelor de furnizare a apei, precum și a produselor nealimentare, împotriva contaminării în urma unei eliberări radioactive semnificative

b) Pentru protecția populației prin restricționarea consumului de alimente lapte și apă potabilă, precum și bunuri nealimentare care pot fi contaminate ca urmare a emisiilor radioactive semnificative.

Acțiunile de protecție pentru situațiile de urgență sunt, în mod eficient, opțiunile de protecție împotriva expunerii radiologice, care reprezintă partea de atenuare a consecințelor. Acțiunile de planificare de urgență (PE) pentru prevenirea și limitarea expunerilor sunt cunoscute în general: evacuarea, adăpostirea, protecția respiratorie, relocarea, profilaxia prin administrare iodurii de potasiu (KI), decontaminarea oamenilor, decontaminarea terenurilor și clădirilor, protecția lanțului alimentar, tratamentul medical. Din februarie 2005 sunt specificate mai precis acțiunile de protecție urgentă și contramăsurile ce ar trebui să includă următoarele: izolarea unei zone contaminate sau a unei surse radioactive și prevenirea ingestiei inadvertente, evacuarea, adăpostirea, protecția respiratorie și protecția pielii și ochilor, decontaminarea indivizilor, profilaxie stabilă de iod, protejarea alimentării și prevenirea consumului de produse alimentare și apă contaminate semnificativ, gestionarea răspunsului medical și protecția comerțului internațional.

CAPITOLUL 5 ELABORAREA MATRICII DE RISC PENTRU O CENTRALĂ NUCLEAROELECTRICĂ CU REACTOR CANDU

Capitolul 5 a adus în discuție dinamica complexă și provocările de siguranță asociate cu operarea unui reactor nuclear de tip CANDU. Prin intermediul simulărilor detaliate, s-a oferit o perspectivă profundă asupra reactivității și regulării acestuia, precum și a importanței reacției rapide și corecte în fața diverselor scenarii de risc. Controlul fin al reactivității a fost subliniat ca o componentă esențială pentru menținerea stării de siguranță și stabilitate a reactorului. Experimentele au arătat că erorile în manipularea barelor de control sau în sistemele de răspuns automatizate pot duce la fluctuații periculoase ale puterii reactorului, ilustrând importanța instruirii aprofundate și a protocoalelor riguroase pentru operatori.

Obiectivele principale ale focus-grupului realizat în acest capitol au fost detectarea posibilelor defecțiuni și cuantificarea riscurilor asociate acestora, ierarhizarea, din punct de vedere al probabilității, a principalelor erori care pot apărea în sectoarele unei infrastructuri critice din energia nucleară, determinarea consecințelor unui atac terorist sau sabotaj, clarificarea unor aspecte economice legate de mentenanța CNE Cernavodă, precum și interconectarea principalelor riscuri de atac terorist, sabotaj, cutremur și incendiu cu erorile identificate.

Tabelul 5.1 Principalele erori identificate și probabilitatea de eșec a sistemului

Probabilitatea de intamplare a evenimentului ales	Erori sector 1 (Reactor nuclear)	Erori sector 2 (Transportul de căldură)	Erori sector 3 (Abur, turbina și apa de alimentare)	Erori sector 4 (Camera de control)
Aproape certa			Eroare la senzorul pentru debitul de abur	Pană de electricitate
Probabilă	Blocare reactor		Blocarea tuturor supapelor de alimentare Eroare de "rulare înapoi" a turbinei	Eroare umană
Posibilă	Rutina "setback" pentru reactor eșuează	Eroare la deschiderea supapei de siguranță a circuitului principal	Blocarea turbinei	Panou cu erori
		Eroare la deschiderea supapei de limitare a presurizatorului		
		Eroare la închiderea supapei de izolare a presurizatorului	Eroare de închidere a tuturor supapelor de izolare pentru controlul nivelului de abur	Atac cibernetic
		Eroare la deschiderea supapei de alimentare		
		Eroare la deschiderea supapei de purjare		
Probabilitate redusă	Rutina "stepback" pentru reactor eșuează			Acces neautorizat
	Deteriorarea fizică a reactorului			
	Un banc de bare absorbante cade în reactor			
Improbabilă				

Sursă: Contribuție proprie cu ajutorul cercetării de tip Focus-grup

În urma analizării întrebărilor adresate experților în domeniul energiei nucleare, au fost extrase ierarhizările individuale ale sectoarelor alese, precum și valorile indicilor de probabilitate și impact, urmând ca, în continuare, prin utilizarea simulatorului CANDU-9, să se poată determina cu adevărat valoarea impactului în funcție și de interconectarea erorilor și de rezultatele obținute.

Partea de accentuat este cea legată de probabilități, deoarece, în mediul real, nu a avut loc un număr suficient de accidente încât să existe un istoric al erorilor care au dus la un accident nuclear și cum au generat sau interacționat cu alte erori din același sector sau din alte sectoare ale CNE Cernavodă. Totodată, este foarte importantă corelația făcută de experți în cadrul focus-grupului și numărul erorilor provocate în fiecare sector de fiecare dintre cele 4 riscuri importante analizate: sabotaj, atac terorist, cutremur și incendiu. Impactul va fi calculat cu ajutorul simulatorului CANDU-9 pentru fiecare dintre erorile determinate, iar apoi va fi alcătuită matricea de risc ACIS pentru întreaga centrală nucleară, fiind împărțită pe sectoare. Răspunsurile colectate creează o imagine de ansamblu asupra nivelului de protecție a centralei nucleare, a unor măsuri actuale pentru protecția populației, a unor consecințe în caz de sabotaj, atac terorist etc. Totodată, prezentul focus-grup a evidențiat în urma analizei, nevoia de reactualizare a valorilor considerate ca date de intrare în caz de accident nuclear pentru vitezele posibile ale vântului pentru alcătuirea unor scenarii de amenințare actuale. Predicțiile meteorologice pot fi cât mai aproape de realitate doar pentru o perioadă de până la 7-14 zile în funcție de condițiile meteorologice. Astfel, în cazul unor simulări în caz de accident nuclear vitezele vântului introduse pot fi mărite pentru a avea o imagine mai corectă asupra posibilelor zone afectate.

Dezvoltată în Germania, metodologia ACIS (Analysis of Critical Infrastructural Sectors) propune o abordare diferită a protecției infrastructurii critice, bazată pe relația dintre analiza riscurilor și evaluarea criticității. În cazul infrastructurilor critice, o analiză tipică a riscurilor bazată pe catalogarea în obiecte, amenințări, vulnerabilități și probabilități este dificil de utilizat deoarece nu există suficiente date statistice. Cu toate acestea un eveniment pozitiv este reprezentat de prezumția că nu vor exista destule catastrofe sau atacuri teroriste, încât să existe suficiente date statistice. De aceea, în practică, opiniile experților sunt utilizate în principal.

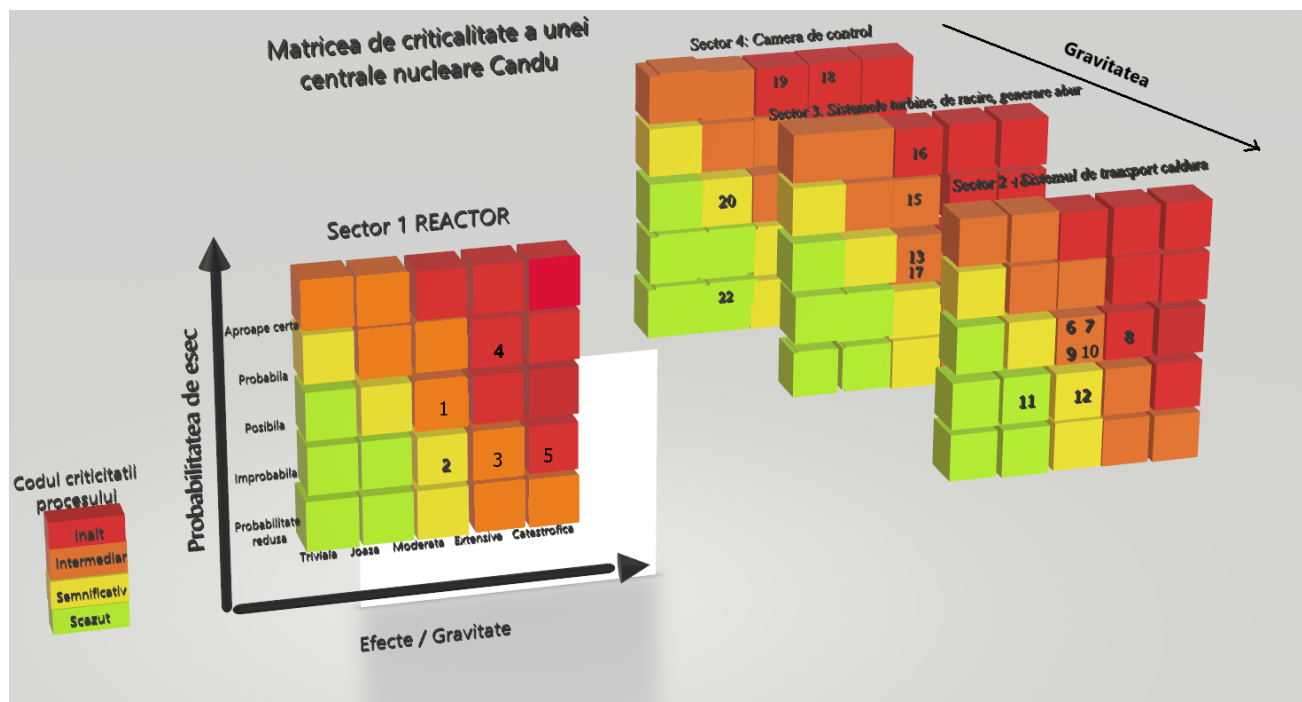


Figura 5.1 Matricea de criticitate ACIS (Analysis of Critical Infrastructural Sectors)

Sursa: Contribuție proprie

În figura 5.1 este ilustrată matricea de criticitate ACIS în funcție de sectoarele și erorile determinate, în funcție de probabilitatea de eșec și de efectele aduse asupra CNE. Obiectivul de dezvoltare inteligentă trebuie realizat prin eforturile specialiștilor în domeniu și trebuie să vizeze creșterea protecției sectorului energetic văzut ca infrastructură critică. Matricea de criticitate ajută îmbunătățirea protecției infrastructurilor critice din domeniul energiei nucleare prin:

- Evidențierea tuturor riscurilor existente și anticipate în timp ce se identifică elementele și procesele critice din cadrul unei facilități nucleare.
- Determinarea criticității subsectoarelor, sectoarelor și a proceselor în care putem descompune funcționalitatea IC alese.
- Dezvoltarea unei matrici de criticitate pentru modelul de infrastructură ales (centrală nuclearoelectrică)
- Reducerea disfuncționalităților care pot afecta stabilitatea și funcționarea optimă a proceselor și serviciilor critice din cadrul IC prin implementarea unor măsuri proactive în cadrul unui sistem eficace de gestionare a riscurilor;
- Creșterea nivelului de expertiză în domeniu prin actualizarea permanentă a analizelor de risc, inclusiv prin evaluări comparative cu situații specifice manifestate pe teritoriul altor state, transpunerea acestor rezultate în standardele naționale;

- Respectarea regulilor de confidențialitate ale datelor și a informațiilor a căror diseminare neautorizată poate afecta protecția sistemelor informatice ale unei instalații nucleare. Cunoșcând matricea de criticitate pentru IC dată, managementul informatizat al centralei și managementul protecției fizice a acesteia devine misiune mai facilă.

Cu ajutorul „Simulatorului Compact Candu 9”, pe baza simulărilor efectuate anterior în cadrul acestui capitol, am realizat un model al sectoarelor și proceselor critice, ce compun matricea de criticitate pentru o centrală nucleare electrică de tip CANDU. Împărțirea în sectoare a componentelor unei centrale nucleare electrice pe baza funcționalității:

Tabelul 5.2 Sectoarele de criticitate pentru Centrala Nuclear-Electrică CANDU 9

Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4
Reactor	Transportul de căldură	Abur, turbină și apă de alimentare	Cameră de control
Rutina ”setback” pentru reactor eșuează	Eroare la deschiderea supapei de siguranță a circuitului principal	Eroare de închidere a tuturor supapelor de izolare pentru controlul nivelului de abur	Eroare umană
Rutina ”stepback” pentru reactor eșuează	Eroare la deschiderea supapei de limitare a presurizatorului	Blocarea tuturor supapelor de alimentare	Panou cu erori
Un banc de bare absorbante cad în reactor	Eroare la închiderea supapei de izolare a presurizatorului	Eroare la senzorul pentru debitul de abur	Pană de electricitate
Blocare reactor	Eroare la deschiderea supapei de alimentare	Blocarea turbinei	Atac cibernetic
Deteriorare fizică a reactorului	Eroare la deschiderea supapei de purjare	Eroare de ”rulare înapoi” a turbinei	Acces neautorizat

Sursa : Contribuție proprie

CAPITOLUL 6 DETERMINAREA MĂSURILOR DE REDUCERE A RISCULUI DE ACCIDENT NUCLEAR ASUPRA POPULAȚIEI ADIACENTE UNEI CENTRALE NUCLEARE FOLOSIND SIMULATOARELE HYSPLIT ȘI RHODOS

Prezentul capitol aduce în prim plan instrumentele moderne de prevenire și prognoză folosite de marile centrale nucleare, precum și de autoritățile naționale și internaționale. Cu ajutorul acestui instrument care a reieșit prin comparații a fi unul din cele mai performante în domeniu și cu ajutorul omologului sau, programul de predicție atmosferică „Rhodos” au fost realizate numeroase simulări. Acestea au fost realizate în toate condițiile meteorologice și pentru toate substanțele periculoase care pot fi emise în caz de accident nuclear de centrala nuclearelectrică de la Cernavodă. Au fost efectuate simulări pentru un posibil accident nuclear și a fost stabilită cu exactitate populația afectată și dispersia norilor poluanți raportat la suprafața țării.

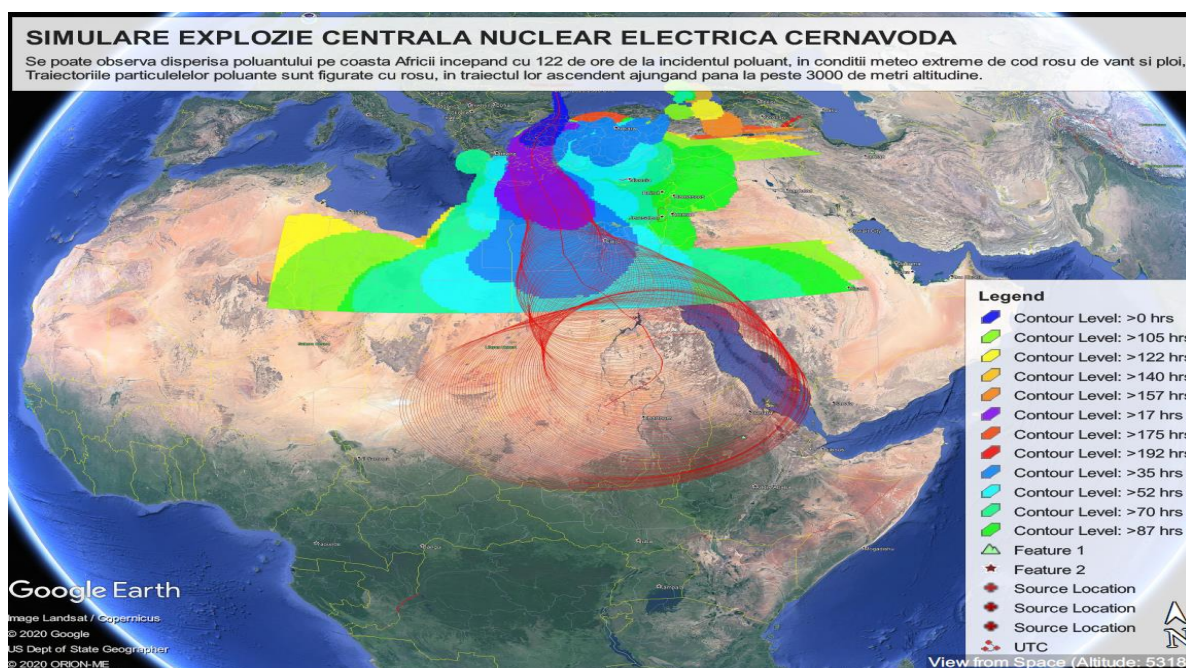


Figura 6.1 Dispersia particulelor în urma simulării unei explozii la Centrala nucleară de la Cernavodă

Sursă: Contribuție proprie cu ajutorul simulatorului HYSPLIT

În fig. 6.1 este prezentată dispersia norului radioactiv din simularea 3 (CNE Cernavodă, 44.322405 lon.: 28.056464) în condiții atmosferice de vânt puternic 10 pe scara Beaufort (88-100 km/h), efectuată în data de 07.07.2020, cu ajutorul modelului meteorologic GFS. Simularea a avut o durată totală de 196 de h și s-au folosit particule ipotetice de Cs-137, pornind simularea de la o unitate ipotetică de masă. Durata eliberării atmosferice a fost de scurtă durată, 10 minute, de la o înălțime de 50 m, iar sedimentarea radionuclizilor având loc cu o rată de 0.1 cm/s. Degradarea radioactivă la precipitații nu a fost calculată în prezența simulare. În secțiunea particule au fost generate particulele model de Cs -137 și funcția lor de transport convectiv, precum și traiectoriile de deplasare a particulelor figurate cu roșu. Acestea s-au ridicat de la sol ajungând la înălțimi între 0 și 12 000 de m. Durata totală a simulării a fost de 196 de ore, iar pictograma ilustrează colorat timpul în care radionuclizii ating o anumită zonă geografică. Stilul hărții a fost mutat pe „satelite”, iar rezoluția setată pe nivelul global. Fig. 6.1 este una din pictogramele generate de simulatorul HYSPLIT, aleasă sugestiv pentru a exemplifica funcția prezentată. HYSPLIT integrează rezultatele simulării în aplicații complexe de tip „leaflet map” sau „GoogleEarth”, ușor de urmărit în format interactiv pentru observație dinamică.

Simulare realizată în data de 24.05.2021

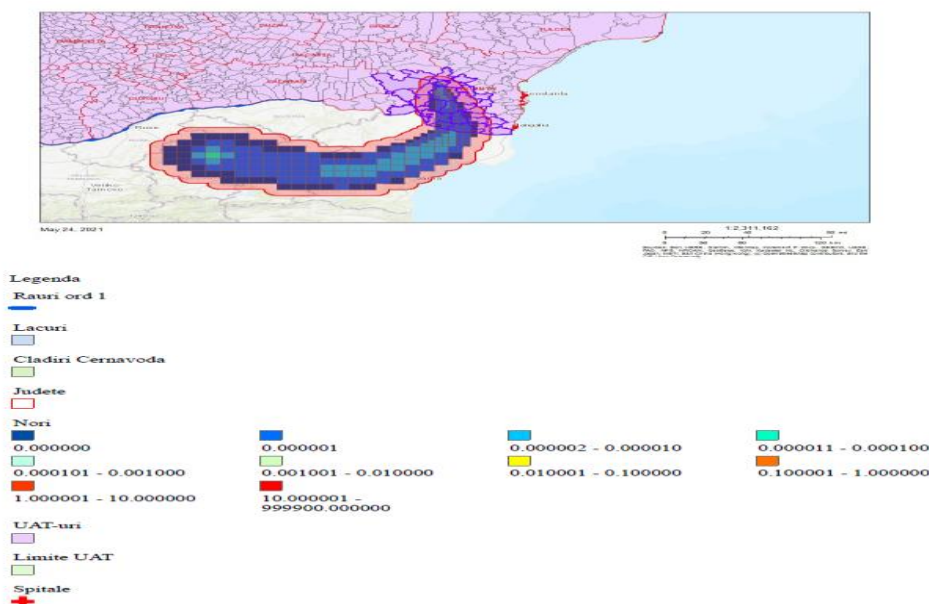


Figura 6.2 Raport nor Cs-137 la o oră/ zone afectate 24.05.2021

Sursa: Contribuție proprie cu ajutorul simulatorului Rhodos

În figura 6.2 se ilustrează deplasarea norului radioactiv pe o perioadă de timp de o oră și zonele pe care le afectează în urma simulării din 24.05.2021.

Informații populație afectată

Numărul total al populației afectate în zona radioactivă (plus o distanță de 10 kilometri în exteriorul acesteia) este de **168659 de locuitori**. Totodată, simularea ilustrează și anumite date cheie pentru înțelegerea situației și necesității populației adiacente CNE Cernavodă, cum ar fi populația afectată care este prezentă în zonele de urgență (144.331 de oameni), populația din zonele PAZ și UPZ afectate în primele 30 de minute de la momentul de început al degajării de substanță radioactivă: 412 și 19.945 de oameni, precum și totalul populației afectate în primele 30 de minute: 38.565 de oameni. Marea majoritate a măsurilor de protecție care pot salva populația afectată sunt luate în primele 30 de minute din momentul de început al accidentului nuclear. Simularea a fost realizată în condiții de cod portocaliu meteorologic emis de Agenția Națională de Meteorologie a României.

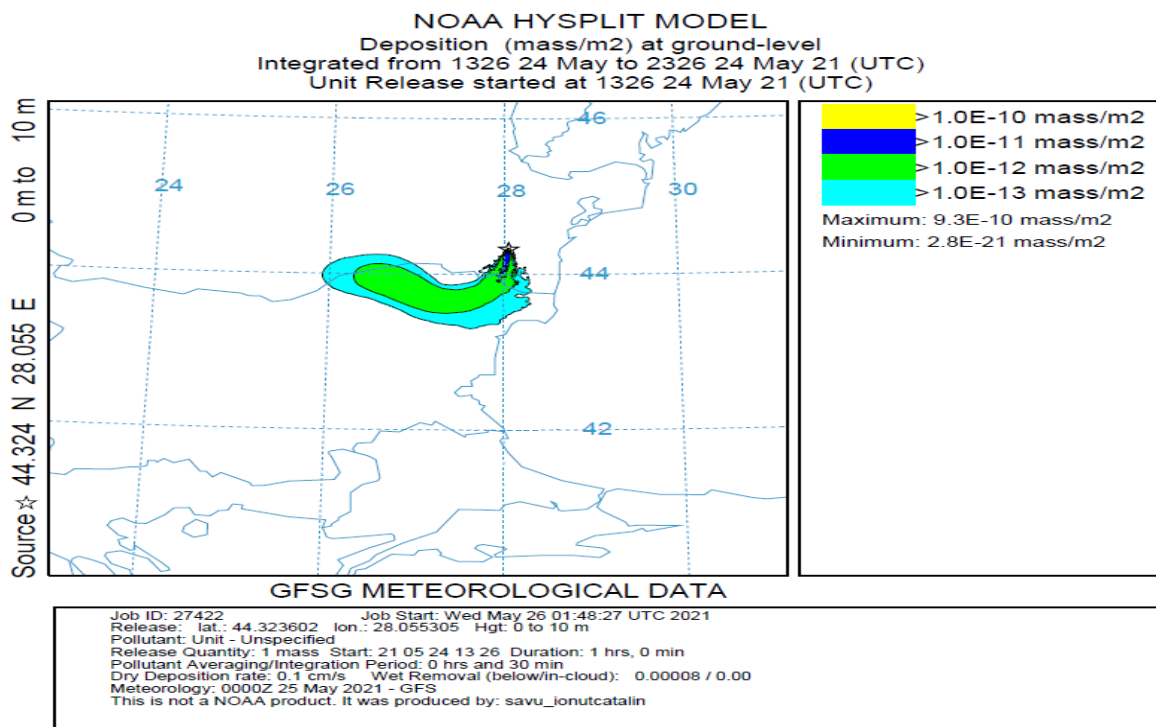


Figura 6.3 Depozitarea particulelor radioactive la sol mg/m2 24.05.2021

Sursa: Contribuție proprie cu ajutorul simulatorului Hysplit

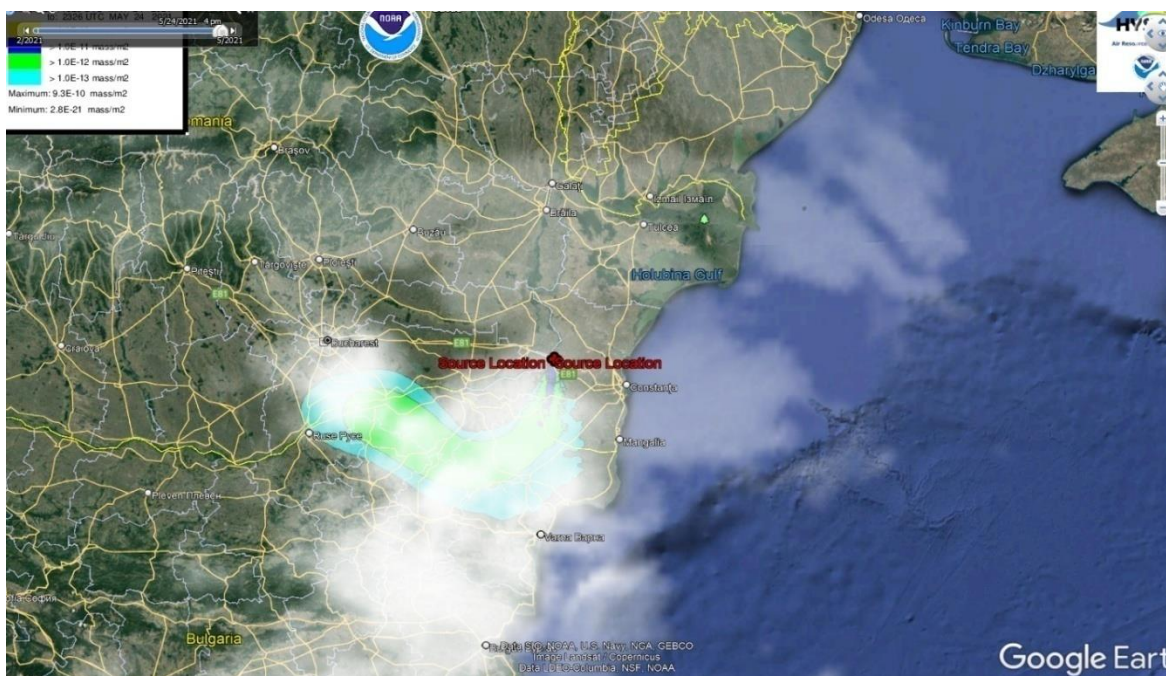


Figura 6.4 Depozitarea particulelor Google Earth 25.05.2021

Sursa: Contribuție proprie cu ajutorul simulatorului Hysplit

În figurile 6.3 și 6.4 este prezentată depozitarea particulelor radioactive la nivelul solului cu ajutorul simulatorului Hysplit sau în urma utilizării Google Earth. În toate simulările, se poate observa că norii radioactivi depășesc granița terestră a țării. Pentru toate perioadele în care au fost efectuate simulări se poate observa că depozitarea particulelor din norul radioactiv depășește o arie de 400 de km, ajungând la distanțe de 500-600 de km, în decurs de 24 de ore. *Distanța de planificare extinsă maximă* conform CNCAN, din 2018 este de 100 km. Distanța la care se depozitează particulele pe o direcție dată, în decurs de 24 de ore este cu 400-500 de km mai mare față de *distanța de planificare extinsă maximă*. Cu ajutorul simulărilor anterioare a fost evidențiat că în cazul unor accidente nucleare coroborate cu fenomene meteo extreme, gravitatea incidentului nuclear crește.

Conform I.S.U. Dobrogea în zona Dobrogea, în care este amplasată și CNE Cernavodă, fenomenele naturale sunt reprezentate de vânturi extreme cu viteze între 88 și 117 km/h și peste, precum și de fenomene extrem de rare precum tornade și cutremure (orașul Cernavodă se află pe microfalia Vrancea). Fie că este vorba de o precipitare a incidentului nuclear (a se vedea cutremurul de la Fukushima) sau că este vorba de un fenomen ce împrășteie poluanții radioactivi mai repede, ca în simulările efectuate pe „cod roșu de vânt”, se impune modificarea măsurilor și adoptarea de măsuri noi în vederea unei protecții antipoluare radioactivă cât mai eficientă.

Urmărind următoarele considerații:

- Calculele de precizie a măsurătorilor radiațiilor s-au îmbunătățit chiar și pe distanțe mari
- Cooperarea globală s-a îmbunătățit iar o limită de 350 de km și peste nu mai este exagerată, în vederea cooperării între state privind poluanții ce tranzitează granițele
- Cooperarea în privința schimbului de măsurători și de alertă a populațiilor țărilor respective în vederea efectuării de studii mai complexe de mediu și urbanistică privind amplasarea unei noi centrale nuclear-electrice, astfel încât să minimizeze riscurile.
- Incidența cancerelor la mai mult de 300 de km, cu etiologie Cernobîl, a crescut considerabil pe măsură ce mijloacele de diagnostic au evoluat.
- În cazul în care avem fenomene extreme meteo, poluarea radioactivă ajunge la distanțe considerabile, mai repede decât este estimat în condiții normale meteorologice și de presiune.

Simulare realizată pentru centrala nucleară de la Cernobîl /21.03.2022

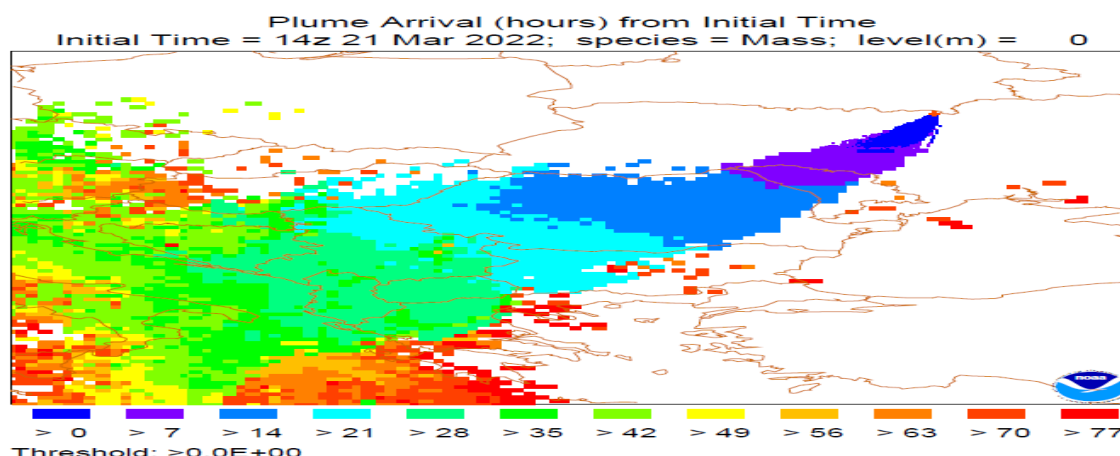


Figura 6.5 Timpul sosirii norului Cernobîl 21.03.2021

Sursa: Contribuție proprie cu ajutorul simulatorului Hysplit

Conform condițiilor meteorologice din perioada 19-21.03.2022, în cazul în care direcția vântului ar favoriza norul radioactiv să străbată suprafața României, acesta ar atinge granița țării noastre în aproximativ 4-5 ore de la momentul producerii accidentului nuclear, având un impact puternic asupra solului și a populației. Astfel, un accident nuclear pe teritoriul Ucrainei ar putea avea efecte catastrofale asupra populației României, în condițiile în care centrala nucleară de la Zaporiozjie are în funcțiune 6 reactoare, fiind aproximativ de 3 ori mai puternică decât CNE Cernavodă.

Simulare realizată pentru centrala nucleară de la Zaporiozjie/ 21.03.2022

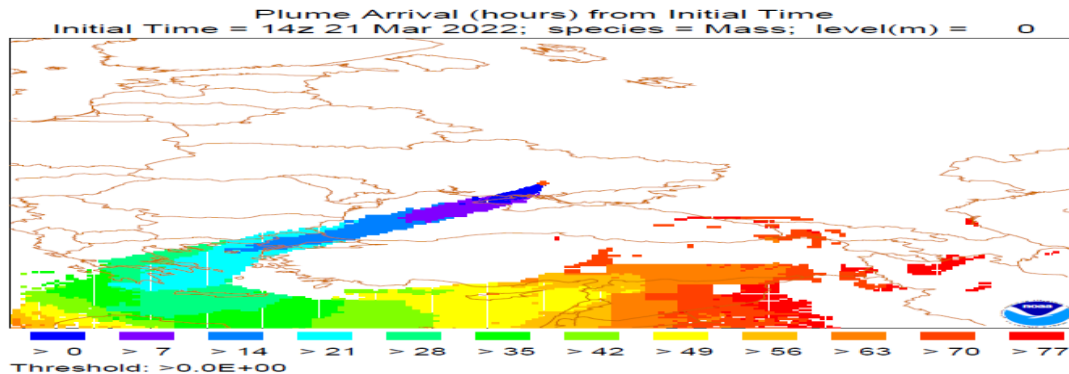


Figura 6.6 Timpul sosirii norului Zaporiozjie 21.03.2021

Sursa: Contribuție proprie cu ajutorul simulatorului Hysplit

În contextul actual, este foarte importantă utilizarea permanentă a simulatoarelor de prognoză meteorologică și dispersie atmosferică, precum și a celor care testează reziliența infrastructurilor critice din domeniul energiei nucleare. Totodată, extinderea zonelor de răspuns în caz de accident nuclear este necesară acum mai mult ca niciodată pentru protejarea eficientă a populației adiacente centralelor nucleare, dar și a mediului. Comunitatea internațională, împreună cu IAEA, odată cu schimbările geopolitice majore și cu apariția unui conflict foarte aproape de granițele NATO, propun o cooperare la nivel nuclear, astfel încât fiecare țară să considere o rază în jurul centralelor nucleare proprii, precum și să aibă sub observație această rază, orientându-și atenția către centralele nucleare de pe teritoriul Ucrainei. Această distanță devine crucială în implementarea principalelor măsuri de protecție și prevenție asupra populațiilor adiacente centralelor nucleare.

În urma tuturor simulărilor cu ajutorul Rodhos/HYSPLIT, dar în special cele din 17,18,19 și 24.05.2021 pe coduri roșu și portocaliu meteorologic de vânt au arătat că norul și particulele de Cs -137 au ajuns la peste 400 km distanță de locul emiterii, iar populația afectată de efecte directe ale radiațiilor în unele scenarii depășește 400 000 de locuitori la doze ridicate de radiații gamma, iar norul radioactiv va afecta majoritatea județelor țării, dar și zone aparținând Moldovei, și Bulgariei.

Astfel, se propune pentru CNE Cernavodă:

- 1) Modificarea limitei PAZ de la 3 km la 10 km;**
- 2.) Modificarea limitei UPZ de la 25 de km la 50 de km;**
- 3.) Modificarea limitei maxime (EPD) de la 100 de km la 150 km.**

Tratarea riscului după aplicarea măsurilor de reducere din scenariile de amenințare

Pentru reducerea riscului analizate se impun măsuri pentru diminuarea următoarelor vulnerabilități și/sau îmbunătățirea următoarelor capabilități:

Tabelul 6.1 Tratarea riscului

Vulnerabilitatea	Factorul de risc asociat	Măsuri de tratare a riscurilor
Planuri neadecvate de intervenție	Incendii, cutremur, atac terorist	Actualizarea planurilor și procedurilor specifice de intervenție Actualizarea protocoalelor de către structurile cu atribuții în obiectiv
Planuri de evacuare neadecvate		Actualizarea planurilor și procedurilor specifice de intervenție Actualizarea protocoalelor de către structurile cu atribuții în obiectiv
Situația socio-economică	Atac terorist, sabotaj	Îmbunătățirea modalităților de comunicare a evenimentului Asigurarea unui răspuns rapid
Funcționalitatea sistemelor secundare de control	Incendii, cutremur	Achiziția de sisteme moderne de prevenție a populației Mentenanță de calitate
Gestionarea necorespunzătoare a evenimentului	Atac terorist, sabotaj	Intensificarea cursurilor de pregătire și perfecționare Colaborare cu mai multe instituții în vederea aplicării imediate a măsurilor de protecție a populației.
Asigurarea măsurilor de protecție în caz de nefuncționare a panoului de comandă a rectorului CANDU	Incendii	Modernizarea unui sistem de detecție și semnalizare
Gradul de pregătire a personalului	Incendii, cutremur, sabotaj	Intensificarea cursurilor de pregătire și perfecționare
Gradul de uzură a sistemelor auxiliare	Incendii	Asigurarea mentenanței la minimum 2 săptămâni
Situația geo-politică	Atac terorist, sabotaj	Creșterea nivelului de securitate a populației prin întărirea securității fizice și cibernetice interne Creșterea nivelului de securitate a populației prin colaborarea cu autoritățile competente

Sursa: Contribuție proprie după Ghidul de realizare al PSO

Tabelul 6.2 Nivelul de risc după aplicarea măsurilor de reducere al acestuia

PROBABILITATE			Foarte ridicat 5						
			Ridicat 4		ATAC TERORIST				Atac terorist
			Mediu 3		INCENDIU, SABOTAJ (în urma aplicării măsurilor)			Incendiu, Sabotaj	
			Scăzut 2			CUTREMUR (în urma aplicării măsurilor)			Cutremur
			Foarte scăzut 1						
			0	Foarte scăzut 1	Scăzut 2	Mediu 3	Ridicat 4	Foarte ridicat 5	
Nivel de risc calculat	Nivel	Punctaj	GRAVITATEA CONSECINTELOR						
	F. scăzut	1-3							
	Scăzut	4-6							
	Mediu	7-12							
	Ridicat	13-16							
	F. ridicat	17-25							

Sursa: Contribuție proprie după Ghidul de realizare al PSO

Prin matricea de criticitate realizată în tabelul 6.2 se poate observa clar cum valorile principalelor riscuri identificate au scăzut și se încadrează în limita acceptată de către infrastructura critică analizată, în cazul de față CNE Cernavodă. Astfel, aplicarea concretă a măsurilor de prevenire și tratare a riscului a funcționat, iar principalele riscuri identificate pot fi considerate sub control. Populația adiacentă centralei beneficiază de măsurile de prevenire și protecție, pe de o parte, precum și de cele realizate la nivelul infrastructurii critice în sine. Totodată, un număr de peste 100.000 de persoane sunt incluse în zonele de urgență și astfel li se pot aplica măsurile specifice. În oricare dintre cazurile principale de riscuri identificate: sabotaj, atac terorist, cutremur, incendiu, chiar dacă una dintre cele două componente ale riscului rămâne neschimbată (probabilitatea), impactul poate fi diminuat în urma aplicării măsurilor de prevenire și protecție.

CAPITOLUL 7 IMPACTUL SOCIO-ECONOMIC AL MĂSURILOR PROPUSE ASUPRA POPULAȚIEI ADIACENTE CENTRALEI NUCLEAROELECTRICE CERNAVODĂ

Prezentul capitol pune în evidență cele mai importante măsuri de prevenire și protecție asupra populației adiacente CNE Cernavodă și impactul economic și social adus de mărirea zonelor de răspuns la urgență, precum și de totalitatea daunelor aduse de un posibil accident nuclear, simulate cu ajutorul programelor Rhodos și Hysplit, în condiții meteorologice de cod galben, portocaliu sau roșu în zona Dobrogea, emise de Agenția Națională de Meteorologie.

Localitățile afectate sunt următoarele:

Tabelul 7.1 Localitățile afectate simulate 24.05.2021

Nr.crt.	Localitate afectată	Număr de locuitori
1	ADAMCLISI	2419
2	ALBESTI	3751
3	ALIMAN	2923
4	AMZACEA	2863
5	BARAGANU	2146
6	BORCEA	8360
7	CERCHEZU	1454
8	CERNAVODĂ	19577
9	CHIRNOGENI	3421
10	CIOCÂRLIA	3142
11	COBADIN	9447
12	COMANA	2026
13	DELENI	2502
14	DOBROMIR	3417
15	DUMBRAVENI	579
16	INDEPENDENTA	3092
17	LIMANU	6510
18	MEDGIDIA	46636
19	MERENI	2464
20	MIRCEA VODĂ	5325
21	MURFATLAR	11662

Nr.crt.	Localitate afectată	Număr de locuitori
22	NEGRU VODĂ	5804
23	PECINEAGA	3423
24	PEȘTERA	3534
25	RASOVA	3892
26	SALIGNY	2249
27	SEIMENI	2230
28	STELNICA	1890
29	TORTOMAN	1921

Sursa: Contribuție proprie cu ajutorul simulatorului Rhodos

În tabelul 7.1 se prezintă localitățile, numărul populației și totalitatea obiectivelor afectate de norul radioactiv în urma simulării din 24.05.2021.

În cadrul capitolului 6 au fost realizate multiple simulări cu ajutorul simulatoarelor Rhodos și Hysplit. Aceste simulări ilustrează și anumite date cheie pentru înțelegerea situației și necesității populației adiacente CNE Cernavodă, cum ar fi populația afectată care este prezentă în zonele de urgență, populația din zonele PAZ și UPZ afectate în primele 30 de minute de la momentul de început al degajării de substanță radioactivă, precum și totalul populației afectate în primele 30 de minute. Marea majoritate a măsurilor de protecție care pot salva populația afectată sunt luate în primele 30 de minute din momentul de început al accidentului nuclear. Simulările au fost realizate în condiții de coduri galben, portocaliu și roșu meteorologic emise de Agenția Națională de Meteorologie a României.

Tabelul 7.2 Populația afectată și includerea în zonele de urgență

Data realizării simulării	24.02.2021	21.04.2021	17.05.2021	18.05.2021	19.05.2021	24.05.2021	14.07.2021
Populația afectată	98723	71231	415055	238829	252232	168659	82431
Mortalitate aproximativă 1/40 din populația afectată	2468	1780	10376	5971	6306	4216	2061
Populația afectată aflată în zonele de urgență	79447	52368	331740	183333	194002	144331	55921
Populația din zona PAZ (3 km) afectată în interval de 30 minute	321	304	671	420	503	412	293
Populația din zona UPZ (25 km) afectată în interval de 30 minute	17035	14209	31877	20654	21456	19945	14137
Populația totală afectată în interval de 30 minute	30034	28455	78966	42611	44529	38565	29459
Populația afectată care nu este inclusă în zonele de urgență	19276	18863	83315	55496	58230	24328	26510

Sursă: Contribuție proprie

Conform datelor prezentate în tabelul 7.2, simulările realizate la datele de 24.02.2021, 21.04.2021, 17.05.2021, 18.05.2021, 19.05.2021, 24.05.2021 și 14.07.2021 indică faptul că

populația afectată de norul radioactiv și de depunerea particulelor la sol depășește numărul locuitorilor din proximitatea CNE Cernavodă, incluși în zonele de urgență conform actualelor reglementări. Astfel, se evidențiază discrepanțe semnificative între numărul persoanelor expuse la norul radioactiv și cele protejate conform normelor în vigoare pentru fiecare zonă de urgență. Simulările au fost efectuate în condiții meteorologice caracterizate de coduri galben, portocaliu și roșu emise de Administrația Națională de Meteorologie pentru regiunea Dobrogea. La datele specificate, următoarele numere de persoane au fost afectate: 24.02.2021 – 19.276 persoane, 21.04.2021 – 18.863 persoane, 17.05.2021 – 83.315 persoane, 18.05.2021 – 55.496 persoane, 19.05.2021 – 58.230 persoane, 24.05.2021 – 24.328 persoane, 14.07.2021 – 26.510 persoane, toate acestea fiind potențial incluse în zone de urgență și putând beneficia de o protecție adecvată în cazul unui accident nuclear.

Extinderea limitelor UPZ, PAZ, EPD propusă în capitolul 7 al tezei de doctorat ar include integral populația afectată, chiar și în cazul unui cod roșu meteorologic accentuat, așa cum s-a manifestat pe 17.05.2021, când un total de 415.055 de persoane au fost grav afectate de norul radioactiv, iar 83.315 de persoane nu ar fi beneficiat de măsuri de prevenire și protecție în caz de accident nuclear. În scenariul simulat, rata mortalității ar fi putut depăși de două sau trei ori valorile normale pentru populația situată în zonele de urgență adiacente CNE Cernavodă.

Un factor esențial în prevenirea și protecția populației este timpul de răspuns. Cele mai importante măsuri trebuie implementate în primele 30 de minute de la momentul inițial al accidentului nuclear. Simulările realizate cu HySplit și Rodos subliniază necesitatea urgentă de a modifica limita zonei PAZ de la 25 km la 50 km. Toate simulările au demonstrat o depășire a numărului de persoane afectate din zona PAZ cu un procent între 70% și 100%. Astfel, într-un interval de doar 30 de minute, norul radioactiv depășește zona PAZ cu până la 20-25 km, iar măsurile de protecție aplicabile în această zonă ar trebui extinse la o distanță de maxim 50 km, conform propunerilor autorului. În continuare, au fost identificate principalele puncte de interes din zona adiacentă CNE Cernavodă, numărul de locuitori/angajați și cifra de afaceri înregistrată. Pe o rază de 3 km, au fost luate în calcul și întreprinderi mici, iar după această distanță, doar sate, comune, orașe și obiective de interes major, pentru a putea determina una dintre cele 3 componente ale daunelor financiare provocate de un posibil accident nuclear în urma riscurilor analizate în prezenta lucrare.

Tabelul 7.3 Daunele financiare provocate de un posibil accident nuclear

	Data	Daune posibile asupra CNE Cernavodă	Posibile daune pe traiectorie	Pierdere de energie electrică	Daune totale
Incendiu	24.02.2021	300-500 mil \$	1 mld \$	107 mil\$	1.6 mld \$
	21.04.2021	300-500 mil \$	800 mil \$	107 mil\$	1.4 mld \$
	17.05.2021	300-500 mil \$	5 mld \$	107 mil\$	2.1 mld \$
	18.05.2021	300-500 mil \$	2.2 mld \$	107 mil\$	2.8 mld \$
	19.05.2021	300-500 mil \$	2.5 mld \$	107 mil\$	3.1 mld \$
	24.05.2021	300-500 mil \$	1.8 mld \$	107 mil\$	2.4 mld \$
	14.07.2021	300-500 mil \$	900 mil \$	107 mil\$	1.5 mld \$
Cutremur	24.02.2021	500mil - 1mld \$	1.1 mld \$	214 mil \$	2.3 mld \$
	21.04.2021	500mil - 1mld \$	1 mld \$	214 mil \$	2.2 mld \$
	17.05.2021	500mil - 1mld \$	6 mld \$	214 mil \$	7.2 mld \$
	18.05.2021	500mil - 1mld \$	2.5 mld \$	214 mil \$	3.7 mld \$
	19.05.2021	500mil - 1mld \$	2.8 mld \$	214 mil \$	4 mld \$
	24.05.2021	500mil - 1mld \$	2 mld \$	214 mil \$	3.2 mld \$
	14.07.2021	500mil - 1mld \$	1 mld \$	214 mil \$	2.2 mld \$
Atac terorist	24.02.2021	1mld-1.5mld \$	1.3 mld \$	321 mil \$	2.1 mld \$
	21.04.2021	1mld-1.5mld \$	1.1 mld \$	321 mil \$	2.9 mld \$
	17.05.2021	1mld-1.5mld \$	7 mld \$	321 mil \$	8.8 mld \$
	18.05.2021	1mld-1.5mld \$	2.7 mld \$	321 mil \$	4.5 mld \$
	19.05.2021	1mld-1.5mld \$	2.8 mld \$	321 mil \$	4.6 mld \$
	24.05.2021	1mld-1.5mld \$	2.1 mld \$	321 mil \$	3.9 mld \$
	14.07.2021	1mld-1.5mld \$	1.1 mld \$	321 mil \$	2.9 mld \$
Sabotaj	24.02.2021	400-500 mil \$	1 mld \$	86 mil \$	1.6 mld \$
	21.04.2021	400-500 mil \$	800 mil \$	86 mil \$	1.4 mld \$
	17.05.2021	400-500 mil \$	5 mld \$	86 mil \$	5.6 mld \$
	18.05.2021	400-500 mil \$	2.2 mld \$	86 mil \$	2.8 mld \$
	19.05.2021	400-500 mil \$	2.5 mld \$	86 mil \$	3.1 mld \$
	24.05.2021	400-500 mil \$	1.8 mld \$	86 mil \$	2.4 mld \$
	14.07.2021	400-500 mil \$	900 mil \$	86 mil \$	1.5 mld \$

Sursă: Contribuție proprie

În tabelul 7.3 sunt detaliate estimările privind daunele posibile ce ar putea rezulta dintr-un accident nuclear provocat de unul dintre cele patru riscuri majore evidențiate în această lucrare, pentru fiecare dintre simulările realizate. Totalul daunelor este calculat prin agregarea pierderilor suferite de CNE Cernavodă, costurile de reparații, valoarea totală a afacerilor afectate parțial sau total, daunele asupra alimentelor, terenurilor agricole, populației, precum și pierderile legate de producția de energie electrică. Prețul mediu al unui MWh este de 549,52 lei. Unitatea 1 și Unitatea 2 de la CNE Cernavodă au produs împreună 11.377.435 MW într-un an, iar durata estimată de specialiști pentru care cel puțin o unitate nu ar putea produce energie electrică este de 50 de zile în cazul riscului de incendiu, 100 de zile în cazul unui cutremur, 150 de zile în cazul unui posibil atac terorist și 40 de zile în cazul riscului de sabotaj asupra CNE Cernavodă.

Astfel, calculele indică diferențe semnificative în ceea ce privește pierderile economice, care pot varia între 1,4 miliarde \$ și 8,8 miliarde \$, în funcție de riscul analizat, condițiile meteorologice extreme și direcția și viteza vânturilor. Posibilele pierderi financiare care ar afecta direct CNE Cernavodă au fost discutate în cadrul interviurilor de profunzime și a numeroaselor

dezbateri desfășurate în cadrul grupului de lucru G.L.E.N.U.R., cu participarea specialiștilor din C.N.C.A.N.

Contribuții proprii

În cadrul prezentei teze de doctorat, au fost aduse contribuții semnificative în următoarele domenii și aspecte, esențiale pentru protecția și optimizarea infrastructurilor critice nucleare și protecție a populației adiacente:

1. Adaptarea metodologiei ACIS pentru infrastructuri critice nucleare

A fost creată matricea ACIS (Analysis of Critical Infrastructural Sectors) pentru centrala nucleară de la Cernavodă. Această matrice a facilitat o analiză detaliată a sectoarelor și proceselor critice din cadrul centralei, incluzând identificarea principalelor erori potențiale și ierarhizarea acestora în funcție de relevanța și impactul lor asupra sectoarelor operaționale ale CNE Cernavodă. Acest instrument analitic oferă o bază solidă pentru prioritizarea măsurilor de siguranță și optimizarea gestionării riscurilor în infrastructura critică a centralei.

2. Construirea scenariilor de risc și identificarea măsurilor de protecție a populației adiacente CNE Cernavodă

În lucrarea de doctorat a fost realizată o cercetare detaliată a potențialelor scenarii de risc asociate centralei nucleare electrice Cernavodă pentru a înțelege mai bine riscurile asociate unor posibile evenimente de emisie accidentală sau provocată. Studiul a permis identificarea măsurilor optime de protecție pentru populația locală și propunerea unor strategii de intervenție eficientă în caz de urgență, contribuind la consolidarea planurilor de siguranță publică în regiune.

3. Cercetare asupra simulărilor atmosferice comparative cu HYSPLIT și RHODOS

A fost realizată o cercetare comparativă între simulatoarele HYSPLIT și RHODOS, cu scopul de a evidenția avantajele și limitările fiecăruia în contextul prognozei dispersiei radioactive. Analiza a inclus o evaluare detaliată a preciziei și capacității de predicție pe termen scurt, mediu și lung, oferind astfel o bază riguroasă pentru selectarea celor mai adecvate instrumente în cadrul managementului situațiilor de urgență nucleară.

4. Determinarea impactului unui accident nuclear asupra populației adiacente CNE Cernavodă și mediului înconjurător

A fost evaluat impactul potențial al unui accident nuclear asupra populației și mediului înconjurător, utilizând date și modele precise. Această evaluare a inclus cuantificarea pierderilor de vieți omenești, a răniților, a pagubelor materiale și a impactului economic, oferind o imagine detaliată a consecințelor unui astfel de eveniment.

5. Propuneri de extindere a zonele de urgență și de optimizare a măsurilor de protecție asupra populației adiacente CNE Cernavodă

Au fost formulate propuneri pentru extinderea zonelor de urgență PAZ și UPZ din jurul CNE Cernavodă, pe baza cercetărilor privind impactul asupra populației adiacente, derivate din simulările efectuate, analiza efectelor economice și sociale, precum și evaluarea condițiilor meteorologice aflate într-o continuă dinamică. Aceste propuneri includ extinderea perimetrelor de protecție, implementarea unor măsuri preventive suplimentare și optimizarea capacității de răspuns în situații de urgență nucleară, contribuind astfel la consolidarea siguranței populației din zonă.

6. Realizarea cercetării pe baza interviurilor de profunzime

A fost realizată o cercetare în urma interviurilor de profunzime cu experți în domeniu, obținându-se informații esențiale pentru corelarea și adaptarea datelor de intrare necesare simulărilor, precum și a probabilității de apariție a unor erori la nivelul centralei. Aceste interviuri au contribuit la acuratețea și relevanța rezultatelor obținute, permițând o interpretare mai riguroasă a scenariilor de risc analizate.

7. Elaborarea măsurilor de protecție și prevenție privind populația adiacentă CNE Cernavovă

Pe baza ierarhizării riscurilor identificate, au fost propuse măsuri concrete de protecție și prevenție pentru CNE Cernavodă, incluzând elaborarea de planuri de acțiune în situații de urgență, proceduri detaliate pentru evacuare și adăpostire, precum și măsuri specifice de decontaminare. Aceste măsuri sunt esențiale pentru reducerea riscurilor identificate și pentru aducerea acestora sub pragul acceptabil stabilit pentru CNE Cernavodă, în conformitate cu standardele unei infrastructuri critice. Contribuțiile personale din această lucrare aduc o valoare semnificativă securității nucleare și managementului riscurilor, oferind soluții pentru protecția populației.

Lista lucrărilor publicate

Lista lucrărilor științifice publicate în cadrul unor manifestări științifice naționale și internaționale, acestea reprezentând rezultate ale cercetării științifice din această perioadă și diseminarea rezultatelor cercetărilor efectuate în această perioadă. Astfel, până în acest moment au fost publicate următoarele tipuri de lucrări:

- 4 articole științifice publicate în volumele unor manifestări științifice naționale și internaționale indexate ISI
- Articole științifice indexate publicate în volumele unor manifestări științifice naționale și internaționale indexate BDI

Lista lucrărilor publicate sau aflate în curs de publicare

Articole științifice publicate în volumele unor manifestări științifice naționale și internaționale indexate ISI

[1] **Savu, IC** and Militaru, G, *Critical infrastructures development aligned with European union procedures. Evidence from Romania*, 15th International Conference on Business Excellence (ICBE) - Digital Economy and New Value Creation, Dec 1 2021 | Proceedings of the international conference on business excellence 15 (1) , pp.468-479, WOS:000747987000017

[2] Barbu, A., Militaru G., **Savu I C.**, 2019, *Investigating the Factors that Influence the Adoption of Smartwatch Technologies Evidence from Romania*, 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA) 13-14 November, Madrid, Spain, Vision 2025; Education Excellence and Management of Inovations through Sustainable Economic Competitive Advantage, pp. 5765-5776, ISBN: 978-0-9998551-3-3, WOS: 000556337407053

[3] Barbu, A., Militaru G., **Savu I C.**, 2019, *Determining the acceptance level of smartwatches using the TAM model. Evidence from Romania*. The 9th International Conference of Management and Industrial Engineering ICMIE 2019, November 14-16th, 2019, Management Perspectives in the Digital Transformation, Bucharest, Romania, Editura NICULESCU, 2019, pp. 191-201, WOS:000519338200018

[4] Georgescu, RM; **Savu, IC** and Militaru, G. *How can social networks improve the recruitment process case study – Linkedin*, 12th International Management Conference on Management Perspectives in the Digital Era (IMC), 2018 | Proceedings of the 12th international management conference: management perspectives in the digital era (IMC 2018) , pp.644-652, WOS:000473413800071

Articole științifice publicate în volumele unor manifestări științifice naționale și internaționale indexate BDI

- [1] Savu I. , Militaru G. (2021), *Critical infrastructures development aligned with European union procedures. Evidence from Romania*. Proceedings of the International Conference on Business Excellence, Vol.15 (Issue 1), pp. 468-479. <https://doi.org/10.2478/picbe-2021-0043>
- [2] Savu I. , Militaru G., 2019, *Smart development of critical infrastructures in Romania*. In: 6th SWS International Scientific Conferences on social sciences 2019. 2019. p. 383-390.
- [3] Savu I. , Militaru G., Copaci V.P. , 2018, *Critical infrastructure protection in Romanian One Health concept*, One Health International Journal, 4(1),15-20,2018 One Health New Medical Concept Association conference, Romania
- [4] Savu I. , Militaru G. ,2018, *Nuclear waste management - an international approach*, Annals of the Academy of Romanian Scientists Series on Engineering Sciences ,Volume 10, Number 2/2018, ISSN 2066- 8570

BIBLIOGRAFIE

1. Română, A. (2016). Institutul de Lingvistică „Iorgu Iordan–Al. Rosetti”. *Dicționarul explicativ al limbii române*, 1237.
2. Alexandrescu, G., & Vaduva, G. (2006). *Infrastructuri critice. pericole, amenintari la adresa acestora. sisteme de protectie*. Universitatea Nationala de Aparare Carol I'.
3. Almaleh, A., & Tipper, D. (2021). Risk-based criticality assessment for smart critical infrastructures. *Infrastructures*, 7(1), 3.
4. Alrammah, I., Saeed, I. M. M., Mhareb, M. H. A., & Alotiby, M. (2022). Atmospheric dispersion modeling and radiological environmental impact assessment for normal operation of a proposed pressurized water reactor in the eastern coast of Saudi Arabia. *Progress in Nuclear Energy*, 145, 104121.
5. Apud Dediu, G., (1996) Protecția infrastructurilor critice – o nouă provocare. Ed. Polirom.
6. Aryalakshmi, S., & Madhu, D. (2021, November). Moisture trajectories during heavy rainfall events using Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2070, No. 1, p. 012066). IOP Publishing.
7. Bazemore, D. W. (2019). Quantifying Uncertainty of Ensemble Transport and Dispersion Simulations Using HYSPLIT.
8. Bereznai, G. T., & Harvel, G. (2011). Introduction to CANDU systems and operation. *University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, Canada*.
9. Biringer, B., Vugrin, E., & Warren, D. (2013). *Critical infrastructure system security and resiliency*. CRC press.
10. Brashear, J. P. (2020). Managing risk to critical infrastructures, their interdependencies, and the region they serve: A risk management process. In *Optimizing Community Infrastructure* (pp. 41-67). Butterworth-Heinemann.
11. Reinermann, D., & Weber, J. (2003). Analysis of critical infrastructures: The ACIS methodology (Analysis of critical infrastructural sectors). In *Critical Infrastructure Protection Workshop*.
12. Chock, D. P., & Winkler, S. L. (1994). A particle grid air quality modeling approach: 1. The dispersion aspect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D1), 1019-1031.
13. CNCAN, (2007). Ghid privind verificarea periodică a sistemelor de protecție fizică a instalațiilor nucleare.

14. Cohen, M. D., Draxler, R. R., Artz, R., Commoner, B., Bartlett, P., Cooney, P., ... & McDonald, J. (2002). Modeling the atmospheric transport and deposition of PCDD/F to the Great Lakes. *Environmental science & technology*, 36(22), 4831-4845.
15. Crouhy, M., Galai, D., Mark, R., (2014). The essentials of risk management, Second edition. ed. McGraw-Hill, New York.
16. Di Bona, G., Forcina, A., Falcone, D., & Silvestri, L. (2020). Critical risks method (CRM): A new safety allocation approach for a critical infrastructure. *Sustainability*, 12(12), 4949.
17. Dong, X., Pan, D., Li, Z., Zhang, Y., Feng, Y., & Liu, J. (2017). Improving Human-System Interface Design Through Human Behavior Assessment in the Control Room of Nuclear Power Plants. In *Nuclear Power Plants: Innovative Technologies for Instrumentation and Control Systems: International Symposium on Software Reliability, Industrial Safety, Cyber Security and Physical Protection of Nuclear Power Plant 1* (pp. 143-151). Springer Singapore.
18. Draxler, R. R. (1992). *Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectories (HYSPLIT), Version 3.0: User's guide and model description* (p. 26). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Air Resources Laboratory.
19. Draxler, R. R. (1999). HYSPLIT_4 User's Guide. NOAA Technical Memorandum. ERL ARL-230.
20. Draxler, R. R., & Heffter, J. L. (1989). Across North America Tracer Experiment (ANATEX). Volume 1, Description, ground-level sampling at primary sites, and meteorology.
21. Draxler, R. R., & Hess, G. D. (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories. *Australian meteorological magazine*, 47(4), 295-308.
22. Draxler, R. R., & Rolph, G. D. (2012). Evaluation of the Transfer Coefficient Matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D5).
23. Draxler, R. R., & Taylor, A. D. (1982). Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 367-372.
24. Duggan, D. P., & Michalski, J. T. (2007). Threat analysis framework. *Sanida Report*.
25. Elky, S. (2006). An introduction to information systems risk management.
26. Fay, B., Glaab, H., Jacobsen, I., & Schrodin, R. (1995). Evaluation of Eulerian and Lagrangian atmospheric transport models at the Deutscher Wetterdienst using ANATEX surface tracer data. *Atmospheric environment*, 29(18), 2485-2497.
27. Federal Office for Information Security, (2018). Critical Infrastructure Protection in Germany.

28. Feng, Y., Wang, Z. Q., Liu, J. B., & Guo, Y. H. (2017). Discussion About Issues of Human Error in Digital Control Room of NPP. In *Nuclear Power Plants: Innovative Technologies for Instrumentation and Control Systems: International Symposium on Software Reliability, Industrial Safety, Cyber Security and Physical Protection of Nuclear Power Plant 1* (pp. 133-141). Springer Singapore.
29. Fleming, Z. L., Monks, P. S., & Manning, A. J. (2012). Untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition. *Atmospheric Research*, 104, 1-39.
30. Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D. W., & Van Dorland, R. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2.
31. Gery, M. W., Whitten, G. Z., Killus, J. P., & Dodge, M. C. (1989). A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94(D10), 12925-12956.
32. Hopkin, P. (2018). *Fundamentals of risk management: understanding, evaluating and implementing effective risk management*. Kogan Page Publishers.
33. IAEA, (2002). Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. *Requirements*.
34. IAEA, (2004). „Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency. *IAEA Safety Standards, Draft Safety Guide DS105 (version 7.0)*.
35. Price, C. (2011). Development of the IAEA Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Materials and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Rev. 5). *Journal of Nuclear Materials Management*, 39(3), 11-17.
36. Internationale Atomenergie-Organisation, (2006). Monitoring for radioactive material in international mail transported by public postal operators: reference manual, IAEA nuclear security series *Technical guidance*. Vienna.
37. Internationale Atomenergie-Organisation, (2006). Technical and functional specifications for border monitoring equipment: reference manual, IAEA nuclear security series *Technical guidance*. Vienna.
38. Internationale Atomenergie-Organisation, (2013). Establishing the nuclear security infrastructure for a nuclear power programme, IAEA nuclear security series implementing guide. *International Atomic Energy Agency, Vienna*.
39. ISU, D., (2017). Planul de analiză și acoperire a riscurilor al județului Constanța.
40. Ivanenko, O. (2020). Implementation of risk assessment for critical infrastructure protection with the use of risk matrix. *ScienceRise*, (2 (67)), 26-38.

41. Kinser, A. M. (2001). Simulating wet deposition of radiocesium from the Chernobyl accident.
42. KRITIS - Federal Office for Information Security, (2017). Critical Infrastructure Protection în Germany.
43. Lucian Biro, Dan Voinea, (2016). Criminalitatea în domeniul nuclear, implicații asupra siguranței naționale vol. 1. *Asociația Criminalistilor din Romania Sparex Nuclear 3S- SRL-Romania, Targu-Jiu*.
44. MAI, CNCAN, (2018a). Regulament privind gestionarea situațiilor de urgență specifice riscului nuclear sau radiologic.
45. MAI, CNCAN, (2018b). Regulament privind gestionarea situațiilor de urgență specifice riscului nuclear sau radiologic.
46. Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory, (2020). WRF research and forecasting model.
47. Netherlands Ministry of interior, (2005). *Netherlands - Report on Critical Infrastructure protection*.
48. Nitu, P., (2007). Securitatea centralelor Nuclear Electrice. *Editura Polirom*.
49. Outrider, (2020). Screenshot harta interactiva Outrider. URL <https://outrider.org>
50. Pesch-Cronin, K. A., & Marion, N. E. (2016). *Critical infrastructure protection, risk management, and resilience: A policy perspective*. CRC Press.
51. Piguet, F., Eckert, P., Knüsli, C., Deriaz, B., Wildi, W., Giuliani, G., & Piguet, F. P. (2019). Modeling of a major accident in five nuclear power plants from 365 meteorological situations in western Europe and analysis of the potential impacts on populations, soils and affected countries. *Genève: Sortir du Nucléaire, Suisse Romande*.
52. Prezentare pentru investitori, Cernavodă, (2019) <https://www.nuclearelectrica.ro/ir/wp-content/uploads/sites/9/2019/11/prezentare-romana.pdf>
53. Raport de securitate nucleara pentru Unitatea 2 de la CNE Cernavoda -Rezumat-, (2019). <http://www.cncan.ro/assets/Transparenta/Reautorizarea-exploatarii-Unitatii-2-a-CNE-Cernavoda/Raport-securitate-nucleara-Unitatea-2.pdf>
54. Rolph, G. D., Draxler, R. R., & De Pena, R. G. (1992). Modeling sulfur concentrations and depositions in the United States during ANATEX. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 26(1), 73-93.
55. SN Nuclearelectrica SA, (2018). Raport Anual 2018.
56. SN Nuclearelectrica -SA, ISU Dobrogea, (2018). Plan de urgenta, ghid personal pentru locuitorii din zona CNE Cernavoda.
57. SRI, (2012). Protecția infrastructurilor critice.

58. Stein, A. F., Lamb, D., & Draxler, R. R. (2000). Incorporation of detailed chemistry into a three-dimensional Lagrangian–Eulerian hybrid model: Application to regional tropospheric ozone. *Atmospheric Environment*, 34(25), 4361-4372.
59. Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., & Wotawa, G. (2005). The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(9), 2461-2474.
60. Urbina, O. J., Teixeira, E. R., & Matos, J. C. (2021, May). Identification of risk management models and parameters For critical infrastructures. In *International Probabilistic Workshop* (pp. 391-404). Cham: Springer International Publishing.
61. Valizadeh, B., Heydarizade, Y., Tayebi, J., & Rezaie, M. R. (2024). A Simulation to Assess the Probability of the Spread of Radioactive Materials from the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant using the HYSPLIT Model. *Pollution*, 10(1), 595-605.
62. Wikipedia the free encyclopedia, (2022). Scala INES.
63. Xi, C. H., Zhang, L. Q., & Tian, Y. (2017). Analyzing and Processing the Malfunction of Control Valve Dithering in PWR Nuclear Power Plant. In *Nuclear Power Plants: Innovative Technologies for Instrumentation and Control Systems: International Symposium on Software Reliability, Industrial Safety, Cyber Security and Physical Protection of Nuclear Power Plant 1* (pp. 59-68). Springer Singapore.
64. Xing, Y. Y., Huang, H. B., & Yang, X. M. (2017). 3D Digital Virtual Simulation Application System for Technical Management of Nuclear Power Station Equipment. In *Nuclear Power Plants: Innovative Technologies for Instrumentation and Control Systems: International Symposium on Software Reliability, Industrial Safety, Cyber Security and Physical Protection of Nuclear Power Plant 1* (pp. 1-7). Springer Singapore.
65. Xu, H., Zhang, B., & Liu, Y. (2021). New safety strategies for nuclear power plants: A review. *International Journal of Energy Research*, 45(8), 11564-11588.
66. Chai, T. (2024). HYSPLIT Nuclear Applications and Emergence Response. *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 73, 1797-1806.
67. Salman, A. D., Al-Jumaily, K. J., & AL-Salihi, A. M. (2020, December). Aerosol-cloud-precipitation interactions over Iraq using MODIS satellite data and HYSPLIT model during (2008-2017). In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2290, No. 1). AIP Publishing.
68. Hao, C., Song, L., & Zhao, W. (2021). RETRACTED ARTICLE: HYSPLIT-based demarcation of regions affected by water vapors from the South China Sea and the Bay of Bengal. *European Journal of Remote Sensing*, 54(sup2), 348-355.
69. APANGU, Godfrey Philliam, et al. (2022) Sentinel-2 satellite and HYSPLIT model suggest that local cereal harvesting substantially contribute to peak *Alternaria* spore concentrations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 326: 109156

70. Skrynyk, O., Voloshchuk, V., Budak, I., & Bubin, S. (2019). Regional HYSPLIT simulation of atmospheric transport and deposition of the Chernobyl ¹³⁷Cs releases. *Atmospheric Pollution Research*, 10(6), 1953-1963.
71. Jooybari, S. A., Peyrowan, H., Rezaee, P., & Gholami, H. (2022). Evaluation of pollution indices, health hazards and source identification of heavy metal in dust particles and storm trajectory simulation using HYSPLIT model (Case study: Hendijan center dust, southwest of Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2), 107.
72. Cassol, H. L., Domingues, L. G., Sanchez, A. H., Basso, L. S., Marani, L., Tejada, G., ... & Gatti, L. V. (2020). Determination of region of influence obtained by aircraft vertical profiles using the density of trajectories from the HYSPLIT model. *Atmosphere*, 11(10), 1073.
73. Gunda, G. K. T., Champatiray, P. K., Chauhan, M., Chauhan, P., Ansary, M., Singh, A., ... & Balaji, S. (2021). Modelling of volcanic ash with HYSPLIT and satellite observations: a case study of the 2018 Barren Island volcano eruption event, Andaman Territory, India. *Curr Sci*, 121, 529-538.
74. Chai, T., Stein, A., & Ngan, F. (2018). Weak-constraint inverse modeling using HYSPLIT-4 Lagrangian dispersion model and Cross-Appalachian Tracer Experiment (CAPTEX) observations—effect of including model uncertainties on source term estimation. *Geoscientific Model Development*, 11(12), 5135-5148.
75. Aryalakshmi, S., & Madhu, D. (2021, November). Moisture trajectories during heavy rainfall events using Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2070, No. 1, p. 012066). IOP Publishing.
76. Kalinskaya, D. V., & Kudinov, O. B. (2017, November). Methodology of ground aerosol sources determination based on AERONET and HYSPLIT models data results. In *23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics* (Vol. 10466, pp. 817-825). SPIE.
77. Lepicard, S., Heling, R., & Maderich, V. (2004). POSEIDON/RODOS models for radiological assessment of marine environment after accidental releases: application to coastal areas of the Baltic, Black and North Seas. *Journal of environmental radioactivity*, 72(1-2), 153-161.
78. Kovalets, I. V., Romanenko, O., & Synkevych, R. (2020). Adaptation of the RODOS system for analysis of possible sources of Ru-106 detected in 2017. *Journal of Environmental Radioactivity*, 220, 106302.
79. Kopka, P., Mazur, A., Potemski, S., & Wojciechowicz, H. (2022). Application of the RODOS decision support system for nuclear emergencies to the analysis of possible

- consequences of severe accident in distant receptors. *Annals of Nuclear Energy*, 167, 108837.
80. Walter, H., Gering, F., Arnold, K., Gerich, B., Heinrich, G., & Welte, U. (2016). RODOS-based simulation of potential accident scenarios for emergency response management in the vicinity of nuclear power plants. *BfS-SCHR-60/16*. urn: nbn: de, 0221-2016091214084.
 81. Prăvălie, R., & Bandoc, G. (2018). Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental implications. *Journal of environmental management*, 209, 81-92.
 82. Suman, S. (2018). Hybrid nuclear-renewable energy systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, 181, 166-177.
 83. Todreas, N. E., Kazimi, M. S., & Massoud, M. (2021). *Nuclear systems Volume II: Elements of thermal hydraulic design*. CRC Press.
 84. Hasegawa, A., Tanigawa, K., Ohtsuru, A., Yabe, H., Maeda, M., Shigemura, J., ... & Chhem, R. K. (2015). Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on Fukushima. *The Lancet*, 386(9992), 479-488.
 85. Van Vliet, M. T., Wiberg, D., Leduc, S., & Riahi, K. (2016). Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 6(4), 375-380.
 86. Rahman, A., Farrok, O., & Haque, M. M. (2022). Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161.
 87. Sovacool, B. K., Heffron, R. J., McCauley, D., & Goldthau, A. (2016). Energy decisions reframed as justice and ethical concerns. *Nature Energy*, 1(5), 1-6.
 88. Caldara, D., & Iacoviello, M. (2022). Measuring geopolitical risk. *American Economic Review*, 112(4), 1194-1225.
 89. Lubina, M. (2017). From Geopolitical Chance to Security Threat. *Polish Political Science Yearbook*, 46(1), 221-238.
 90. Conze, E., Klimke, M., & Varon, J. (Eds.). (2017). *Nuclear threats, nuclear fear and the Cold War of the 1980s*. Cambridge University Press.
 91. Johnson, J. (2022). Inadvertent escalation in the age of intelligence machines: A new model for nuclear risk in the digital age. *European Journal of International Security*, 7(3), 337-359.
 92. Roberts, B. (2020). On adapting nuclear deterrence to reduce nuclear risk. *Daedalus*, 149(2), 69-83.

93. Portugal-Pereira, J., Ferreira, P., Cunha, J., Szklo, A., Schaeffer, R., & Araújo, M. (2018). Better late than never, but never late is better: Risk assessment of nuclear power construction projects. *Energy Policy*, 120, 158-166.
94. Kyne, D., & Harris, J. T. (2015). A longitudinal study of human exposure to potential nuclear power plant risk. *International Journal of Disaster Risk Science*, 6, 399-414.
95. Carless, T. S., Redus, K., & Dryden, R. (2021). Estimating nuclear proliferation and security risks in emerging markets using Bayesian Belief Networks. *Energy Policy*, 159, 112549.
96. Ford, M. J., Abdulla, A., & Morgan, M. G. (2017). Evaluating the cost, safety, and proliferation risks of small floating nuclear reactors. *Risk analysis*, 37(11), 2191-2211.
97. Onderco, M., & Zutt, M. (2021). Emerging technology and nuclear security: What does the wisdom of the crowd tell us?. *Contemporary Security Policy*, 42(3), 286-311.
98. Shin, H. (2017). Risk politics and the pro-nuclear growth coalition in Japan in relation to the Fukushima. *Energy & Environment*, 28(4), 518-529.
99. Bracken, P. (2016). The cyber threat to nuclear stability. *Orbis*, 60(2), 188-203.
100. Varde, P. V., & Pecht, M. G. (2018). *Risk-Based Engineering: An Integrated Approach to Complex Systems--Special Reference to Nuclear Plants*. Springer Singapore.
101. Kim, S., & Kim, S. (2017). Impact of the Fukushima nuclear accident on belief in rumors: The role of risk perception and communication. *Sustainability*, 9(12), 2188.
102. Kim, J., Bang, Y., & Lee, W. J. (2016). Living near nuclear power plants and thyroid cancer risk: A systematic review and meta-analysis. *Environment international*, 87, 42-48.