Workplace and Process Safety in Next Generation Europe - Teaching for Learning Safety4EU

Project No. 101126832

Coordinator: Dr Milan Protić

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Co-funded by the European Union

L6: Modeli izvora i disperzije

Dr Milan Protić, Dr Miomir Raos

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L6: Modeli izvora i disperzije — pregled kursa (15 h)

Co-funded by the European Union

Struktura kursa L6

- L6-1 Modeli izvora: ispuštanje tečnosti i gasova [2 h]
- L6-2 Atmosferska stabilnost i meteorološki parametri [2 h]
- L6-3 Gaussov model disperzije gasovitih oblaka [3 h]
- L6-4 Disperzija teških gasova i posebni modeli [2 h]
- L6-5 Dvofazni tok i isparavanje iz bazena tečnosti [2 h]
- L6-6 Modelovanje posledica: toksičnost i SEVESO [2 h]
- L6-7 Softverski alati i laboratorijske vežbe [2 h]

Veza sa prethodnim i narednim lekcijama

- L5: modeli toplotne radijacije, požara i eksplozija daju ulazne scenarije za L6 disperziju.
- Izlaz iz L6 je koncentraciono polje C(x, y, z, t) u atmosferi — osnova za procenu toksičnih i zapaljivih zona.
- L7/L8: modeli mašinskog učenja treniraju se na izlaznim podacima disperzionih simulacija.

Ključni standardi i softver koji koristimo u L6

- ALOHA (NOAA/EPA): Areal Locations of Hazardous Atmospheres — besplatan alat za brzu procenu hazarda.
- PHAST (DNV): industrijski standard za procenu rizika u SEVESO postrojenjima.
- AERMOD (EPA): regulatorni model za atmosfersku disperziju.
- Python/Google Colab: scipy, numpy i matplotlib za numeričke proračune i grafičke prikaze.

L6: Modeli izvora i disperzije

L6-1 Modeli izvora: ispuštanje tečnosti i gasova

Dr Milan Protić, Dr Miomir Raos

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L6-1: Šta je model izvora i zašto je ključan?

Co-funded by the European Union

Definicija modela izvora (source term model)

- Matematički opis količine, brzine i fizičkog stanja materije koja se oslobađa pri akcidentu.
- Izlazni parametri: $\dot{m}$ [kg/s], T_{oblak} [K], gustina oblaka [kg/m³], prečnik izvora [m].
- Model izvora je ulaz u model disperzije — greška u modelu izvora umnožava se kroz ceo proračun.

Tipovi akcidentnih ispuštanja

- Ispuštanje tečnosti kroz otvor: tankovi, cevovodi i procesne posude pod pritiskom.
- Ispuštanje gasa pod pritiskom: kompresorske stanice, posude pod pritiskom i pneumatski sistemi.
- Dvofazno ispuštanje (flash): pregrejana tečnost pri pritisku višem od atmosferskog — mlaz tečne/gasovite faze.
- Katastrofalni kvar: trenutno oslobađanje celokupnog sadržaja posude.

Posledice različitih tipova izvora

- Tečno ispuštanje → jezero na tlu → isparavanje iz jezera → gasni oblak (spor izvor).
- Gasovito ispuštanje → neposredan oblak gasa (brz izvor).
- Dvofazno ispuštanje → aerosol + gasovita faza → kombinovana disperzija (najteži slučaj).
- Tip izvora direktno određuje koji model disperzije treba koristiti u L6-3 i L6-4.

L6-1: Ispuštanje tečnosti kroz otvor — Torricellijev model

Co-funded by the European Union

Osnovne jednačine (Torricelli / Bernoulli)

$$v_{otv} = C_d \cdot \sqrt{2gh + \frac{2(P_{sud} - P_{atm})}{\rho}} \ [m/s]$$

$$\dot{m} = C_d \cdot A_h \cdot \rho \cdot \sqrt{2gh + \frac{2\Delta P}{\rho}} \ [kg/s]$$

C_d = koeficijent pražnjenja: 0.61 za oštar otvor; 0.72 za zaobljeni otvor; 0.80 za kratku cev.
h = visina tečnosti iznad otvora [m] | ρ = gustina tečnosti [kg/m³].

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{A_h}{A_t} \cdot C_d \cdot \sqrt{2gh + \frac{2\Delta P}{\rho}}$$

Vremenska promena nivoa u sudu

A_t = horizontalni presek tanka [m²] | A_h = površina otvora [m²].
Rešava se numerički (Euler ili RK4) za h(t) i ṁ(t) tokom pražnjenja.

L6-1: Ispuštanje tečnosti kroz otvor — Torričelijev model

Co-funded by the European Union

Ručni proračun — sud 10 m³, otvor 25 mm, benzin, P_nad = 0.5 bar

- $\rho = 740$ kg/m³ | $A_t = 10/3 = 3.33$ m² | $h_o = 3$ m.
- $A_h = \pi/4 \times 0.025^2 = 4.91 \times 10^{-4}$ m².
- $v_o = 0.61 \times \sqrt{(2 \times 9.81 \times 3 + 2 \times 50000/740)} = 8.50$ m/s.
- $\dot{m}_o = C_d \times A_h \times \rho \times v_o = 3.09$ kg/s ≈ 186 kg/min.

```
import numpy as np
from scipy.integrate import solve_ivp
rho = 740; Cd = 0.61; Ah = 4.91e-4; At = 3.33; dP = 50000; g = 9.81
dhdt = lambda t, h: -(Ah/At)*Cd*np.sqrt(max(2*g*h[0] + 2*dP/rho, 0))
sol = solve_ivp(dhdt, [0, 600], [3.0], max_step=5)  # h(t), t
```

L6-1: Ispuštanje tečnosti — Maple implementacija i analiza

Co-funded by the European Union

Maple — Torricellijev model sa promenljivim pritiskom

```
restart:
rho := 740:  Cd := 0.61:  Ah := 4.91e-4:
At := 3.33:  dP := 50000:  g := 9.81:

# ODE za nivo tečnosti:
ode := diff(h(t), t) = -(Ah/At)*Cd*sqrt(2*g*h(t) + 2*dP/rho):
ic  := h(0) = 3.0:
sol := dsolve({ode, ic}, h(t), type = numeric):

# Grafički prikaz h(t):
with(plots):
p1 := odeplot(sol, [t, h(t)], 0..600,
              labels = ["t [s]", "h [m]"],
              title = "Opadanje nivoa u tanku"):
display(p1):

# Kumulativna masa ispuštene tečnosti:
m_dot_t := t -> Cd*Ah*rho*sqrt(2*g*sol(t)[2] + 2*dP/rho):
M_total := int(m_dot_t(t), t = 0..600):
printf("Ukupno ispušteno: %.0f kg\n", M_total):
```

L6-1: Ispuštanje gasa pod pritiskom — kompresibilno strujanje

Co-funded by the European Union

Dva režima: subsonično i kritično (choked) strujanje

- Kritični uslov za odnos pritisaka:

$$\frac{P_{sud}}{P_{atm}} \geq \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

- Za vazduh (γ = 1.4): kritični odnos = 1.893; za metan (γ = 1.31): kritični odnos ≈ 1.84.

Kritično strujanje — maksimalni protok gasa

$$\dot{m}_{choked} = C_d \cdot A_h \cdot P_{sud} \cdot \sqrt{\frac{\gamma M}{R T_{sud}}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad [kg/s]$$

M = molarna masa gasa [kg/mol] | R = 8.314 J/(mol·K) | T_{sud} = temperatura gasa u sudu [K].

L6-1: Ispuštanje gasa pod pritiskom — kompresibilno strujanje

Co-funded by the European Union

Primer: metan iz suda (P = 10 bar, T = 20 °C), otvor D = 20 mm

- $A_h = \pi/4 \times 0.02^2 = 3.14 \times 10^{-4}$ m² | γ = 1.31 | M = 0.016 kg/mol.
- Kritični faktor za metan: $\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} = 0.535$
- $\dot{m} = 0.61 \times 3.14 \times 10^{-4} \times 10^{6} \times 0.0924 \times 0.535 = 9.48 \frac{kg}{s}$.

Subsonično strujanje (P_{sud} blizu P_{atm})

$$\dot{m} = C_d \cdot A_h \cdot \sqrt{2\rho_{gas}(P_{sud} - P_{atm})} \cdot \text{korekcioni faktor}$$

L6-1: Isparavanje iz bazena tečnosti na tlu

Co-funded by the European Union

Formiranje bazena pri ispuštanju tečnosti

- Tečnost se širi po tlu dok nije ograničena ivicama tanka, bermom ili konfiguracijom terena

$$A_j = \frac{V_{ispuštene}}{h_j} \quad [m^2]$$

h_j ≈ 5–20 mm za niskoviskozne tečnosti (benzin, voda); veća vrednost za viskozne tečnosti (ulje)

Brzina isparavanja iz jezera

- Mackay–Matsugu jednačina:

$$\dot{m}_{isp} = K_m \cdot A_j \cdot \rho_{gas} \cdot \ln(1 + B_m) \quad [kg/s]$$

$$B_m = \frac{\frac{P_{vap}}{P_{atm}}}{1 - \frac{P_{vap}}{P_{atm}}} \quad \text{(Spaldingov broj prenosa mase)}$$

P_{vap} = pritisak pare tečnosti [Pa] — ključna fizička veličina.

Co-funded by the European Union

Pojednostavljena formula (Yellow Book, TNO)

$$\dot{m}_{isp} = \frac{0.0071 \cdot u^{0.78} \cdot A_j \cdot M \cdot P_{vap}}{RT_j}$$

```
import math
u = 3.0; A_j = 50.0; M = 0.086; P_vap = 17300; R = 8.314; T_j = 293
m_dot = 0.0071 * u**0.78 * A_j * M * P_vap / (R * T_j)
print(f'Brzina isparavanja = {m_dot*1000:.2f} g/s = {m_dot*3600:.1f} kg/h')
```

L6-1: Dvofazno ispuštanje — flash isparavanje

Co-funded by the European Union

Kada nastupa flash isparavanje?

- Kada je temperatura tečnosti u sudu viša od tačke ključanja pri atmosferskom pritisku.
- Primeri: propan ($T_{ključ}$ = −42 °C na 1 bar), LPG, freon, amonijak, metan i hlor.
- Pri otvaranju otvora pritisak naglo pada: tečnost prelazi u pregrejano stanje i isparava.
- Deo ostaje kao aerosol (sitne kapi), a deo odmah postaje gas.

Frakcija flash isparavanja

$$F_v = \frac{C_{p,L}(T_{sud} - T_{ključ})}{\Delta H_{vap}} \quad \text{(termička ravnoteža)}$$

$C_{p,L}$ = specifični toplotni kapacitet tečnosti [kJ/(kg·K)]
$T_{ključ}$ = tačka ključanja pri atmosferskom pritisku [K]
ΔH_{vap} = entalpija isparavanja pri $T_{ključ}$ [kJ/kg]

L6-1: Dvofazno ispuštanje — flash isparavanje

Co-funded by the European Union

Primer: propan u tanku na 50 °C

- $C_{p,L}$(propan) = 2.5 kJ/(kg·K) | $T_{ključ}$ = −42 °C = 231 K | ΔH_{vap} = 426 kJ/kg.
- F_v = 2.5 × (323 − 231) / 426 = 0.540 → 54% isparava odmah.
- Ostatak (46%) se hladi na $T_{ključ}$ i ostaje kao aerosol koji postepeno isparava.

```
def flash_frakcija(T_sud, T_kljuc, Cp_L, dH_vap):
    Fv = Cp_L * (T_sud - T_kljuc) / dH_vap
    return min(max(Fv, 0), 1.0)  # ograniči na [0, 1]
print(f'Fv propan = {flash_frakcija(323, 231, 2.5, 426):.3f}')
```

L6-1: Ventil sigurnosti i hitno ispuštanje (relief valve)

Co-funded by the European Union

Funkcija ventila sigurnosti (PRV — Pressure Relief Valve)

- Štiti posude pod pritiskom od prekoračenja dozvoljenog pritiska (MAWP — Maximum Allowable Working Pressure).
- API RP 520/521: standardi za dimenzionisanje PRV-a u naftnoj i gasnoj industriji.
- EN ISO 4126: evropski standard za sigurnosne uređaje za zaštitu od prekomernog pritiska.

Dimenzionisanje PRV-a za gasovitu fazu

$$A_{PRV} = \frac{\dot{m}_{req}}{K_d \cdot P_1 \cdot \sqrt{\frac{M}{Z \cdot T}}} \quad [m^2]$$

K_d = koeficijent pražnjenja PRV-a (tipično 0.975 za vazduh; 0.85–0.90 za pare)

P_1 = apsolutni pritisak otvaranja PRV-a [bar] | Z = faktor kompresibilnosti

$\dot{m}_{req}$ = potrebni protok kroz PRV u najgorem scenariju (požar, blokiran izlaz, hemijska reakcija)

L6-1: Ventil sigurnosti i hitno ispuštanje (relief valve)

Co-funded by the European Union

Određivanje scenarija za dimenzionisanje

- Scenario 1: spoljašnji požar ispod tanka/posude — API 521 tablica za prenos toplote Q_požar.

$$Q_{požar} = 43200 \cdot F \cdot A_n{}^{0.82} \quad [W]$$

$$\dot{m} = \frac{Q_{požar}}{\Delta H_{vap}} \quad \text{(isparavanje usled toplotnog opterećenja)}$$

- Primer:

Horizontalni sud C_3H_8, zapremina 10 m³, A_n = 24 m², bez berme (F = 1.0).

$Q_{požar}$ = 43200 × 1.0 × 24^0.82 = 550000 W;

$\dot{m}$ = 550000 / 426000 = 1.29 kg/s.

L6-1: Katastrofalni kvar posude — instantno ispuštanje

Co-funded by the European Union

Šta je katastrofalni kvar (catastrophic failure)?

- Nagla mehanička ruptura posude i oslobađanje celokupnog sadržaja u kratkom vremenskom periodu.
- Uzroci: BLEVE, unutrašnja eksplozija, korozija, mehanički udar ili požar spolja.

Model instantnog oblaka (instantaneous release model)

- Pretpostavlja se da se celokupna masa M_f oslobađa trenutno i formira približno sferni oblak:

$$C_0 = \frac{M_f}{V_{oblak}} \quad [kg/m^3]$$

$$r_0 = \left(\frac{3M_f}{4\pi\rho_{smeše}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad [m]$$

Uzima se da je $\rho_{smeše} \approx 1.0–1.5 \times \rho_{vazduha}$ za oblake teških gasova

L6-1: Katastrofalni kvar posude — trenutno ispuštanje

Co-funded by the European Union

Ekvivalentni Gaussov model za trenutni izvor

$$C(x,y,z,t) = \frac{M_f}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma^3} \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2 \; ; \; \sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_{atm}(t)$$

Ručni proračun: trenutno ispuštanje 100 kg hlorovodonika (HCl)

M_f = 100 kg | ρ_{gas} = 1.63 kg/m³ (HCl pri 25 °C)
V_{oblak} = 100/1.63 = 61.3 m³ | r_0 = (3×61.3/(4π))^(1/3) = 2.45 m
C_0 = 100/61.3 = 1.631 kg/m³ ≈ 1631 mg/m³ — znatno iznad IDLH (50 ppm)

L6-1: Rezime modela izvora — vodič za izbor

Co-funded by the European Union

Dijagram toka za izbor modela izvora

- Korak 1: odrediti fizičko stanje — tečnost, gas ili dvofazni tok
- Korak 2: odrediti nivo pritiska — nadatmosferski (> 1.1 bar), atmosferski ili podpritisak
- Korak 3: odrediti tip scenarija — rupa, potpuni lom cevovoda, kvar ventila ili požar

Izbor modela prema tipu scenarija

- Gas pod pritiskom, kritični tok: koristiti model kritičnog toka (L6-1, slajd 6)
- Gas pod pritiskom, subsonični tok: koristiti subsoničnu Bernoullijevu formulu
- Tečnost iz tanka: Torricellijev model, zatim isparavanje iz jezera (L6-1, slajd 7)
- Pregrejana tečnost: flash model + aerosol (L6-1, slajd 8) — najsloženiji slučaj
- Instantno oslobađanje: sferni oblak (L6-1, slajd 10)

Važne ulazne veličine koje treba pribaviti iz SDS-a

- Molarna masa, gustina tečnosti/gasa, tačka ključanja i pritisak pare na T_{amb}
- Entalpija isparavanja, specifična toplota tečne faze i $\gamma = C_p/C_v$ za gasove
- OEL/TWA/STEL/IDLH vrednosti za toksične materije; DGZ/GGZ za zapaljive materije
- Preporuka: Python klasa IzvorIspustanja sa validacijom ulaza (npr. $T_{sud} > T_{ključ} \rightarrow$ flash model)

L6-1: Python — biblioteka modela izvora

Co-funded by the European Union

Kompletna Python implementacija modela izvora

```
import numpy as np, math
from scipy.integrate import solve_ivp

class IzvorIspustanja:
    def __init__(self, rho, P_sud, T_sud, gamma, M_mol):
        self.rho = rho
        self.P = P_sud
        self.T = T_sud
        self.gamma = gamma
        self.M = M_mol

    def tecnost_otvor(self, Ah, h, Cd=0.61):
        v = Cd * math.sqrt(2 * (9.81*h + (self.P - 101325)/self.rho))
        return Ah * self.rho * v  # [kg/s]
```

Co-funded by the European Union

Kompletna Python implementacija modela izvora

```
#Nastavak sa prethodnog slajda
    def gas_choked(self, Ah, Cd=0.61):
        g = self.gamma
        R = 8.314
        cf = (2/(g + 1))**((g + 1)/(2*(g - 1)))
        return Cd * Ah * self.P * math.sqrt(g*self.M/(R*self.T)) * cf

    def flash_Fv(self, T_kljuc, CpL, dHvap):
        Fv = CpL * (self.T - T_kljuc) / dHvap
        return min(max(Fv, 0), 1)

# Primer upotrebe:
izvor = IzvorIspustanja(740, 2e5, 313, 1.1, 0.086)  # benzin
print(f'm_dot = {izvor.tecnost_otvor(4.9e-4, 2.5):.3f} kg/s')
```

Co-funded by the European Union

Maple — parametarska studija ispuštanja tečnosti

```
restart:
with(plots):

# Parametri benzinskog tanka:
rho := 740:  Cd := 0.61:  g := 9.81:  dP := 50000:
At := 3.33:
Ah_list := [1e-4, 2e-4, 5e-4, 1e-3]:  # različite veličine otvora

# ODE za svaku veličinu otvora:
boje := [red, blue, green, magenta]:
grafovi := []:
for k from 1 to 4 do
    Ah := Ah_list[k]:
    ode := diff(h(t), t) = -(Ah/At)*Cd*sqrt(2*g*h(t) + 2*dP/rho):
    sol := dsolve({ode, h(0) = 3.0}, h(t), numeric):
    grafovi := [op(grafovi), odeplot(sol, [t, h(t)], 0..600, color = boje[k])]:
end do:
```

Co-funded by the European Union

Maple — parametarska studija ispuštanja tečnosti

```
#Nastavak sa prethodnog slajda
display(grafovi,
        labels = ["t [s]", "h [m]"],
        title = "Uticaj veličine otvora na brzinu pražnjenja"):
```

Zaključci analize

- Otvor 10 mm: pražnjenje oko 600 s; otvor 32 mm: oko 60 s — kvadratna zavisnost od prečnika.
- Nadpritisak ΔP povećava početni protok, ali protok opada kako nivo pada.
- Ukupno ispuštena masa uvek je $M_{ukupno} = \rho \times A_t \times h_0$ — ne zavisi od veličine otvora.

L6: Modeli izvora i disperzije

L6-2 Atmosferska stabilnost i meteorološki parametri

Dr Milan Protić, Dr Miomir Raos

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L6-2: Atmosferska granična oblast i turbulencija

Co-funded by the European Union

Atmosferska granična oblast (ABL — Atmospheric Boundary Layer)

- Donji sloj atmosfere do 1–2 km visine, gde se osećaju trenje i toplotni efekti površine Zemlje.
- U ovom sloju odvija se gotovo sva industrijska disperzija — ključan je za SEVESO modelovanje.
- Turbulencija u ABL: mehanička (trenje o tlo i prepreke) + termička (konvekcija danju).
- Turbulencija razblažuje gasovite oblake — viša turbulencija = brže razblaživanje = manji rizik.

Dnevno-noćni ciklus ABL

- Dan: Sunce greje tlo → termička konvekcija → jaka turbulencija → nestabilni uslovi (klase A, B, C).
- Noć: tlo se hladi zračenjem → inverzija temperature → slaba turbulencija → stabilni uslovi (klase E, F).
- Oblačno/vetrovito: mehanička turbulencija dominira → neutralni uslovi (klasa D).

Karakteristike turbulencije

- Intenzitet turbulencije: σ_v/u (standardna devijacija brzine / srednja brzina) = 0.05–0.25.
- Turbulentna kinetička energija (TKE): mera intenziteta turbulentnih fluktuacija.
- Monin-Obukhovljeva dužina L_{MO}: matematička mera stabilnosti — negativna za nestabilno, pozitivna za stabilno.

L6-2: Pasquill-Giffordove klase atmosferske stabilnosti

Co-funded by the European Union

Pasquill (1961) — šest klasa stabilnosti A do F

- A: izuzetno nestabilno — jako Sunčevo zagrevanje, slab vetar (u < 2 m/s).
- B: umereno nestabilno — umereno Sunčevo zagrevanje, slab do umeren vetar.
- C: blago nestabilno — blago Sunčevo zagrevanje, umeren vetar (3–5 m/s).
- D: neutralno — oblačno, noćni uslovi sa vetrom ili jak vetar (> 6 m/s).
- E: blago stabilno — noćni uslovi, delimično oblačno, slab do umeren vetar.
- F: umereno stabilno — vedro noćno nebo, slab vetar (u < 3 m/s).

Tabela za određivanje klase stabilnosti (Gifford)

- Ulazni parametri: brzina vetra na 10 m visine + intenzitet Sunčevog zagrevanja ili noćni uslovi.
- Jako zagrevanje = jarko Sunce i suvo tlo; slabo zagrevanje = oblačno, jutro ili veče.
- Noću: ako je oblačnost > 4/8, klasa D; vedro nebo + slab vetar = klasa F.

L6-2: Pasquill-Giffordove klase atmosferske stabilnosti

Co-funded by the European Union

Značaj klase za disperziju

- Klasa A: najbrže razblaživanje — kratke zone hazarda.
- Klasa F: najsporije razblaživanje — najduže zone hazarda, najgori scenario.
- U SEVESO analizama uvek računati konzervativni scenario: F/G klasa, u = 1.5 m/s.

Python — određivanje klase iz meteoroloških podataka

```
def PG_klasa(u_10, zagrevanje, noc=False):
    if noc:
        return "F" if u_10 < 3 else ("E" if u_10 < 5 else "D")
    if u_10 < 2 and zagrevanje == "jako": return "A"
    if u_10 < 3 and zagrevanje in ["jako", "umereno"]: return "B"
    if u_10 < 5 and zagrevanje == "umereno": return "C"
    return "D"
```

Co-funded by the European Union

Profil brzine vetra sa visinom — zakon stepena

$$u(z) = u_{ref} \cdot (z / z_{ref})^{p} \quad [m/s]$$

- z_{ref} = referentna visina (obično 10 m, meteorološka merenja); u_{ref} = brzina vetra na z_{ref}
- p = eksponent profila vetra; zavisi od stabilnosti atmosfere i hrapavosti terena.

Vrednosti eksponenta p prema Pasquill-Gifford klasi i terenu

- Klasa A, ravan teren: p = 0.10 | Klasa D, ravan teren: p = 0.25.
- Klasa F, ravan teren: p = 0.40 | Klasa D, grad: p = 0.33.
- Klasa D, šume/predgrađa: p = 0.28 | Klasa F, grad: p = 0.50.

Co-funded by the European Union

Praktično značenje

- Ispuštanja se dešavaju na različitim visinama; lokalna brzina vetra mora se računati na visini izvora.
- Na produkte iz visokog dimnjaka (z = 100 m) više utiče vetar nego na produkte iz niskog dimnjaka (z = 2 m)
- Efektivna visina ispuštanja H_{ef} uključuje geometrijsku visinu dimnjaka i porast struje vrelih gasova

$$H_{ef} = H_{dim} + \Delta h$$

Python — brzina na visini ispuštanja

```
def u_z(z, u_ref=4.0, z_ref=10.0, p=0.25):
    return u_ref * (z / z_ref)**p
print(f"Brzina na 50 m: {u_z(50):.2f} m/s")
```

L6-2: Koeficijenti disperzije σ_y i σ_z

Co-funded by the European Union

Pasquill-Giffordovi koeficijenti disperzije

- $\sigma_y(x)$ = standardna devijacija koncentracione raspodele u bočnom pravcu [m]
- $\sigma_z(x)$ = standardna devijacija koncentracione raspodele u vertikalnom pravcu [m]
- Obe vrednosti rastu sa rastojanjem x i sa nestabilnošću atmosfere (klasa A najveće, F najmanje).

Empirijske korelacije — Pasquill-Gifford

$$\sigma_y(x) = c \cdot x^d \quad [m]$$
$$\sigma_z(x) = a \cdot x^b \quad [m]$$

- Koeficijenti se uzimaju iz tabela za svaku PG klasu; za x u km rezultat je u km, pa se u kodu množi sa 1000.

L6-2: Koeficijenti disperzije σ_y i σ_z

Co-funded by the European Union

Koeficijenti za ravan teren

- Klasa A: σ_y: c = 0.22, d = 0.894 | σ_z: a = 0.20, b = 0.894.
- Klasa D: σ_y: c = 0.08, d = 0.894 | σ_z : a = 0.06, b = 0.750.
- Klasa F: σ_y: c = 0.04, d = 0.894 | σ_z : a = 0.016, b = 0.730.

Python — funkcije σ_y i σ_z za svaku klasu

```
PG = {"A": {"sy": (0.22, 0.894), "sz": (0.20, 0.894)},
      "D": {"sy": (0.08, 0.894), "sz": (0.06, 0.750)},
      "F": {"sy": (0.04, 0.894), "sz": (0.016, 0.730)}}
def sigma(x_m, klasa, tip):
    c, d = PG[klasa][f"s{tip}"]
    return 1000 * c * (x_m / 1000)**d
```

L6-2: Inverzija temperature i posebni meteorološki uslovi

Co-funded by the European Union

Inverzija temperature

- Normalno: temperatura opada sa visinom (temperaturni gradijent približno −6.5 °C/km).
- Inverzija: temperatura raste sa visinom — atmosfera je stabilna i potiskuje vertikalno mešanje.
- Tipovi inverzija: prizemna (noćna, radijaciona), subsidencijska i advektivna.

Uticaj na disperziju

- Prizemna inverzija: oblak ne može da se podigne iznad inverzionog sloja → horizontalni „poklopac”.
- Fumigacija: kada se inverzija razloži jutarnjim grejanjem, oblak može naglo da se spusti ka tlu.
- Fumigacija je jedan od najopasnijih disperzionih scenarija — maksimalne koncentracije se javljaju pri tlu.
- Looping (vijuganje oblaka): u nestabilnim uslovima oblak vijuga i povremeno dodiruje tlo.

Co-funded by the European Union

Visina mešanja (mixing height — z_i)

z_i = visina mešanja

- Gornja granica ABL iznad koje se disperzija bitno menja; tipično 500–2000 m danju.
- Noću z_i može biti samo 50–200 m — oblak se zarobljava u tankom sloju.
- Model sa mešanjem (well-mixed): za $z > z_i$ koncentracija se uzima kao uniformna u sloju mešanja.

Praktične posledice za SEVESO analizu

- Klasa F + niska visina mešanja (< 200 m) + mirna noć = konzervativni scenario za SEVESO procenu.
- Lokalne meteorološke podatke uzeti sa najbliže meteorološke stanice, za najmanje 10 godina merenja.

L6-2: Porast pluma (plume rise) — dimnjak i vreli izvori

Co-funded by the European Union

Šta je porast pluma?

- Gas ističe iz dimnjače topliji ili brži od okoline i zbog inercije i uzgona diže se iznad vrha dimnjaka
- Veća efektivna visina znači manje koncentracije pri tlu i manji rizik za stanovništvo

$$H_{ef} = H_{dim} + \Delta h$$

Briggsove formule za porast pluma

- Fluksni parametar uzgonske sile F_b koristi temperaturu, brzinu i prečnik dimnjaka

$$F_b = \frac{g \cdot v_{dim} \cdot {r_{dim}}^2 \cdot (T_{dim} - T_{amb})}{T_{amb}} \quad [m^4/s^3]$$

$$\Delta h = \frac{1.6 \cdot {F_b}^{1/3} \cdot {x_f}^{2/3}}{u} \quad \text{za } F_b > 55\ m^4/s^3$$

$$\Delta h = \frac{21.425 \cdot {F_b}^{3/4}}{u} \quad \text{za } F_b < 55\ m^4/s^3$$

L6-2: Porast pluma (plume rise) — dimnjak i vreli izvori

Co-funded by the European Union

Primer

- Dimnjača: T_{dim} = 200 °C, v_{dim} = 10 m/s, r_{dim} = 0.5 m, T_{amb} = 15 °C, u = 5 m/s.
- F_b = 15.7 m^4/s^3 < 55 → Δh = 31.5 m.

Python — proračun porasta pluma

```
g = 9.81; v = 10; r = 0.5; T_dim = 473; T_amb = 288; u = 5.0
Fb = g * v * r**2 * (T_dim - T_amb) / T_amb
dh = 21.425 * Fb**(3/4) / u if Fb < 55 else None
```

L6-2: Hrapavost terena i urbani efekat

Co-funded by the European Union

Dužina hrapavosti (z_0 — Surface Roughness Length)

z_0 = dužina hrapavosti

- Karakteristična visina prepreka na tlu koja određuje profil vetra i turbulenciju.
- z_0 = 0.0002 m: mirna vodena površina | z_0 = 0.01 m: kratka trava, pustinja.
- z_0 = 0.1 m: nisko rastinje, razbacane kuće | z_0 = 0.5 m: predgrađa, šume.
- z_0 = 1.0–3.0 m: gusto izgrađen grad, visoke zgrade.

Urbani efekat na disperziju

- Visoke zgrade i ulični kanjoni stvaraju složen vetar, recirkulacione zone i lokalne vrtloge.
- Za industrijska postrojenja u urbanim zonama, kada je geometrija važna, koristiti CFD modele.
- AERMOD ima opciju za urbanu hrapavost — povećava vertikalnu disperziju u gradskim zonama.

Co-funded by the European Union

Realna meteorologija vs. worst-case analiza

- SEVESO zahteva analizu konzervativnog scenarija (klasa F, u = 1.5 m/s) i statistički očekivanog scenarija.
- Statistički scenario: koristiti raspoloživu istoriju meteorologije, npr. Weibullovu raspodelu brzine vetra.

Python — Weibullova raspodela

```
from scipy.stats import weibull_min
import numpy as np; import matplotlib.pyplot as plt
u_data = np.random.weibull(2.0, 8760) * 4.5
c, loc, scale = weibull_min.fit(u_data, floc=0)
print(f"Weibull: k={c:.2f}, lambda={scale:.2f} m/s")
```

Co-funded by the European Union

Meteorološki parametri koji ulaze u modele disperzije

- Brzina i smer vetra na 10 m (satni prosek), temperatura vazduha, vlažnost i oblačnost.
- Atmosferska stabilnost (PG klasa ili Monin-Obukhovljeva dužina L) i visina mešanja z_i.
- Za SEVESO studiju bezbednosti: najmanje 3 godine meteoroloških podataka sa najbliže stanice.

Meteorološki podaci za Srbiju

- RHMZ Srbije: javno dostupni podaci sa mreže meteoroloških stanica.
- SYNOP (WMO sinoptičke poruke) i METAR (aerodromske) poruke — satna rezolucija.
- NOAA NCEI: globalna baza meteoroloških podataka za međunarodne projekte.

Co-funded by the European Union

Frekvencija stabilnosnih klasa za Niš (orijentacione vrednosti)

- Klasa A (jako nestabilno): ≈ 3% | Klasa B: ≈ 8% | Klasa C: ≈ 14%.
- Klasa D (neutralno): ≈ 40% (najčešća) | Klasa E: ≈ 20% | Klasa F: ≈ 15%.
- Vetar: najčešći smerovi NW i S/SE — važno za SEVESO zonu uticaja.

Python — učitavanje i analiza meteoroloških podataka

```
import pandas as pd
df = pd.read_csv("nis_met_2020_2023.csv", parse_dates=["datetime"])
print(df.groupby(df.datetime.dt.month)["u_10"].describe())
# Ruža vetrova: from windrose import WindroseAxes
```

Co-funded by the European Union

L6: Modeli izvora i disperzije

L6-3 Gaussov model disperzije gasovitih oblaka

Dr Milan Protić, Dr Miomir Raos

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L6-3: Gaussov model disperzije — teorijska osnova

Co-funded by the European Union

Istorijat i osnova

- Razvijen 1960-ih za regulatornu procenu zagađenja vazduha (EPA, Velika Britanija).
- Pretpostavlja se da koncentracioni profil oblaka ima Gaussovu raspodelu u bočnom i vertikalnom pravcu.
- Osnova je rešenje difuzione jednačine za stacionarni izvor sa uniformnim vetrom.

Gaussova jednačina za kontinualni plum

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y{}^2}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z{}^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z{}^2}\right)\right]$$

- C = koncentracija [mg/m³ ili ppm]; Q = maseni protok izvora [mg/s ili kg/s].
- σ_y = bočno širenje oblaka; σ_z = vertikalno širenje oblaka; u = brzina vetra na efektivnoj visini H.
- H = efektivna visina ispuštanja; x = rastojanje niz vetar; y = bočno odstupanje; z = visina.

Co-funded by the European Union

Član refleksije od tla

- Drugi eksponencijalni član opisuje refleksiju od tla; tlo se tretira kao idealni reflektor.
- U praksi deo materije može da se izgubi depozicijom, apsorpcijom ili hemijskim reakcijama.

Prizemna koncentracija na osi pluma

$$C_{osa}(x) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left(\frac{-H^2}{2{\sigma_z}^2}\right)$$

- Ova formula je osnova za brze SEVESO proračune toksičnih gasovitih oblaka.

L6-3: Gaussov model — ručni proračun (prizemni izvor)

Co-funded by the European Union

Zadatak

- Izračunati koncentraciju amonijaka na 500 m niz vetar.
- Dato: Q = 0.5 kg/s NH_3; H = 0 m; u = 4 m/s; PG klasa D.
- Granične vrednosti NH_3: IDLH = 300 ppm; ERPG-3 = 750 ppm; AEGL-3 = 160 ppm.

Korak 1 — koeficijenti disperzije na x = 500 m

- σ_y = 0.08 × (0.5)^0.894 = 0.0427 km = 42.7 m.
- σ_z = 0.06 × (0.5)^0.750 = 0.0357 km = 35.7 m.

Korak 2 — prizemna osa pluma

$$C_{osa}(x) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z{}^2}\right)$$

- C_{osa} = 500000 / (π × 42.7 × 35.7 × 4) = 26.2 mg/m³.

L6-3: Gaussov model — ručni proračun (prizemni izvor)

Co-funded by the European Union

Konverzija mg/m³ u ppm

$$\text{ppm} = \frac{\text{mg/m}^3 \cdot 22.4 \cdot \text{T}}{\text{M} \cdot 273}$$

- Za NH_3: C = 26.2 × (22.4/17) × (293/273) = 36.7 ppm.

Procena hazarda

- Na 500 m koncentracija je ispod ERPG-3, ali iznad ERPG-1; evakuacija ili upozorenje može biti opravdano.
- Rastojanje do IDLH računa se iterativno iz jednačine $C_{osa}(x) = 300$ ppm.

L6-3: Gaussov model — Python implementacija

Co-funded by the European Union

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
PG = {"A": {"sy": (0.22, 0.894), "sz": (0.20, 0.894)},
      "D": {"sy": (0.08, 0.894), "sz": (0.06, 0.750)},
      "F": {"sy": (0.04, 0.894), "sz": (0.016, 0.730)}}
def sig(x_m, klasa, smer):
    c, d = PG[klasa][f"s{smer}"]
    return 1000 * c * (x_m / 1000)**d  # [m]
def gauss_osa(x_m, Q_kg_s, H, u, klasa):
    sy = sig(x_m, klasa, "y")
    sz = sig(x_m, klasa, "z")
    C_kg_m3 = Q_kg_s/(np.pi*sy*sz*u) * np.exp(-H**2/(2*sz**2))
    return C_kg_m3 * 1e6  # [mg/m3]
# NH3, Q = 0.5 kg/s, H = 0, u = 4 m/s, klasa D
x = np.logspace(2, 4, 200)
C_mg = np.array([gauss_osa(xi, 0.5, 0, 4, "D") for xi in x])
C_ppm = C_mg * 22.4/17 * 293/273
plt.semilogx(x, C_ppm)
plt.axhline(300, color="r", label="IDLH")
plt.axhline(750, color="k", label="ERPG-3")
plt.xlabel("x [m]"); plt.ylabel("C [ppm]"); plt.legend()
```

L6-3: Gaussov model — MAPLE implementacija i analiza

Co-funded by the European Union

```
restart:
with(plots):
# Parametri: NH3, PG klasa D
Q := 500000: H := 0: u := 4.0: M := 17: T_K := 293:
# Koeficijenti disperzije za PG klasu D
sy := x -> 1000*0.08*(x/1000)^0.894:
sz := x -> 1000*0.06*(x/1000)^0.750:
# Prizemna koncentracija na osi pluma [ppm]
Cppm := x -> Q/(Pi*sy(x)*sz(x)*u)
             *exp(-H^2/(2*sz(x)^2))*(22.4/M)*(T_K/273):
p1 := logplot(Cppm(x), x=100..10000, color=blue, thickness=2,
              labels=["x [m]", "C [ppm]"]):
h1 := plot(300, x=100..10000, color=red, linestyle=dash):
h2 := plot(750, x=100..10000, color=black, linestyle=dash):
display([p1,h1,h2], title="Gaussova disperzija NH3 – klasa D"):
x_IDLH := fsolve(Cppm(x) = 300, x=500):
printf("Rastojanje do IDLH = %.0f m\n", x_IDLH):
```

L6-3: Maksimalna prizemna koncentracija i njeno rastojanje

Co-funded by the European Union

Rastojanje maksimalne prizemne koncentracije

- Za podignute izvore (H > 0), maksimalna prizemna koncentracija nije neposredno kod izvora, nego niz vetar.
- Na tom rastojanju oblak se dovoljno raširi vertikalno da “dodirne” tlo.

$$\sigma_z(x_{max}) = \frac{H}{\sqrt{2}}$$

Aproksimacija maksimalne koncentracije

$$C_{max} \approx \frac{Q \cdot \exp(-1)}{\pi \cdot e \cdot \sigma_y(x_{max}) \cdot u \cdot H}$$

- Što je veća efektivna visina izvora H, veće je x_{max} i manja je C_{max} na tlu.

L6-3: Maksimalna prizemna koncentracija i njeno rastojanje

Co-funded by the European Union

Ručni proračun: NH_3, Q = 0.5 kg/s, H = 20 m, u = 4 m/s, klasa D

- Uslov: $\sigma_z = H/\sqrt{2} = 20/1.414 = 14.14$ m.
- Za klasu D: $\sigma_z = 0.06 \times x^{0.750}$; iterativno se dobija $x_{max} \approx 1375$ m.
- $\sigma_y(1375\text{ m}) \approx 106$ m; $C_{max} \approx 9.75$ mg/m³ = 13.7 ppm.

Python — iterativno nalaženje x_max

```
from scipy.optimize import minimize_scalar
neg_C = lambda x: -gauss_osa(x, 0.5, 20, 4, "D")
res = minimize_scalar(neg_C, bounds=(100, 20000), method="bounded")
print(f"x_max = {res.x:.0f} m, C_max = {-res.fun:.2f} mg/m3")
```

L6-3: 2D koncentraciono polje — mapa izokoncentracija

Co-funded by the European Union

Zašto nam treba 2D mapa?

- SEVESO studija bezbednosti zahteva prikaz zona opasnosti u xy ravni, tj. na mapi postrojenja.
- Inspekciji i lokalnim vlastima potreban je vizuelni prikaz zona uticaja i evakuacionih zona.
- Mapa izolinija prikazuje konture C = const, npr. IDLH, ERPG-1, ERPG-2 i ERPG-3.

Proširena Gaussova jednačina za 2D ravan (z = 0)

$$C(x,y) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2{\sigma_y}^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-H^2}{2{\sigma_z}^2}\right)$$

- σ_y i σ_z su funkcije rastojanja x niz vetar; y opisuje bočno širenje oblaka.

L6-3: 2D koncentraciono polje — mapa izokoncentracija

Co-funded by the European Union

Python — generisanje 2D mape izokoncentracija NH_3

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
x_arr = np.linspace(10, 5000, 300)
y_arr = np.linspace(-500, 500, 200)
X, Y = np.meshgrid(x_arr, y_arr)
C_2d = np.zeros_like(X)
for i, x in enumerate(x_arr):
    sy = sig(x, "D", "y"); sz = sig(x, "D", "z")
    C_2d[:, i] = (0.5/(np.pi*sy*sz*4))*np.exp(-Y[:, i]**2/(2*sy**2))
plt.contourf(X, Y, C_2d*1e6, levels=[25, 300, 750], cmap="Reds")
plt.xlabel("x [m]"); plt.ylabel("y [m]")
```

L6-3: Gaussov model za instantni izvor — putujući oblak

Co-funded by the European Union

Razlika: kontinualni izvor i trenutni izvor

- Kontinualni izvor (plum): stacionarni oblak sa fiksnim izvorom — primenjuje se prethodna Gaussova jednačina.
- Instantni izvor (puff): oblak putuje niz vetar i vremenom se širi.

Trenutni Gaussov model (puff model)

$$C(x,y,z,t) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \cdot \sigma_y{}^2 \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-[(x - ut)^2 + y^2]}{2\sigma_y{}^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z{}^2}\right)$$

- M = ukupna masa ispuštene materije [kg].
- σ_y i σ_z zavise od vremena i turbulentnog širenja oblaka, a centar oblaka se pomera za x = u·t.

L6-3: Gaussov model za instantni izvor — putujući oblak

Co-funded by the European Union

Primer: instantno oslobađanje 200 kg hlorovodonika (HCl)

- Na početku (t = 0) oblak je kod izvora; posle 60 s pri u = 4 m/s centar oblaka je na x = 240 m.
- Maksimalna koncentracija u centru oblaka opada približno kao $M/[(2\pi)^{(3/2)}\cdot\sigma_y^2\cdot\sigma_z]$.

Python — animacija putujućeg oblaka

```
# Koristiti matplotlib.animation za C(x,y,t) kao video.
# Svaki frejm: izračunati C za trenutno t i nacrtati izolinije.
# anim = FuncAnimation(fig, update, frames=range(0,300,5), interval=200)
```

L6-3: Uticaj klase stabilnosti — poređenje klasa A i F

Co-funded by the European Union

Poređenje najbolje i najgore meteorološke situacije

- Klasa A (jako nestabilna): σ_y i σ_z su veliki → brzo razblaživanje → manji rizik.
- Klasa F (stabilna): σ_y i σ_z su mali → sporo razblaživanje → oblak dopire dalje.
- Paradoks: sunčan dan je često bezbedniji od vedre, hladne noći za disperziju toksičnih materija.

Numerički primer: NH_3, Q = 0.5 kg/s, H = 0, u = 4 m/s, x = 1 km

- Klasa A: σ_y = 202 m, σ_z = 200 m → C ≈ 0.98 mg/m³ = 1.4 ppm (bezbednije).
- Klasa D: σ_y = 80 m, σ_z = 55 m → C ≈ 9.1 mg/m³ = 12.7 ppm.
- Klasa F: σ_y = 40 m, σ_z = 12 m → C ≈ 82.9 mg/m³ = 116 ppm (opasno).
- Razlika između A i F: koncentracija u klasi F može biti približno 80 puta veća na istom rastojanju.

Zaključci za SEVESO projektovanje

- Za worst-case procenu zone uticaja koristiti klasu F, a za posebne konzervativne analize i klasu G.
- U statističkoj analizi izračunati učestalost klase F za lokalni meteorološki režim.
- MAPLE/Python: paralelno računati klase A, D i F i prikazati krive na istom dijagramu.

L6-3: Integralna doza — kumulativna izloženost toksičnoj materiji

Co-funded by the European Union

Od koncentracije do integralne doze

- Bezbednosna granica nije samo trenutna koncentracija C, nego i trajanje izloženosti.
- Kod puff modela integralna doza je integral C(t)·dt tokom prolaska oblaka preko posmatrane tačke.

$$D = \frac{C_{max} \cdot \sigma_d \cdot \sqrt{(2\pi)}}{u}$$

Toksična doza i probit

- IDLH: kratkoročna granica opasna po život i zdravlje, najčešće za 30 min izloženosti.
- AEGL: akutne smernice za 10 min, 30 min, 1 h, 4 h i 8 h.
- ERPG: tri nivoa za planiranje vanrednih situacija, najčešće za 1 h izloženosti.

L6-3: Integralna doza — kumulativna izloženost toksičnoj materiji

Co-funded by the European Union

Opšta probit jednačina za toksične gasove

$$Pr = a + b \cdot \ln(C^n \cdot t_e)$$

$$P = 50 \cdot [1 + \mathrm{erf}(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}})]$$

Python — probit analiza za NH_3

```
from scipy.special import erf
import numpy as np
a, b, n = -35.9, 1.85, 2.0
C_ppm = 200; te = 600
C_mg = C_ppm * 17 / 22.4
Pr = a + b * np.log(C_mg**n * te)
smrtnost = 50*(1 + erf((Pr - 5)/np.sqrt(2)))
```

L6-3: Ograničenja Gaussovog modela i kada ga ne koristiti

Co-funded by the European Union

Pretpostavke Gaussovog modela

- Stacionarni i približno ravnomerni vetar — smer i brzina ne menjaju se značajno tokom disperzije.
- Ravno i horizontalno tlo — bez jakog uticaja brda, dolina, zgrada i kompleksne geometrije.
- Konzervativna materija — nema značajnih hemijskih reakcija, depozicije ili apsorpcije u tlo.
- Gas nije znatno gušći od vazduha; gusti gasovi zahtevaju posebne modele.

Kada Gaussov model nije pouzdan

- Gusti gasovi (Cl_2, HF, NH_3 pri visokim koncentracijama): oblak se širi pri tlu → L6-4.
- Kompleksan teren: koristiti CFD ili CALMET/CALPUFF sa topografijom.
- Blizina zgrada: uključiti zavetrinske zone i building-wake efekte (AERMOD, ADMS).
- Reaktivni gasovi (HF, SO_3, NO_2): hemija menja koncentracije i rastojanja hazarda.
- Bliska zona izvora (< 100 m): Gaussian pristup često nije tačan — koristiti CFD ili specijalizovan model.

Kada je Gaussov model dovoljan

- Početna SEVESO procena: brza i konzervativna za screening analizu.
- Regulatorne zone 1/2: Gaussov model uz konzervativnu meteorologiju često je prihvaćen pristup.
- Veća rastojanja (> 500 m): dovoljna tačnost za planiranje i uporedne scenarije.

L6-3: Kompletna SEVESO procena disperzije — ručni primer

Co-funded by the European Union

Zadatak

- Procena SEVESO zone uticaja za ispuštanje hlorovodonika (HCl).
- Dato: Q = 0.2 kg/s; H = 2 m; PG klasa F; u = 2 m/s.
- Granične vrednosti HCl: AEGL-1 = 1.8 ppm; AEGL-2 = 22 ppm; AEGL-3 = 100 ppm; IDLH = 50 ppm.
- M(HCl) = 36.46 g/mol.

Konverzija ppm u mg/m³

$$C[\mathrm{mg/m^3}] = C[\mathrm{ppm}] \cdot \frac{M}{22.4} \cdot \frac{273}{T_K}$$

Korak 1 — koeficijenti disperzije za PG klasu F

- $\sigma_y(x) = 0.04 \times (x/1000)^{0.894}$ [km]; $\sigma_z(x) = 0.016 \times (x/1000)^{0.730}$ [km].

L6-3: Kompletna SEVESO procena disperzije — ručni primer

Co-funded by the European Union

Korak 2 — prizemna koncentracija na osi oblaka

- x = 200 m: C ≈ 1046 mg/m³ = 643 ppm (AEGL-3).
- x = 500 m: C ≈ 213 mg/m³ = 131 ppm (AEGL-3).
- x = 1000 m: C ≈ 63 mg/m³ = 39 ppm (iznad AEGL-2, ispod IDLH).
- x = 2000 m: C ≈ 19.5 mg/m³ = 12 ppm (ispod AEGL-2).

Korak 3 — SEVESO zone

- Zona unutrašnjeg planiranja (AEGL-3 > 100 ppm): R ≈ 530 m od izvora.
- Zona spoljašnjeg planiranja (AEGL-2 > 22 ppm): R ≈ 1500 m od izvora.
- Zaključak: curenje HCl od 200 g/s u stabilnoj atmosferi može dati evakuacione zone > 1 km.

L6: Modeli izvora i disperzije

L6-4 Disperzija teških gasova i posebni modeli

Dr Milan Protić, Dr Miomir Raos

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L6-4: Gusti gasovi — ponašanje različito od neutralnih gasova

Co-funded by the European Union

Šta je gusti/teški gas (dense/heavy gas)?

- Gas koji je gušći od okolnog vazduha zbog veće molarne mase ili niske temperature.
- Kriterijum: $\rho_{gas} > 1.5 \times \rho_{vazduha} \Rightarrow$ potencijalno ponašanje gustog gasa.
- HF: M = 20 g/mol, ρg/ρair ≈ 1.38 na 25 °C, ali može formirati težak aerosol.
- Cl_2: M = 70.9 g/mol, ρg/ρair ≈ 2.44; LPG je posebno težak kada izlazi kao hladan oblak.

Karakteristično ponašanje gustih gasova

- Horizontalno širenje: oblak se širi bočno po tlu kao „palačinka“; Gaussov model ga često potcenjuje.
- Vertikalno: oblak ne uzlazi lako, već ostaje blizu tla zbog gravitacionog širenja.
- Depresije i jame: akumulacija u kanalima, šahtovima, jarugama i podrumima.
- Turbulentno mešanje je oslabljeno zbog gravitacione stabilizacije oblaka.

Primeri industrijskih gustih gasova

- Hlor (Cl_2): M = 70.9 g/mol, ρ ≈ 3.17 kg/m³; veoma toksičan gas u hemijskoj industriji.
- Sumporvodonik (H_2S): M = 34.1 g/mol, ρ ≈ 1.52 kg/m³; toksičan gas u rafinerijama.
- Amonijak (NH_3): M = 17 g/mol; pri ispuštanju hladne tečnosti može nastati težak aerosol.
- LPG (propan/butan): hladan flash-oblak u početku može biti znatno teži od vazduha.

L6-4: Britter-McQuaid model za gusti gas

Co-funded by the European Union

Britter-McQuaid (1988) model — pojednostavljeni industrijski model

- Empirijski model zasnovan na laboratorijskim i terenskim eksperimentima sa teškim gasovima.
- Predviđa maksimalnu koncentraciju na osi oblaka kao funkciju rastojanja i početnih uslova.

Ulazni parametri

- $\dot{V}$ = zapreminski protok ispuštanja [m³/s]; u = brzina vetra [m/s].

$$g_0 = g \cdot (\rho_g - \rho_a) / \rho_a \quad [m/s^2]$$

- q = $\dot{V}$ · [ρ(gas)/ρ(vazduh)] je efektivni zapreminski protok [m³/s].

$$D = (q/u)^{1/2} \quad [m]$$

$$X^* = x / (q \cdot g_0 \cdot u^{-3})^{1/3}, \quad C^* = C/C_0$$

Ručni proračun — ispuštanje Cl_2, 1 kg/s

- ρ(Cl_2) = 3.17 kg/m³; ρ(vazduh) = 1.2 kg/m³; $\dot{V}$ = 1/3.17 = 0.315 m³/s; u = 3 m/s.
- g_0 = 9.81 × (3.17 − 1.2)/1.2 = 16.1 m/s²; q = 0.315 × (3.17/1.2) = 0.833 m³/s.

Python — Britter-McQuaid korelacija

```
g0 = 9.81 * (3.17 - 1.2) / 1.2  # Cl2
q = 0.315
u = 3.0
C0 = 3.17
def BM_Xstar(x): return x / (q * g0 / u**3)**(1/3)
def BM_Cstar(Xstar): return min(1.0, 0.3 * Xstar**(-0.65))
```

L6-4: Britter-McQuaid model za gusti gas

Co-funded by the European Union

Ručni proračun — ispuštanje Cl_2, 1 kg/s

- $\rho(Cl_2) = 3.17$ kg/m³; ρ(vazduh) = 1.2 kg/m³; $\dot{V} = 1/3.17 = 0.315$ m³/s; u = 3 m/s.
- $g_0 = 9.81 \times (3.17 - 1.2)/1.2 = 16.1$ m/s²; $q = 0.315 \times (3.17/1.2) = 0.833$ m³/s.

Python — Britter-McQuaid korelacija

```
g0 = 9.81 * (3.17 - 1.2) / 1.2  # Cl2
q = 0.315
u = 3.0
C0 = 3.17
def BM_Xstar(x): return x / (q * g0 / u**3)**(1/3)
def BM_Cstar(Xstar): return min(1.0, 0.3 * Xstar**(-0.65))
```

L6-4: DEGADIS i SLAB modeli — principi

Co-funded by the European Union

DEGADIS (Dense Gas Dispersion) — USEPA model

- Razvijen na osnovu LNG i propanskih eksperimenata; koristi se za gusti gas u hitnim analizama.
- Opisuje vertikalni profil koncentracije i temperature u oblaku teškog gasa.
- Rešava skup ODE jednačina za očuvanje mase, energije i količine kretanja u teškom gasnom oblaku.
- Ulazni podaci: temperatura, molarna masa, stopa ispuštanja, meteorološki parametri i hrapavost terena.

SLAB model (LLNL / US DOE)

- Single Layer (Box) model za horizontalna i vertikalna ispuštanja teških gasova.
- Modelira prelaz od gustog gasa ka neutralnom, odnosno Gaussovom ponašanju oblaka.
- Koristi integralne veličine po vertikalnom profilu oblaka, pa je brži od CFD modela.
- SLAB se koristi u više evropskih zemalja kao prihvatljiv model za SEVESO analize.

Box model — jednostavnija alternativa

- Pretpostavlja uniformnu koncentraciju unutar kutijastog oblaka koji se širi po tlu.
- Jednačine očuvanja prate dL/dt, dH/dt i dW/dt — dužinu, visinu i širinu oblaka.
- Dovoljan je za SEVESO screening; za detaljnu analizu koristiti DEGADIS, SLAB, PHAST ili CFD.

Python Box model za instantni teški gas

```
# dW/dt = Ce * sqrt(g0 * H)          # gravitaciono širenje
# dH/dt = -entrainment_top             # mešanje sa vazduhom odozgo
# dL/dt = u + lateral_spreading        # transport niz vetar + širenje
```

L6-4: Primer analize — ispuštanje Cl_2 iz postrojenja za hlor

Co-funded by the European Union

Scenario: ispuštanje hlora iz cisterne

- 1 tona Cl_2 za 5 min; Q = 1000/300 = 3.33 kg/s; u = 2 m/s; PG klasa F; H = 0 m.
- Cl_2: M = 70.9 g/mol; ρ = 3.17 kg/m³; AEGL-3(30 min) = 3.0 ppm = 9.5 mg/m³.

Korak 1: Gaussov model — bez dense-gas efekta

- σy = 0.04 × 0.5^0.894 × 1000 = 21.4 m; σz = 0.016 × 0.5^0.730 × 1000 = 9.1 m.

$$C_{osa}(500\ \mathrm{m}) = 3.33 \times 10^6 / (\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u) = 2717\ \mathrm{mg/m^3} = 858\ \mathrm{ppm}$$

Korak 2: korekcija za gusti gas

- Cl_2 je oko 2.6 puta gušći od vazduha, širi se horizontalnije i sporije se razblažuje.
- Na 500 m Gaussov model može potceniti koncentraciju; Britter-McQuaid korekcija daje približno C ≈ 1.3 × C(Gauss).
- C ≈ 1116 ppm — znatno iznad AEGL-3; scenario je ekstremno opasan.

Zaključak i SEVESO zona

- AEGL-3 zona za 3 ppm može biti veća od 5000 m niz vetar u stabilnoj atmosferi.
- SEVESO III zahteva posebne studije bezbednosti za postrojenja sa velikim količinama hlora.
- Za teške gasove koristiti DEGADIS, SLAB ili PHAST, a ne samo Gaussov model.

L6-4: ALOHA softver — praktična primena

Co-funded by the European Union

ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres)

- Razvili NOAA i US EPA; besplatan alat za hitnu procenu zona hazarda.
- Podržava Gaussov model, DEGADIS za guste gasove, BLEVE, požarne scenarije i eksplozije.
- Izlaz: grafičke karte zona hazarda — AEGL-1/2/3, IDLH, LFL i druge relevantne granice.

ALOHA ulazni podaci

- Hemikalija: izbor iz baze sa preko 1000 jedinjenja; SDS parametri se učitavaju automatski.
- Atmosfera: temperatura, pritisak, brzina vetra, stabilnost ili direktna meteorološka merenja.
- Tip ispuštanja: tečnost, gas, cevovod, tank, dvofazno ispuštanje ili oblak prašine.
- Trajanje ispuštanja: kontinualno ili vremenski ograničeno ispuštanje.

Integracija ALOHA sa GIS mapama

- ALOHA + QGIS/ArcGIS: preklapanje zona hazarda na satelitsku mapu postrojenja i okoline.
- Primena: SEVESO hitni plan, obuka vatrogasnih jedinica i planiranje evakuacije.
- Vežba: simulirati ispuštanje Cl_2, izvesti .shp fajl i otvoriti ga u QGIS-u.

Ograničenja ALOHA

- Maksimalna distanca modelovanja je približno 10 km; za dalje domete koristiti AERMOD ili CALPUFF.
- Ne modelira detaljno teren i zgrade; za kompleksan teren koristiti naprednije modele.

L6-4: PHAST softver — industrijski standard za SEVESO

Co-funded by the European Union

PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) — DNV

- Industrijski standard za SEVESO studije bezbednosti u EU i svetu.
- Sadrži modele za UDM disperziju, BLEVE, pool fire, jet fire i eksplozije.

UDM (Unified Dispersion Model) — srce PHAST-a

- Jedinstveni model automatski prelazi između jeta, gustog gasa i Gaussovog režima.
- Korisnik ne mora ručno da bira model; PHAST procenjuje dominantni režim ispuštanja i disperzije.
- Vertikalni profil temperature i gustine je ključan za tačnu simulaciju kriogenih i dvofaznih ispuštanja.

PHAST u SEVESO procesu — tipičan radni tok

- Korak 1: definisati scenario — hemikalija, količina, pritisak, temperatura i geometrija.
- Korak 2: pokrenuti PHAST; softver bira model ispuštanja i disperzije.
- Korak 3: očitati rastojanja za AEGL-1/2/3 ili ERPG-1/2/3.
- Korak 4: uneti rastojanja u QRA matricu i prikazati zone na mapi postrojenja.

Alternativna rešenja

- CAMEO/ALOHA: besplatno rešenje, dovoljno za screening SEVESO analize.
- Python: otvoreni kod za akademske Gaussove i dense-gas modele.
- OpenFOAM + buoyantFoam: CFD za kompleksan teren; besplatan, ali zahteva iskusnog korisnika.

L6: Modeli izvora i disperzije

L6-5 Dvofazni tok i isparavanje iz bazena tečnosti

Dr Milan Protić, Dr Miomir Raos

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L6-5: Dvofazni tok — fizičke osnove i klasifikacija

Co-funded by the European Union

Klasifikacija dvofaznih tokova

- Dvofazni tok nastaje kada tečnost i para koegzistiraju i zajedno utiču kroz sistem.
- Tip 1: dvofazni tok u cevovodu — curenje duž cevovoda sa kondenzacijom ili isparavanjem.
- Tip 2: flash dvofazni izlaz — supergrejana tečnost naglo isparava pri ispuštanju.
- Tip 3: dvofazni dvokomponentni tok — smeša različitih fluida, emulzija ili mulj.

Režimi dvofaznog toka u cevovodu

- Mehurićasti tok: mali gasoviti mehurići raspršeni su u tečnoj fazi.
- Slug tok: alternirajuće zone tečnosti i gasa; može izazvati udare pritiska u cevi.
- Stratifikovani tok: tečnost je dole, gas gore — tipično u horizontalnim cevima.
- Prstenasti tok: film tečnosti uz zid, gas u sredini — pri visokim brzinama strujanja.

Relevantnost za procesnu bezbednost

- Slug tok može uzrokovati nagle oscilacije pritiska i opterećenje starih instalacija.
- Flash dvofazni izlaz formira aerosol koji se često ponaša kao gusti gas.
- Dvofazni tok kroz PRV može znatno promeniti kapacitet ventila; potrebno je posebno dimenzionisanje.

Co-funded by the European Union

Jednofazni i dvofazni izlaz

- Jednofazni gas: izlaz je samo gas; za daleku disperziju često je dovoljan Gaussov model.
- Dvofazni izlaz: supergrejana tečnost naglo prelazi u paru i aerosol; modelovanje je znatno složenije.
- Aerosol: fine kapljice tečnosti, tipično < 100 µm; pri ispuštanju se mogu ponašati slično gasu.
- Aerosol se sporije taloži od krupnih kapljica i može ostati duže u oblaku.

Frakcija koja ostaje kao aerosol i rain-out

$$F_{aer} = 1 - F_v \quad f_{rain} = \max(0, 2\cdot(F_v - 0.5))$$

- Deo kapljica pada na tlo i formira jezero; taj deo se zatim naknadno isparava.
- CCPS aproksimacija: za 0.5 < Fv < 1.0 može se koristiti rain-out frakcija prema gornjoj formuli.
- Za propan na 50 °C: Fv = 0.54, pa približno 8% mase pada na tlo kao rain-out.

Co-funded by the European Union

Modelovanje kombinovanog ispuštanja — PHAST pristup

- Faza 1: flash isparavanje — određivanje F_v, temperature izlaza i gustine oblaka.
- Faza 2: jet sa impulsom ili gravitaciono širenje aerosolnog oblaka.
- Faza 3: prelaz aerosola ka čistom gasnom oblaku; zatim Gaussov ili dense-gas model.

Python — fazna ravnoteža

```
def flash_stanje(T_sud, T_bp, Cp_L, dHvap, rho_L, rho_vap):
    Fv = min(Cp_L * (T_sud - T_bp) / dHvap, 1.0)
    T_iz = T_bp  # temperatura izlaza
    rho_mix = 1 / (Fv/rho_vap + (1-Fv)/rho_L)
    return Fv, T_iz, rho_mix
```

Co-funded by the European Union

Mackay-Matsugu model (1973)

$$\dot{m}_{isp} = 0.0071 \cdot u^{0.78} \cdot A \cdot M \cdot P_{vap} / (R \cdot T_j) \quad [kg/s]$$

- Model pretpostavlja stacionarno isparavanje i približno uniformnu temperaturu bazena tečnosti T_j.
- Primena: stabilne organske tečnosti, npr. benzin, dizel i alkoholi na sobnoj temperaturi.

TNO Yellow Book model za kriogena jezera

- Kriogene tečnosti (LNG, propan, amonijak) imaju temperaturu jezera znatno nižu od okoline.
- Toplota dolazi konvekcijom iz vazduha i provođenjem iz tla.

$$\dot{m}_{isp} = (q_{konv} + q_{cond}) / \Delta H_{vap} \quad [kg/s]$$

$$q_{cond} = \lambda_{tlo} \cdot A \cdot (T_{tlo} - T_j) / \sqrt{(\pi \cdot a \cdot t)}$$

Co-funded by the European Union

Promenljiv bazen tečnosti

$$dA/dt = Q_m(t) / (\rho_L \cdot h_j)$$

- Površina jezera raste tokom ispuštanja, pa i brzina isparavanja raste sa vremenom.
- Stacionarno stanje se postiže tek posle određenog vremena; za kratke incidente treba koristiti nestacionarni model.

Maple — simulacija rasta bazena tečnosti i isparavanja

```
restart:
Q_m := 2.0: rho_L := 500: h_j := 0.01: A0 := 1.0:
dHvap := 426000: h_konv := 10: T_amb := 293: T_j := 231:
dA := t -> Q_m/rho_L/h_j - h_konv*(T_amb-T_j)/dHvap:
A := t -> A0 + int(dA(s), s=0..t):
m_isp := t -> h_konv*A(t)*(T_amb-T_j)/dHvap:
```

L6-5: Disperzija LNG (Liquefied Natural Gas) — poseban slučaj

Co-funded by the European Union

Zašto je LNG posebno rizičan?

- LNG se čuva na −162 °C i približno 1 bar; pri ispuštanju brzo isparava zbog toplote tla i okoline.
- Metan je lakši od vazduha, ali je kriogeni oblak metana u početku hladan i gušći od okolnog vazduha.
- Zato se početni LNG oblak ponaša kao gusti gas i širi se pri tlu.

Tranzicija LNG oblaka

- Faza 1: kriogeni oblak je teži od vazduha i širi se gravitaciono po tlu.
- Faza 2: zagrevanje oblaka; gustina opada i prelazi ka neutralnoj disperziji.
- Faza 3: topli metanski oblak postaje lakši od vazduha i prelazi u uzlazno širenje.

$$T_{neutral} = T_{amb} \cdot M_{CH_4} / M_{air}$$

L6-5: Disperzija LNG (Liquefied Natural Gas) — poseban slučaj

Co-funded by the European Union

LNG nesreće i regulativa

- Cove Point 1979: curenje LNG-a i požar u zgradi pumpe; 1 poginuo.
- Skikda 2004 (Alžir): LNG eksplozija, 27 poginulih — jedna od najtežih LNG nesreća.
- EU Gas Directive 2009/73/EC i EN 1473 definišu zahteve za LNG terminale.

Python — temperatura neutralne gustine

```
R = 8.314; M_CH4 = 0.016; M_air = 0.029
T_amb = 293  # K
T_neutral = T_amb * M_CH4 / M_air
print(f'T neutralne gustine = {T_neutral-273.15:.1f} °C')
```

L6-5: Toksičnost HF (fluorovodonična kiselina) — posebni modeli

Co-funded by the European Union

Zašto je HF izuzetno opasan?

- HF je veoma toksičan: IDLH = 30 ppm; AEGL-3(10 min) ≈ 170 ppm.
- HF para u vlažnom vazduhu može formirati teže oligomere; oblak može biti znatno teži od vazduha.

$(HF)_n$ — oligomerizacija HF u vlažnom vazduhu

- Standardni Gaussov model može potceniti rizik za HF; potrebni su posebni modeli.

Posebni modeli za HF disperziju

- HGSYSTEM (Shell): specijalizovan model za HF; uključuje polimerizaciju i gustu fluidnu fazu.
- PHAST: poseban HF modul sa korelacijama za gustinu oligomerizovanog HF.
- ALOHA: HF model je ograničen; za SEVESO HF analize preporučuje se PHAST ili ekvivalentan alat.

Industrijska primena i SEVESO pragovi

- Rafinerije: HF alkilacija benzinskih frakcija; na lokaciji može biti 100–1000 t HF.
- Metalurgija aluminijuma: HF može nastajati kao nusproizvod pri elektrolizi aluminijuma.
- SEVESO III: oko 5 t HF odgovara gornjem pragu iz Aneksa I i zahteva Studiju bezbednosti.

Mere ublažavanja

- Vodene zavese: raspršena voda apsorbuje HF zbog visoke rastvorljivosti.
- Berm-kontejnment: zadržavanje tečnog HF u nepropusnoj betonskoj bermi.
- Alternativna tehnologija: prelaz sa HF na sumpornu kiselinu (H_2SO_4) u alkilaciji gde je moguće.

L6-5: Primer — kompletan proračun ispuštanja i disperzije propana

Co-funded by the European Union

Scenario

- Cevovod propana, ruptura 50 mm, P = 10 bar, T = 20 °C, u = 3 m/s, PG klasa F.

Korak 1: model izvora — kritični tok

$$P_{sud}/P_{atm} = 10/1.013 = 9.87 > 1.80 \Rightarrow \text{kritični tok}$$

$$A_h = \pi/4 \cdot D^2 = \pi/4 \cdot 0.05^2 = 1.963 \times 10^{-3}\ m^2$$

$$\dot{m} = C_d \cdot A_h \cdot P_{sud} \cdot \sqrt{(\gamma \cdot M/(R \cdot T))} \cdot F_{krit} = 8.1\ kg/s$$

Korak 2: flash isparavanje

- $T_{ključ}$(propana) = −42 °C = 231 K; C_p,L = 2.5 kJ/(kg·K); ΔH_{vap} = 426 kJ/kg.

$$F_v = C_{p,L} \cdot (T_{sud} - T_{ključ}) / \Delta H_{vap} = 0.364$$

$$\dot{m}_{gas} = F_v \cdot \dot{m} = 0.364 \cdot 8.1 = 2.95\ kg/s$$

Korak 3: Gaussova disperzija (PG F, u = 3 m/s)

- DGZ propana = 2.1% ≈ 21000 mg/m³ u vazduhu na 20 °C.

$$C_{osa}(x) = 2.95 \times 10^6 / (\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot 3) = 21000\ mg/m^3$$

- Sa $\sigma_y = 0.04 \cdot x^{0.894}$ i $\sigma_z = 0.016 \cdot x^{0.730}$ dobija se zona zapaljivog oblaka do približno 350 m niz vetar.

Zaključak

- Za ovakve scenarije SEVESO procena mora povezati: izvor, flash frakciju, aerosol/rain-out i disperziju.

L6: Modeli izvora i disperzije

L6-6 Modelovanje posledica: toksičnost i SEVESO

Dr Milan Protić, Dr Miomir Raos

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L6-6: Sistem graničnih vrednosti izloženosti — OEL, IDLH, AEGL, ERPG

Co-funded by the European Union

Hijerarhija graničnih vrednosti izloženosti toksičnim gasovima

- OEL/TWA (Occupational Exposure Limit / Time-Weighted Average): profesionalna izloženost, 8 h/dan.
- STEL (Short-Term Exposure Limit): kratkotrajna izloženost, 15 min — obično 3–5× TWA.
- IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health): koncentracija neposredno opasna po život, NIOSH.

AEGL (Acute Exposure Guideline Levels) — EPA sistem

- AEGL-1: neprijatnost i iritacija — reverzibilni efekti.
- AEGL-2: onesposobljavanje ili teške ireverzibilne povrede — ometena evakuacija.
- AEGL-3: smrtonosna koncentracija — opasnost od smrtnih ishoda pri zadatom vremenu.

ERPG (Emergency Response Planning Guidelines) — AIHA sistem

- ERPG-1: blagi efekti, bez trajnih medicinskih posledica.
- ERPG-2: ozbiljne ireverzibilne povrede ili ometena evakuacija.
- ERPG-3: koncentracija opasna po život za 1 h izloženosti — zona interne akcije hitnih službi.

Primeri za ključne SEVESO materije

- NH_3: TWA = 25 ppm | STEL = 35 ppm | IDLH = 300 ppm | AEGL-3(1 h) = 160 ppm | ERPG-3 = 750 ppm.
- Cl_2: TWA = 0.5 ppm | STEL = 1 ppm | IDLH = 10 ppm | AEGL-3(1 h) = 20 ppm | ERPG-3 = 25 ppm.
- HCl: TWA = 5 ppm | STEL = 5 ppm | IDLH = 50 ppm | AEGL-3(1 h) = 100 ppm | ERPG-3 = 150 ppm.

L6-6: Probit analiza za toksične gasove — kvantitativna procena smrtnosti

Co-funded by the European Union

Opšti oblik probit jednačine

$$\mathrm{Pr} = a + b \times \ln(C^n \times t)$$

gde su a, b i n empirijski parametri za svaki gas.

- C = koncentracija [mg/m³] | t = vreme izloženosti [min].

$$P(\%) = 50 \times (1 + \mathrm{erf}((\mathrm{Pr} - 5)/\sqrt{2})).$$

Probit parametri za ključne toksične gasove (Crowl & Louvar, 2019)

- Amonijak (NH_3): a = −35.9, b = 1.85, n = 2.0.
- Hlor (Cl_2): a = −8.29, b = 0.92, n = 2.75.
- Hlorovodonik (HCl): a = −16.85, b = 2.00, n = 1.0.
- Sumporovodonik (H_2S): a = −31.42, b = 3.008, n = 1.43.

L6-6: Probit analiza za toksične gasove — kvantitativna procena smrtnosti

Co-funded by the European Union

Amonijak — primer proračuna

- C = 500 ppm = 369 mg/m³ | t = 30 min | a = −35.9, b = 1.85, n = 2.0.

$$\Pr = -35.9 + 1.85 \times \ln(369^2 \times 30) = -35.9 + 1.85 \times \ln(4094430).$$

$$\Pr = -35.9 + 1.85 \times 15.22 = -7.74.$$

- Pr = −7.74 → smrtnost ≈ 0% (Pr < 0 znači zanemarljivu smrtnost; oko Pr = 5 je 50%).

Python — probit za čitav opseg koncentracija

```
import numpy as np; from scipy.special import erf
a, b, n = -35.9, 1.85, 2.0  # NH3
C_ppm = np.logspace(1, 4, 200)  # 10 do 10000 ppm
C_mg = C_ppm * 17 / 22.4
Pr = a + b * np.log(C_mg**n * 30)
smrtnost = 50 * (1 + erf((Pr - 5) / np.sqrt(2)))
```

L6-6: Kvantitativna procena rizika (QRA) — osnove

Co-funded by the European Union

Šta je QRA (Quantitative Risk Assessment)?

- Sistematska numerička procena verovatnoće i posledica akcidentnih događaja.
- Rezultat: rizik izražen kao frekvencija povrede ili smrtnosti po godini za određenu lokaciju.

Ključni elementi QRA

- Identifikacija scenarija: šta može da se dogodi? (HAZOP, FMEA, What-If analiza).
- Frekvencija scenarija: koliko često? (istorijski podaci, pouzdanost opreme, fault tree).
- Modelovanje posledica: koje su zone efekta? (L6-3, L6-4, L5-4, L5-5).
- Procena rizika: kombinacija frekvencije i posledice za svaku lokaciju.

F-N dijagram (Frequency–Number of Fatalities)

- x-osa: broj smrtnih ishoda N | y-osa: kumulativna frekvencija F(N), tj. frekvencija događaja sa ≥ N žrtava.
- ALARP princip: iznad gornje linije rizik je neprihvatljiv; ispod donje linije rizik je prihvatljiv.
- UK HSE kriterijumi: individualni rizik 10^{-5}/god za radnike; 10^{-6}/god za javnost.

SEVESO III i QRA

- Član 10 SEVESO III: obavezna procena rizika u Studiji bezbednosti za objekte višeg reda opasnosti.
- QRA izveštaj mora biti podnet nadležnim organima i, u odgovarajućem obimu, dostupan javnosti.
- Python: implementacija jednostavnog F-N dijagrama na osnovu izlaza modela posledica.

L6-6: Stablo događaja (Event Tree) i SEVESO scenariji

Co-funded by the European Union

Stablo događaja (Event Tree Analysis — ETA)

- Polazna tačka: inicijalni događaj (npr. curenje gasa iz cevovoda).
- Svaki čvor u stablu: pitanje Da/Ne — da li se zapali, da li radi ESD, koji je smer vetra?
- Svaka grana ima verovatnoću iz baza podataka ili ekspertske procene.
- Rezultat: lista scenarija sa frekvencijama i vrstama posledica.

Primer: stablo događaja za curenje gasa iz cevovoda

- Inicijalni događaj: curenje gasa ($f_r = 1 \times 10^{-3}$/km/god — CONCAWE baza podataka).
- Grana A: neposredno paljenje (p = 0.20) → jet fire | nema paljenja (p = 0.80).
- Grana B: zakasnelo paljenje (p = 0.30) → VCE/flash fire | nema paljenja (p = 0.70) → toksična disperzija.

Frekvencije posledica

$$\text{Jet fire: } 1\times10^{-3} \times 0.20 = 2\times10^{-4}/\text{km/god.}$$

$$\text{VCE: } 1\times10^{-3} \times 0.80 \times 0.30 = 2.4\times10^{-4}/\text{km/god.}$$

$$\text{Toksična disperzija: } 1\times10^{-3} \times 0.80 \times 0.70 = 5.6\times10^{-4}/\text{km/god.}$$

- Ukupna frekvencija svih posledica = inicijalna frekvencija curenja (kontrola bilansa).

Verovatnoće paljenja iz SFPE Handbook i DNV/OREDA baze podataka

- P(neposredno paljenje): gas 0.10–0.20 | LPG 0.15–0.25 | toksičan gas bez paljenja: 0.
- P(zakasnelo paljenje) zavisi od količine ispuštene materije i prisutnosti izvora paljenja.

L6-6: Individualni i socijalni rizik — prostorna karta rizika

Co-funded by the European Union

Individualni rizik (IR)

- Verovatnoća smrtnosti za osobu koja stalno boravi na datoj lokaciji tokom jedne godine.

$$IR(x,y) = \Sigma_i \, f_i \times P_smrt,i(x,y) \quad [1/godina]$$

- Izolinije IR = const na mapi daju prostornu kartu rizika.
- EU kriterijumi (HSE UK, RIVM Holandija): IR < 10^{-6}/god za stanovništvo u blizini postrojenja.

Socijalni rizik (F-N dijagram)

- Uzima u obzir broj izloženih osoba, ne samo jednu hipotetičku osobu.
- Potreban podatak: raspodela populacije oko postrojenja (popisi, GIS podaci).
- F-N dijagram: kumulativna frekvencija F(N) događaja sa najmanje N žrtava.

L6-6: Individualni i socijalni rizik — prostorna karta rizika

Co-funded by the European Union

ALARP (As Low As Reasonably Practicable) princip

- Zone rizika: neprihvatljivo | ALARP (smanjiti ako je razumno izvodljivo) | prihvatljivo.
- U ALARP zoni troškovi daljeg smanjenja rizika moraju biti proporcionalni smanjenju rizika.
- Matematička granica u UK: IR > 10^{-5}/god = neprihvatljivo bez obzira na troškove.

Python — generisanje prostorne karte IR

```
# Za svaku ćeliju grida (xi, yi):
# IR(xi, yi) = sum(fi * Psm(xi, yi)) za sve scenarije i
# Psm(x, y) = P(smrtnost | C(x, y)) iz probit jednačine
# plt.contourf(X, Y, IR_grid, levels=[1e-7, 1e-6, 1e-5])
```

L6-6: SEVESO III — obaveze i sadržaj Studije bezbednosti

Co-funded by the European Union

Direktiva SEVESO III (2012/18/EU) — pregled obaveza

- Primenjuje se na postrojenja koja rukuju opasnim materijama iznad propisanih pragova.
- Dva praga — niži (Lower Tier) i viši (Upper Tier) — različite obaveze.
- Niži prag: politika sprečavanja većih nesreća (MAPP) i sistem upravljanja bezbednošću.
- Viši prag: Studija bezbednosti (Safety Report) + interni i eksterni plan vanrednih situacija.

Sadržaj Studije bezbednosti (Safety Report)

- Opis postrojenja: procesi, opasne materije, količine, tehnologije, zaposleni.
- Identifikacija većih opasnosti: HAZOP, FMEA, What-If, accident scenarios.
- Procena rizika: consequence analysis (L5+L6), event trees, QRA.
- Planovi za hitne situacije: interni (zaposleni) i eksterni (vatrogasci, civilna zaštita, javnost).
- Mere prevencije i zaštite: tehničke i organizacione barijere.

Uloga modela disperzije u SEVESO izveštaju

- Consequence modeling je obavezan element za svaki identifikovani scenario.
- Softveri prihvaćeni u praksi EU: PHAST, SAFETI (DNV), ALOHA, EFFECTS (TNO), BREEZE i slični alati.
- Model mora biti validan, dokumentovan i primenjen od strane kompetentnog inženjera.

L6-6: Primeri SEVESO nesreća i pouke za disperziono modelovanje

Co-funded by the European Union

Bhopal 1984 — obavezna lekcija za svakog inženjera procesne bezbednosti

- Union Carbide, fabrika pesticida u Bhopalu (Indija): ispuštanje oko 40 t metil-izocijanata (MIC).
- MIC: IDLH = 3 ppm | M = 57 g/mol | $\rho \gg \rho_{vazduha}$ → gusti gas; Gaussov model bi potcenio rizik.
- Uzrok: voda ušla u MIC tank → egzotermna reakcija → porast temperature → sigurnosni ventil se otvorio.
- Posledice: zvanično 3787 smrtnih ishoda; procene dugoročnih smrtnih ishoda su znatno veće.

Zašto su posledice bile toliko katastrofalne?

- Noć: stabilna atmosfera (PG klasa F) — sporo razblaživanje i velika prizemna koncentracija.
- Gusti gas: MIC je približno 2× teži od vazduha — oblak se kretao pri tlu i ulazio u kuće.
- Nije bilo efikasnog plana evakuacije ni pravovremenog upozorenja stanovništva.
- Tehnički kvarovi: skruber, baklja (flare) i rashladni sistem nisu radili kako treba.

Pouke za SEVESO modelovanje

- Za materije sa M ≫ M_vazduha koristiti dense-gas model, a ne samo Gaussov model.
- Noćni scenariji (PG F) često daju najgori slučaj i moraju biti uključeni u SEVESO analizu.
- Urbano okruženje fabrike zahteva posebno razmatranje, jer se stanovništvo ne može brzo evakuisati.
- SEVESO III zahteva i eksterni plan koji uključuje lokalno stanovništvo.

L6: Modeli izvora i disperzije

L6-7 Softverski alati i laboratorijske vežbe

Dr Milan Protić, Dr Miomir Raos

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L6-7: Laboratorijska vežba — Gaussov model sa Pythonom

Co-funded by the European Union

Cilj vežbe: implementirati kompletan Gaussov model i generisati SEVESO mapu zona

Zadatak 1: Implementirati Gaussov model za kontinualni izvor

Koristiti NumPy i SciPy za rešavanje numeričkih problema

Implementirati P-G korelacije za svih 6 klasa stabilnosti (A do F)

Plotovati $C_{osa}(x)$ za sve klase na jednom grafikonu (log-log skala)

Zadatak 2: 2D mapa izokoncentracija za SEVESO scenario

Izabrani gas: HCl, Q = 0.1 kg/s, H = 0 m, u = 2 m/s, PG klasa F

Generisati meshgrid (x: 0–2000 m, y: −500 do 500 m)

Plotovati contourf sa nivoima AEGL-1 (1.8 ppm), AEGL-2 (22 ppm), AEGL-3 (100 ppm)

Zadatak 3: Naći rastojanje do IDLH za različite Q

Niz Q: 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 5.0 kg/s

Za svaki Q: naći rastojanje do IDLH koristeći scipy.optimize.brentq

Plotovati rastojanje do IDLH u funkciji Q na log-log skali i izračunati eksponent (očekivano približno $Q^{0.5}$)

Izlaz vežbe

Python skripta (gauss_SEVESO.py) + 3 grafika u PDF formatu + kratak izveštaj (1 strana)

Predati kao ZIP arhivu na Moodle do sledećeg časa

L6-7: Vežba — Modelovanje ispuštanja pomoću ALOHA softvera

Co-funded by the European Union

ALOHA preuzimanje i instalacija

Besplatan softver: https://www.epa.gov/cameo/aloha-software — Windows/Mac/Linux

Baza hemikalija > 1000 jedinjenja sa SDS parametrima | Podrška za AEGL i ERPG nivoe

Vežba: NH_3 ispuštanje iz rashladnog sistema na industrijskom postrojenju

Scenario: tanka cev DN 25 mm pukla u rashladnom sistemu | P = 15 bar | T = 30 °C | Q = ?

Korak A: Uneti u ALOHA → Ammonia → Pipe leak → D = 25 mm, P = 15 bar, T = 30 °C

Korak B: ALOHA automatski proračunava $\dot{m}$ (flash model)

Korak C: Uneti meteorološke podatke: u = 3 m/s, T_{amb} = 25 °C, PG klasa D (dnevni scenario)

Korak D: Odabrati AEGL-3 kao prikaz zone hazarda — dobiti rastojanje zone

Korak E: Izvesti rezultate kao .txt izveštaj i KMZ fajl za Google Earth

Ponoviti sa PG klasom F — uporediti zone hazarda klase D i klase F

Očekivano: zona klase F je 2–3× veća od zone klase D — dokumentovati razliku

Napraviti tabelu: Q [kg/s], klasa, AEGL-1 [m], AEGL-2 [m], AEGL-3 [m]

Diskusija

Proceniti koji deo postrojenja može biti ugrožen i preporučiti mere

Postoji li stambena zona ili javni put u radijusu AEGL-2?

Koji su putevi evakuacije bezbedni u zavisnosti od smera vetra?

L6-7: Vežba — Britter-McQuaid model u Pythonu

Co-funded by the European Union

Zadatak: Modelovati ispuštanje Cl_2 (1 kg/s) i uporediti Gaussov i BM model

```
import numpy as np; import matplotlib.pyplot as plt
# Parametri Cl2:
rho_Cl2 = 3.17; rho_air = 1.2; Q_m = 1.0; u = 3.0
g0 = 9.81*(rho_Cl2-rho_air)/rho_air  # redukovano ubrzanje
Vdot = Q_m/rho_Cl2  # zapreminski protok [m^3/s]
q = Vdot * (rho_Cl2/rho_air)  # [m^3/s]
x_arr = np.logspace(1.5, 4, 200)  # 30 m do 10 km
# Britter-McQuaid korelacija:
def BM_C(x, Q_m, q, g0, u, rho_Cl2):
    Xstar = x / (q * g0 / u**3)**(1/3)
    Cstar = min(1.0, 0.3 * Xstar**(-0.65))  # aproksimacija
    return Cstar * Q_m / (q * u**0.5) / rho_Cl2 * 1e6  # ppm

C_BM = [BM_C(x, Q_m, q, g0, u, rho_Cl2) for x in x_arr]
C_Gauss = [gauss_osa(x, Q_m*1e6, 0, u, "D") for x in x_arr]  # iz prethodnih vežbi
plt.semilogx(x_arr, C_BM, "r-", label="Britter-McQuaid")
plt.semilogx(x_arr, C_Gauss, "b--", label="Gaussov (klasa D)")
plt.axhline(10, color="k", label="IDLH Cl2")
plt.legend(); plt.xlabel("x [m]"); plt.ylabel("C [ppm]")
```

L6-7: Vežba — Integracija modela izvora i disperzije

Co-funded by the European Union

Kompletan lanac modela: od ispuštanja do SEVESO zone

Ovo je integrativni zadatak koji povezuje L6-1 do L6-6 u jedan Python program

Korak 1 — Model izvora:

Koristiti klasu IzvorIspustanja (L6-1 vežba) za proračun $\dot{m}$

Uneti: hemikaliju, veličinu otvora, pritisak, temperaturu i nivo tečnosti

Izlaz: $\dot{m}$ [kg/s], temperatura oblaka [K], frakcija flash-isparavanja

Korak 2 — Meteorološki podaci:

Učitati P-G klasu, brzinu vetra i visinu ispuštanja

Izračunati σ_y i σ_z korelacije za izabranu klasu

Korak 3 — Model disperzije:

Primeniti Gaussov model na $\dot{m}$ iz koraka 1

Generisati C(x) krivu duž ose pluma

Korak 4 — Posledice:

Naći rastojanja za AEGL-1, AEGL-2, AEGL-3 i IDLH

Generisati 2D mapu izokoncentracija i snimiti je u PNG formatu

Izračunati probit smrtnost na ključnim rastojanjima

Zadatak za studente: primeniti postupak na scenario po izboru (NH_3, Cl_2, HCl, SO_2, H_2S)

Predati: Python kod + grafike + tabela SEVESO zona + zaključak na 1 strani

L6-7: Pregled komercijalnih i regulatornih softverskih alata

Co-funded by the European Union

Komercijalni softveri za SEVESO analize

PHAST (DNV): integrisani model izvora + disperzija + požar + eksplozija. Cena: približno 15.000 EUR/god

SAFETI (DNV): PHAST + QRA modul (F-N dijagram, IR mapa). Isti proizvođač

BREEZE PHAST (Trinity Consultants): sličan PHAST-u, dominantno američko tržište

EFFECTS/RISKAT (TNO): holandski standard, korišćen u Beneluksu i skandinavskim SEVESO analizama

Besplatni / akademski alati

ALOHA (NOAA/EPA): najbolji za brze hitne procene | Ograničenje: 10 km, ravno tlo

AERMOD (EPA): regulatorni model za hronične emisije | Besplatan, široko korišćen

CALPUFF (EPA): za veća rastojanja (> 50 km), složen teren i meteorološki mozaik

OpenFOAM: CFD za kompleksni teren i zgrade | Besplatan, ali zahteva eksperta i HPC

Python biblioteke

AtmosphericDispersion (PyPI): Gaussov model, Pasquill-Gifford klase | pip install atmdis

puff: Gaussov puff model za instantne izvore | pip install puff

OpenDrift: Lagranžev čestični model za hemijska i naftna ispuštanja u more i vazduh

Izbor softvera za SEVESO u Srbiji

Regulativa RS (Zakon o hemikalijama, Sl. glasnik RS 36/2009): ne propisuje specifičan softver

Preporuka struke: ALOHA za screening, PHAST za detaljne analize | EU inspekcija prihvata oba pristupa