Dependency, Uncertainty, and Importance Analysis

การวิเคราะห์ความเชื่อมโยง ความไม่แน่นอน และความสำคัญ

ดร.ชลกานต์ เอี่ยมสำอางค์

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

ความเสียหายที่เชื่อมโยง (Dependent Failure)

เหตุการณ์สองเหตุการณ์จะเชื่อมโยงกัน (dependent) ก็ต่อเมื่อ

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A)\Pr(B|A)$$

ถ้า $\Pr(B|A) = \Pr(B) \rightarrow A \cap B$ คือ A และ B เป็นอิสระจากกัน ดังนั้น

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A)\Pr(B)$$

แต่ถ้าไม่เป็นอิสระ จะต้องมี correction factor

$$\boxed{\Pr(A \cap B) = \Pr(A)\Pr(B) + X_{AB}}$$

ที่

X_{AB} is the correction factor

A, B are not independent

การแบ่งประเภทของ Dependent Failure

ความเกี่ยวข้องภายใน (Internal dependencies) เช่น

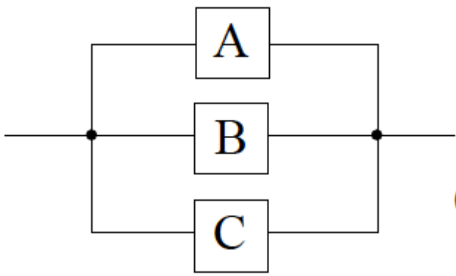
1. Challenge
2. เชื่อมโยงระหว่างระบบ
3. เชื่อมโยงระหว่างส่วนประกอบ/อุปกรณ์

ความเกี่ยวข้องภายนอก (External dependencies) เช่น

1. น้ำท่วม
2. ความชื้น
3. ความร้อน
4. ไฟไหม

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Dependent Failure

Example: ระบบแบบต้องใช้ได้สองในสาม (2-out-of-3 system) คือ ถ้าส่วนประกอบสองชิ้นเสียหาย ระบบจะเสียหาย จะได้ cut-sets ดังนี้



$$C_1 = A \cap B,\ C_2 = A \cap C,\quad C_3 = B \cap C,\quad C_4 = A \cap B \cap C$$

Cut-sets ที่เป็นอิสระจากกัน (mutually exclusive) จะเป็นดังนี้

$$C_1 = A \cap B \cap \overline{C}$$
$$C_2 = A \cap \overline{B} \cap C$$
$$C_3 = \overline{A} \cap B \cap C$$
$$C_4 = A \cap B \cap C$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Dependent Failure

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\Pr(\text{system failure}) &= \Pr(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) \\ &= \Pr(C_1) + \Pr(C_2) + \Pr(C_3) + \Pr(C_4)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_1 &= A \cap B \cap \overline{C} = [A_I \cap B_I \cap \overline{C}] \cup [X_{AB\overline{C}}] \\ C_2 &= A \cap \overline{B} \cap C = [A_I \cap \overline{B} \cap C_I] \cup [X_{A\overline{B}C}] \\ C_3 &= \overline{A} \cap B \cap C = [\overline{A} \cap B_I \cap C_I] \cup [X_{\overline{A}BC}] \\ C_4 &= A \cap B \cap C = [A_I \cap B_I \cap C_I] \cup [X_{ABC}]\end{aligned}$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Dependent Failure

$$\Pr(F) = \left[\overbrace{\Pr(A_I)}^{Q_1}\cdot\overbrace{\Pr(B_I)}^{Q_1} + \overbrace{\Pr(X_{AB})}^{Q_2}\right]\overbrace{\Pr(\overline{C})}^{1 - Q_1} + \left[\Pr(A_I)\cdot\Pr(C_I) + \Pr(X_{AC})\right]\Pr(\overline{B}) +$$

$$\left[\Pr(B_I)\cdot\Pr(C_I) + \Pr(X_{BC})\right]\Pr(\overline{A}) + \left[\underbrace{\Pr(A_I)}_{Q_1}\cdot\underbrace{\Pr(B_I)}_{Q_1}\cdot\underbrace{\Pr(C_I)}_{Q_1} + \underbrace{\Pr(X_{ABC})}_{Q_3}\right]$$

$$= 3\left(Q_1^2 + Q_2\right)\left(1 - Q_1\right) + \left(Q_1^3 + Q_3\right)$$

$$= 3\left(Q_1^2 - Q_1^3 + Q_2 - Q_1Q_2\right) + \left(Q_1^3 + Q_3\right)$$

$$= 3Q_1^2 - 2Q_1^3 + 3Q_2 - 3Q_1Q_2 + Q_3$$

โดยสันนิษฐานว่าส่วนประกอบทั้งสามตัวเหมือนกัน (identical) และ Q_1 คือ independent failure Q_2 คือ dependent failure สำหรับสองตัว Q_3 คือ dependent failure สำหรับสามตัว

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Dependent Failure

$$Q_1 = \Pr(A_I) = \Pr(B_I) = \Pr(C_I)$$

$$\Pr(\bar{C}) \cong 1 - \Pr(C_I) = 1 - Q_1$$

$$Q_2 = \Pr(X_{AB}) = \Pr(X_{BC}) = \Pr(X_{AC})$$

$$Q_3 = \Pr(X_{ABC})$$

$$\Pr(F) = 3Q_1^2(1 - Q_1) + 3Q_2(1 - Q_1) + Q_1^3 + Q_3$$

ถ้าให้ $Q_1 \leq 0.01$ จะประมาณได้ว่า $(1 - Q_1) \approx 1$ และ $Q_3 \approx 0$

$$\boxed{\Pr(F) \approx 3Q_1^2 + 3Q_2 + Q_3}$$

Beta Factor Model

สำหรับระบบที่มีส่วนประกอบ m ชิ้น และความน่าจะเป็นที่มีเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับส่วนประกอบ k ชิ้น คือ Q_k โดย $1 \leq k \leq m$

$$Q_k = \begin{bmatrix} (1 - \beta)Q_t & \text{for } k = 1 \\ 0 & \text{for } k = 2 \text{ to } m - 1 \\ \beta Q_t & \text{for } k = m \end{bmatrix}$$

m คือ จำนวนส่วนประกอบที่มี dependent failure

Beta Factor Model

β-factor model,

$$\beta = \frac{\lambda_C}{\lambda_C + \lambda_I}$$

$$n_c + n_I = n_t,$$

$$\lambda_c + \lambda_I = \lambda_t$$

$$\hat{\beta} = \frac{\frac{n_C}{T}}{\frac{n_C}{T} + \frac{n_I}{T}} = \frac{n_C}{\underbrace{n_I + n_C}_{n_t}} = \frac{\lambda_C}{\underbrace{\lambda_C + \lambda_I}_{\lambda_t}}$$

c = ความเสียหายจากเหตุเดียวกัน (common cause)

n_c = จำนวนส่วนประกอบที่เสียจาก common cause

n_i = จำนวนส่วนประกอบที่เสียโดยอิสระ (independent)

λ_c = อัตราความเสียหายจาก common cause

λ_I = อัตราความเสียหายจาก independent failure

λ_t = อัตราความเสียหายทั้งหมด

ตัวอย่าง Beta Factor Model

Example: $n_c = 1, \quad n_I = 9, \quad n_{t}, = 10, \text{ and } Q_t = 0.01$

$N = 1000$

$$\hat{\beta} = \frac{n_C}{n_t} = 0.1$$

คือ 10% ของความเสียหายเป็นแบบ dependent ดังนั้น

$$Q_1 = (1 - 0.1)\, Q_t = 0.9\, Q_t = 0.9(0.01) = 0.009$$
$$Q_2 = 0$$
$$Q_3 = 0.1\, Q_t = 0.1 \times 0.01 = 0.001$$

$$Q_t = Q_c + Q_I,$$

$$Q_1 = 0.009, \quad Q_2 = 0, \quad Q_3 = 0.001.$$

ตัวอย่าง Beta Factor Model

ดังนั้น จากตัวอย่าง 2-out-of-3 system

$$
\begin{aligned}
\Pr(F) &= 3(0.009)^2(1 - 0.009) + 3(0)(1 - 0.009) + (0.009)^3 + 0.001 \\
&= 3(0.009)^2(0.991) + 0.001 \\
&= 2.4E-4 + 1E-3 \\
&= 1.24E-3
\end{aligned}
$$

จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้ dependent failure มีผลมากกว่า independent failures

Multi-Greek Letter (MGL) Model

$$Q_k = \frac{1}{\binom{m-1}{k-1}}(1 - \zeta_{k+1})\left(\prod_{i=1}^{k}\zeta_i\right)Q_t \qquad k = 1, 2, 3, \ldots, m$$

$$\binom{m-1}{k-1} = {}^{k-1}_{m-1}C$$

$$\zeta_1 = 1$$

$$\zeta_2 = \beta$$

$$\zeta_3 = \gamma$$

$$\vdots$$

$$\zeta_{m+1} = 0$$

สำหรับ 2-out-of 3 system

$$Q_1 = \frac{1}{\binom{2}{0}}(1 - \zeta_2)\left(\prod_{i=1}^{1}\zeta_i\right)Q_t = 1(1 - \beta)Q_t = \underline{(1 - \beta)Q_t}$$

$$Q_2 = \frac{1}{\binom{2}{1}}(1 - \gamma)\beta Q_t = \underline{\frac{1}{2}(1 - \gamma)\beta Q_t}$$

$$Q_3 = \frac{1}{\binom{2}{2}}(1 - 0)(\beta\gamma Q_t) = \underline{\beta\gamma Q_t}$$

$$\Pr(F) = 3Q_1^2 + 3Q_2 + Q_3$$

ตัวอย่าง Multi-Greek Letter (MGL) Model

Example:

$$\beta = 0.1, \quad \gamma = 0.05, \text{ and } Q_t = 0.01$$

$$Q_1 = 0.009$$
$$Q_2 = 0.000225$$
$$Q_3 = 0.00005$$

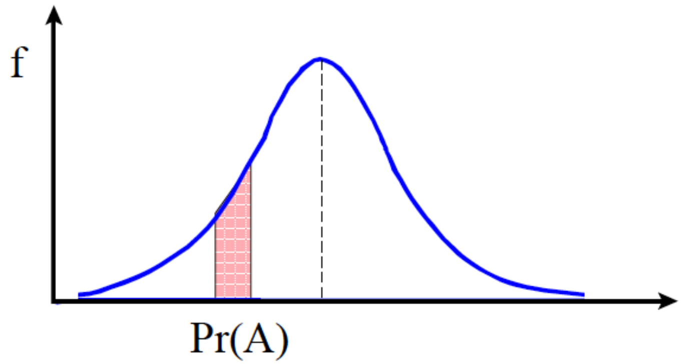
$$\Pr(F) \cong 3Q_1^2 + 3Q_2 + Q_3$$

$$\Pr(F) \cong 3(0.0009)^2 + 3(0.000225) + 0.00005$$

$$\Pr(F) \cong 9.68 \times 10^{-4}$$

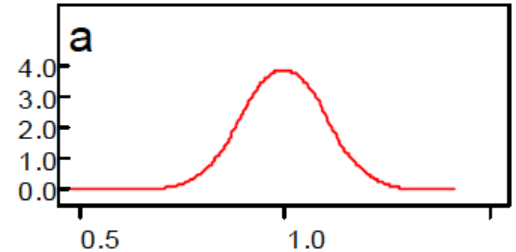
การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty)

Uncertainty คือ ความไม่แน่นอนของค่าความน่าจะเป็น Pr(A) ต้องมีการวิเคราะห์ว่า ถ้าความน่าจะเป็นของ A มีความไม่แน่นอน แล้วความไม่แน่นอนของระบบจะมีค่าเท่าไหร่



$$\mu_a = 1.0$$

$$\sigma_a = 0.1$$



สำหรับ normal distribution

V_X = coefficient of variation

$$V_x = \frac{S}{\overline{X}}$$

$S \rightarrow$ standard deviation

$\overline{X} \rightarrow$ mean

ประเภทของ Uncertainty

Uncertainty แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

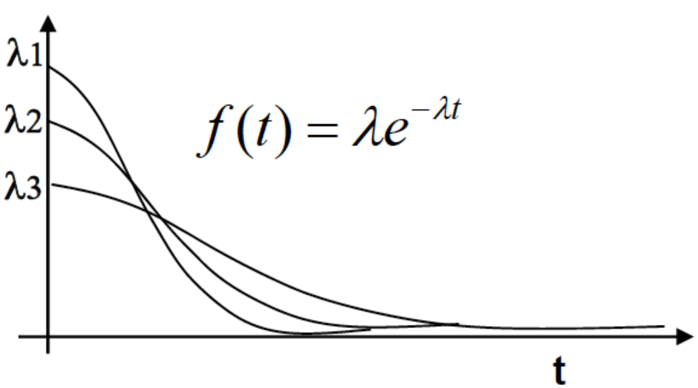
1. ความไม่แน่นอนของตัวแปร (Parameter Uncertainty)
2. ความไม่แน่นอนของโมเดล (Model Uncertainty)
3. ความไม่แน่นอนของความสมบูรณ์ (Completeness Uncertainty)

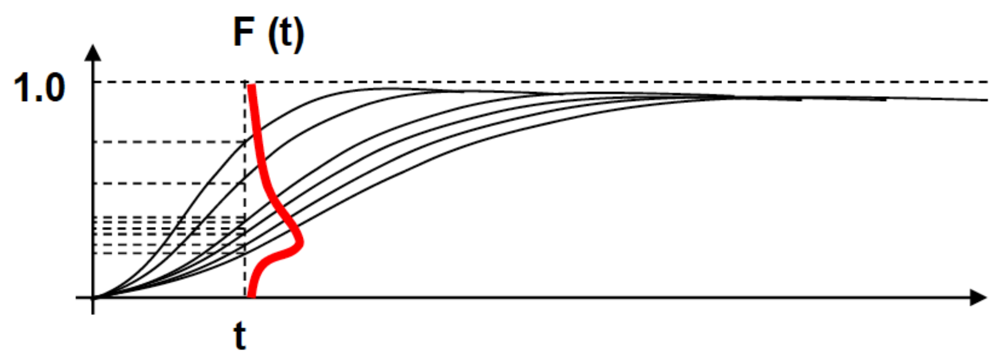
เหตุของ Uncertainty

สำหรับ exponential distribution

$$\Pr(F) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

ถ้า parameter λ มีความไม่แน่นอน แสดงว่า โมเดลที่ใช้มี uncertainty

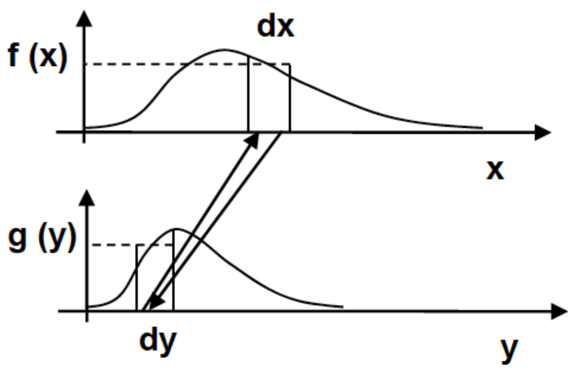




ความเชื่อมโยงของ Uncertainty

ถ้าให้ x มีการแจกแจงเป็น f(x) และ y = y(x)

f(x) และ g(y) เชื่อมโยงกันโดย



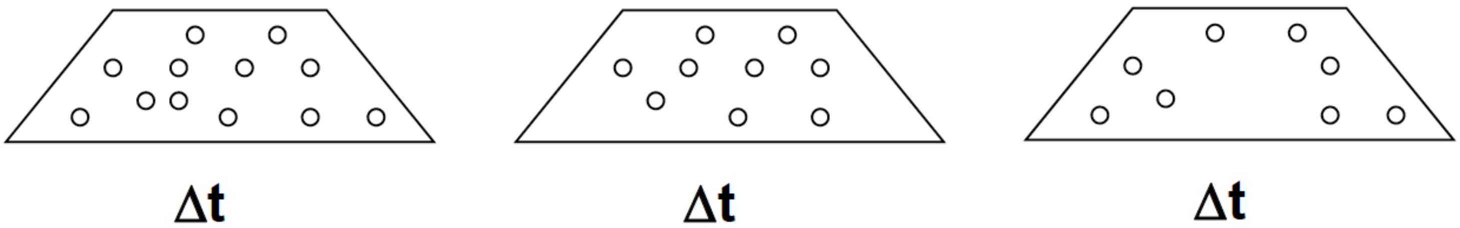
$$f(x)dx = g(y)dy \quad \Rightarrow \quad f(x) = g(y)\frac{dy}{dx}$$

ถ้าการแจกแจงของ x เป็นแบบ lognormal การแจกแจงของ y=ln(x) จะเป็นแบบ normal

$$g(y) = \frac{1}{y\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)^2} \qquad f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

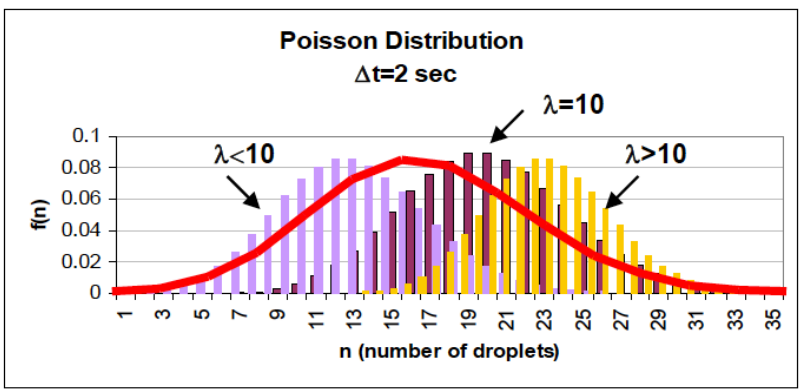
ตัวอย่างของ Uncertainty

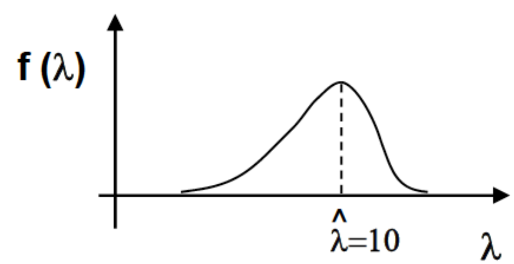
ความน่าจะเป็นของจำนวนหยดน้ำบนกระจกหน้ารถในช่วง 2 วินาทีเป็นเท่าไหร่



Poisson Distribution with rate of occurrence λ (droplets/second)

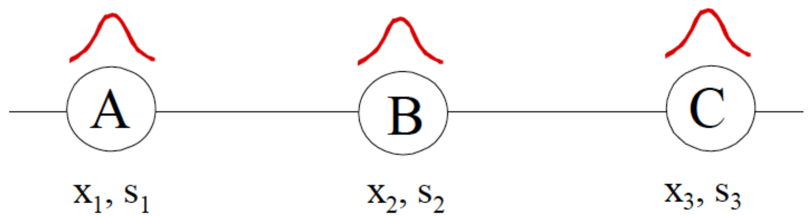
$$f(n) = (\lambda \Delta t)^n \frac{e^{-(\lambda \Delta t)}}{n!}$$





ตัวอย่างของ Uncertainty

Example:



$$\hat{x}_1 = 1E\text{-}2 \quad \hat{x}_2 = 1E\text{-}2 \quad \hat{x}_3 = 1E\text{-}2$$

$$s_1 = 1E\text{-}3 \quad s_2 = 1E\text{-}3 \quad s_3 = 1E\text{-}3 \qquad \text{coefficient of variation} = 0.1$$

$$F = A + B + C$$

$$\Pr(F) = \Pr(A) + \Pr(B) + \Pr(C)$$

$$Y = x_1 + x_2 + x_3 \qquad \leftarrow \text{rare-event approximation}$$

$$\hat{Y} = \hat{x}_1 + \hat{x}_2 + \hat{x}_3$$

$$= 1E\text{-}2 + 1E\text{-}2 + 1E\text{-}2$$

$$= 3E\text{-}2$$

For non-rare event

$$\Pr(F) = \Pr(A) + \Pr(B) + \Pr(C) - \Pr(A \cdot B) - \Pr(A \cdot C) - \Pr(B \cdot C) + \Pr(A \cdot B \cdot C)$$

$$\Pr(F) = Y = x_1 + x_2 + x_3 - x_1 \cdot x_2 - x_1 \cdot x_3 - x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

ตัวอย่างของ Uncertainty

$$s_Y^2 = \sum_{i=1}^{3} \operatorname{var}(x_i) \left[\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right]^2_{x_i = \hat{x}_i}$$

$$= \operatorname{var}(x_1)[1]^2 + \operatorname{var}(x_2)[1]^2 + \operatorname{var}(x_3)[1]^2$$

$$= s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$$

$$= 3(1E-3)^2 = \underline{3E-6}$$

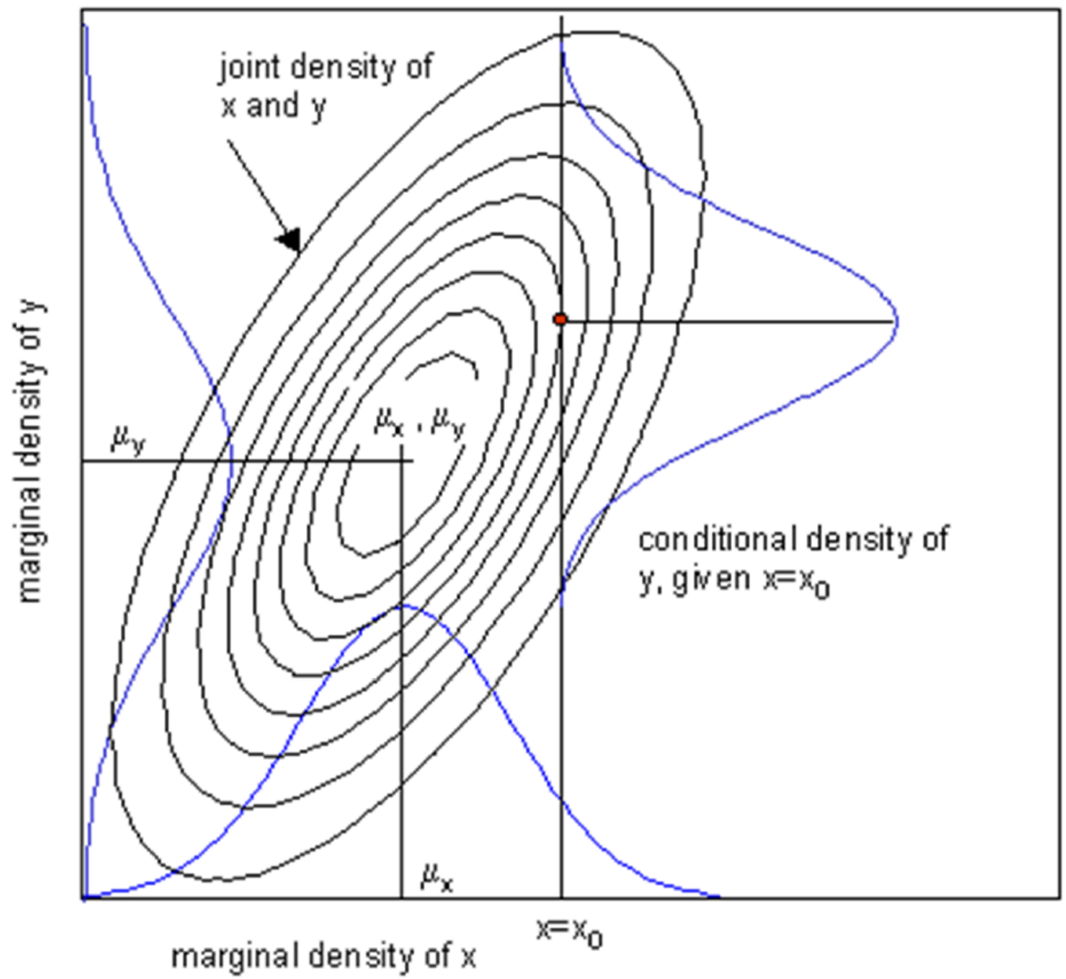
$$s_Y = \sqrt{3}\,(1E-3) = \underline{1.7E-3}$$

therefore,

$$V_{x_i} = \frac{1E-3}{1E-2} = 0.1$$

$$V_F = \frac{1.7E-3}{3E-2} = \underline{5.77E-2}$$

Uncertainty ของ Joint Distribution



การวิเคราะห์ความสำคัญ (Importance)

ในการออกแบบระบบและ จะมีส่วนประกอบของระบบบางส่วนที่มีความสำคัญกว่าส่วนประกอบอื่น เช่น ถ้าส่วนประกอบนั้นเสียไปจะมีผลต่อความน่าจะเป็นที่จะเสียหายของระบบมากกว่า

วิธีการจัดลำดับความสำคัญมีดังนี้

- Birnbaum
- Criticality
- Fussell-Vesely
- Risk Reduction Worth
- Risk Achievement Worth

Birnbaum Measures of Importance

Birnbaum เป็นการวัดความสำคัญในด้านความสำเร็จ

$$I_i^B(t) = \frac{\partial R_s[R(t)]}{\partial R_i(t)},$$

โดย $R_s[R(t)]$ คือ reliability ของระบบที่เป็นฟังก์ชันของ reliability ของแต่ละส่วนประกอบ $R_i(t)$

ถ้า $I_i^B(t)$ สูง แสดงว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของ reliability ของส่วนประกอบนี้นิดหน่อย จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของ reliability ของระบบมาก

Birnbaum Measures of Importance

ถ้าส่วนประกอบเป็นอิสระจากกัน (independent)

$$I_i^B(t) = R_s\left[R(t) \middle| R_i(t) = 1\right] - R_s\left[R(t) \middle| R_i(t) = 0\right],$$

โดยที่ $R_s[R(t) \mid R_i(t) = 1]$ และ $R_s[R(t) \mid R_i(t) = 0]$ คือ reliability ของระบบเมื่อกำหนดให้ reliability ของส่วนประกอบเป็น 1 และ 0

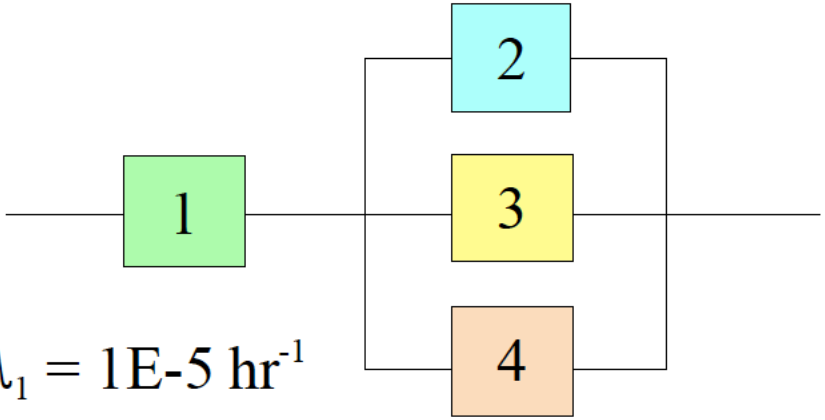
ในทางกลับกัน Birnbaum สามารถเขียนในรูปของ unavailability

$$I_i^B(t) = \frac{\partial F_s[Q(t)]}{\partial Q_i(t)} = F_s\left[Q(t) \middle| Q_i(t) = 1\right] - F_s\left[Q(t) \middle| Q_i(t) = 0\right].$$

ตัวอย่าง Birnbaum Measures of Importance

Example:

ให้คำนวณ Birnbaum importance ของส่วนประกอบ ที่ t = 720 ชั่วโมง โดยให้ใช้ exponential time to failure



$\lambda_1 = 1E\text{-}5\ hr^{-1}$

$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1E\text{-}4\ hr^{-1}$

ตัวอย่าง Birnbaum Measures of Importance

$$R_1(t = 720) = 0.993 \text{ , } R_2(t = 720) = R_3(t = 720) = R_4(t = 720) = 0.9305$$

The reliability function of the system is

$$R_s[R(t)] = R_1(t) \cdot \{1 - [1 - R_2(t)][1 - R_3(t)][1 - R_4(t)]\} = 0.9927$$

Therefore,

$$I_1^B(t) = R_s[R(t) \mid R_1(t) = 1] - R_s[R(t) \mid R_1(t) = 0],$$

$$I_1^B(t) = 1 - [1 - R_2(t)][1 - R_3(t)]\ [1 - R_4(t)],$$

ตัวอย่าง Birnbaum Measures of Importance

ดังนั้น

$$I_1^B(t = 720) \approx 0.9997,$$

$$I_2^B(t) = R_1(t)\{[1- R_3(t)][1-R_4(t)]\},$$

$$I_2^B(t = 720) \approx 0.005.$$

$$I_3^B(t = 720) = I_4^B(t = 720) \approx 0.005.$$

จะเห็นว่าถ้าพัฒนาส่วนประกอบที่ 1 ให้ดีขึ้น จะมีผลต่อการเพิ่ม reliability ของระบบ ได้มากกว่าการพัฒนาส่วนประกอบที่ 2 3 และ 4 มาก ดังนั้นส่วนประกอบที่ 1 มีความสำคัญ (importance) มากกว่า

Criticality Importance

Birnbaum importance ไม่ได้เป็นฟังก์ชันของ reliability ของส่วนประกอบนั้น จะเห็นว่าการพัฒนาส่วนประกอบที่มี reliability สูงอยู่แล้ว จะทำได้ยากกว่าการพัฒนาส่วนประกอบที่มี reliability ต่ำ

$$I_i^{CR}(t) = \frac{\partial R_s[R(t)]}{\partial R_i(t)} \times \frac{R_i(t)}{R_s[R(t)]},$$

$$I_i^{CR}(t) = I_i^{B}(t) \times \frac{R_i(t)}{R_s[R(t)]},$$

$$I_i^{CB}(t) = I_i^{B}(t) \times \frac{Q_i(t)}{F_s[Q(t)]}.$$

Fussell-Vesely Importance

ในกรณีที่ส่วนประกอบ i มีผลต่อ reliability ของระบบ แต่ไม่ถึงกับ critical สามารถใช้ Fussell-Vesely importance

$$I_i^{FV}(t) = \frac{R_i[R(t)]}{R_s[R(t)]},$$

และในรูปแบบของ unrealibility

$$I_i^{FV}(t) = \frac{F_i[Q(t)]}{F_s[Q(t)]},$$

Risk Reduction Worth Importance

Risk Reduction Worth (RRW) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของ unreliability ในกรณีที่ unavailability ของ ส่วนประกอบนั้นเป็น 0 คือ การสันนิษฐานว่าส่วนประกอบนั้นไม่มีทางเสีย

เปรียบเทียบเป็นสัดส่วน

$$I_i^{RRW} = \frac{F_s\left[Q(t)\right]}{F_s\left[Q(t) \middle| Q_i(t) = 0\right]},$$

เปรียบเทียบความแตกต่าง

$$I_i^{RRW} = F_s\left[Q(t)\right] - F_s\left[Q(t) \middle| Q_i(t) = 0\right],$$

Risk Achievement Worth Importance

Risk Achievement Worth (RRW) เป็นการวัดความสำคัญที่ตรงกันข้ามกับ Risk Reduction Worth โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของ unreliability ในกรณีที่ unavailability ของ ส่วนประกอบนั้นเป็น 1 คือ การสันนิษฐานว่าส่วนประกอบนั้นเสีย

เปรียบเทียบเป็นสัดส่วน

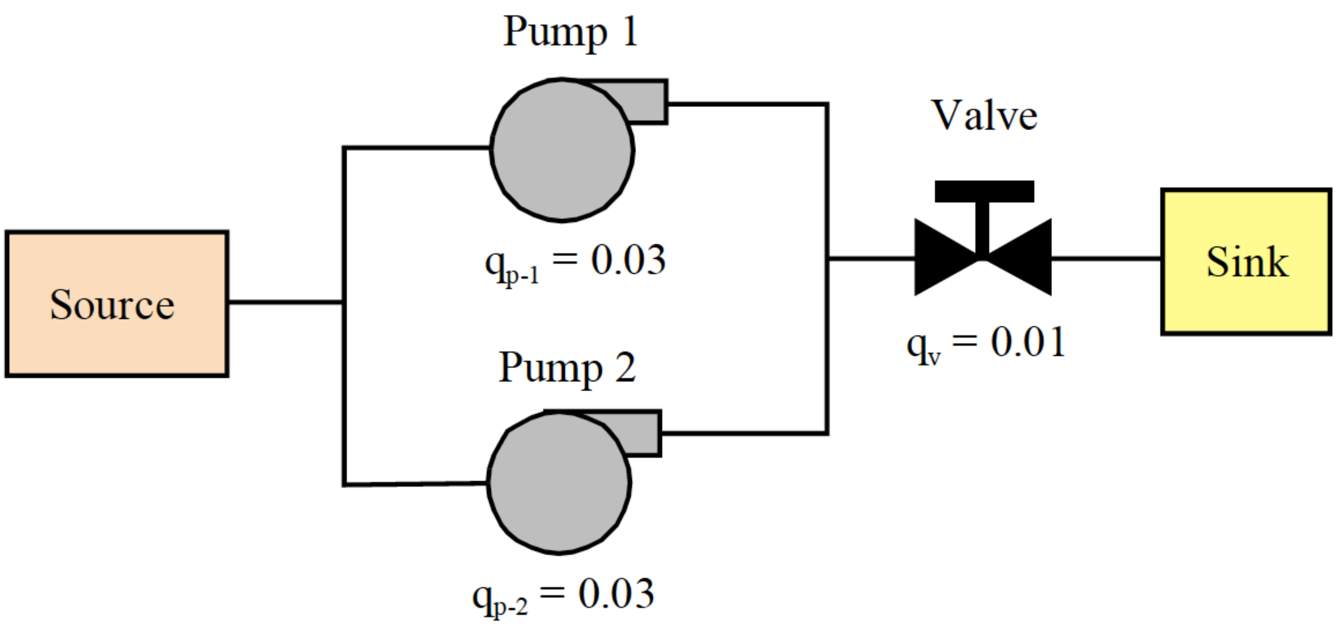
$$I_i^{RAW} = \frac{F_s\left[Q(t) \middle| Q_i(t) = 1\right]}{F_s\left[Q(t)\right]},$$

เปรียบเทียบความแตกต่าง

$$I_i^{RAW} = F_s\left[Q(t) \middle| Q_i(t) = 1\right] - F_s\left[Q(t)\right],$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Importance Measures

Example: จากระบบปั๊มน้ำตามรูปข้างล่าง จงหา Birnbaum, Criticality, Fussell-Vesely, RRW, RAW importance measures ของ valve (V) pump 1 (P-1) และ pump 2 (P-2) ทั้งแบบ reliability และ unrealiability



ตัวอย่างการวิเคราะห์ Importance Measures

Component reliability:

$$R_{P-1} = R_{P-2} = 0.97, \quad R_v = 0.99.$$

System reliability function:

$$R_s[R(t)] = R_v \cdot [R_{P-1} + R_{P-2} - R_{P-1} \times R_{P-2}] = 0.989.$$

Using the rare event approximation:

$$F_s[Q(t)] = Q_{P-1} \times Q_{P-2} + Q_v = 0.011.$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Importance Measures

1) **Birnbaum's Importance**:

$$I_v^B = R_{p-1} + R_{p-2} - R_{p-1} \times R_{p-2} \approx 1,$$

$$I_{p-1}^B = R_v - R_v \times R_{p-2} \approx 0.03,$$

$$I_{p-2}^B = R_v - R_v \times R_{p-1} \approx 0.03.$$

Using the unreliability function:

$$I_v^B \approx 1,$$

$$I_{p-1}^B = Q_{p-2} \approx 0.03,$$

$$I_{p-2}^B = Q_{p-1} \approx 0.03.$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Importance Measures

2) **Criticality Importance**:

$$I_{v}^{CR} = 1 \times \frac{0.99}{0.989} \approx 1,$$

$$I_{p-1}^{CR} = I_{p-2}^{CR} = 0.03 \times \frac{0.97}{0.989} \approx 0.029.$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Importance Measures

3) **Fussell-Vesely Importance**:

$$I_i^{FV}(t) = \frac{R_i[R(t)]}{R_s[R(t)]},$$

$$R_v[R(t)] = R_s[R(t)] \approx 0.989$$

$$R_{p-1}[R(t)] = R_v \times [R_{p-1} - R_{p-1} \times R_{p-2}] \approx 0.029,$$

$$R_{p-2}[R(t)] = R_v \times [R_{p-2} - R_{p-1} \times R_{p-2}] \approx 0.029,$$

$$I_v^{FV} = \frac{0.989}{0.989} = 1,$$

$$I_{p-1}^{FV} = I_{p-2}^{FV} = \frac{0.029}{0.989} \approx 0.029.$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Importance Measures

ถ้าเป็นฟังก์ชันในรูปแบบ unreliability

$$I_i^{FV}(t) = \frac{F_i[Q(t)]}{F_s[Q(t)]},$$

$$F_v[R(t)] = Q_v \approx 0.01,$$

$$F_{p-1}[Q(t)] = Q_{p-1} \times Q_{p-2} \approx 0.0009$$

$$F_{p-2}[Q(t)] = Q_{p-2} \times Q_{p-1} \approx 0.0009$$

$$I_v^{VF} = \frac{0.01}{0.011} = 0.9$$

$$I_{p-1}^{VF} = I_{p-2}^{VF} = \frac{0.0009}{0.011} \approx 0.08$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Importance Measures

For **RRW**,

$$F_s[Q|Q_v = 0] = Q_{P\text{-}1} \times Q_{P\text{-}2} = 0.03 \times 0.03 = 0.0009,$$

ดังนั้นถ้าเป็นแบบสัดส่วน

$$I_v^{RRW} = \frac{0.011}{0.0009} = 12.2,$$

ถ้าเป็นแบบความแตกต่าง

$$I_v^{RRW} = 0.011 - 0.0009 = 0.01.$$

สำหรับปั๊มก็เช่นกัน

$$I_{p-1}^{RRW} = I_{p-2}^{RRW} = \frac{0.011}{0.01} = 1.1 \qquad I_{p-1}^{RRW} = I_{p-2}^{RRW} = 0.011 - 0.01 = 0.001.$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Importance Measures

For RAW

เช่นเดียวกัน ถ้าเป็นแบบสัดส่วน

$$I_{v}^{RAW} = \frac{1}{0.011} = 90.91.$$

ถ้าเป็นแบบความแตกต่าง

$$I_{v}^{RAW} = 1 - 0.011 \approx 1$$

สำหรับปั๊มก็เช่นกัน

$$I_{p-1}^{RAW} = I_{p-2}^{RAW} = \frac{1 \times 0.03 + 0.01}{0.011} = 3.64$$

$$I_{p-1}^{RAW} = I_{p-2}^{RAW} = (1 \times 0.03 + 0.01) - 0.011 = 0.029.$$

สรุปการวิเคราะห์ Importance Measures

Importance Measures	Failure Space		Success Space	
	Mathematical Definition	**Interpretation**	**Mathematical Definition**	**Interpretation**
Birnbaum	$I_B = F_{i=0} - F_{i=1}$	The rate of system failure changes with respect to the failure of component i	$I_B = S_{i=1} - S_{i=0}$	The rate of system success changes with respect to the success of component i
Risk Reduction Worth	$I_{RRW} = \frac{F}{F_{i=1}}$	The relative improvements in system failure, realizable by improving component i	$I_{RRW} = \frac{S_{i=1}}{S}$	The Relative improvement in system , realizable by improving component i
Risk Achievement Worth	$I_{RAW} = \frac{F_{i=0}}{F}$	Factor by which probability of system failure would increase with no credit for component i	$I_{RAW} = \frac{S}{S_{i=0}}$	Factor by which probability of system Success would decrease with no credit for component i
Fussell-Vesely	$I_{FV} = \frac{F - F_{i=1}}{F}$	Fraction of system unavailability (or Risk) involving failure of component i.	$I_{FV} = \frac{S - S_{i=0}}{S}$	Fraction of system success, involving success of component i.

I_i: Importance measure for component I
$i = 1$: The condition that component i, operates successfully
$i = 0$: The condition that component i, has failed
S: Total Success of the System
F: Total Failure of the System

References

- IAEA, SAFETY SERIES SSG-3: Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. 2010.
- IAEA, TECDOC-1511: Determining PSA Quality for Applications in NPPs. 2006.
- Modarres, Mohammad, Mark P. Kaminskiy, and Vasiliy Krivtsov. "Reliability engineering and risk analysis: a practical guide". CRC press, 2016.
- Christian Kirchsteiger, On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 12 (1999) 399–419.
- NRG, Training Course on "Requirements and safety evaluation of NPP PSA", INSC Project MC3.01/13, Training and Tutoring for experts of the NRAs and their TSOs for developing or strengthening their regulatory and technical capabilities.
- F.C. Brayon, M. Mazlehab, P. Prak Tomb, A.H.S Mohd Sarifc, Z. Ramlia, F. Zakariab, F. Mohamedc, Abid Aslamd, A. Lyubarskiye, I.Kuzminae, P.Hughese , A.Ulsese, Building Competence for Safety Assessment of Nuclear Installations: Applying IAEA's Safety Guide for the Development of a Level 1 Probabilistic Safety Assessment for the TRIGA Research Reactor in Malaysia
- K. Simola, Reliability methods in nuclear power plant ageing management, VTT Publications 379, Technical Research Centre of Finland ESPOO 1999.
- JRC Scientific and Technical Reports, Guidelines for Analysis of Data Related to Ageing of Nuclear Power Plant Components and Systems, EUR 23954 EN - 2009