هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

جانمایی بهینه حسگرها با استفاده از روش ارزش اطلاعات

مهدی معاونی تاج‌الدین[۱] ، محمدعلی فارسی[۲]، ایمان بهمن جهرمی[۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران، moaveni@sun.ari.ac.ir
۲- دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران، farsi@ari.ac.ir
۳- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران، bahman@ari.ac.ir

چکیده

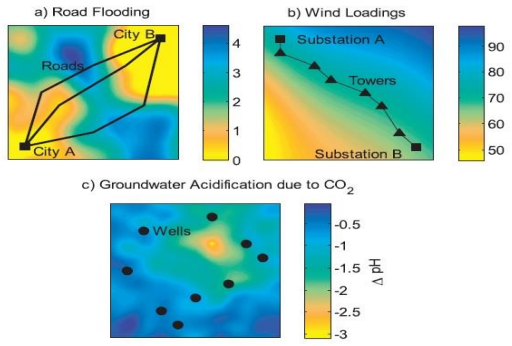
در این بررسی ابتدا به اهمیت مسئله‌ی داده برداری و جانمایی سنسورها در داده‌برداری پرداخته شده است. یکی از روش‌های جدید برای بهینه سازی جانمایی سنسورها روش ارزش اطلاعات است. در ادامه تئوری‌های تصمیم‌گیری و روش ارزش اطلاعات و مبانی آن تشریح شده‌است. نحوه‌ی کاربرد این روش در بهینه‌سازی جانمایی سنسورها بیان و تشریح شده است. سپس دو نمونه مسئله در زمینه‌ی جانمایی سنسورها در مسائل مهندسی بیان و تحلیل گردیده است. مسئله‌ی نخست در خصوص وضعیت تحمل بار برای یک زمین و ریسک‌ها و هزینه‌های مربوط به آن و لزوم یا عدم لزوم صورت شمع کوبی در آن است. مسئله‌ی دوم در حوزه‌ی پایش پدیده‌ی خزش در لوله‌ها و مخازن فشار بالاست. در این مسئله جانمایی سنسورها با توجه به ریسک‌های مربوطه با استفاده از روش ارزش اطلاعات انجام شده است . نتایج با استاندارد UNI 11096، در خصوص مخازن فشار و دما بالا مورد مقایسه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: روش ارزش اطلاعات، جانمایی بهینه حسگرها، قابلیت اطمینان، تئوری بیزین، تصمیم‌گیری، بهینه‌سازی

مقدمه

مسائل مختلفی در حوزه‌های گوناگون علوم وجود دارد که در آنها با توجه به نتایج آزمون‌های تجربی و اندازه‌گیری‌های انجام شده در نقاط خاصی از آن میدان در خصوص نحوه‌ی توزیع آن پدیده در میدان اظهار نظر و قضاوت می‌شود. معمولاً مانند شکل ۱ مجموعه‌ای از حسگرها به‌منظور نظارت بر یک پدیده‌ی پیچیده‌ی مکانی- زمانی، مانند دما و نور در یک ساختمان، آلودگی در یک دریاچه، بارش در یک منطقه جغرافیایی گسترده، شرایط ترافیکی در یک شبکه جاده‌ای یا کیفیت آب در شبکه توزیع آب شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. نحوه‌ی جانمایی آنها در میدان مسئله‌ی مورد نظر در نتیجه‌ی قضاوت کلی از آن میدان مؤثر است. در امور پزشکی و درمانی نیز همواره این چالش وجود دارد که پرشک معالج، براساس کدام آزمایش (یا آزمایش‌ها) و با کمترین هزینه برای درمان بیمار تصمیم بگیرد. در تمام این مسائل با قرار دادن مجموعه ای از حسگرها یا ایستگاه های آشکارساز داده‌برداری و مشاهدات انجام می‌شود.

در عمل، انجام داده‌برداری دارای هزینه است. به عنوان مثال، هزینه تهیه سنسورها و استقرار آنها، مصرف انرژی، زمان و تلاش مورد نیاز برای انجام آزمایش، صبر و توجه کاربر، یا هزینه برای انجام آزمایش های پزشکی و غیره، مواردی هستند که داده‌برداری را با محدودیت روبرو می‌کنند.



شکل 1: جانمایی سنسورها برای مشاهده‌ی a) جاده هایی که از دشت سیلابی با عمق متفاوت عبور می‌کنند b) نیروی باد وارد بر خط انتقال برق c) گروهی از چاه‌ها که در معرض اسیدی شدن آب‌های زیرزمینی بدلیل نشت از یک مخزن ترسیب کربن[۱] قرار می‌گیرند [1].

[۱] carbon sequestration

بنابراین سؤال اساسی این است که داده‌برداری به چه صورت باشد تا بتوان مفیدترین اطلاعات را که تا حد امکان مقرون به صرفه نیز باشد، به دست آورد؟

دو رویکرد برای داده برداری وجود دارد: رویکردهای اکتشافی[۱] که برای بهینه بودن تلاش نمی‌کنند، اما به سرعت راه حل‌هایی با عملکرد اغلب معقول پیدا می‌کنند. این رویکردها شامل الگوریتم‌های نزدیک‌بین (myopic) مانند اکتشافی حریصانه (heuristics greedy) یا رویکردهای آرامش مداوم (continuous relaxation) است [2].

رویکردهای غیراکتشافی که سعی می‌کنند راه‌حل بهینه را بیابند، اما معمولاً یافتن معیار بهینه سازی و تشکیل تابع هدف برای مسائل بزرگ-تر بسیار دشوار است. این رویکردها شامل تکنیک هایی مانند برنامه ریزی احتمالی با استفاده از فرآیندهای تصمیم گیری مارکوف، استفاده از روش ارزش اطلاعات و... است [7]–[3].

در بسیاری از کاربردهای عملی، انتخاب از میان مشاهدات، مفید اما پرهزینه، مهم است. با بهره‌برداری از ساختار مسئله و توجه به آن می-توان به طور کارآمد و تقریباً بهینه، بسیاری از مسائل داده برداری را حل کرد.

در این ارئه مقاله بهینه سازی مسائل داده‌برداری و جایگذاری سنسورها به روش ارزش اطلاعات[۲] یا به اختصار VoI که یکی از روش‌های غیراکتشافی است، مورد بررسی قرار گرفته است.

روش ارزش اطلاعات (VoI)

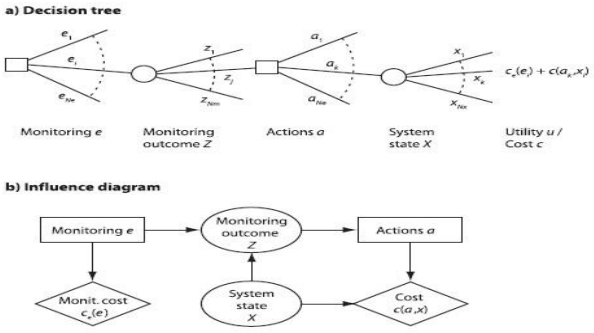
چهارچوب تئوری تصمیم‌گیری[۳]

در شکل ۲ به‌صورت شماتیک درخت تصمیم و دیاگرام تأثیر یک تصمیم در شرایط عدم قطعیت ارائه شده‌است. یک تصمیم بهینه در شرایط عدم قطعیت، تصمیمی است که مطلوبیت مورد انتظار (E[U]) را به حداکثر و هزینه مورد انتظار (E[C]) را به حداقل برساند. علاوه برآن اقدامات و فعالیت‌های نگهداری، تعمیر و هزینه اقدام نت و خطر مرتبط با خرابی (برای کل سیستم) را بهینه کند [۵].

از آنجا که نتایج نظارت[۴] تصمیمات اقدامی را بهبود می‌بخشد لذا باید اقدام لازم (اقدام اصلاحی) با توجه به داده‌های موجود (قبلی) از وضعیت سیستم بهینه گردد. به این فرآیند، بهینه سازی تصمیم پیشین[۵] گفته می‌شود.

اطلاعات کامل[۶]

اطلاعات کامل یک موقعیت فرضی است که در آن هیچ عدم قطعیتی در مورد X وجود ندارد. در این مورد، تصمیم گیرنده همیشه قادر است بهترین اقدام لازم را انتخاب کند.



شکل ۲: درخت تصمیم و دیاگرام تأثیر [۵]

اطلاعات غیرکامل[۷]

در عمل اما، سیستم‌های مانیتورینگ و اندازه‌گیری‌ها در معرض انواع خطاهای تصادفی یا عدم قطعیت هستند. به عنوان مثال، برای موردی که دانش کامل از پارامترهای مواد در دسترس است، اگر بارگذاری‌های آینده بر آیتم، نامشخص باقی بماند، رویداد شکست را نمی‌توان با قطعیت پیش‌بینی کرد. علاوه بر این، اکثر اندازه‌گیری‌ها غیرمستقیم هستند. لذا همواره با داده‌هایی مواجه هستیم که قطعیت ندارند.

به‌روز رسانی بیزین[۸]

احتمال بیزین در شرایط عدم قطعیت تعریف می‌شود. می‌توان از اطلاعات ناقص برای آگاهی یافتن در مورد X و در نتیجه در مورد رویدادهای $E_1,\dots,E_m$ استفاده کرد. به‌روز رسانی بیزین چهارچوبی ریاضی برای آگاهی از توزیع احتمال X و احتمالات رخدادهای $E_1,\dots,E_m$ با اطلاعات غیر قطعی جدید است. در این روش احتمال رخداد E_i به‌شرط مشاهده‌ی رخداد Z، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Pr(E_i|Z) = \frac{\Pr(E_i \cap Z)}{\Pr(Z)} \qquad (۱)$$

جهت مطالعه با جزئیات بیشتر در خصوص منطق احتمالی بیزین به [۸] مراجعه شود.

ارزش اطلاعات شرطی[۹] و ارزش اطلاعات (VOI)

هنگامی که مشاهده‌ی Z انجام شد، احتمالات $\Pr(E_i|Z)$ قابل محاسبه خواهد بود. بهینه‌سازی تصمیم برمبنای یک مقایسه با نتایج تصمیم

[۱] heuristic
[۲] Value of Information
[۳] decision-theoretic framework
[۴] monitoring
[۵] prior decision optimization
[۶] perfect information
[۷] imperfect information
[۸] Bayesian updating
[۹] conditional value of information

بهینه‌ی پیشین انجام می‌شود. تفاضل هزینه‌ی اقدام بهینه (پیشین) با هزینه‌ی اقدام بهینه جدید (پسین) ارزش اطلاعات شرطی (CVoI) تعریف می‌شود. توجه داشته باشید که CVoI صفر است اگر تصمیم بهینه پسین با تصمیم بهینه‌ی پیشینی یکسان باشد و در غیر این صورت دارای مقدار مثبت است. این مقادیر مقایسه‌ای هستند و بخودی‌خود دارای ارزش محاسباتی نیستند [۵].

برای تولید اطلاعات شرطی (انجام مشاهده‌ی Z) با توجه به جایگذاری سنسور در نقاط مختلف به‌صورت عددی، معمولاً از روش مونت‌کارلو استفاده می‌شود [۹] [۱۰]. بدین صورت که برای شبیه‌سازی نتایج اندازه-گیری یک نقطه، مقادیر تصادفی زیادی ایجاد و مقدار اندازه‌گیری شده، میانگین مقادیر تصادفی خواهد بود. حال برای هریک از مقادیر شبیه-سازی شده ماتریس مقدار میانگین و کوواریانس با توجه به روش‌های بیزین، بروز رسانی شده و تابع هزینه‌ی مورد انتظار که میانگین هزینه‌ی مورد انتظار در هر نقطه است، محاسبه می‌شود.

همان‌طور که بیان شد، تفاضل هزینه‌ی اقدام بهینه‌ی پیشین با هزینه‌ی اقدام بهینه جدید (پسین) ارزش اطلاعات شرطی (CVoI) تعریف می-شود.

ارزش اطلاعات یا VoI، مقدار مورد انتظار CVoI با توجه به تمام نتایج احتمالی اندازه‌گیری است.

$$\mathrm{VoI} = \mathrm{E}[\mathrm{CVoI}] \qquad (۲)$$

چند کاربرد از بهینه سازی جانمایی حسگرها[۱]

بررسی وضعیت استحکام یک زمین برای ساخت بنا به روش ارزش اطلاعات

در کارگاه آموزشی [۱۰]، مسئله‌ای بدین صورت مطرح شد که قرار است یک سری سازه در زمینی مربع به ابعاد ۲۵۰ متر در ۲۵۰ متر ساخته شود. مکان‌های درون این قطعه با یک سیستم مختصات (X_1, X_2)، که $0 \leq X_1 \leq 250$ و $0 \leq X_2 \leq 250$ مشخص می‌شوند. ظرفیت باربری خاک $f(X_1,X_2)$، در هر مکانی در این دامنه توسط یک میدان تصادفی لاگ‌نرمال[۲] توصیف می‌شود. میدان تصادفی لاگ‌نرمال برای توصیف پدیده‌هایی مانند پراکندگی گونه‌های زیستی، پراکندگی مواد معدنی در پوسته زمین و... دارای کاربرد است [۱۱]. از آنجا که ظرفیت باربری خاک تابعی از عناصر تشکیل‌دهنده آن است، بنابراین توزیع لاگ‌نرمال برای بیان پراکندگی تصادفی این کمیت انتخاب می‌شود.

زمین به ۲۵ مربع ۵۰ در ۵۰ متری تقسیم شده است. در هر مربع، ظرفیت باربری خاک باید بیش از ۸۰ کیلو پاسکال باشد تا امکان ساخت و ساز ایمن فراهم شود (ظرفیت باربری مربع با ظرفیت باربری در مرکز مربع تقریب یکسان فرض می‌شود). دو گزینه برای ساخت و ساز در هر مربع امکان پذیر است: می‌توان از خاک برای حمایت از یک پایه و فنداسیون استفاده کرد (مرتبط با یک انتخاب عمل a=0 برای مربع) یا آنکه می‌توان در آن زمین شمع‌کوبی کرد (مرتبط با یک انتخاب عمل a=1 برای مربع)، که ظرفیت باربری کافی را تضمین می‌کند. استفاده از شمع مستلزم هزینه ساخت و ساز ۵ میلیون یورو بیشتر است، اما اگر از شمع استفاده نشود و ظرفیت باربری خاک کمتر از ۸۰ کیلو پاسکال باشد، خرابی ساختاری رخ خواهد داد و هزینه‌ای معادل ۲۰۰ میلیون یورو برای بخش مربع ایجاد می‌شود. تابع خسارت برای هر مربع بصورت زیر بیان می‌شود.

$$C(f.a) = \begin{cases} 0 & if\ f \geq 80\ [kPa]\ and\ a = 0 \\ 200\ M€ & if\ f < 80\ [kPa]\ and\ a = 0 \\ 5\ M€ & if\ a = 1 \end{cases} \qquad (۳)$$

با استفاده از توزیع درنظر گرفته‌شده، ماتریس مقدار میانگین، انحراف معیار استاندارد و کوواریانس محاسبه و از روی آن ماتریس قابلیت اطمینان (β) محاسبه می‌شود. مطابق توضیحات ارائه شده در [۵]–[۷]، [۹]، [۱۰]، در این شبیه‌سازی هریک از ۲۵ نقطه یکبار بعنوان نقطه اندازه‌گیری درنظر گرفته می‌شود. با توجه به مختصات هر نقطه‌ی اندازه‌گیری همبستگی آن نقطه با سایر نقاط مشخص می شود. از روی همبستگی بدست آمده، مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد جدید بر مبنای احتمالات بیزین، محاسبه می‌شود. با استفاده از مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد بروز شده و احتمال تصادفی خطای 1%، مقدار اندیس قابلیت اطمینان (β) برای هر نقطه ۱۰۰۰ بار محاسبه می‌شود. از روی مقدار اندیس قابلیت اطمینان، مقدار احتمال شکست به شرط اندازه‌گیری در نقطه‌ی مفروض و خسارت مورد انتظار به شرط اندازه-گیری در نقطه‌ی مفروض بدست می‌آید. در نهایت مقدار تابع خسارت پسینی مورد انتظار به شرط اندازه گیری در نقطه مفروض (y) بصورت زیر بین تمام احتمالات در نظر گرفته‌شده، میانگین‌گیری خواهد شد.

$$\mathbb{E}L_i(Y) \cong \frac{1}{n_{simulations}} \sum_{j=1}^{n_{simulations}} \mathbb{E}L_i(y_i) \qquad (۴)$$

و در نهایت مقدار VoI اندازه‌گیری نسبت به نقطه مفروض y به‌صورت تفاضل هزینه‌ی مورد انتظار اولیه و تابع هزینه‌ی پسینی از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{VoI} = \mathbb{E}L(\emptyset) - \sum_{i=1}^{25} \mathbb{E}L_i(Y) \qquad (۵)$$

با تکرار محاسبات نسبت به تمام نقاط مسئله، مقادیر VoI بصورت شکل ۳ به‌دست می‌آیند. ملاحظه می‌شود که اندازه‌گیری در نقاط (25m,125m) و (25m,75m) دارای بیشترین ارزش است. بنابراین بهتر است، اندازه‌گیری در این نقاط باید انجام شود.

[۱] Sensor Placement Optimization

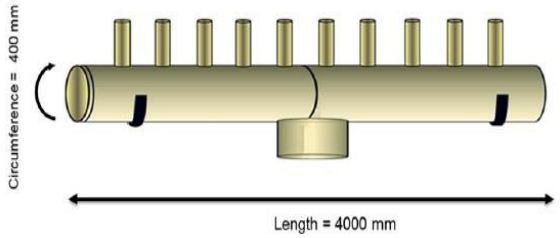
[۲] Lognormal

$x_2 = 225m$	6.8 M€	4.4 M€	0.7 M€	0.0 M€	0.0 M€
$x_2 = 175m$	9.5 M€	6.2 M€	0.9 M€	0.0 M€	0.0 M€
$x_2 = 125m$	10.2 M€	6.6 M€	1.0 M€	0.0 M€	0.0 M€
$x_2 = 75m$	10.1 M€	6.2 M€	0.8 M€	0.0 M€	0.0 M€
$x_2 = 25m$	7.6 M€	4.6 M€	0.7 M€	0.0 M€	0.0 M€
	$x_1 = 25m$	$x_1 = 75m$	$x_1 = 125m$	$x_1 = 175m$	$x_1 = 225m$

شکل ۳. مقادیر VoI در نقاط مختلف زمین [۱۰]

جانمایی بهینه سنسور در تجهیزات تحت فشار

یکی از جدیدترین روش های بهینه سازی جانمایی حسگرها، استفاده از روش VoI است. آقای سید مجتبی حسینی و همکاران ایشان از پلی-تکنیک میلان [۶] در پژوهشی نشان داده‌اند که با استفاده از این روش می توان از تعداد حسگرها برای کنترل ضخامت یک لوله فشار و دما بالا، نسبت به استاندارد مربوطه، کاست. قرارگیری دراز مدت مواد در معرض تنش و در دمای بالا سبب بروز و تشدید پدیده‌ی خزش[۱]خواهد شد. در شکل ۴ شماتیک منیفولد محتوی بخار مافوق گرم[۲]ارائه شده-است.



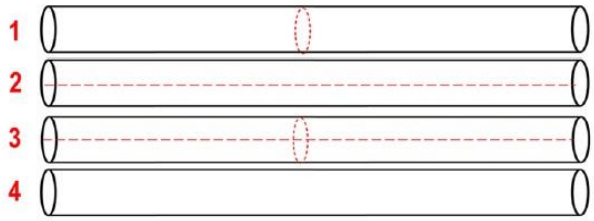
شکل ۴: شماتیک منیفولد حاوی بخار مافوق گرم [۶]

در جدول ۱ مشخصات مواد و شرایط کاری منیفولد بخار مافوق گرم ارائه شده‌است. در شکل ۶ نحوه‌ی جانمایی سنسورها مطابق استاندارد UNI 11096 ارائه شده‌است. مطابق استاندارد مذکور باید برای چنین مسئله‌ای ۳۲ سنسور جانمایی گردد.

محققان چهار هندســـه مختلف برای لوله مورد بررســـی قرار داده‌اند. هندسه اول اتصال دو لوله از وسط به یکدیگر است. هندسه دوم، رول کردن ورق و جوش دادن درز آن و ساخت یک لوله است. هندسه سوم ترکیب دو هند سه بالا ست. به عبارت دیگر رول کردن و وجوش دادن دو لوله از و سط به یکدیگر ا ست و هند سه چهارم یک لوله بدون درز است. در شکل ۵ زیر این هندسه‌ها ارائه شده‌است.

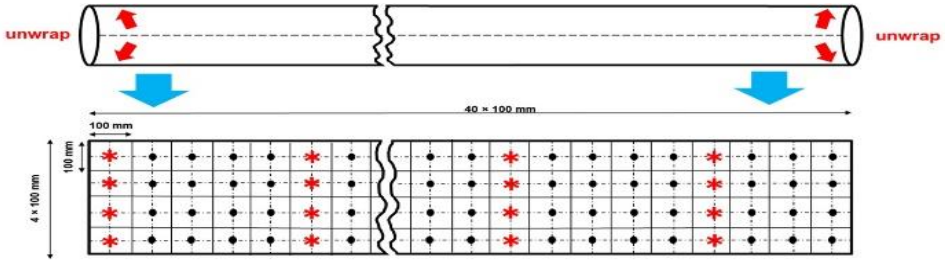
جدول ۱: مشخصات مواد و شرایط کاری و محیطی لوله [۶]

فشار طراحی	189 [barg]
دمای طراحی	ورودی: 778 [K] خروجی:723 [K]
نوع مواد	9Cr-IMo-V-Nb (Plate) ASME SA-387/SA-387M Grade 91
درصد عمر سپری شده	35%
ساعات کارکرد	100,000 [hours]
استحکام کششی	475 [MPa]
ضخامت	20 [mm]



شکل ۵: هندسه‌های مختلف لوله مولد بخار [۶]

در ادامه با انجام تحلیل‌های المان محدود، محدوده‌ی انحراف از استحکام مجاز را بدست آورده‌اند. در این بررسی ضخامت اولیه ورق لوله‌ها 20 mm و حداقل ضخامت مجاز (حد نهایی) آن 16.9 mm در نظر گرفته شده‌است. ضخامت لوله بصورت توزیع نرمال با مقدار میانگین 20 mm و انحراف معیار استاندارد 1 mm درنظر گرفته‌شده‌است. در نواحی تحت تأثیر جوشکاری[۳]مقدار انحراف معیار استاندارد 2 mm درنظر گرفته‌شده‌است.

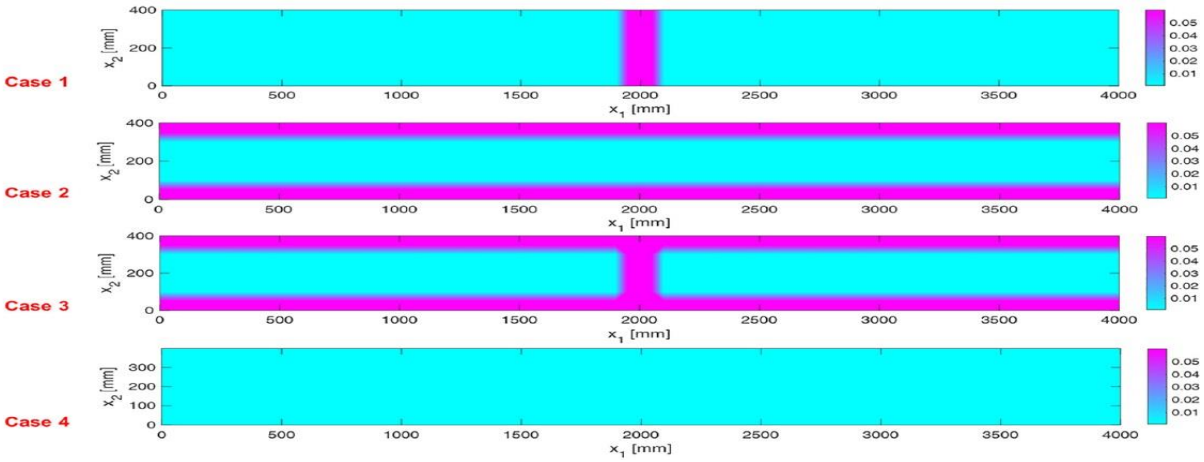


شکل ۶: جانمایی سنسورها مطابق استاندارد UNI 11096 [۶]

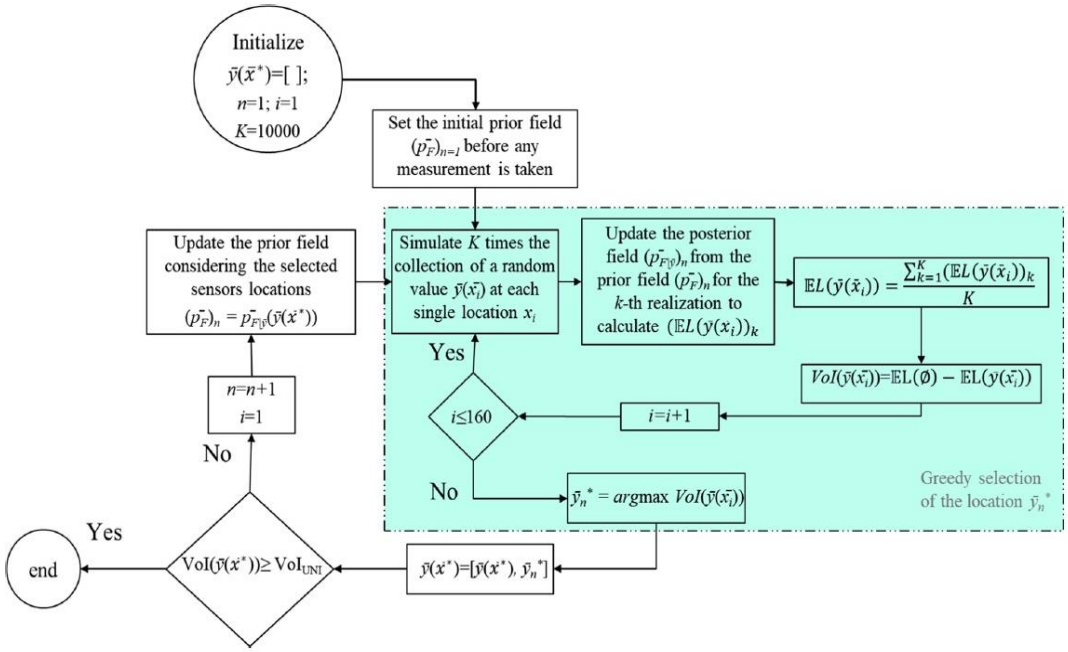
[۱] creep
[۲] superheat
[۳] HAZ(Heat Affected Zone

در گام نخست محققان، یک تحلیل اولیه از احتمال شکست انجام داده‌اند. این تحلیل با توجه به مقدار میانگین، انحراف معیار استاندارد و با استفاده از روابط توزیع نرمال برآورد شده‌است. معیار شکست رسیدن ضخامت لوله به 16.9 mm در اثر خزش می‌باشد. نتایج این تحلیل در شکل ۷ آورده شده‌است. در هندسه اول حداکثر احتمال شکست 6.06% و حداقل 0.1% است.

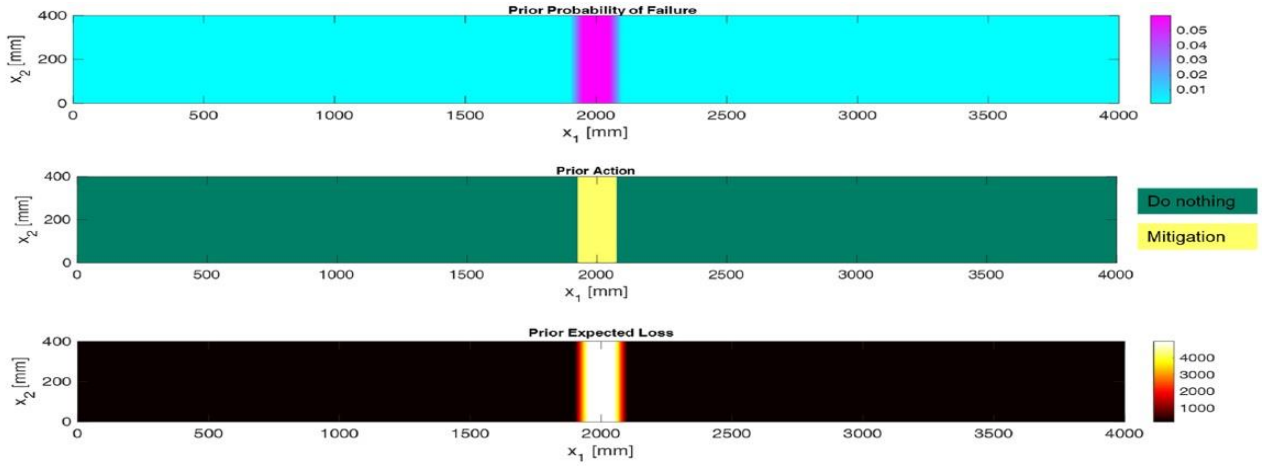
در شکل ۸ الگوریتم بهینه یابی نقاط استقرار سنسورها ارائه شده‌است. مطابق توضیحات ارائه شده در مقاله آقای سید مجتبی حسینی و همکاران [۶]، در این شبیه‌سازی هریک از ۱۶۰ نقطه یکبار بعنوان نقطه اندازه‌گیری درنظر گرفته می‌شود. با توجه به مختصات هر نقطه‌ی اندازه‌گیری همبستگی آن نقطه با سایر نقاط مشخص می شود. از روی همبستگی بدست آمده، مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد جدید محاسبه می‌شود. با استفاده از مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد بروز شده و احتمال تصادفی خطای 1%، مقدار اندیس ضریب اطمینان (β) برای هر نقطه ۱۰۰۰۰ بار محاسبه می‌شود. از روی مقدار اندیس قابلیت اطمینان، مقدار احتمال شکست به شرط اندازه‌گیری در نقطه‌ی مفروض و خسارت مورد انتظار به شرط اندازه‌گیری در نقطه‌ی مفروض بدست می‌آید. برای هر نقطه ۱۰۰۰۰ بار محاسبات انجام و نهایتاً میانگین گرفته خواهدشد. حال مقدار VoI بدست آمده با فرض اندازه گیری در نقطه معلوم با مقدار VoI بدست آمده با فرض اندازه‌گیری در نقاطی مطابق دستورالعمل استاندار UNI 11096 مقایسه می‌شود. اگر مقدار VoI بالاتر بود این نقطه بعنوان نقطه بهینه برای جانمایی سنسور اندازه‌گیری انتخاب می‌شود. روند انجام محاسبات در فلوچارت زیر تشریح شده‌است.



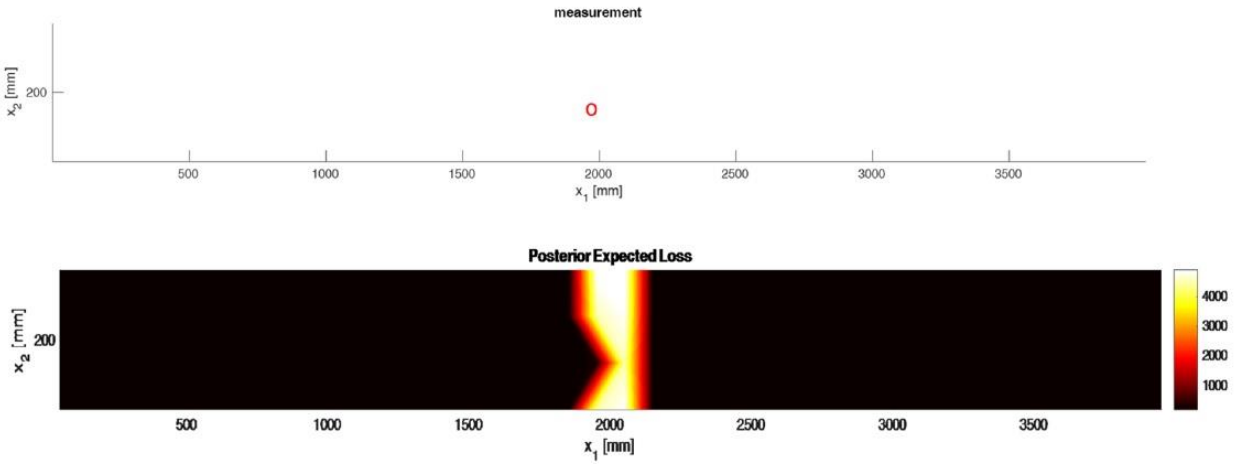
شکل ۷: تحلیل اولیه از احتمال شکست هندسه‌های مختلف لوله مولد بخار [۶]



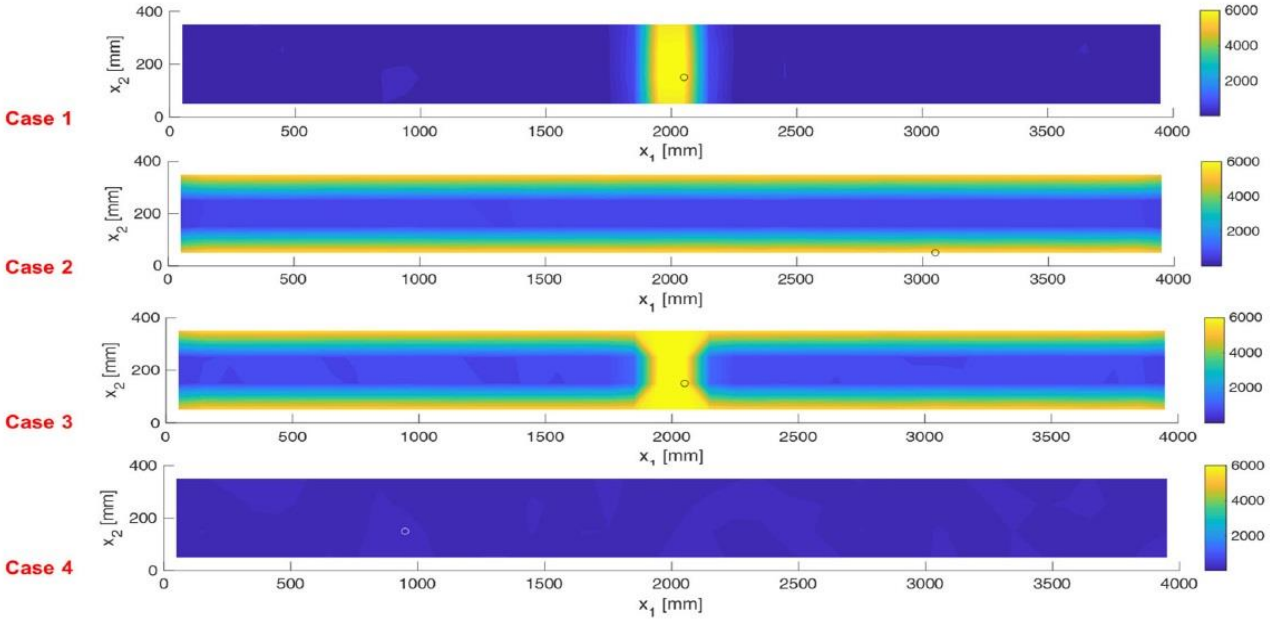
شکل ۸: الگوریتم بهینه یابی نقاط استقرار سنسورها [۶]



شکل ۹: احتمال شکست اولیه، نقاط نیازمند اقدام اولیه و خسارت مورد انتظار اولیه [۶]



شکل ۱۰: خسارت مورد انتظار با فرض اندازه‌گیری در نقطه‌ی (1950, 150) در هندسه اول [۶]



شکل ۱۱: مقدار تابع VoI در نقاط مختلف هر هندسه [۶]

در شـکل ۹ مقادیر احتمال شـکسـت اولیه، نقاط نیازمند اقدام اولیه (نیازمند نصب سنسور) و خسارت مورد انتظار اولیه گزارش شده‌است. در محاسبات انجام شده برای تخمین خسارت مورد انتظار اولیه مقدار حداکثر خسارت ۵۰۰۰ و حداقل ۱۹۴ یورو برآورد شده‌است.

در شکل ۱۰ مقدار خسارت مورد انتظار با فرض اندازه‌گیری در نقطه‌ی (1950, 150) آورده شده‌است. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد؛ مقدار خسارت مورد انتظار در این نقطه به مقدار ۳۵۱ یورو کاهش یافته‌است. زیرا این نقطه از نقاط بحرانی بوده و با نصب سنسور بر روی آن احتمال شکست آن قبل از اقدامات اصلاحی کاهش چشمگیری خواهد یافت.

با اجرای الگوریتم تشریح شده، مقدار تابع VoI در نقاط مختلف هر هندسه محاسبه گردیده‌است. نتایج در شکل ۱۱ ارائه شده‌است. برای هندسه‌ی اول، مقدار VoI بر مبنای اندازه‌گیری در نقطه‌ی (2050,150) با ۶۳۵۴ یورو و برای سایر نقاط تحت تأثیر جوشکاری بین ۵۴۴۶ تا ۶۳۵۴ یورو بدست آمد.

با ادامه حل، نقاط بهینه با توجه به الگوریتم بهینه سازی حریصانه به صورت زیر گزارش شده‌است. مطابق شکل ۱۲ برای هندسه اول تعداد ۵ نقطه وجود دارد که در آنها مقدار VoI در آنها از مقدار VoIبر مبنای نقاط مورد نظر استاندارد بالاتر است.

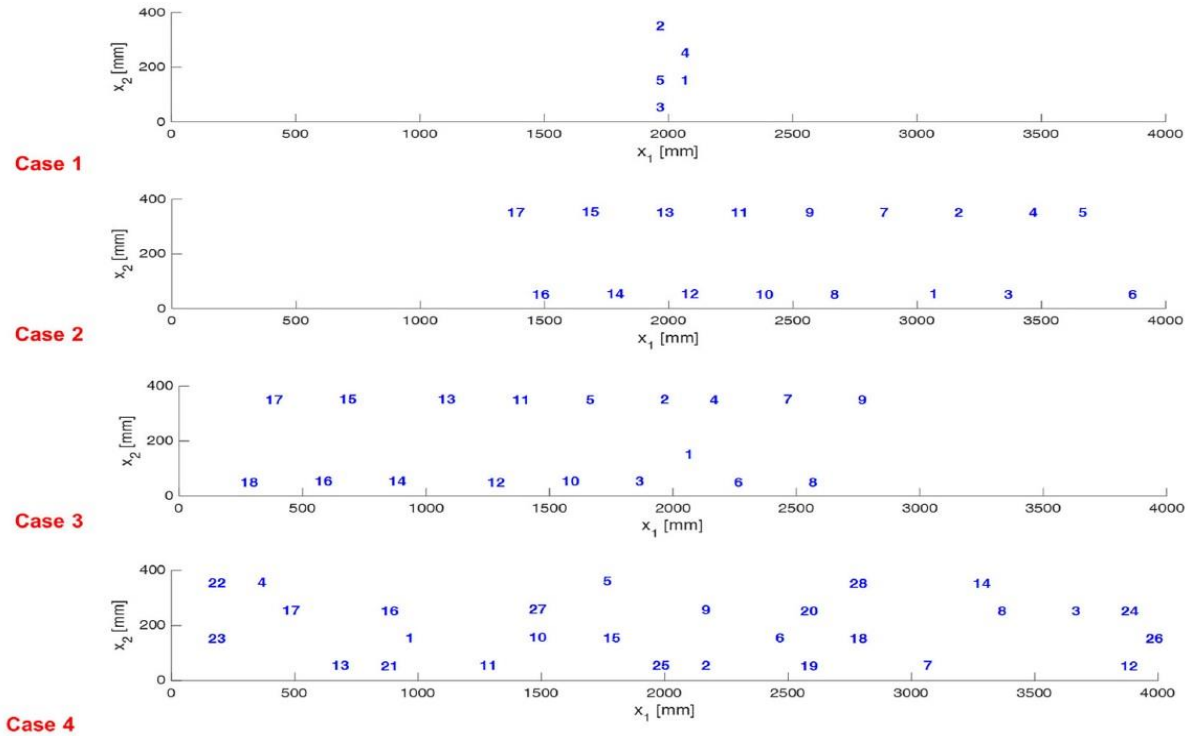
مقایسه نتایج حاصله با استاندارد UNI 11096 نشان می‌دهد که می‌توان با تعداد سنسور کمتر، اطلاعات کامل‌تری (یا حداقل اطلاعاتی در همان سطح از اهمیت) را از وضعیت لوله استخراج کرد. با تعریف نسبت ارزش اطلاعات به تعداد سنسورها (n) بصورت زیر می‌توان مقیاسی برای ارزشمندی اطلاعات حاصله تعریف نمود.

$$r = \frac{\mathrm{VoI}}{n} \qquad (۶)$$

بطور مشابه برای جانمایی سنسورها مطابق استاندارد UNI 11096 نیز همین ضریب مقیاسی بصورت زیر تعریف می‌شود. با این تفاوت که تعداد سنسورها بصورت ثابت ۳۲ عدد درنظر گرفته می‌شود. این مقایسه در **جدول ۲** ارائه شده‌است.

$$r_{UNI} = \frac{\mathrm{VoI}_{UNI}}{n_{UNI}} \qquad (۷)$$

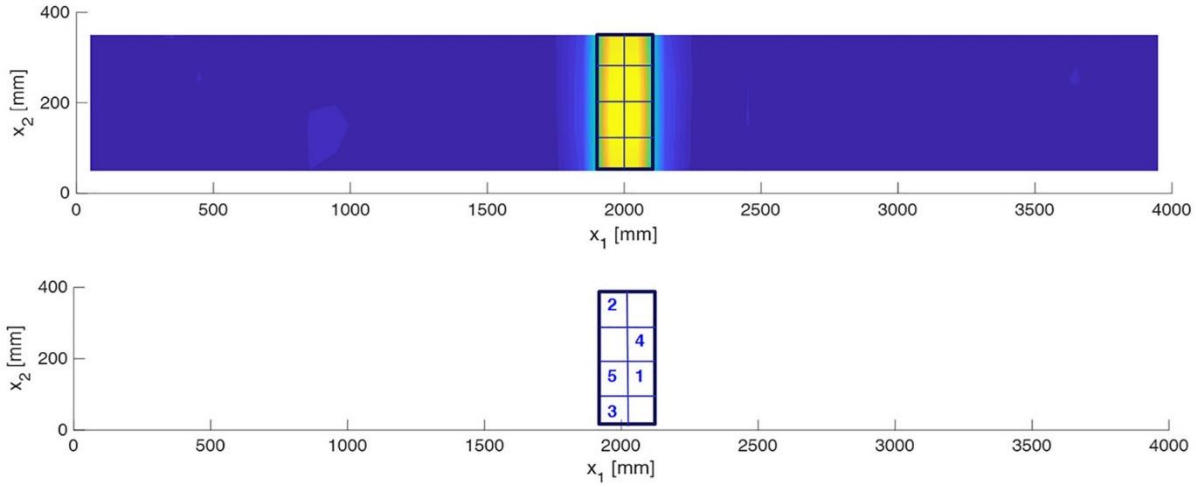
در شکل ۱۳ موقعیت ۵ نقطه‌ای که VoI آنها از $\mathrm{VoI}_{\mathrm{UNI}}$ بالاتر است؛ برای هندسه اول آورده شده‌است. حال ممکن است این سؤال مطرح شود که نقاط مشخص شده بعنوان نقاط دارای VoI بالا همگی از نظر هندسی متقارن هستند و اطلاعات یک نقطه، منطقاً مشخص کننده شرایط سایر نقاط هم خواهدبود. بررسی انجام شده در پژوهش سید مجتبی حسینی و همکاران [۶] نشان می‌دهد که در صورت تکرار محاسبات به تعداد ۱۰۰۰ دفعه، VoIهای حاصله در محدوده 62±5% قرار خواهد گرفت. این بدان معناست که VoI این نقاط تقریباً ارزش یکسان دارند و احتمال تقریباً برابری بعنوان یکی از نقاط بهینه انتخاب سنسور دارند. نتیجه در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است.



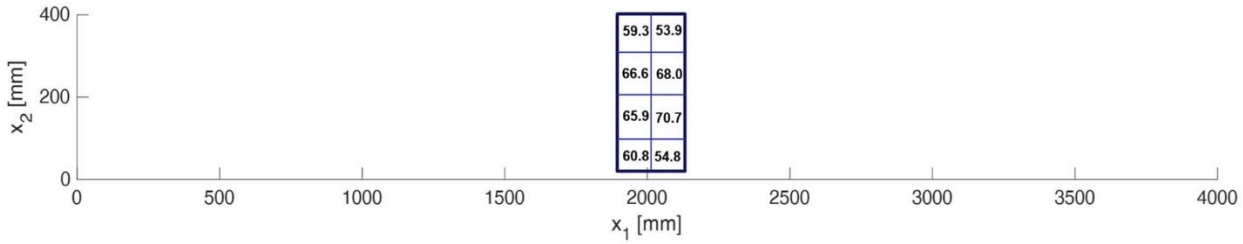
شکل ۱۲: نقاط بهینه برای جایگذاری سنسور هر هندسه [۶]

جدول ۲: مقایسه نتایج بررسی انجام شده با استاندارد UNI 11096

Case study	VoI	n	r	VoI_{UNI}	n_{UNI}	r_{UNI}
1	26495	5	5299	26386	32	824.56
2	99772	17	5868.94	94014	32	2937.94
3	107270	18	5959.44	104200	32	3256.23
4	6156.1	28	219.86	5984.7	32	187.02



شکل ۱۳: نقاط بهینه برای جایگذاری سنسور در هندسه اول [۶]



شکل ۱۴: احتمال آنکه نقاط انتخاب شده در هندسه اول نقطه بهینه باشند [۶]

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

اهمیت مسئله‌ی جانمایی سنسورها در انواع داده‌برداری‌ها به‌وضوح روشن است. در حوزه‌ی مهندسی هوافضا با یک تحلیل اولیه در خصوص جانمایی سنسورها قبل از شروع به تست‌های تجربی می‌توان با انجام آزمون‌ها کمتر و به تبع آن کاهش هزینه‌ها و خطرات تست به نتایج دقیق‌تر و کامل‌تر دست یافت. جانمایی سنسورها تنها در حوزه‌ی مهندسی قرار ندارند و شامل مسائل بی‌شماری در حوزه‌ی زیرساخت‌های شهری، ملی و بین المللی، پزشکی و درمانی، امنیتی و انتظامی و... نیز می‌باشد.

روش ارزش اطلاعات یک روش تصمیم‌گیری مبتنی بر احتمالات بیزین است و با هر مقدار از اطلاعات اولیه می‌توان به تخمین نتایج تصمیم‌گیری پرداخت. البته هر چه اطلاعات اولیه کامل‌تر و دقیق‌تر باشد نتایج استفاده از این روش هم دقیق‌تر خواهد بود. با استفاده از این روش می‌توان بین تعداد آزمون‌های مورد انجام، تعداد سنسورها، هزینه‌ی نصب و نگهداری سنسورها، هزینه‌ی اجرای آزمون و خسارت شکست‌های احتمالی تعادل و ارتباط برقرار و تصمیم بهینه را اتخاذ نمود. این مهم در خصوص انواع داده‌برداری‌های پژوهشی در حوزه‌ی مهندسی هوافضا که هزینه و ریسک تکرار آنها بسیار بالاست بسیار مفید می‌باشد.

در این بررسی اهمیت مسئله جانمایی بهینه سنسورها بیان گردید. در ادامه مبانی روش ارزش اطلاعات و مفاهیم اولیه‌ی آن تشریح و معرفی شد. دو پژوهش مرتبط در حوزه بهینه سازی جانمایی سنسورها با روش ارزش اطلاعات تشریح گردید.

از آقای دکتر سید مجتبی حسینی، پژوهشگر دپارتمان انرژی دانشگاه پلی تکنیک میلان، به‌دلیل راهنمایی‌های بی‌دریغ کتبی و شفاهی‌شان و در اختیار گذاشتن جزوه‌ی کارگاه آموزشی "تحلیل تصمیم و تحلیل روش ارزش اطلاعات" تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

[1] C. Malings and M. Pozzi, “Conditional entropy and value of information metrics for optimal

sensing in infrastructure systems," *Struct. Saf.*, vol. 60, pp. 77–90, 2016, doi: 10.1016/j.strusafe.2015.10.003.

[2] T. H. Yi and H. N. Li, "Methodology developments in sensor placement for health monitoring of civil infrastructures," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/612726.

[3] A. Krause, "Optimizing Sensing Theory and Applications," 2008.

[4] S. M. Hoseyni, F. Di Maio, and E. Zio, "VoI-Based Optimal Sensors Positioning and the Sub-Modularity Issue."

[5] D. Straub, "Value of information analysis with structural reliability methods," *Struct. Saf.*, vol. 49, pp. 75–85, 2014, doi: 10.1016/j.strusafe.2013.08.006.

[6] S. M. Hoseyni, F. Di Maio, and E. Zio, "Optimal sensor positioning on pressurized equipment based on Value of Information," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab.*, vol. 235, no. 4, pp. 533–544, Aug. 2021, doi: 10.1177/1748006X219896

61.

[7] C. Malings and M. Pozzi, "Value of information for spatially distributed systems: Application to sensor placement," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 154, pp. 219–233, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ress.2016.05.010.

[8] W. . Ang, A.H.S. and Tang, "Probability Concepts in Engineering Planning and Design,.Vol. 1," *Basic Princ. John Wiley, New York*, 1975.

[9] M. Pozzi and A. Der Kiureghian, "Assessing the value of information for long-term structural health monitoring," *Heal. Monit. Struct. Biol. Syst. 2011*, vol. 7984, no. 510, p. 79842W, 2011, doi: 10.1117/12.881918.

[10] M. Pozzi, "decision analysis types and value of information analyses – part 2 VoI in spatially distributed systems," 2017.

[11] م. فارسی, اصول مهندسی قابلیت اطمینان. تهران: سیمای دانش, ۱۳۹۵.