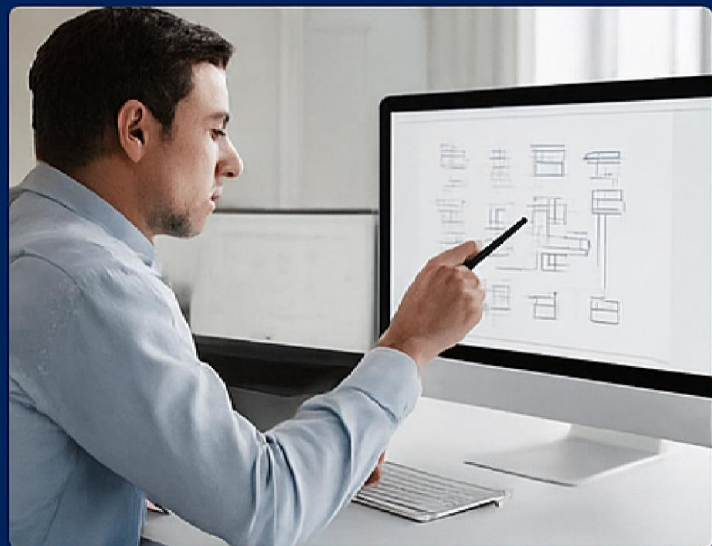
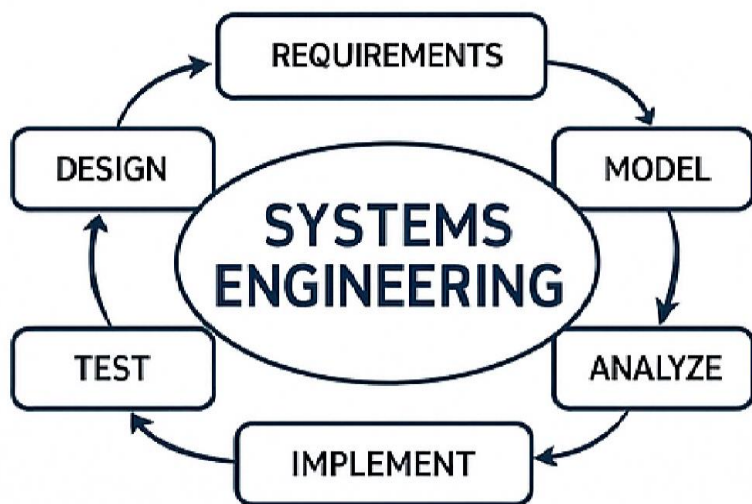


مقدمه ای بر مهندسی سیستم‌ها

و ضرورت توجه دانشجویان مهندسی صنایع به آن

در مقطع تحصیلات تکمیلی



در عصر پیچیده و به سرعت در حال تحول امروز، جوامع و صنایع بیش از هر زمان دیگری با سامانه‌های پیچیده و چندبخشی مواجه‌اند؛ سامانه‌هایی که تعاملات میان اجزاء، نقش‌آفرینی عوامل انسانی، محدودیت منابع و عدم قطعیت‌های محیطی را به چالشی دائمی بدل کرده‌اند. در چنین بستری، **مهندسی سیستم‌ها (Systems Engineering)** به عنوان یک رویکرد بین‌رشته‌ای و نظام‌مند برای طراحی، تحلیل، یکپارچه‌سازی و مدیریت چرخه عمر سامانه‌های پیچیده، نقش کلیدی در تضمین موفقیت پروژه‌های کلان و ملی ایفا می‌کند.

مهندسی سیستم‌ها، برخلاف گرایش‌های سنتی که عموماً به جنبه‌های فنی خاصی محدود می‌شوند، از ابتدا تا انتهای یک پروژه، نگاهی کل‌نگر (Holistic) و مبتنی بر تفکر سیستمی (Systems Thinking) دارد. از این‌رو، دانش‌آموختگان رشته مهندسی صنایع، که پیش‌زمینه‌ای قوی در تحلیل فرآیندها، بهینه‌سازی، مدیریت عملیات و تصمیم‌گیری کمی دارند، در موقعیتی ممتاز برای ورود به این حوزه قرار دارند. تلفیق دانش آن‌ها با اصول مهندسی سیستم‌ها می‌تواند زیرساختی توانمند برای رهبری پروژه‌های پیچیده در ایران آینده فراهم آورد؛ از توسعه شهرهای هوشمند و سامانه‌های حمل‌ونقل هوایی و ریلی گرفته تا طراحی زیرساخت‌های انرژی پایدار و مدیریت بحران‌های زیست محیطی.

به عنوان نمونه، مطالعه موردی طراحی سامانه موشکی پاتریوت در ایالات متحده (INCOSE, 2023)، نشان می‌دهد که نبود یکپارچگی سیستمی و نادیده گرفتن تعامل اجزای نرم افزاری و سخت‌افزاری در مراحل اولیه طراحی، منجر به ناکارآمدی حیاتی در عملکرد عملیاتی این سامانه شد. این تنها یک مثال از اهمیت نگاه سیستمی در پروژه‌های حیاتی است. در مقابل، پروژه‌هایی نظیر طراحی ایستگاه فضایی بین‌المللی (NASA Systems Engineering Handbook, 2020) نمونه‌ای موفق از کاربرد اصول مهندسی سیستم‌ها در سطح بین‌المللی به‌شمار می‌آید.

در ایران نیز، توسعه پروژه‌های بین‌بخشی مانند شبکه ملی اطلاعات، طرح تحول سلامت، یا سامانه‌های یکپارچه مدیریت منابع آبی، بدون رویکرد مهندسی سیستم‌ها، با خطر شکست، اتلاف منابع و نارضایتی ذی‌نفعان همراه خواهد بود. لذا، تربیت نسل جدیدی از مهندسان با رویکرد سیستمی، ضرورتی راهبردی برای توسعه پایدار و پیشرفت فناوریانه کشور است.

در نتیجه، توصیه می‌شود دانشجویان مهندسی صنایع، با توجه به آمادگی تحلیلی و دید میان رشته‌ای خود، مسیر تحصیلی خود را در مقطع کارشناسی‌ارشد به سوی مهندسی سیستم‌ها سوق دهند. مطالعه منابع معتبر مانند INCOSE Systems Engineering Handbook (نسخه چهارم، 2015) و کتاب Thinking in Systems نوشته دانلا میدوز، می‌تواند نقطه شروعی برای درک عمیق‌تر مفاهیم این حوزه باشد. این جزوه چکیده‌ای از کتاب INCOSE Systems Engineering Handbook ویرایش پنجم می‌باشد که برای علاقه‌مندان به این رشته خلاصه شده است.

همچنین علاقه‌مندان به مطالعه بیشتر روی مطالعات موردی (Case Studies) می‌توانند از لینک زیر اقدام کنند :

https://sebokwiki.org/wiki/Implementation_Examples

مهندسی سیستم‌ها (SE)

جهان ما و سیستم‌هایی که طراحی می‌کنیم به طور مداوم پیچیده‌تر و درهم‌تنیده‌تر می‌شوند. مهندسی سیستم‌ها یک رویکرد یکپارچه است که به تیم‌ها کمک می‌کند تا سیستم‌ها و پیچیدگی آن‌ها را درک کرده و مدیریت کنند و در نهایت سیستم‌هایی موفق ارائه دهند.

دیدگاه SE مبتنی بر **تفکر سیستمی** است. یک دیدگاه که آگاهی ما را از کل‌ها و ارتباط اجزا در درون آن کل‌ها تقویت می‌کند. هدف مهندسی سیستم‌ها این است که اجزا به گونه‌ای با یکدیگر کار کنند که اهداف کلی سیستم محقق شوند. متخصصان SE در تیم‌های پروژه کار می‌کنند و یک رویکرد جامع، متعادل و مبتنی بر چرخه عمر را اتخاذ می‌کنند تا به تکمیل موفق پروژه‌های سیستم‌ها کمک کنند.

مسئولیت SE این است که سیستم‌هایی را ایجاد کند که "مناسب هدف" باشند، به این معنا که سیستم‌ها اهداف مورد نظر خود را به انجام برسانند، در برابر اثرات در دنیای واقعی انعطاف‌پذیر باشند و در عین حال از اقدامات ناخواسته، اثرات جانبی و پیامدهای منفی جلوگیری کنند.

منشأ مفهوم سیستم:

مفاهیم یک سیستم به طور کلی به فلسفه غربی و بعدها به علم بازمی‌گردد، اما مفهومی که برای متخصصان SE آشنا تر است، اغلب به **لودویگ فون برتalanفی (1950، 1968)** نسبت داده می‌شود که یک سیستم را به عنوان یک «کل» شامل «اجزای» متعامل تعریف می‌کند.

سیستم کامل:

شامل تمام تجهیزات، تأسیسات، مواد، برنامه‌های کامپیوتری، فریمور، مستندات فنی، خدمات و پرسنل مرتبط برای عملیات و پشتیبانی است، تا جایی که استفاده خودکفا در محیط موردنظر ممکن باشد.

توضیح (2019) INCOSE :

- سیستم‌ها می‌توانند **فیزیکی** یا **مفهومی** باشند، یا ترکیبی از هر دو.
- سیستم‌های فیزیکی از ماده و انرژی تشکیل شده‌اند و ممکن است اطلاعاتی در حامل‌های ماده-انرژی رمزگذاری شده باشند و رفتار قابل مشاهده‌ای را نشان دهند.
- سیستم‌های مفهومی، سیستم‌های انتزاعی اطلاعات خالص هستند و رفتار مستقیمی را نشان نمی‌دهند، اما «معنا» را نمایش می‌دهند.
- در سال 1990، یک انجمن حرفه‌ای برای SE به نام **شورای ملی مهندسی سیستم‌ها (NCOSE)** توسط نمایندگان چندین شرکت و سازمان آمریکایی تأسیس شد.
- به دلیل افزایش مشارکت متخصصان SE در خارج از ایالات متحده، نام این سازمان در سال 1995 به **شورای بین‌المللی مهندسی سیستم‌ها (INCOSE)** تغییر یافت.

با معرفی استاندارد بین‌المللی ISO/IEC 15288 در سال 2002، رشته مهندسی سیستم‌ها به‌طور رسمی به‌عنوان یک مکانیزم ترجیحی برای ایجاد توافق در تولید محصولات و خدمات بین سازمان‌های تأمین‌کننده و خریدار شناخته شد.

مفهوم بهینه‌سازی تلاش SE :

- سطح بهینه تلاش SE: برای بسیاری از پروژه‌ها، 10٪ تا 14٪ از کل هزینه پروژه به SE اختصاص داده شود تا بهترین ROI (Return on Investment) یا بازگشت سرمایه به دست آید.
- تلاش کم یا بیش از حد SE هر دو منجر به افزایش هزینه‌ها یا تأخیر در زمان‌بندی می‌شوند.

مفهوم Emergence :

• تعریف:

- Emergence پدیده‌ای است که در آن کل یک سیستم ویژگی‌هایی را نشان می‌دهد که تنها در سطح کل سیستم معنادار هستند و نمی‌توان آن‌ها را به عناصر منفرد سیستم نسبت داد.
- این ویژگی‌ها از تعاملات بین عناصر سیستم یا بین سیستم و محیط آن حاصل می‌شوند.

• ویژگی‌های emergent :

- ویژگی‌های مطلوب: مانند ایمنی سیستم یا انعطاف‌پذیری.
- ویژگی‌های نامطلوب: مانند تداخل، مهار یا تشدید پدیده‌ها.

مثال‌های کاربردی از: Emergence

• ایمنی سیستم:

- ایمنی کل سیستم تنها از تعاملات صحیح بین عناصر سیستم به‌دست می‌آید و نمی‌توان آن را از عملکرد عناصر منفرد نتیجه گرفت.

• انعطاف‌پذیری (Resilience) :

- انعطاف‌پذیری یک سیستم به تعاملات مناسب و مدیریت اثرات محیطی وابسته است.

مهندسان باید تعاملات بین عناصر سیستم را طراحی و مدیریت کنند تا ویژگی‌های مطلوب (مانند ایمنی یا انعطاف‌پذیری) تقویت و ویژگی‌های نامطلوب (مانند تداخل یا مهار) کاهش یابند.

مجموعه‌ای از System of interest (Sol) و سیستم‌های عمل‌گرا را می‌توان به‌عنوان سیستم سیستم‌ها در نظر گرفت.

سیستم‌های ارتباطی (Interfacing Systems):

- سیستم‌هایی که با SOL از طریق یک رابط (فیزیکی، داده‌ای یا ...) تعامل دارند.

سیستم‌های عمل‌گرا: (Interoperating Systems)

- سیستم‌هایی که در محیط عملیاتی SOL با آن همکاری کرده و برای دستیابی به یک هدف مشترک کار می‌کنند.

سیستم‌های تسهیل‌کننده: (Enabling Systems)

- سیستم‌هایی که فعالیت‌های چرخه عمر SOL را پشتیبانی می‌کنند، اما بخشی از محیط عملیاتی مستقیم SOL نیستند.

مثال‌ها از سیستم‌های خارجی:

نوع سیستم خارجی	مثال‌ها
سیستم‌های ارتباطی	حسگرهایی که داده‌ها را به SOL منتقل می‌کنند یا کاربران انسانی که با سیستم تعامل دارند.
سیستم‌های عمل‌گرا	سیستم‌های هوایی و زمینی که برای یک مأموریت مشترک با یکدیگر کار می‌کنند.
سیستم‌های تسهیل‌کننده	خطوط تولید، سیستم‌های مدیریت لجستیک، یا ابزارهای توسعه نرم‌افزاری.

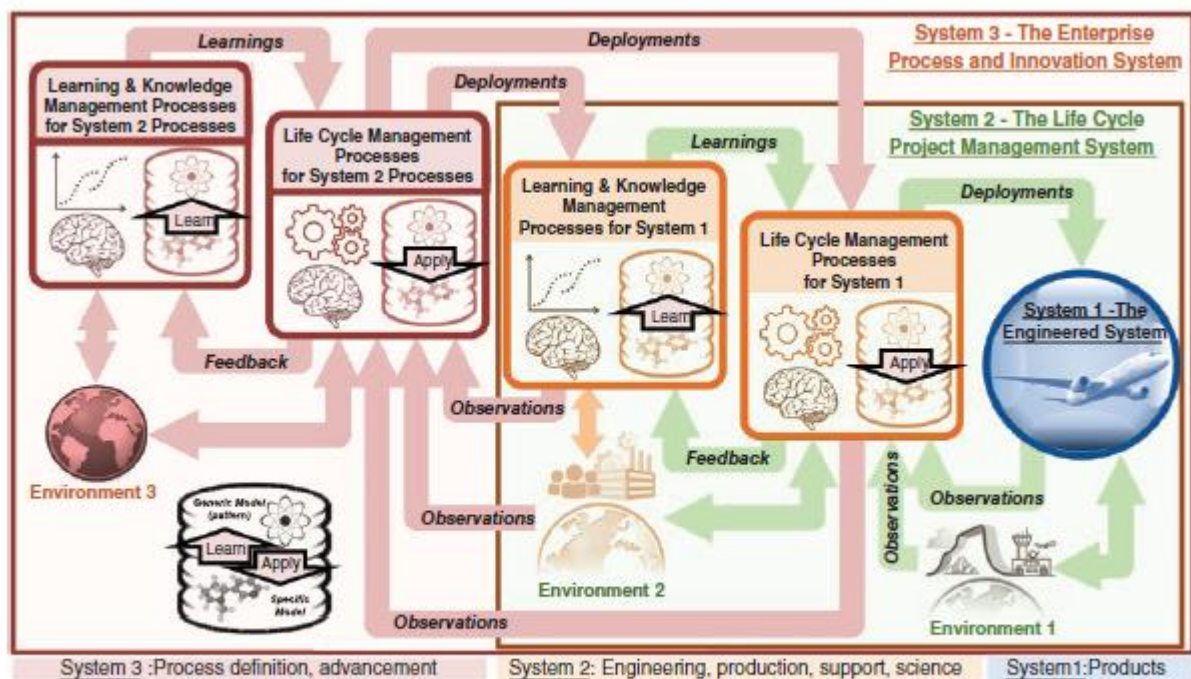


FIGURE 1.6 System innovation ecosystem pattern. From Schindel and Dove (2016) and Schindel (2022b). Used with permission. All other rights reserved.

- سیستم 1: یک هواپیما که در محیط عملیاتی خود پرواز می‌کند.
- سیستم 2: فرآیندهای مدیریت تولید و نگهداری که عملکرد هواپیما را پشتیبانی می‌کنند.
- سیستم 3: فرآیندهای سازمانی که ابزارها، روش‌ها، و سیاست‌های پشتیبان برای سیستم 2 را تعریف و بهبود می‌بخشند.

اهمیت ساختار سلسله مراتبی:

1. مدیریت پیچیدگی:
 - تقسیم یک سیستم به عناصر کوچکتر و سادهتر باعث مدیریت بهتر پیچیدگی می شود.
2. انعطاف پذیری طراحی:
 - این ساختار امکان تغییر و بهبود بخش های خاصی از سیستم را بدون تأثیر بر کل سیستم فراهم می کند.
3. یکپارچگی و تعامل:
 - تعامل بین عناصر مختلف در یک ساختار سلسله مراتبی بهتر تعریف و کنترل می شود.

مثال های سلسله مراتب:

1. یک وسیله نقلیه (Vehicle):
 - سیستم اصلی: خودرو
 - عناصر سیستم: موتور، چرخ ها، سیستم ترمز
 - موتور (به عنوان سیستم): شامل پیستون ها، میل لنگ، سوپاپ ها (عناصر زیرمجموعه)
2. یک سیستم اطلاعاتی:
 - سیستم اصلی: نرم افزار مدیریت داده
 - عناصر سیستم: پایگاه داده، واسط کاربری، سرورها
 - پایگاه داده (به عنوان سیستم): شامل جداول، ایندکس ها، و داده ها

جدول خطاهای شناختی

تأثیر بر مهندس سیستم	توضیحات	خطای شناختی
سوالات و توصیف مسائل را به دقت طراحی کنید تا از تأثیرگذاری در پاسخ جلوگیری شود.	نحوه‌ی پرسش یا توصیف مسائل تصمیم‌گیری اهمیت دارد.	چارچوب‌بندی (Framing)
حقایق و داده‌های مرتبط را قبل از درخواست قضاوت بررسی کنید. از قانون بیز برای به‌روزرسانی باورها استفاده کنید.	افراد براساس ویژگی‌های نمایانگر نتیجه‌گیری کرده و اغلب حقایق مرتبط یا نرخ‌های پایه را نادیده می‌گیرند.	نماینده‌گی (Representativeness)
حقایق و داده‌های مرتبط را بپرسید و سیستم‌هایی طراحی کنید که داده‌های مرتبط را ارائه دهند.	ما به رویدادهای زنده و اخیر وزن بیشتری می‌دهیم.	دسترسی (Availability)
هرگز با پرسیدن نتیجه‌ی مورد انتظار شروع نکنید.	تخمین اولیه بر تخمین‌های نهایی تأثیر می‌گذارد.	لنگر انداختن (Anchoring)
سوگیری‌های احتمالی فرد را در ارائه تخمین‌ها درک کنید.	افراد هنگام قضاوت‌های احتمالی ممکن است برای تخمین‌هایی که به نفع خودشان است انگیزه داشته باشند.	انگیزشی (Motivational)
داده‌های مربوط به نتایج مشابه بد را جستجو کنید.	احتمال نتایج خوب را بیش از حد تخمین زده و احتمال نتایج بد را دست‌کم می‌گیریم.	خوش‌بینی (Optimism)
داده‌هایی که باور فعلی ما را رد می‌کنند به صورت فعالانه جستجو کنید.	داده‌هایی را که باورهای ما را تأیید می‌کنند بیشتر وزن می‌دهیم.	تأیید (Confirmation)
نظرات مخالف را در داخل گروه جستجو کنید و ارزیابی‌های خارجی درخواست کنید.	گروهی از افراد تصمیمات غیرمنطقی برای حفظ هماهنگی گروهی می‌گیرند.	تفکر گروهی (Group Think)
نظرات منبع را ارزیابی کنید.	ما به افراد دارای قدرت اعتماد بیشتری کرده و تحت تأثیر نظرات آنها قرار می‌گیریم.	اقتدار (Authority)
معیارهای تصمیم‌گیری صحیح را تعیین کنید.	فرض اینکه شخصی با رتبه بالاتر همیشه در تصمیم‌گیری‌ها درست است.	رتبه‌گرایی (Rankism)

قانون بیز (Bayes' Theorem) یک قاعده در احتمال و آمار است که برای به‌روزرسانی احتمال وقوع یک رویداد در حضور اطلاعات یا شواهد جدید به کار می‌رود. این قانون ارتباطی بین احتمال اولیه (prior probability) و احتمال پسین (posterior probability) برقرار می‌کند.

تعریف ریاضی قانون بیز

قانون بیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} = P(A|B)$$

که در آن:

- $P(A|B)$: احتمال شرطی وقوع رویداد A با فرض اینکه B رخ داده است (احتمال پسین).
- $P(B|A)$: احتمال شرطی وقوع B با فرض اینکه A رخ داده است.
- $P(A)$: احتمال اولیه وقوع A (قبل از در نظر گرفتن اطلاعات B).
- $P(B)$: احتمال وقوع B (مجموعه احتمالات تمام حالات ممکن که می‌توانند منجر به B شوند).

مفهوم ساده

فرض کنید می‌خواهید احتمال اینکه یک فرد بیمار باشد (رویداد A) با توجه به نتیجه یک تست مثبت (رویداد B) را محاسبه کنید. قانون بیز به شما اجازه می‌دهد این احتمال را با توجه به اطلاعات زیر محاسبه کنید:

1. احتمال اولیه بیمار بودن فرد ($P(A)$).
2. احتمال اینکه تست در صورت بیمار بودن مثبت باشد ($P(B|A)$).
3. احتمال کلی تست مثبت شدن ($P(B)$).

مثال:

فرض کنید:

- $P(A) = 0.01$: احتمال اولیه اینکه فرد بیمار باشد (1% افراد جامعه بیمارند).
- $P(B|A) = 0.9$: احتمال اینکه تست بیماری در صورت بیمار بودن مثبت باشد (90% دقت).
- $P(B|\neg A) = 0.05$: احتمال مثبت شدن تست در صورت بیمار نبودن (5% خطای مثبت کاذب).
- $P(\neg A) = 0.99$: احتمال اینکه فرد بیمار نباشد.

حال، $P(B)$ (احتمال کلی تست مثبت) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$P(\neg A) \cdot P(B|\neg A) + P(A) \cdot P(B|A) = P(B)$$

$$0.0144 = (0.99 \cdot 0.05) + (0.01 \cdot 0.9) = P(B)$$

سپس، احتمال پسین $(P(A|B))$ به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} = P(A|B)$$

$$0.625 \approx \frac{0.01 \cdot 0.9}{0.0144} = P(A|B)$$

بنابراین، احتمال اینکه فرد بیمار باشد با توجه به تست مثبت، 62.5% است.

کاربردهای قانون بیز

1. پزشکی: برای ارزیابی احتمال ابتلا به بیماری‌ها با توجه به نتایج آزمایش.
2. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین: برای طبقه‌بندی داده‌ها و پیش‌بینی.
3. تحلیل ریسک: برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت.
4. تشخیص عیب: در سیستم‌های مهندسی برای ارزیابی احتمال خطا یا نقص.

قانون بیز ابزاری قوی برای تصمیم‌گیری منطقی در شرایط نامطمئن است.

هفت اصل از اصول 15 گانه ی مهندسی سیستم ها در ادامه آورده میشود :

7. نیازهای ذی نفعان می تواند تغییر کند و باید در طول چرخه عمر سیستم در نظر گرفته شود.

8. مهندسی سیستم ها نیازهای ذی نفعان را با در نظر گرفتن بودجه، زمان بندی، نیازهای فنی و دیگر انتظارات و محدودیت ها بررسی می کند.

• **زیر اصل 8(a):** مهندسی سیستم ها به دنبال بهترین تعادل بین توابع و تعاملات سیستم در محدوده بودجه، زمان بندی، نیازهای فنی و انتظارات دیگر است.

9. تصمیمات مهندسی سیستم ها تحت عدم قطعیت و با در نظر گرفتن ریسک اتخاذ می شوند.

10. کیفیت تصمیم گیری به دانش مربوط به سیستم، سیستم های پشتیبان و سیستم های هم عمل کننده موجود در فرآیند تصمیم گیری بستگی دارد.

11. مهندسی سیستم ها تمام چرخه عمر سیستم را شامل می شود.

- **زیر اصل 11(a):** مهندسی سیستم ها به درک سیستم دست می یابد.
- **زیر اصل 11(b):** مهندسی سیستم ها زمینه مأموریت (کاربرد سیستم) را تعریف می کند.
- **زیر اصل 11(c):** مهندسی سیستم ها سیستم را مدل سازی می کند.
- **زیر اصل 11(d):** مهندسی سیستم ها سیستم را طراحی و تحلیل می کند.
- **زیر اصل 11(e):** مهندسی سیستم ها سیستم را آزمایش می کند.
- **زیر اصل 11(f):** مهندسی سیستم ها از تولید سیستم پشتیبانی می کند.
- **زیر اصل 11(g):** مهندسی سیستم ها از عملیات، نگهداری و بازنشستگی سیستم پشتیبانی می کند.

12. سیستم های پیچیده توسط سازمان های پیچیده مهندسی می شوند.

13. مهندسی سیستم ها رشته های مهندسی و علمی را به طور مؤثر یکپارچه می کند.

14. مهندسی سیستم ها مسئول مدیریت تعاملات بین رشته ها در سازمان است.

15. مهندسی سیستم ها بر اساس مجموعه ای از نظریه های میان برد است.

- **زیر اصل 15(a):** مهندسی سیستم ها دارای مبنای نظریه سیستم ها است.
- **زیر اصل 15(b):** مهندسی سیستم ها دارای مبنای منطقی-فیزیکی خاص سیستم است.
- **زیر اصل 15(c):** مهندسی سیستم ها دارای مبنای ریاضی است.
- **زیر اصل 15(d):** مهندسی سیستم ها دارای مبنای جامعه شناختی خاص سازمان است.

مهندسی در ابتدا از طریق مهارت‌های عملی و تجربیات کسب‌شده در ساخت و سازهای جهان قدیم مانند ساختمان‌ها، شهرها و ماشین‌های جنگی آغاز شد. در طی قرن‌ها، بشر تلاش کرده است تا دانش خود را به شکل "چگونه انجام دادن" مستند کند و از نسل‌های پیشین بیاموزد.

نمونه‌های اولیه قواعد سرانگشتی در مهندسی:

- مرکز ثقل را پایین نگه دارید.
- 80 درصد جرم را در ستون‌ها متمرکز کنید.

این قوانین اولیه، از آزمون و خطا و شکست‌های واقعی مانند فرو ریختن سقف یا برج‌ها به وجود آمدند. با گذشت زمان و پیشرفت علم و فناوری، قواعد تجربی جای خود را به تحلیل‌های پیشرفته و شبیه‌سازی‌ها دادند.

تحولات اخیر

در دوران مدرن، سیستم‌های پیچیده‌ای ساخته می‌شوند که علم مهندسی سنتی را به چالش می‌کشند. در پاسخ به این چالش‌ها:

- علوم اجتماعی و رفتاری
- علوم مدیریت
- علم سیستم‌ها به مهندسی سیستم‌ها اضافه شده‌اند تا راه‌حل‌هایی برای پیچیدگی‌های جدید ارائه دهند.

کاربردهای فعلی

توجه دوباره به اصول تجربی در مهندسی سیستم‌ها تا حد زیادی مدیون کتاب Maier و Rehtin (2009) است که هنوز هم یکی از بهترین منابع منتشرشده در این زمینه به‌شمار می‌رود.

نمونه‌ای از قواعد تجربی مهندسی سیستم‌ها:

1. بیان اولیه مسئله را لزوماً درست یا بهینه ندانید:

- این اصل می‌گوید که نباید فرض کرد که تعریف اولیه مسئله بهترین یا درست‌ترین تعریف است. این موضوع باید با دقت و احترام با کاربران و ذی‌نفعان مدیریت شود.
- شکست در دستیابی به تفاهم متقابل در مراحل اولیه اغلب علت اصلی شکست پروژه‌ها است.
- ایجاد روابط قوی با ذی‌نفعان می‌تواند در حل مسائل دشوار در مراحل بعدی مفید باشد.

1. مسائل ناشناخته در مراحل اولیه پروژه‌ها:

در مراحل ابتدایی یک پروژه، مسائل ناشناخته اغلب چالش‌برانگیزتر از مشکلات شناخته‌شده هستند. درک صحیح از محیط، شناسایی کامل ذی‌نفعان، و بررسی پیامدهای احتمالی راه‌حل‌ها می‌تواند مسائل پیش‌بینی‌نشده بسیاری را آشکار کند. این مسئله بر اهمیت برنامه‌ریزی و تحلیل دقیق در مراحل آغازین پروژه تأکید دارد.

2. مدل سازی قبل از ساخت:

"ابتدا مدل سازی کنید، سپس بسازید" این قاعده بیان می کند که، در صورت امکان، ابتدا سیستم را مدل سازی کنید.

○ علم سیستم ها این اصل را ارائه می دهد:

"تنها مدل کامل از یک سیستم در محیط آن، خود سیستم در محیط آن است".

○ این قاعده به استفاده از چرخه های زندگی تکاملی، استقرار سریع نمونه های اولیه، و چرخه های زندگی چابک

اشاره دارد و نشان دهنده نقش روش های مدرن در طراحی و توسعه سیستم های قرن بیست و یکم است.

ایجاد مخزنی از قواعد تجربی

یک مخزن قواعد تجربی می تواند به عنوان پایگاه دانش عمل کند و شامل موارد زیر باشد:

- رسانه های متنی، تصویری یا ویدیویی (مانند کلیپ های آموزشی).
- رسانه های تعاملی برای تشویق به بحث و دریافت بازخورد.

ویژگی های یک مخزن کارآمد قواعد تجربی:

- ارتباط با منابع دانش موجود:

این مخزن باید به دیگر منابع معتبر دانش متصل باشد.

- استفاده از متاداده ها:

قواعد باید با برچسب های متاداده برای بازیابی آسان تر طبقه بندی شوند.

- سازماندهی مبتنی بر حوزه های مهارت: SE

مخزن باید بر اساس حوزه های پذیرفته شده مهارت در مهندسی سیستم ها سازمان دهی شود.

- امکان تنظیم مجموعه شخصی:

کاربران باید بتوانند مجموعه ای از قواعد مرتبط با فعالیت های حرفه ای یا شخصی خود را انتخاب و سفارشی سازی کنند.

متاداده (Metadata) به داده‌هایی گفته می‌شود که اطلاعاتی درباره داده‌های دیگر ارائه می‌دهند. به عبارت دیگر، متاداده‌ها "داده درباره داده" هستند. آن‌ها برای توصیف ویژگی‌ها، ساختار، یا محتوای اصلی داده‌ها استفاده می‌شوند و کمک می‌کنند تا داده‌ها به طور مؤثر سازمان‌دهی، جستجو، و مدیریت شوند.

مثال از متاداده در یک فایل عکس

یک فایل عکس دیجیتال ممکن است حاوی متاداده‌هایی مانند موارد زیر باشد:

- نام فایل: IMG_1234.jpg
- ابعاد: 1920x1080: پیکسل
- دوربین: Canon EOS 80D
- تاریخ عکس‌برداری: 2023-11-19
- مکان: تهران، ایران
- تنظیمات: f/2.8, 1/200s, ISO 100

این اطلاعات به کاربران کمک می‌کنند تا عکس‌ها را بر اساس دوربین، مکان، تاریخ، و دیگر ویژگی‌ها سازمان‌دهی و جستجو کنند.

رابطه بین علم سیستم‌ها، تفکر سیستمی، و مهندسی سیستم‌ها

- دیدگاه سیستمی (Systems Worldview): ترکیب مفاهیمی مانند سیستم، مرزها، روابط، محیط/زمینه، سلسله‌مراتب، ظهور (Emergence)، ارتباطات، و کنترل با هدف خاص، منجر به ایجاد دیدگاه سیستمی می‌شود.
- تفکر سیستمی (Systems Thinking): تفکر سیستمی توانایی شناسایی الگوهای سیستم در پدیده‌های مختلف، زمینه‌های مسئله، و رشته‌ها را فراهم می‌کند.
 - این تفکر ما را قادر می‌سازد تا سیستم‌ها را به صورت یکپارچه بررسی کرده و درباره آن‌ها به طور منطقی تحلیل کنیم.
- علم سیستم‌ها (Systems Science): مطالعه الگوهای سیستم‌ها به توسعه علوم سیستمی مانند نظریه عمومی سیستم‌ها (General System Theory)، سایبرنتیک (Cybernetics)، و نظریه پیچیدگی (Complexity Theory) منجر شده است.
- مهندسی سیستم‌ها (SE): کاربرد تفکر سیستمی و مفاهیم علمی سیستم‌ها در مهندسی، پایه‌ای برای عمل مهندسی سیستم‌ها است.
 - بازتاب نتایج SE به بهبود علم سیستم‌ها و تفکر سیستمی کمک می‌کند و این چرخه بازخورد مثبت، توانایی ما را برای طراحی و مداخله در سیستم‌های پیچیده تقویت می‌کند.

• نقش اصول سیستمی:

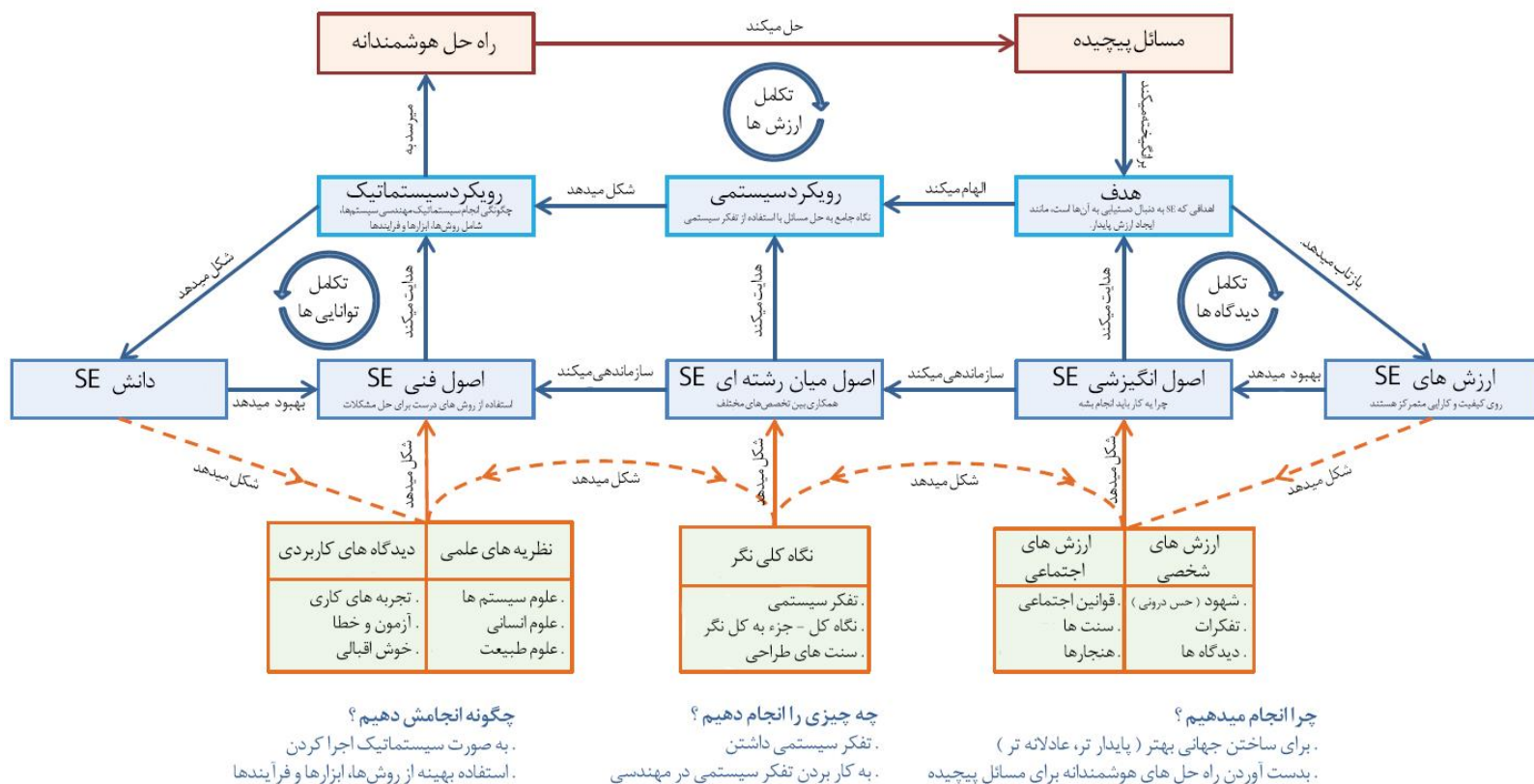
- اصول سیستمی، دلیل انجام کارها (Why)، اهداف (What)، و روش‌های انجام کارها (How) را در مهندسی سیستم‌ها هدایت می‌کنند.
- این اصول از پیچیدگی و ظرافت به‌عنوان پدیده‌های سیستمی الهام می‌گیرند.

• هدف چرخه:

ایجاد راه‌حل‌های زیبا و کارآمد برای مسائل پیچیده.

- موفقیت در کاربردهای مهندسی سیستم‌ها، اعتبار دیدگاه سیستمی را تقویت می‌کند.
- این دیدگاه به متخصصان SE کمک می‌کند تا بهتر درک کنند:

1. چرا یک راه‌حل نیاز است.
2. چگونه می‌توان یک راه‌حل را طراحی کرد.
3. چه ابزارها و روش‌هایی برای حل مسائل پیچیده مناسب هستند.



یک چارچوب معماری برای تکامل رشته مهندسی سیستم‌ها

تلاش‌ها برای ایجاد علم سیستم‌ها به دو شکل **کاهشی** و **کلی‌نگر** انجام شده‌اند که هر دو ارزشمند هستند.

- برای مثال، ساعت یک سیستم است، اما عملکرد آن را می‌توان با رویکرد کاهشی توضیح داد.
 - از طرف دیگر، رویکرد کلی‌نگر به ما کمک می‌کند بفهمیم چرا به ساعت‌ها نیاز داریم، چگونه ساعت‌ها در محیط خود طی چرخه عمرشان (عملکرد، پایداری، یا تخریب) وجود دارند، و چگونه طراحی زیبای آن‌ها با گذر زمان تکامل پیدا می‌کند.
- هر دو رویکرد کاهشی و کلی‌نگر برای توضیح سیستم‌ها از استدلال‌های سیستمی استفاده می‌کنند، اما از جهت‌های مختلفی شروع می‌کنند:

- رویکرد کاهشی (**Reductionist**) : از پایین به بالا. (bottom-up)
- رویکرد کلی‌نگر (**Holistic**) : از خارج به داخل. (outside-in)

در مهندسی سیستم‌ها، نیاز است که بین دو جنبه سیستماتیک و سیستمی تعادل برقرار شود:

1. سیستماتیک بودن : شامل استفاده از فرآیندهای مهندسی سیستم‌ها است.
2. سیستمی بودن : به معنای به‌کارگیری تفکر سیستمی برای هدایت این فرآیندهاست.

برای متخصصان مهندسی سیستم‌ها، داشتن دانش و مهارت‌های لازم برای انجام تحلیل جامع و هدایت مداخلات سیستمی بسیار حیاتی است.

بیشتر رویکردهای برجسته تفکر سیستمی ریشه در علوم مدیریت دارند یا در این حوزه استفاده می‌شوند.

- با این حال، این رویکردها به همان اندازه در عمل مهندسی سیستم‌ها قابل استفاده هستند، زیرا مشکلاتی که متخصصان مهندسی سیستم‌ها با آن مواجه می‌شوند (مانند نیاز به گنجاندن دیدگاه‌های فرهنگی، اجتماعی، سیاسی و مدیریتی در مدل‌های سیستم‌ها و سایر وظایف مهندسی سیستم‌ها) مشابه چالش‌های علوم مدیریت هستند.

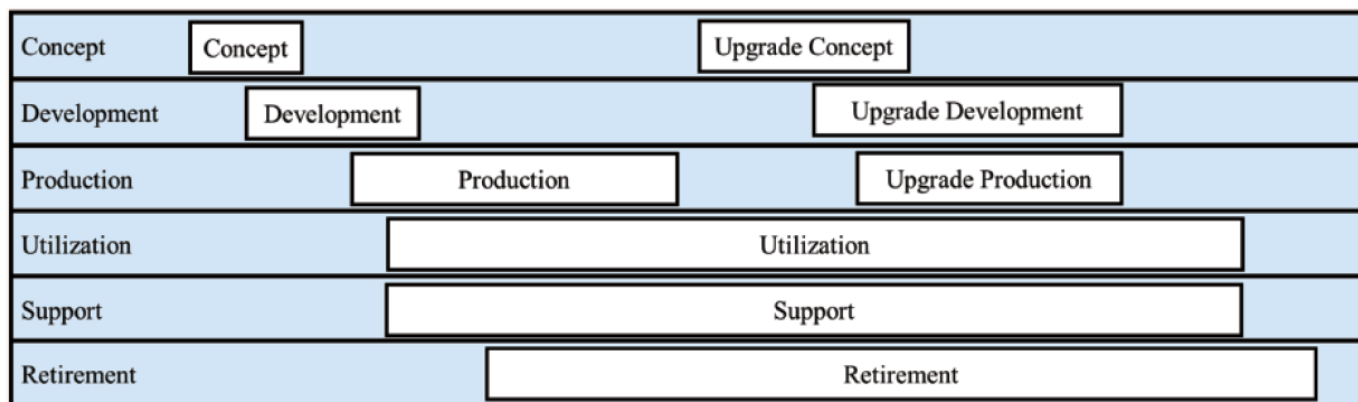
به گفته متخصصان تفکر سیستمی، اگر مهندسی سیستم‌ها (**SE**) بتواند طیف کامل روش‌شناسی‌ها، مدل‌ها، و روش‌های سیستم‌ها را بپذیرد، در موقعیت بسیار بهتری برای مقابله با **فوق‌پیچیدگی‌هایی** که پروژه‌ها، سازمان‌ها و جوامع معاصر را گرفتار کرده‌اند، قرار خواهد گرفت.

- **چرخه عمر سیستم:**
مشابه مراحل رشد موجودات زنده (که به آن چرخه عمر گفته می‌شود)، مجموعه‌ای از مراحل برای سیستم وجود دارد که به آن **چرخه عمر سیستم (System Life Cycle)** گفته می‌شود.

چرخه عمر سیستم:

سیستم‌های مهندسی شده به‌طور مفهومی از مجموعه‌ای از مراحل عبور می‌کنند که این مراحل چرخه عمر سیستم را تشکیل می‌دهند.

دروازه‌های تصمیم‌گیری تعیین می‌کنند که یک مرحله پایان یافته و مرحله جدیدی شروع شود.



این تصویر مراحل چرخه عمر سیستم را نمایش می‌دهد. مراحل ذکر شده شامل:

1. **Concept مفهوم:** مرحله‌ای که در آن ایده و نیازهای اولیه برای سیستم شناسایی و بررسی می‌شوند.
 - **Upgrade Concept:** بروزرسانی یا ارتقاء مفهوم اولیه در صورت نیاز.
2. **Development توسعه:** مرحله‌ای که در آن سیستم طراحی، مدل‌سازی و توسعه داده می‌شود.
 - **Upgrade Development:** بروزرسانی یا ارتقاء مراحل توسعه سیستم.
3. **Production تولید:** مرحله‌ای که سیستم ساخته شده و به تولید می‌رسد.
 - **Upgrade Production:** ارتقاء و بروزرسانی فرآیند تولید.
4. **Utilization استفاده:** مرحله‌ای که سیستم وارد عملیات شده و در محیط واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
5. **Support پشتیبانی:** ارائه پشتیبانی، تعمیر و نگهداری سیستم در طول عمر عملیاتی آن.
6. **Retirement بازنشستگی:** مرحله‌ای که سیستم به پایان چرخه عمر خود می‌رسد و بازنشسته یا جایگزین می‌شود.

هر مرحله می‌تواند با دیگر مراحل همپوشانی داشته باشد یا در صورت نیاز چندین بار تکرار شود، همان‌طور که در نمودار نمایش داده شده است. این رویکرد انعطاف‌پذیری لازم برای مدیریت سیستم‌های پیچیده را فراهم می‌کند.

- نمودارهای چرخه عمر معمولاً مقیاس‌های زمانی مراحل را نشان نمی‌دهند.
- مثلاً یک سیستم ممکن است در چند سال از مرحله مفهوم اولیه به مرحله عملیاتی برسد و برای چند دهه مورد استفاده و ارتقاء قرار گیرد (مانند هواپیماهای جت یا نیروگاه‌های هسته‌ای).
- اما سیستم‌های دیگر ممکن است چرخه‌های توسعه متوالی با دوره‌های کوتاه استفاده و بازنشستگی داشته باشند (مانند تلفن‌های همراه یا الکترونیک مصرفی).

مرحله بازنشستگی زمانی است که سیستم یا یکی از عناصر سیستم و خدمات مرتبط با آن از بهره‌برداری خارج می‌شوند. فعالیت‌های مهندسی سیستم در این مرحله عمدتاً بر اطمینان از رعایت الزامات دفع متمرکز است که می‌تواند گسترده باشد. با این حال، اغلب ارزشمند است که مستندات تولید شده حداقل در مراحل بهره‌برداری و پشتیبانی بایگانی شود. این اطلاعات می‌تواند در صورت شناسایی نیاز به یک سیستم جدید بسیار ارزشمند باشد.

برنامه‌ریزی برای بازنشستگی بخشی از تعریف سیستم در طول مراحل مفهوم‌سازی و توسعه است. تجربه بارها نشان داده است که نادیده گرفتن بازنشستگی سیستم از ابتدا، پیامدهای جدی به دنبال دارد. اوایل قرن بیست و یکم، بسیاری از کشورها قوانین خود را تغییر دادند تا توسعه‌دهنده یک سیستم را مسئول دفع مناسب آن در پایان عمر مفیدش بدانند.

هدف از تشکیل تیم بازبینی و حسابرسی فنی

این تیم برای ارزیابی پیشرفت پروژه و اطمینان از انطباق سیستم با الزامات فنی و نیازهای ذی‌نفعان تشکیل می‌شود. وظیفه اصلی تیم این است که بررسی کند آیا سیستم موردنظر (SoI) به سطح قابل‌قبولی از بلوغ فنی، کیفیت، و کاهش ریسک رسیده است یا خیر. این تیم همچنین به عنوان بخشی از فرآیند تصمیم‌گیری عمل می‌کند تا اطمینان حاصل شود که پروژه آماده حرکت به مرحله بعدی از چرخه عمر است یا نیاز به اصلاحاتی دارد.

نحوه سازماندهی تیم بازبینی و حسابرسی فنی

1. تعریف هدف و محدوده بازبینی یا حسابرسی

- هدف بازبینی یا حسابرسی مشخص می‌شود (برای مثال، آیا طراحی سیستم با الزامات فنی همخوانی دارد؟).
- محدوده‌ای که بررسی خواهد شد تعیین می‌شود (برای مثال، طراحی، الزامات، یا نتایج آزمایش‌ها).

2. تخصیص نقش‌ها و مسئولیت‌ها

- مدیر پروژه: مدیریت کلی پروژه را بر عهده دارد و به عنوان رابط بین ذی‌نفعان و تیم فنی عمل می‌کند.
- مهندس اصلی سیستم: (Lead SE Practitioner) هدایت جنبه‌های فنی سیستم، نظارت بر انطباق با الزامات، و پشتیبانی فنی از تیم.
- رئیس بازبینی: (Chair) هماهنگ‌کننده جلسات بازبینی، اطمینان از رعایت فرآیندهای تعریف‌شده.
- ضبط‌کننده: (Recorder) ثبت دقیق تمام بحث‌ها، تصمیمات، و اقدامات تعیین‌شده در جلسات.
- نمایندگان خریدار و تأمین‌کننده: تضمین می‌کنند که دیدگاه‌ها و انتظارات ذی‌نفعان و تأمین‌کنندگان در نظر گرفته شود.
- رهبران فنی و ارزیابی: هدایت جنبه‌های تخصصی (مانند ارزیابی و تأیید سیستم) و ارائه تخصص فنی در زمینه خاص پروژه.

3. برنامه‌ریزی و هماهنگی

- تاریخ و مکان جلسات بازبینی مشخص می‌شود.
- معیارهای ورود و خروج (Entry & Exit Criteria) برای هر بازبینی تعریف و بین همه اعضا شفاف‌سازی می‌شود.

- بررسی‌های پیش‌جلسه (Dry-Runs) ممکن است برای افزایش اثربخشی جلسه برگزار شود.

4. اجرای جلسات بازبینی یا حسابرسی

- ارائه گزارشات: تیم‌های مختلف گزارش‌های مرتبط با بخش خود را ارائه می‌کنند.
- بحث و ارزیابی: اعضا مستندات و عملکردها را بررسی می‌کنند و نظرات خود را مطرح می‌کنند.
- ثبت تصمیمات و اقدامات: هرگونه تصمیم یا اقدام لازم همراه با مسئولیت‌ها و تاریخ‌های انجام مشخص می‌شود.

5. پیگیری و نظارت

- اطمینان از اجرای اقدامات تعیین‌شده.
- ارزیابی و ثبت نتایج در سیستم مدیریت پیکربندی (Configuration Management).

مزایای تشکیل تیم بازبینی و حسابرسی فنی

- شناسایی مشکلات پیش از موعد: بررسی‌های منظم به تیم اجازه می‌دهد مشکلات بالقوه را پیش از حرکت به مرحله بعدی شناسایی و حل کند.
- کاهش ریسک: اطمینان حاصل می‌شود که ریسک‌های فنی و اجرایی به حداقل ممکن کاهش یافته‌اند.
- اطمینان از انطباق: سیستم با الزامات فنی، نیازهای ذی‌نفعان و استانداردهای مورد انتظار مطابقت دارد.
- تسهیل تصمیم‌گیری: بازبینی‌ها کمک می‌کنند تا بر اساس اطلاعات مستند و تحلیل‌های دقیق، تصمیم‌گیری‌های بهتری انجام شود.

رویکردهای مدل چرخه عمر

بخش 2.1 مفهوم مراحل چرخه عمر را معرفی کرد. مدل‌های چرخه عمر به عنوان چارچوب‌هایی عمل می‌کنند که در آن مراحل چرخه عمر و گذار بین این مراحل برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی می‌شوند. مدل‌های چرخه عمر متنوعی وجود دارند که هر کدام برای شرایط خاصی مناسب هستند.

مدل‌های چرخه عمر معمولاً به سه گروه تقسیم می‌شوند:

1. مدل ترتیبی (Sequential)

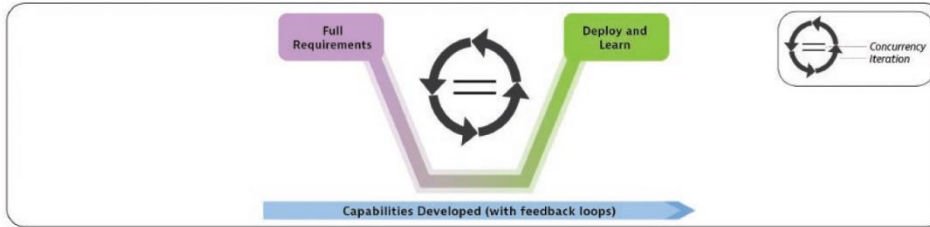
2. مدل افزایشی (Incremental)

3. مدل تکاملی (Evolutionary)

رویکرد ترتیبی

توسعه کامل سیستم از ابتدا تا انتها به صورت خطی و مرحله‌به‌مرحله

Sequential



ویژگی‌ها:

- مناسب برای پروژه‌های با نیازمندی‌های پایدار و مشخص - فرآیند ساده و ساختاریافته - زمان زیاد برای ارائه اولین نسخه - انعطاف‌پذیری کم در برابر تغییرات

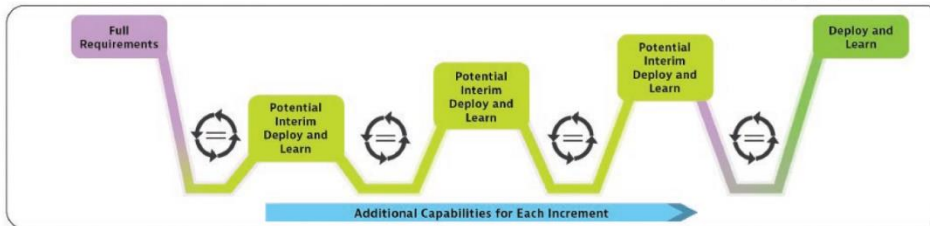
مراحل:

- جمع‌آوری و تکمیل کامل نیازمندی‌ها
- توسعه و تکمیل سیستم (با حلقه‌های بازخورد برای بهبود)
- استقرار و یادگیری

رویکرد افزایشی

توسعه سیستم در قالب افزایش‌های جداگانه که هر یک قابلیت‌های جدیدی به سیستم اضافه می‌کند.

Incremental



ویژگی‌ها:

- ارائه سریع قابلیت‌های اولیه - انعطاف‌پذیری بیشتر برای اصلاح و بهبود - مدیریت پیچیده‌تر - احتمال ناسازگاری بین افزایش‌ها

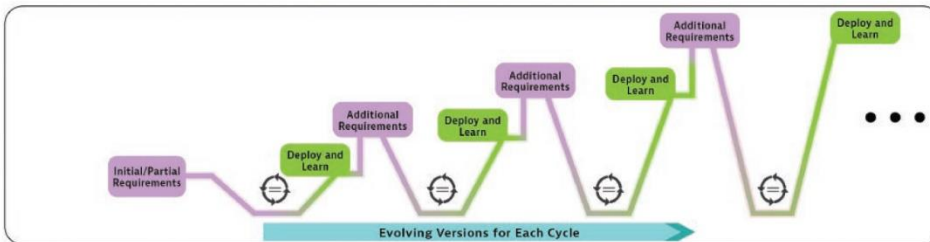
مراحل:

- شروع با نیازمندی‌های اولیه و جزئی
- استقرار موقت نسخه اولیه و یادگیری
- جمع‌آوری نیازمندی‌های اضافی
- تکرار فرآیند برای تکمیل نسخه‌های تکمیلی
- استقرار و یادگیری در هر چرخه

رویکرد تکاملی

توسعه سیستم به صورت تکراری و در چندین چرخه، با تمرکز بر یادگیری و تکامل مداوم.

Evolutionary



ویژگی‌ها:

- انعطاف‌پذیری بالا در برابر تغییرات - بهبود تدریجی و مستمر سیستم - مناسب برای پروژه‌های پیچیده و نامشخص - نیاز به مدیریت و هماهنگی بالا - امکان طولانی شدن چرخه‌های توسعه

FIGURE 2.5 Concepts for the three life cycle model approaches. INCOSE SEH original figure created by Endler. Usage per the INCOSE NOTICES page. All other rights reserved.

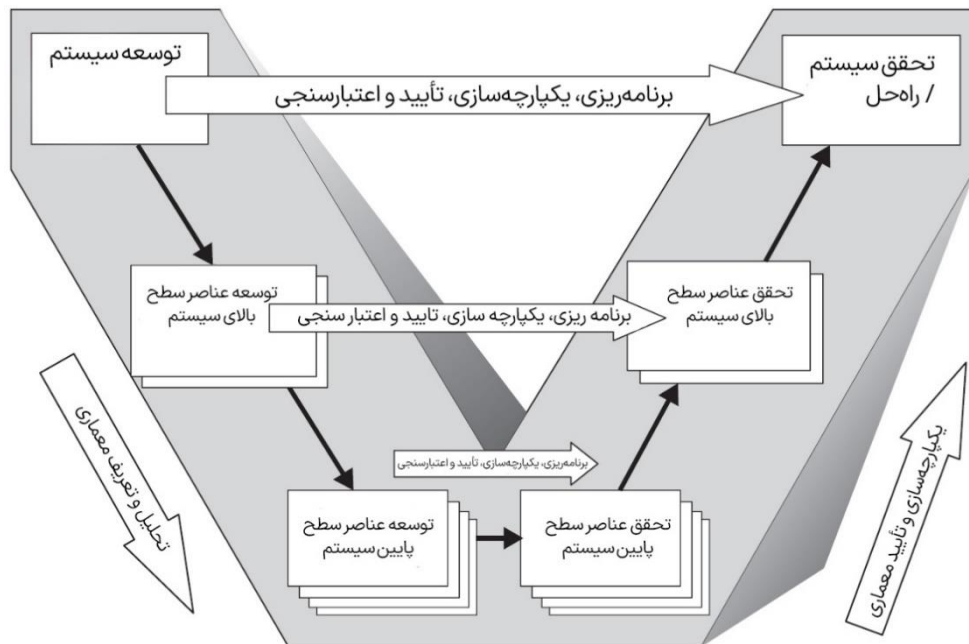
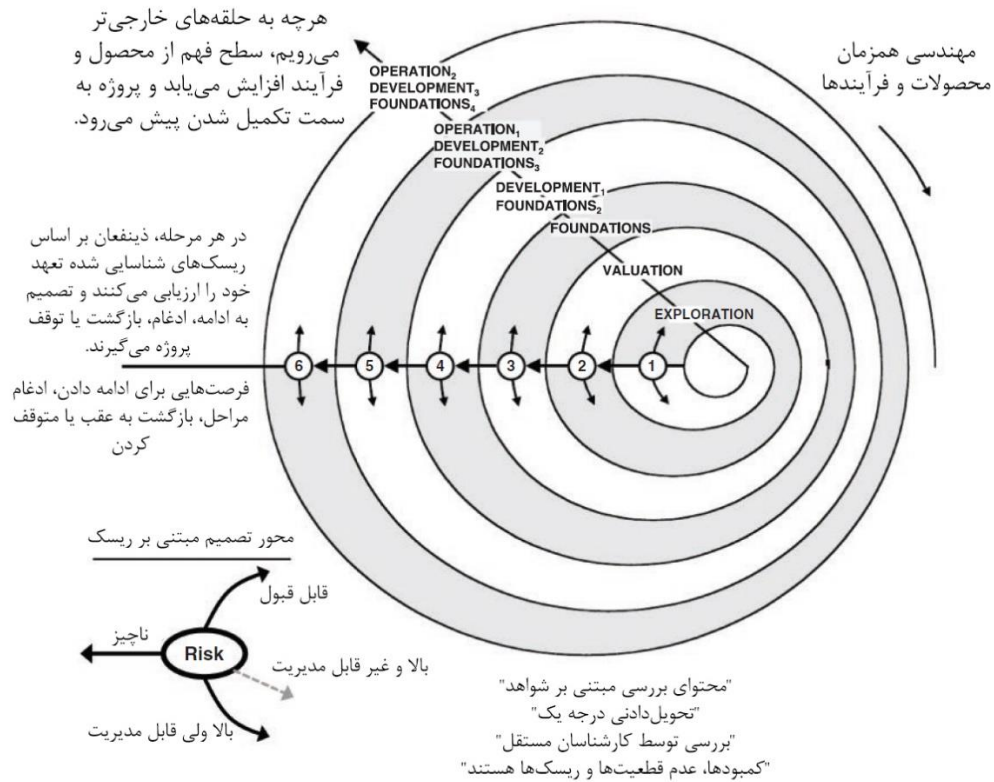


FIGURE 2.6 The SE Vee model. From Forsberg, et al. (2005) with permission from John Wiley & Sons. All other rights reserved.

ساختار V برای نشان دادن دو جریان کلیدی (طراحی و آزمون) و ارتباط مستقیم آن‌ها طراحی شده است. این مدل تأکید می‌کند که هر مرحله طراحی باید مستقیماً با یک مرحله آزمون متناظر باشد و اهمیت تکرار و ارزیابی در هر سطح سیستم را برجسته می‌سازد.

رویکردهای افزایشی از دهه ۱۹۶۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. (Larman and Basili, 2003) این روش‌ها یک رویکرد عملی و کاربردی ارائه می‌دهند که به پروژه‌ها این امکان را می‌دهد تا ابتدا یک قابلیت اولیه (یا مجموعه‌ای محدود از قابلیت‌ها) ارائه شود و سپس با تحویل‌های متوالی، به سیستم مطلوب (SoI) دست یابند. هدف از رویکرد افزایشی ارائه ارزش سریع و پاسخگویی به نیازها است. به‌طور کلی، هر افزایش قابلیت‌هایی را اضافه می‌کند که به نتیجه‌ای مورد رضایت ذینفعان برای همان افزایش منجر می‌شود.

بر اساس مجموعه‌ای از الزامات، مجموعه‌ای از افزایش‌ها تعریف می‌شود و افزایش اولیه شروع می‌شود. سپس افزایش‌های بعدی آغاز می‌شوند و این فرآیند تکرار می‌شود تا زمانی که یک سیستم کامل پیاده‌سازی شود یا سازمان تصمیم بگیرد که پروژه را متوقف کند. همچنین، افزایش‌های میانی می‌توانند برای پشتیبانی از یادگیری به کار گرفته شوند.



۱. مرحله ایجاد : مرحله ای است که در آن اکتشاف اولیه انجام می‌شود و ریسک‌های مرتبط بررسی می‌شود.
۲. مرحله ارزیابی : ارزیابی اولیه انجام شده و بررسی می‌شود که آیا پروژه از لحاظ اقتصادی و فنی ارزش ادامه دادن دارد یا خیر.
۳. مرحله زیر بنایی : این مرحله مربوط به ایجاد زیربنای پروژه است، مانند معماری اولیه و برنامه های اولیه
۴. مرحله توسعه : پیشرفت‌های صورت گرفته در این مرحله ارزیابی می‌شود و تصمیم‌گیری برای ادامه یا تغییر مسیر انجام می‌گیرد.
۵. مرحله عملیات و توسعه ۲ : پیشرفت‌های صورت گرفته در این مرحله ارزیابی می‌شود و تصمیم گیری برای ادامه یا تغییر مسیر انجام می‌گیرد.
۶. مرحله عملیات و توسعه ۳ : در این مرحله، تمرکز بر عملیات و پیشرفت‌های توسعه‌ای است و تصمیم‌گیری درباره مرحله بعد صورت می‌گیرد.

FIGURE 2.7 The Incremental Commitment Spiral Model (ICSM). From Boehm, et al. (2014) with permission from Pearson Education. All other rights reserved.