ISSN: 2008-5079 / EISSN: 2538-2365
DOI: 10.22034/AAUD.2020.120061

بررسی رویکردهای الگوریتمیک در چیدمان فضایی (با تأکید بر نظریه گراف)

رمیصاء رحمتی گواری[۱]- هادی قدوسی‌فر[۲]*- منصوره طاهباز[۳]- فاطمه زارع میرک‌آباد[۴]

۱. دکتری معماری، گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲. استادیارگروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
۳. دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۴. استادیار گروه آموزشی علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۰۸ تاریخ اصلاحات: ۹۷/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۷/۰۹/۲۶ تاریخ انتشار: ۹۹/۰۹/۳۰

چکیده

چیدمان فضایی در پلان و به خصوص پلان‌های عملکردی از مهم‌ترین بخش‌های هر طرح معماری است. چیدمان فضایی نامناسب منجر به ناکارآمدی پلان در خصوص عملکرد موردنظر می‌شود. جهت چیدمان تسهیلات کارخانه‌ها الگوریتم‌های بسیاری توسط مهندسین صنایع به‌کار گرفته می‌شوند. با پیشرفت‌های صورت گرفته در علوم کامپیوتر این فرض مطرح است که بتوان از الگوریتم‌ها جهت رسیدن به چیدمان فضایی مطلوب در طرح‌های معماری نیز استفاده نمود. در راستای به کارگیری الگوریتم‌ها نیاز است روش‌هایی ارائه شوند تا الگوریتم‌ها با به کارگیری آن‌ها روند چیدمان فضایی را هدایت کنند. هدف پژوهش بررسی مدل‌های اولیه ارائه شده مبتنی بر این روش‌ها است. هدف اصلی پژوهش تمرکز بر انتخاب مدلی است که با به کارگیری آن بتوان روابط فضایی را با تأکید بر همجواری عملکردی فضاها در مراحل ابتدایی طرح و بدون درگیر کردن طراح با ابعاد و اندازه‌ها مدل کرد. از طرفی دیگر این مدل قابلیت توسعه در جهت اعمال ابعاد و اندازه‌ها در مراحل بعدی را نیز دارا است. در راستای انجام پژوهش مدل‌های ارائه شده برای هر یک از این روش‌ها با استفاده از روش مرور نظام‌مند ارائه شده‌اند. سه مدل اصلی در این خصوص وجود دارند. مدل اول شامل بهینه‌سازی براساس یک تابع تک متغیره، مدل دوم مبتنی به تئوری گراف و مدل سوم، مرتبط با بهینه‌سازی چند معیاره می‌باشد. با توجه به اهمیت همجواری عملکردی فضاها در پلان‌های عملکردی و معادل سازی مفهومی نظریه نحو فضا با تئوری گراف و امکان تحلیل روابط عملکردی توسط آن مدل دوم مدلی بسیار مطلوب و انعطاف‌پذیر جهت استفاده طراحان می‌باشد.

واژگان کلیدی: چیدمان فضایی، همجواری عملکردی، تئوری گراف، نحوفضا، الگوریتم.

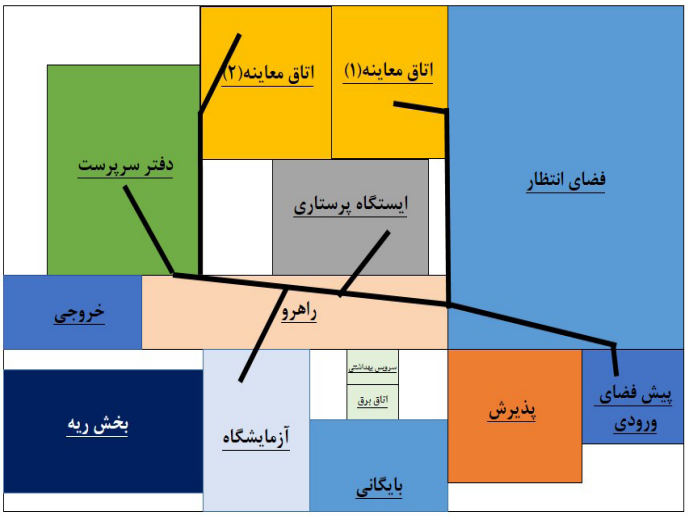
* E_mail: Hadi.ghoddusi@gmail.com

۱. بیان مسئله

چیدمان فضایی از اصلی‌ترین وظایف معماران است. چیدمان فضایی نامناسب می‌تواند سبب کاهش کارایی پلان شود. «برنامه‌ریزی چیدمان یافتن مجموعه‌ای از مکان‌ها جهت جانمایی فعالیت‌ها می‌باشد، به‌گونه‌ای که جانمایی صورت گرفته با اهداف و نیازهای طرح همخوانی داشته باشد» (Mourshed, Manthilake, & Wright, 2009). در واقع چیدمان فضایی یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه است که هدف آن یافتن مناسب‌ترین ترکیب واحدهای طراحی با توجه به محدودیت‌های موجود بدون به خطر انداختن نیازهای کاربران است (Liggett & Mitch-ell, 1981). «بهترین چیدمان فضایی با بررسی کامل فضای راه‌حل‌ها صورت می‌گیرد» (Jagielski & Gero, 1996). «فضای راه‌حل، بزرگ و پیچیده است» (Liggett, 1985). یک طراح تنها می‌تواند منطقه محدودی از فضای راه‌حل را برای رسیدن به چیدمان فضایی مطلوب بررسی کند، به‌همین دلیل چیدمان به دست آمده الزاماً بهینه نمی‌باشد. در نتیجه برای بررسی فضای راه‌حل، تکنیک‌های محاسباتی‌ای همچون چیدمان فضایی الگوریتمیک مورد نیاز است (Michalek & Choudhary, 2002). «تلاش‌ها برای دستیابی به‌برنامه‌ریزی فضایی الگوریتمیک تقریباً از چهل سال پیش آغاز شده است» (Liggett & Mitchell, 1981). اولین روش‌ها جهت ایجاد رویکردهای محاسباتی در تحلیل و تولید طرح‌های معماری، به دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ باز می‌گردد (Alexander, 1964; March & Steadman, 1971; Steadman, 1983). از اوایل دهه ۱۹۶۰ برنامه‌های رایانه‌ای متعددی جهت حل خودکار مسائل چیدمان فضایی توسعه یافتند. بسیاری از تحقیقات بر مسئله چیدمان فضایی در پلان متمرکز بودند (Liggett, 1985). هارت و مور (۱۹۷۳) شناخت فضایی را آگاهی از بازنمایی درونی یا شناخت ساختارها، موجودیت‌ها و روابط فضایی تعریف کردند (Hart & Moore, 1973).

بسیاری از محققین چون ایستمن (۱۹۷۳)، فلیمینگ (۱۹۷۸)، گریسون (۱۹۷۸)، بیکان و فاکس (۱۹۸۹)، چارمن (۱۹۹۳) و مدداب و یانو (۲۰۰۱) تحقیقاتی اکتشافی دراین خصوص انجام داده و روند استفاده از روش‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک، برنامه‌نویسی ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی را دراین خصوص توسعه دادند (Kazakov & Gero,1998; Mi-chalek, Choudhary, Papalambros, 2002; Caldas, 2008). فلمینگ و همکاران (۱۹۹۵) محیطی نرم‌افزاری جهت پشتیبانی از مراحل اولیه طراحی ساختمان[1] ایجاد کردند که (SEED) نام داشت. شکل ۱ نمونه‌ای از خروجی این برنامه را نشان می‌دهد. در این تصویر، چیدمان فضایی یک پلان درمانی به همراه مسیرهای ارتباطی نشان داده شده‌است.

شکل ۱: نمایش مسیرهای دسترسی چیدمان فضایی درSEED



(Liggett, 2000)

«چیدمان فضایی به کمک رایانه، فرآیندی تعاملی بین طراح و رایانه است که به‌جستجوی مؤثر فضای راه‌حل کمک می‌کند» (Jagielski & Gero, 1997). مشابهت بسیاری میان سازماندهی فضایی پلان‌های عملکردی و چیدمان تسهیلات کارخانه‌ها که غالباً توسط مهندسین صنایع صورت می‌گیرد، وجود دارد. در مهندسی صنایع کوپمن[2] و بکمن[3] اولین کسانی بودند که مسئله چیدمان تسهیلات را به‌عنوان یک مسئله رایج صنعتی تعریف کردند. جهت رسیدن به چیدمان فضایی مطلوب مسائل بسیاری دخیل هستند. مهندسین صنایع برای رسیدن به چیدمان تسهیلات مطلوب، بهینه‌سازی آن و فرار از محدودیت‌های ذهن انسان از الگوریتم‌ها بهره برده‌اند. متأسفانه در معماری توجه به چیدمان عملکردی فضاها به جدیت مهندسی صنایع، پی‌گیری نشده است. در

طراحی فضاهایی چون بیمارستان‌ها، این موضوع می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. در چیدمان تسهیلات کارخانه‌ها که توسط مهندسین صنایع صورت می‌پذیرد، هدف کاهش هزینه‌ها است؛ اما در طراحی بیمارستان‌ها این چیدمان موجب بهبود روند گردش بیماران، پرستاران، پزشکان و در نهایت منجر به نجات جان بیماران می‌شود. این پژوهش به بررسی رویکردهای الگوریتمک جهت چیدمان تسهیلات کارخانه‌ها می‌پردازد تا با بررسی نقاط ضعف و قوت آن‌ها و با توجه به محدودیت‌ها و الزامات، به رویکردی جهت استفاده در تحلیل و طراحی در معماری دست یابد که در مراحل ابتدایی طراحی به‌کار گرفته شده و قابلیت مدلسازی و اعمال ابعاد و اندازه‌ها را در مراحل بعدی داشته باشد.

۲. روش تحقیق

توجه به چیدمان فضایی در پلان‌های عملکردی موضوع مهمی رشته‌های صنایع و معماری است. مهندسین صنایع جهت رسیدن به چیدمان تسهیلات مطلوب از الگوریتم‌های مطرح در علوم کامپیوتری بهره می‌برند. چیدمان تسهیلات در کارخانه‌ها معمولاً آخرین مرحله در فرآیند طراحی یک کارخانه است، اما در معماری، چیدمان عملکردی در مراحل ابتدایی طراحی صورت می‌گیرد. در مراحل ابتدایی، معمار در فضای توپولوژیک مشغول به طراحی است. در این زمینه می‌توان به نظریه نحو فضا در معماری اشاره داشت. «این نظریه مبتنی بر هندسه توپولوژیک است و اساساً جهت مطالعات مربوط به دسترسی و اتصال بین فضاهای شهری یا ساختمان‌های معماری به‌کار می‌رود» (Penn, Hillier, Banister, & Xu, 1998). در نتیجه این پژوهش با بررسی الگوریتم‌ها جهت قاعده‌مندسازی چیدمان فضایی، به دنبال روشی قابل استفاده در معماری به‌خصوص در مراحل ابتدایی طراحی می‌باشد که قابلیت توسعه در مراحل بعدی را نیز داشته باشد. بنابراین در این پژوهش با مطالعه روش‌های حل چیدمان تسهیلات در رشته مهندسی صنایع با استفاده از روش مرور نظام‌مند، مفاهیم و روش‌های مطرح در زمینه چیدمان فضایی الگوریتمیک مورد بررسی قرار گرفتند.

۳. نحوه نمایش فضا در مسئله چیدمان فضایی

مسائل چیدمان فضایی شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌هاست که باید به یک مکان نسبت داده شوند. این مکان‌ها به طرق مختلف نمایش داده می‌شوند:

۱. فضا به مثابه شیء‌ای گسسته (مسئله تخصیص یک‌به‌یک)
۲. فضا به مثابه سطح (حوزه- پهنه) (مسئله تخصیص چندبه‌یک)
۳. فضا به مثابه سطح و شکل (مسئله طرح‌ریزی بلوک‌بندی یا پلان طبقه)

این‌ها روش‌های اصلی در تکنیک‌های حل مسائل چیدمان فضایی می‌باشند. این تکنیک‌ها به نحوه نمایش فعالیت و فضای فیزیکی مرتبط هستند. ساده‌ترین مسئله طرح‌ریزی، تخصیص مجموعه‌ای از فعالیت‌های گسسته به مجموعه‌ای از فضاهای گسسته است که در آن هر فعالیت تنها به یک مکان اختصاص می‌یابد. این یک مسئله تخصیص یک‌به‌یک بوده و مساحت تمامی فضاهای عملکردی برابر درنظر گرفته می‌شوند. به‌طور کلی مسئله چیدمان فضایی را نمی‌توان یک مسئله تخصیص یک‌به‌یک درنظر گرفت، زیرا لزوماً فضاهای مورد نیاز برای انجام فعالیت‌ها برابر نیستند. مسئله تخصیص چند به یک یا یک به چند چگونگی تقسیم فعالیت‌ها به چندین طبقه یا بالعکس را توصیف می‌کند. تا اینجا شکل واقعی فضایی که فعالیت در آن رخ می‌دهد، درنظر گرفته نشده است. پیچیده‌ترین مسائل، تخصیص با در نظر گرفتن سطح و شکل (طرح‌ریزی بلوک‌بندی) است که در آن علاوه بر مساحت به شکل و فرم فضا نیز توجه می‌شود (Liggett, 2000).

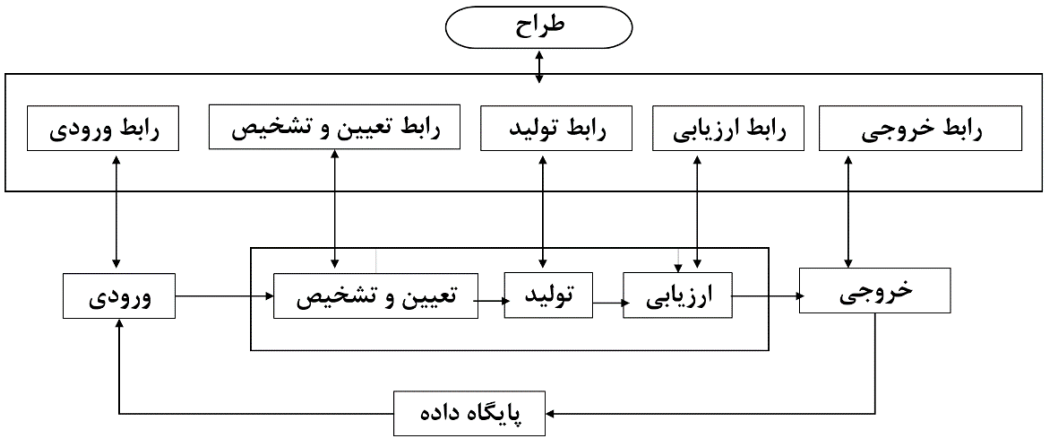
حل این‌گونه مسائل با توجه به پیچیدگی آن‌ها بدون استفاده از الگوریتم‌های رایانه‌ای تقریباً غیرممکن است. اما آنچه برای درک این الگوریتم‌ها مورد نیاز است، یافتن روش‌هایی است که الگوریتم‌ها از آن‌ها جهت هدایت فرآیند چیدمان استفاده می‌کنند.

۴. روش‌های هدایت روند چیدمان فضا و تسهیلات توسط الگوریتم‌ها

«مسئله جانمایی و چیدمان تسهیلات و فضاها به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی شناخته می‌شود، که می‌تواند در انواع مختلفی از مسائل مانند: جانمایی بیمارستان‌ها، مدارس، فرودگاه‌ها، انبارها و غیره مورد استفاده قرار گیرد. در مهندسی صنایع جانمایی تسهیلات در کارخانه‌ها مرتبط با یافتن بهترین چیدمان ممکن برای N فضای فعالیت در N مکان است، به صورتی‌که هزینه انتقال مواد حداقل شود. جهت پاسخ به محدودیت‌ها و الزامات طرح، موقعیت نسبی هر بخش باید مشخص شود» (Singh & Sharma, 2006). سه روش جهت هدایت روند چیدمان وجود دارد. روش اول مبتنی بر بهینه‌سازی یک تابع معیار می‌باشد. در طراحی چیدمان تسهیلات کارخانه این چیدمان باید به نحوی صورت پذیرد که هزینه‌های حمل و نقل به حداقل ممکن برسد. در نتیجه تابع معیار در این مثال به حداقل رساندن هزینه‌های ارتباطی است. روش دوم مبتنی بر تئوری گراف است. جهت به‌کارگیری این رویکرد باید گرافی جهت نمایش مجاورت عملکردی فعالیت‌ها ایجاد کرد (Grason, 1971). بسیاری از رویکردهایی که این روش را دنبال می‌کنند بر مبنای روش چیدمان عملکردی فضایی ریچارد مدرز پیش می‌روند. این روش به ایجاد دیاگرام‌های ارتباطات فضایی منجر می‌شود (Muther, 2015). روش سوم به دنبال یافتن چیدمانی است که مجموعه‌ای متنوع از محدودیت‌ها را دربر دارد.

برای مثال می‌توان به برنامه‌ریزی فضایی عمومی ایستمن و حل کننده مسئله طراحی ففرکورن اشاره داشت. یکی از جدیدترین سیستم‌هایی که زیر مجموعه این روش قرار می‌گیرد، SEED است که سیستمی نرم‌افزاری برای پشتیبانی از مراحل اولیه طراحی ساختمان بوده و نمونه‌ای شماتیک از جانمایی فضاها به صورت مستطیل شکل تحت محدودیت‌های متنوعی همچون دسترسی، نور طبیعی و محرمیت ایجاد می‌کند (Liggett, 2000). شکل ۲ فرآیند چیدمان فضایی نرم افزار SEED را نشان می‌دهد.

شکل ۲: فرآیند چیدمان فضایی نرم افزار SEED



(Flemming & Woodbury, 1995)

۴-۱- روش اول: بهینه‌سازی براساس یک تابع تک متغیره

این روش الگوریتمیک جهت چیدمان تسهیلات برای اولین بار توسط کوپمانس و بکمن برای تخصیص ماشین‌آلات کارخانه‌ها صورت گرفت، با این شرط که فاصله بین بخش‌های وابسته عملکردی به حداقل برسد. این موضوع که تحت عنوان مسئله تخصیص درجه دو شناخته می‌شود، مرتبط با یافتن مکان‌های بهینه برای بخش‌هایی است که از لحاظ عملکردی به یکدیگر وابسته‌اند. این مسئله می‌تواند به صورت تخصیص N فضای عملکردی به N یا بیشتر از N سایت تعریف شود. هر سایت می‌تواند تنها به یک فضای عملکردی اختصاص یابد. همراه با هر جفت فعالیت (i,j)، معیاری جهت نمایش اثر این جفت بر هم Q(i,j) وجود دارد. همراه با هر جفت سایت (ناحیه) (k,l) معیاری جهت اندازه‌گیری انفصال فضایی C(k,l) وجود دارد. به‌علاوه یک هزینه ثابت F(i,k) که ممکن است مرتبط با جانمایی فعالیت i در سایت k باشد. اگر A(i) نشان دهندهٔ سایتی باشد که فعالیت i در یک نگاشت(A) (فعالیت‌ها به سایت‌ها) به آن (سایت) تخصیص داده شده، کل هزینه این نگاشت (راه‌حل) می‌تواند به صورت زیر درنظر گرفته شود:

$$Cost(A) = \sum_{activity\ i} F\big(i,A(i)\big) + \sum_{activity\ i} \sum_{activity\ j} [Q(i,j)C(A(i),A(j))]$$

هدف، ایجاد یک نگاشت A است به طوری‌که تابع هزینه A(Cost) به حداقل برسد. در نظر گرفتن مسئله چیدمان(فضایی) پلان به‌عنوان یک مسئله تخصیص درجه دو برای اولین بار توسط آرمور[۴] و بوفا[۵] در سال ۱۹۶۳ انجام شد. آن‌ها چیدمان یک کارخانه را در نظر گرفتند که در آن هدف به حداقل رساندن هزینه جابه‌جایی محصولات و مواد بین بخش‌ها بود. نتیجه کار آن‌ها منجر به تولید برنامه CRAFT[۶] شد (Liggett, 2000). در مسئله تخصیص درجه دوم، چیدمان فضایی پلان می‌تواند به صورت یک مسئله ترکیبی درنظر گرفته شود که باید در آن فضاهای فعالیت تفکیک نشده به مکان‌های مشخص در پلان تخصیص داده شوند. در اصل این مسئله به وسیله درنظر گرفتن تمامی جایگشت‌های ممکن انتساب فعالیت‌ها به مکان‌ها و ایجاد پلانی انجام می‌گیرد که به تمامی محدودیت‌ها پاسخ دهد. در عمل رسیدن به چیدمان مناسب برای مسائل در ابعاد واقعی (مثلاً تخصیص فضا به بیش از ۱۵ فعالیت) امکان ناپذیر است. زیرا تعداد ترکیبات فعالیت/ مکان ممکن بسیار وسیع است. می‌توان نشان داد که مسائل تخصیص درجه دو متعلق به دسته‌ای از مسائل ریاضی تحت عنوان مسائل ان پی کامپلیت هستند.

به طور کلی رسیدن به راه‌حل کارآمد جهت حل مسائل ان پی کامپلیت غیر ممکن است. راهبردهای موجود جهت حل تقریبی مسئله می‌توانند به دو دسته تقسیم شوند: ۱. استراتژی مقدار اولیه سودمند (سازنده)؛ ۲. استراتژی بهسازی تکرار شونده (بهینه‌سازی). استراتژی با مقدار اولیه سازنده، راه‌حلی را با استفاده از یک فرآیند تصمیم‌گیری

n مرحله‌ای ایجاد می‌کنند (مانند الگوریتم تپه نوردی). راهبردهای بهسازی با یک راه‌حل شروع کرده و تلاش می‌کنند که به طور متوالی آن را بهبود دهند (مانند الگوریتم ژنتیک) (Liggett, 2000).

۴-۲- روش دوم: رویکرد تئوری گراف

مسئله اصلی ایجاد طرحی است که بتواند پاسخگوی الزامات همجواری عملکردی فضاها باشد. تحقیقات زیادی در این‌خصوص انجام شده که بخشی از آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: تحقیقات مبتنی بر تئوری گراف جهت چیدمان فضا و تسهیلات

شماره ردیف	منبع	سال	شماره ردیف	منبع	سال
۱	Foulds	۱۹۸۳	۱۱	Rosenblatt & Golany	۱۹۹۲
۲	Foulds & Giffin	۱۹۸۵	۱۲	Goetschalckx	۱۹۹۲
۳	Foulds, Giffin, & Cameron	۱۹۸۵	۱۳	Al-Hakim	۱۹۹۲
۴	Jacobs	۱۹۸۶	۱۴	Montreuil, Venkatadri, & Ratliff	۱۹۹۳
۵	Montreuil, Ratliff, & Goetschalckx	۱۹۸۷	۱۵	Bozer, Meller, & Erlebacher	۱۹۹۴
۶	Hassan & Hogg	۱۹۸۷	۱۶	Boswell	۱۹۹۴
۷	Al-Hakim	۱۹۹۱	۱۷	Al-Hakim	۲۰۰۱
۸	Hassan & Hogg	۱۹۹۱	۱۸	Wang & Sarker	۲۰۰۲
۹	Leung	۱۹۹۲	۱۹	Chan, Chan, & Ip	۲۰۰۲
۱۰	Kaku & Rachamadya	۱۹۹۲	۲۰	Diponegoro & Sarker	۲۰۰۳

(Singh & Sharama, 2005)

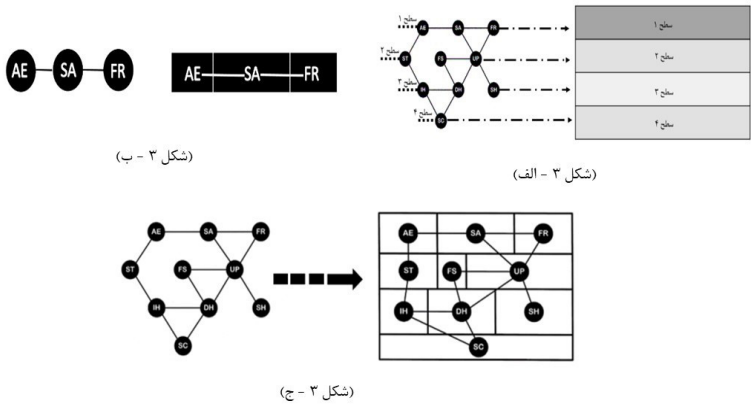
تئوری گراف شاخه‌ای از توپولوژی است. توپولوژی به خصوصیاتی از فضا اشاره دارد که تحت تغییر شکل‌ها حفظ می‌شوند. به‌عنوان مثال برنامه‌ریزی عمومی درون یک بیمارستان را می‌توان بدون در نظر گرفتن جزییاتی همچون اندازه یا فرم فضاها، تعداد کاربران یا سرعت حرکت توصیف کرد. چنین پیکره‌بندی شبکه‌ای می‌تواند توسط یک گراف نشان داده شود. گراف روشی جهت نمایش یک شبکه است که در آن گره‌ها به وسیله مجموعه‌ای از یال‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند (Chías, Abad, & García-Rosales, 2019). «فضای توپولوژیک مفهومی ریاضی و غیراقلیدسی است و در مقابل مفهوم اقلیدسی فضای متریک قرار می‌گیرد و می‌توان به وسیله آن مفاهیمی چون پیوستگی و فضای همبند را تعریف کرد» (Batty, 2004). «نظریه نحوفضا مبتنی بر فضای توپولوژیک است» (Penn, Hillier, Banister, & Xu, 1998).

«در میانه دهه ۱۹۸۰ میلادی، هیلیر و هانسون روش‌هایی را برای تحلیل معماری و فضای شهری به کار گرفتند. مهم‌ترین این روش‌ها بر درک رابطه توپولوژیک بین فضاها استوار بود. آن‌ها نظریه گراف را در پیوند ویژگی‌های ریاضیاتی به پدیده‌های اجتماعی- فضایی در معماری به کار بردند» (Hajian & Tajik, 2017). این رویکرد نیازمند ایجاد یک گراف مجاورت مسطح در مراحل اولیه طراحی بود» (Nassar, 2010). در گراف مسطح ایجاد شده گره‌ها نشان دهنده فضاهای عملکردی و یال‌ها ارتباط بین فضاها بودند. تئوری گراف یک فرآیند دو مرحله‌ای است. در مرحله اول گراف مسطح[۷] ایجاد می‌شود. ممکن است تعداد ارتباطات زیاد بوده و نتوان الزامات همجواری عملکردی فضاها را با یک گراف مسطح نشان داد. در این صورت جهت حل مسئله باید یک گراف مسطح کامل[۸] ایجاد شود. اگر به‌دنبال ایجاد گراف مسطح کامل از یک گراف وزندار باشیم، گراف مسطح کامل باید یال‌هایی با حداکثر وزن را دربرگیرد. مرحله دوم با ایجاد گراف دوگان از گراف مسطح حاصل می‌شود. گراف دوگان یک طرح را بدون درنظر گرفتن شکل و مساحت نمایش می‌دهد. در نهایت می‌توان ابعاد و اندازه و مساحت فضاها را به گراف دوگان حاصل شده اعمال کرد (Liggett, 2000).

با ایجاد یک ساختار شش ضلعی برای گراف مجاورت، گوتچالکز[۹] روشی کارآمد را برای ایجاد طرحی مستطیل شکل برای نمایش پلان ایجاد کرد که در آن مساحت موردنیاز هر فضا توسط دوگان گراف مسطح به دست می‌آید. جهت ایجاد طرح ابتدا یک مستطیل ترسیم می‌شود. سپس این مستطیل با توجه به تعداد سطوح گراف به دست آمده از روابط فضایی به سطوح افقی تقسیم می‌شود. این مطلب در شکل (۳- الف) نشان داده شده است. گراف نمایش داده شده دارای چهار سطح است، بنابراین بلوک مستطیل شکل به چهار سطح افقی تقسیم شده است. سپس هر ردیف با توجه به تعداد فضاها و

مساحت آن‌ها تقسیم‌بندی می‌شود. سطح یک گراف و چگونگی تبدیل آن به یک طرح مستطیلی در شکل (۳- ب) نشان داده شده است. در نتیجه طرح کلی حاصل از گراف همجواری به صورت شکل (۳- ج) خواهد بود.

شکل ۳: الف. تبدیل سطوح یک گراف مجاورت به یک طرح مستطیلی، ب. تبدیل سطر اول گراف به طرحی مستطیلی، ج. تبدیل گراف همجواری به طرحی مستطیلی



(شکل ۳ - ب)

(شکل ۳ - الف)

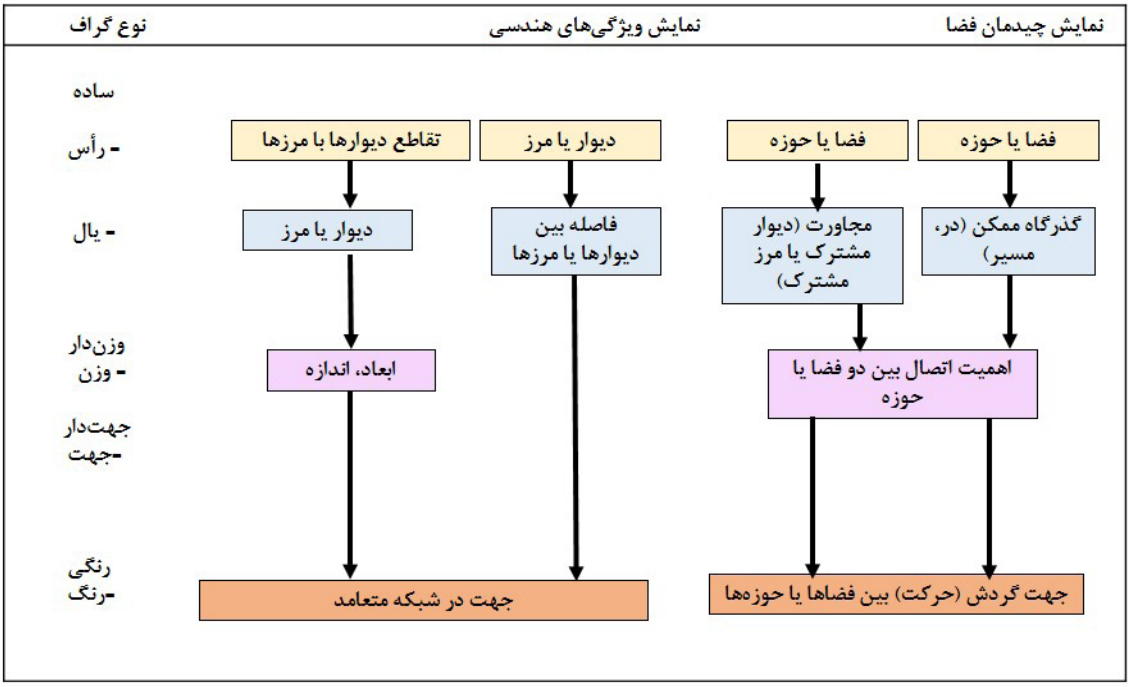
(شکل ۳ - ج)

(Liggett, 2000)

الگوریتم گوتچالکز (اسپیرال[۱۰]) در یک محصول تجاری به نام FactoryOPT مورد استفاده قرار گرفت. مونترویل[۱۱] و همکارانش نیز از یک مدل بهینه‌سازی خطی جهت ایجاد یک چیدمان فضایی از گراف مجاورت مسطح استفاده کردند. محدودیت هر دو رویکرد گوتچالکز و مونترویل مستطیل بودن محیط ساختمان است. رویکرد تئوری گراف به مسئله چیدمان فضایی از چندین جهت با رویکرد مسئله تخصیص درجه دوم متفاوت است. تفاوت اساسی در این است که رویکرد تئوری گراف تنها نیازهای تسهیلاتی دارای همجواری مستقیم را در نظر می‌گیرد و هزینه‌های ارتباطی جفت‌های غیر مجاور را درنظر نمی‌گیرد (Liggett, 2000).

تاریخچه طولانی‌ایی از کاربرد تئوری گراف در مسائل چیدمان فضایی وجود دارد. از این تکنیک جهت برنامه‌ریزی فضایی به تکرار و با استفاده از انواع مختلفی از گراف‌ها جهت نمایش پلان استفاده شده است (Levin, 1964; Casalaina & Rittel, 1967; Krejcirik, 1969; Grason, 1970a, 1970b, 1970c; Teague,1970). جدول ۲ نحوه نمایش مسائل طراحی توسط گراف‌ها، انواع و ویژگی‌های آن‌ها را نشان می‌دهد.

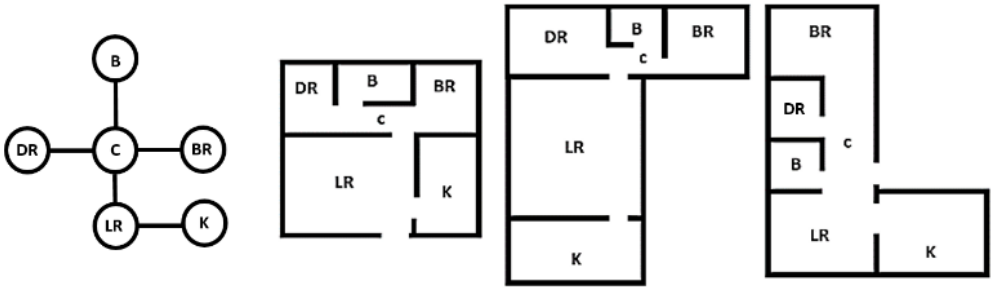
شکل ۴: انواع و ویژگی گراف‌ها



(Roth, Hashimshony, & Wachman, 1985)

تبدیل پلان به گراف ساده است. مرحله اول ایجاد گراف بر مبنای الزامات طرح است: به‌عنوان مثال همجواری عملکردی فضاها. این گراف در مرحله بعدی به یک پلان تبدیل می‌شود. در واقع گراف تولید شده پلانی منحصر به فرد را نمایش نمی‌دهد (شکل ۵)، زیرا هنگامی‌که که طراح الزامات را به صورت گراف توصیف می‌کند، هنوز طیف وسیعی از راه‌حل‌های معمارانه ممکن وجود دارند (Roth, Hashimshony, & Wachman, 1985).

شکل ۵: پلان‌های مختلف با گراف یکسان

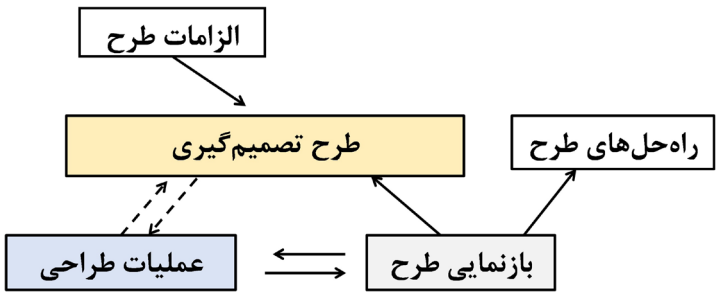


(Roth, Hashimshony, & Wachman, 1985)

۴-۲-۱- مدل گریسون جهت چیدمان فضایی خودکار به کمک تئوری گراف

گریسون الگویی را جهت نمایش فرآیند طراحی معرفی کرد. این الگو به صورت شماتیک در شکل ۶ نشان داده شده و شامل سه جزء می‌باشد: ۱. مجموعه‌ای از اطلاعات که بازنمایی طرح نامیده می‌شود؛ ۲. بخش‌های مربوط به مراحل طراحی که عملیات طراحی نامیده می‌شود و ۳. فرآیند طراحی که به صورت کلی طرح تصمیم‌گیری نامیده می‌شود.

شکل ۶: الگوواره برنامه طراحی



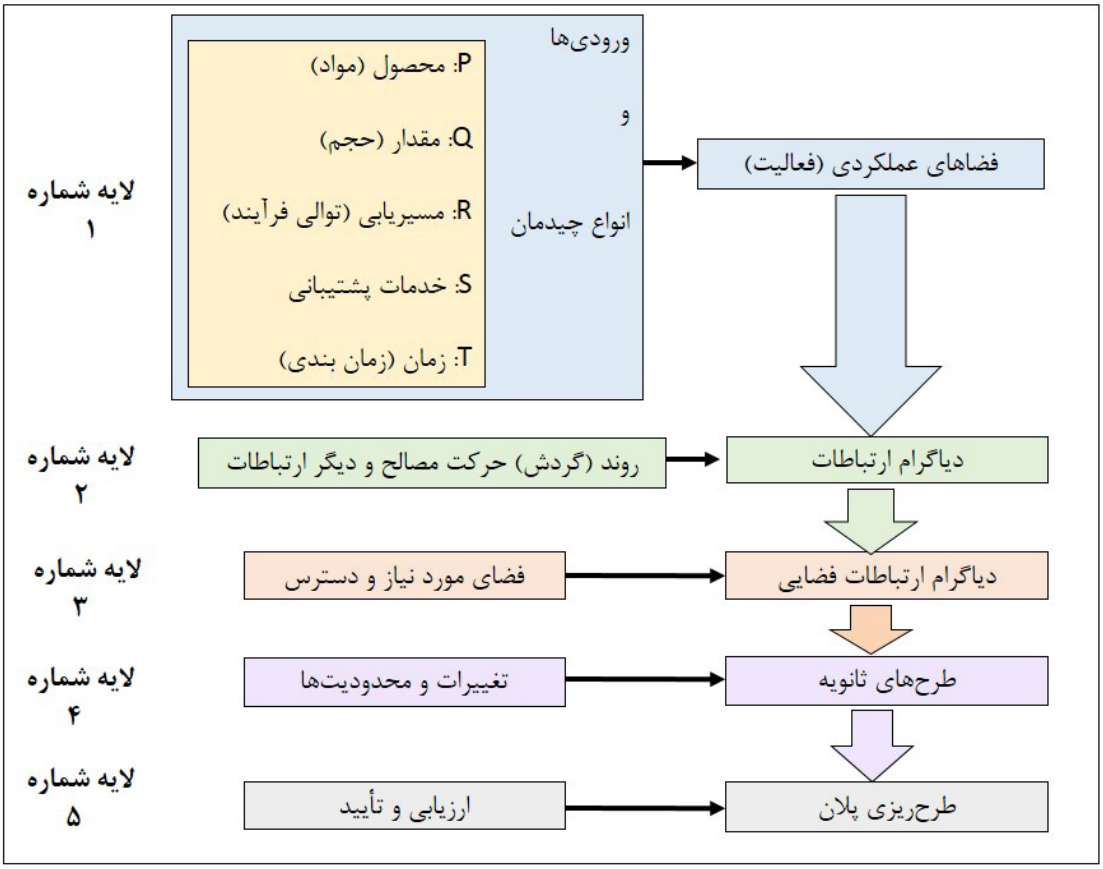
(Grason, 1971)

جهت نمایش پلان در این روش به طرق مختلف می‌توان از گراف‌ها استفاده کرد. بسیاری از رویکردهایی که این روش را دنبال می‌کنند بر اساس روش برنامه‌ریزی چیدمان (فضایی) نظامند ریچارد مدرز[۱۲] عمل می‌کنند.

۴-۲-۲- برنامه‌ریزی چیدمان(فضایی) نظامند[۱۳] مدرز (مبتنی بر تئوری گراف)

این روش متداول‌ترین روش طراحی چیدمان فضایی (به خصوص در مورد کارخانه‌ها) در ۳۰ سال گذشته است که منجر به تولید دیاگرام ارتباطات فضایی می‌شود. الگوی کلی طرح‌ریزی روش SLP که دارای پنج لایه است در شکل ۷ نشان داده شده است.

شکل ۷: الگوی روش SLP



(Muther, 2015)

هدف اصلی چیدمان (فضایی/ تسهیلات) درهر کارخانه‌ای تسهیل فرآیند تولید است. برخی از اهداف فرعی عبارت‌اند از: به حداقل رساندن جابجایی مواد، استفاده اقتصادی از فضا، استفاده مؤثر از کارگر، فراهم آوردن ایمنی، آسایش و راحتی برای کارکنان (Muther, 2015). بنابراین این روش می‌تواند در طراحی انواع پلان‌ها استفاده شود.

۴-۲-۲-۱- دیاگرام ارتباطات فضایی

دیاگرام ارتباطات فضایی خروجی لایه‌سوم از الگوی SLP است. نیازهای فضا برای هر عملکرد معین شده و با فضای موجود مطابقت داده می‌شود، در حقیقت طراح فضای موجود و دیاگرام ارتباطات فضایی به دست آمده را بر هم منطبق می‌کند.

۴-۲-۲-۱-۱- انتساب فضا به دیاگرام

در انتساب فضا به دیاگرام، برنامه‌ریز دوباره با ارتباطات حرکتی و یا عملکردی شروع می‌کند.

۱. انتساب فضا به دیاگرام حرکتی: دیاگرام حرکتی توالی حرکت افراد در فضا را نشان می‌دهد.

۲. انتساب فضا به دیاگرام ارتباطات عملکردی: دیاگرام تحلیل وابستگی نیز نامیده می‌شود و در آن ارتباط هر بخش با دیگر بخش‌ها نشان داده می‌شود.

۳. انتساب فضا به یک دیاگرام مرکب از روابط حرکتی: بسیاری از دیاگرام‌های ارتباطات فضایی می‌توانند جهت نمایش اطلاعات مرتبط با یک پروژه برنامه‌ریزی چیدمان فضایی خاص، به کار روند (Muther, 2015). این رویکرد توسط نظریه نحو فضا در معماری و تئوری گراف پشتیبانی می‌شود. در نتیجه می‌توان از شاخص‌های تئوری گراف و نحوفضا جهت تحلیل کمی چیدمان عملکردی فضاها در فاز نخستین طراحی بهره برد.

۴-۳- روش سوم بهینه‌سازی چند معیاره

این رویکرد، مرتبط با بهینه‌سازی تک اندازه‌ای یا تک معیاری نیست، بلکه به دنبال یافتن چیدمانی است که بتواند برطرف کننده مجموعه متنوعی از محدودیت‌ها باشد (چند معیاره). نمونه‌های اولیه از این روش‌ها، برنامه‌ریز فضای عمومی ایستمن[۱۴] و حل مسئله طراحی ففرکورن[۱۵] هستند.

۴-۳-۱- روش برنامه‌ریز فضای عمومی ایستمن

تمرکز اصلی، طراحی نرم‌افزارهایی است که با بتوانند مسائل طراحی را که ماهیتی سه بعدی دارند، در دو بعد بیان کرده و با کمک و در تعامل با طراح حل نمایند. این مسائل معمولاً شامل چیدمان فضایی، ترتیب قرارگیری

تجهیزات، برنامه‌ریزی سایت و غیره می‌شوند. در چنین مسائلی، مسافت، مجاورت و دیگر توابع، معیاری جهت چیدمان فضایی هستند. ساختارهای کامپیوتری متنوعی توسعه داده شده‌اند که می‌توانند اقداماتی جهت آزمودن نتایج چیدمان فضایی انجام دهند. جهت به‌کارگیری الگوریتم‌ها باید دو عمل تغییر و آزمون ترکیب شوند، به طوریکه چیدمان فضایی که با این برنامه‌ها تولید می‌شوند، برخی معیارهای از پیش تعریف شده را جهت ارزیابی داشته باشند (Eastman, 1973).

۴-۳-۱-۱- شکل‌گیری مسئله طراحی از دیدگاه ایستمن

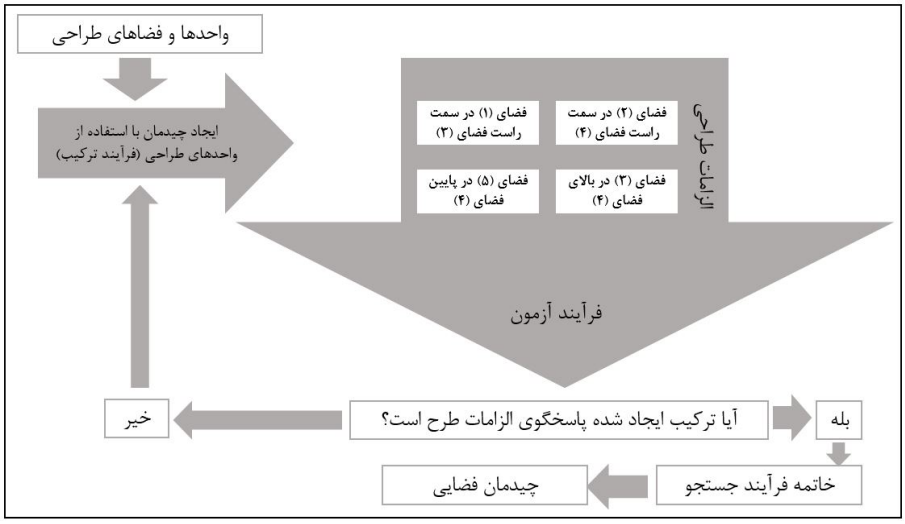
به‌طور کلی، الزامات موجود در طراحی از طریق طراحان قابل تعیین می‌باشد. مجموعه محدودیت‌های موجود، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های امکان‌پذیر را تعریف می‌کنند (فضای جواب). وظیفه اصلی یافتن بهینه‌ترین راه‌حل است. یک فضا یک محدوده فضایی محدود یا بیکرانِ است که در آن چیدمان فضایی ایجاد می‌شود. فضا معمولاً شامل یک اتاق، کالبد ساختمان و سایت است. واحدهای طراحی، عناصر فیزیکی چیدمان یافته در فضا هستند. هر واحد طراحی و فضای اشغال شده مجموعه‌ای از اشکال و اندازه‌های ثابت و یا متغییر را دربر می‌گیرند. روابط فضایی که توسط چیدمان فضایی در جهت پاسخ‌گویی به محدویت‌های خاص ایجاد می‌شوند روابط «اس»[۱۶] نامیده می‌شوند. آزمون خاتمه، در حقیقت آزمودن این مطلب است که آیا چیدمان ایجاد شده پاسخگوی الزامات و نیازهای بوده است؟ در صورت پاسخ به تمامی الزامات خواسته شده فرآیند جستجو جهت یافتن چیدمان مناسب پایان می‌پذیرد و در غیر این صورت تا رسیدن به پاسخ ادامه پیدا یافته و توسط مجموعه $C_1,C_2,\ldots,C_N$ نمایش داده می‌شود. هر ترکیب منطقی‌ایی از روابط «اس» یا واحدهای طراحی، باید امکان‌پذیر باشد. یک ویژگی مهم از مسائل برنامه‌ریزی فضایی این است که عملگرهای $d_1, d_2, \ldots, d_v$ به خوبی تعیین نشده‌اند. یکی دیگر از ویژگی‌های قاعده‌مندسازی مسئله چیدمان فضایی این است که مسئله طراحی ابتدا با یک چیدمان فضایی و شرایط اولیه دلخواه شروع شود و پس از اعمال عملگرها بر آن نتیجه حاصل مورد بررسی و آزمون قرار گیرد. نتیجه به‌دست آمده باید پاسخگوی محدودیت‌ها و الزامات طرح باشد. تمام برنامه‌های مرتبط با برنامه‌ریزی فضایی الگوریتمیک می‌توانند توسط دو جزء از قواعد تصمیم‌گیری، توصیف شوند:

۱. انتخاب عملگر جهت تغییر ارتباطات واحدهای طراحی از حالتی به حالت دیگر؛

۲. آزمودن شرایط خاتمه بر روابط ایجاد شده بین واحدهای طراحی و در نتیجه مجموعه‌ای به‌دست می‌آید که در آن تغییرات و نتیجه اعمال این تغییرات نشان داده می‌شود.

بنابراین اعمال عملگرها بر واحدهای طراحی ارتباطات فضایی موجود را تغییر می‌دهند. روابط فضایی ایجاد شده در حقیقت نتیجه اعمال عملگرها بر روابط واحدهای طراحی موجود است (شکل ۸) (Eastman, 1973).

شکل ۸: ترکیب و آزمون در برنامه‌ریزی فضایی الگوریتمیک



۴-۳-۲- حل کننده مسئله طراحی(DPS) به روش ففرکورن

برنامه‌ریزی فضایی شامل نماش دوبعدی اشیاء جهت ایجاد راه‌حل‌های بهینه برای مسائل توپولوژیک و متریک فضایی است. در حل کننده مسئله طراحی (DPS) به‌روش ففرکورن ابتدا یک مرحله برنامه‌ریزی فضایی انجام می‌شود سپس راه‌حل پیشنهاد شده با کمک روش‌های ابتکاری بهبود داده می‌شود. «هردو روش لایه‌بندی (ففرکورن و ایستمن) از چیدمان فضاها استفاده می‌کردند، تا بتوانند مجموعه‌ای از محدودیت‌ها، که شامل عواملی چون موقعیت قرارگیری، جهت‌گیری، مجاورت، مسیر، چشم‌انداز و فاصله است را رفع نمایند» (Liggett, 2000). «یکی از جدیدترین

این سیستم‌ها ایجاد محیطی نرم‌افزاری جهت پشتیبانی از مراحل اولیه طراحی ساختمان می‌باشد. این موضوع شامل استفاده از رایانه‌ها جهت تجسم، تحلیل و ارزیابی و همچنین تولید یا بازنمایی‌هایی از طرحها هستند. این بازنمایی‌ها قابلیت محاسبه داشته و ابزارهای ارزیابی را قادر می‌سازند تا تمامی داده‌های ورودی را نمایش، جستجو و ارزیابی کنند. ابزارهای ارزیابی به دنبال یافتن اطلاعات موردنیاز برای ارزیابی طرح‌های ارائه شده هستند» (Flem-ming & Woodbury, 1995).

این سیستم‌ها دارای مزایایی ازجمله درنظر گرفتن چندین معیار می‌باشند. از معایب این سیستم‌ها ضعف آن‌ها در حل مسائل در مقیاس بزرگ است. «از دهه ۱۹۶۰ مسئله تولید پلان موضوع بسیاری از پژوهش‌ها بوده است. این پژوهش‌ها عموماً به دو فاز تقسیم می‌شوند. فاز اول: تولید طرح‌های بدون اندازه و فاز دوم: تولید طرح‌ها با درنظرگرفتن اندازه هستند. در ارتباط با فاز اول دو رویکرد وجود دارد: ۱) بهینه‌سازی (چیدمان فضایی) و ۲) ترکیب. در رویکرد اول بهترین چیدمان زمانی حاصل می‌شود که یک تابع هدف بر مبنای مسافت بین دو فعالیت و یا مجاورت اتاق‌ها اعمال شود. در رویکرد دوم هدف تولید راه‌حل‌های امکان‌پذیر است که پاسخگوی شرایط خاصی باشند. این شرایط از خصوصیات فضایی منتج می‌شوند. به‌عنوان مثال می‌توان به خصوصیاتی مانند روابط هندسی بین اتاق‌ها یا محدودیت‌های موقعیتی یا ابعادی اشاره کرد» (Alvarez, San Jose, & Rio, 2015, p. 45).

۵. نتیجه‌گیری

چیدمان فضایی از مراحل اصلی طراحی پلان است. چیدمان صورت گرفته توسط معمار باید مناسب، خلاقانه و در راستای پاسخ به عملکرد باشد. بنابراین هنگام طراحی پلان‌های عملکردی چیدمان فضایی اهمیتی دو چندان می‌یابد. چیدمان فضایی نادرست موجب می‌شود تا پلان کارایی لازم را نداشته باشد. برای دست‌یافتن به چیدمان فضایی بهینه، نیاز است تا تمامی جایگشت‌های ممکن در نظر گرفته شده و از میان آن‌ها بهینه‌ترین چیدمان انتخاب شود. این موضوع با توجه به محدودیت ذهن انسان‌ها و زمانبر بودن امکان‌پذیر نیست.

کارخانه‌ها دارای پلانی عملکردی هستند و چیدمان تسهیلات آن‌ها باید پاسخگوی عملکردشان باشد. چیدمان تسهیلات در کارخانه‌ها توسط مهندسین صنایع صورت می‌پذیرد. با توجه به پیشرفت علوم‌کامپیوتر، مهندسین صنایع برای این‌کار از الگوریتم‌ها بهره‌می‌برند. آن‌ها با به‌کارگیری الگوریتم‌ها توانسته‌اند به چیدمانی بهینه دست یابند. باوجود مشابهتی که بین چیدمان عملکردی فضاها و چیدمان تسهیلات وجود دارد، معماران آن‌چنان از الگوریتم‌ها بهره نبرده‌اند. الگوریتم‌های چیدمان تسهیلات سه روش را دنبال می‌کنند. این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند که معمار با توجه به محدودیت‌ها و الزامات می‌تواند دست به انتخاب زده و حتی در مراحل مختلف به صورت ترکیبی از آن‌ها بهره ببرد. معمار با انتخاب روش مناسب و با به کارگیری الگوریتم‌ها می‌تواند به چیدمان فضایی بهینه، با دقت و سرعت بالا و به دور از محدودیت‌هایی که ذهن با آن‌ها مواجه است، دست یابد.

روش اول: بهینه‌سازی براساس تابع تک متغییره است. این روش از مشهورترین مدل‌های چیدمان تسهیلات است و مرتبط با یافتن مکان‌های بهینه برای بخش‌هایی است که از لحاظ عملکردی به یکدیگر وابسته‌اند. این موضوع تحت عنوان مسئله تخصیص درجه دو نیز شناخته می‌شود. در این روش مساحت اختصاص داده شده به تسهیلات (فضاها) برابر درنظر گرفته می‌شود. این روش در مکان‌یابی بیش از ۱۵ فضای عملکردی ناکارآمد بوده و به یک مسئله اِن پی کامپلیت تبدیل می‌شود. بعید است که بتوان الگوریتمی را یافت که جواب دقیق مسئله را در زمان معقول به‌دست آورد، بنابراین از الگوریتم‌های تقریبی بهره گرفته می‌شود. این الگوریتم‌ها به دو روش عمل می‌کنند. در روش اول پاسخ اولیه به مسئله ایجاد شده و در مرحله بعد توسط معمار یا الگوریتم دیگری بهبود می‌یابد. به این الگوریتم‌ها، الگوریتم‌های ایجادی می‌گویند. در روش دوم: الگوریتم پاسخ اولیه که توسط معمار یا الگوریتم دیگری ایجاد شده، بهبود می‌یابد. الگوریتم‌های ایجادی با به کارگیری برخی تکنیک‌ها و اغلب به‌صورت تصادفی، ترکیبی از همجواری‌های فضایی را پیشنهاد داده و سپس با توجه به نظر طراح و یا با به کارگیری الزامات بهبود می‌یابند. در حرفه معماری درنظرِ نگرفتن یا برابر قرار دادن مساحت برای فعالیت‌ها عموماً مقبول نمی‌باشد. زیرا مکان مورد نیاز برای فضاهای عملکردی لزوماً برابر نیستند و بهتر است مدلی توسط الگوریتم ارائه شود که قابلیت توسعه داشته و در مراحل بعدی قابلیت اعمال ابعاد در آن وجود داشته باشد. در این روش هدف از جانمایی و چیدمان تسهیلات، قرارگیری فضاها و تسهیلات به‌گونه‌ای است که فاصله بین واحدهای عملکردی وابسته، حداقل شده و این واحدها کمترین فاصله را از یکدیگر داشته باشند.

روش دوم: تئوری گراف است. در این رویکرد هزینه‌های جابه‌جایی و انتقال مواد اولیه، محصولات تولیدی و غیره بین فضاهای عملکردی صفر فرض می‌شود. این روش می‌تواند در چیدمان عملکردی فضاها برای پلان‌هایی که هزینه مجاورت بین فضاهای آن قابل تشخیص نیست، به کار رود. در اکثر پلان‌های معماری، یافتن و اعمال هزینه مجاورت فضاها با دشواری‌های فراوانی مواجه بوده و در بسیاری از مواقع ممکن نیست. برای مثال می‌توان به چیدمان فضاها در پلان‌های درمانی و بیمارستان‌ها اشاره داشت. در این پلان‌ها در صورت عدم جانمایی مناسب فضاهای حیاتی، زمان احیاء کردن بیمار از دست می‌رود. جانمایی نامناسب فضاها در پلان‌های درمانی هزینه مالی

در برندارد؛ اما جانمایی نامناسب این فضاها موجب اختلال در روند گردش بیماران شده که می‌تواند منجر به از دست رفتن بیمار شود. این رویکرد می‌تواند در دو فاز دنبال شود. در فاز اول می‌توان تنها به همجواری عملکردی فضاها توجه داشت و در فاز دوم می‌توان مساحت و شکل فضا را بر گراف حاصل از همجواری عملکردی فضاها اعمال کرد. اما به هر مکان نمی‌توان بیش از یک فضای عملکردی نسبت داد. در گراف همجواری عملکردی فضاها، یال‌ها نشان دهنده ارتباط دو فضا بوده و دارای وزن می‌باشند. وزن یال‌ها می‌تواند نشان دهنده اهمیت میزان نزدیکی دو فضا باشد.

هدف این است که در گراف همجواری عملکردی، ارتباطاتی لحاظ شود که دارای بالاترین وزن بوده و درواقع از اهمیت بیشتری برخوردار باشند. در این روش به فضاهای غیرمجاور امتیازی تخصیص داده نمی شود، حتی اگر به یکدیگر نسبتاً نزدیک باشند. طبق نظر فلدز[۱۷] رویکرد تئوری گراف برای طراحی جدید مناسب‌تر است، زیرا مکان هیچ یک از تسهیلات نباید از پیش تعیین شوند. در حالی‌که رویکرد مسئله تخصیص درجه دو می‌تواند هم برای طراحی و هم برای بهینه سازی طرح موجود به کار گرفته شود. تئوری گراف بیشتر در حالتی کاربرد دارد که طراح آزادی عمل بیشتری جهت حل مسئله چیدمان داشته باشد. اما رویکرد تخصیص درجه دو برای موقعیت‌های ساختار یافته مناسب‌تر است. علاوه بر این‌ها، تئوری گراف توسط نظریه نحو فضا پشتیبانی می‌شود. این روش می‌تواند پیکره‌بندی فضایی را به صورت کمی تحلیل نماید و پیش از اعمال ابعاد می‌تواند منجر به ارزیابی چیدمان فضایی شود.

روش سوم، روش بهینه‌سازی چند معیاره است. این روش، مرتبط با بهینه‌سازی تک معیاره نبوده، بلکه به دنبال یافتن چیدمانی براساس چند معیار مختلف باشد. در مراحل ابتدایی طرح، مسائل ناشناخته زیادی برای طراح وجود دارد و درنتیجه در نظر گرفتن تمامی آن‌ها بسیار دشوار است. از طرف دیگر این سیستم‌ها در حل مسائل چیدمان فضایی در مقیاس بزرگ ناتوان هستند. از دیگر معایب آن‌ها در نظر گرفتن فرم تمامی فضاها به صورت مستطیلی است. با توجه به مطالب ذکر شده به نظر می‌رسد رویکرد تئوری گراف، رویکردی منعطف جهت استفاده طراحان در مراحل اولیه طراحی می‌باشد. باتمام این‌ها، معماران با توجه به مسئله پیش‌رو، اهداف، الزامات و محدودیت‌ها می‌توانند یک یا ترکیبی از این رویکردها را جهت دستیابی به چیدمان فضایی مطلوب به‌کار برند.

پی‌نوشت

1. Software Environment to Support Early Phases of Building Design (SEED)
2. Koopmans
3. Beckmann
4. Armour
5. Buffa
6. Computerized Relative Allocation of Facilities Technique

۷. یک گراف را مسطح می‌دانیم اگر هیچ‌یک از یال‌های آن یکدیگر را قطع نکنند. یک گراف مسطح در شکل ۵ نشان داده شده است.

۸. یک گراف مسطح کامل است اگر با افزودن حتی یک یال شرط مسطح بودن در آن صدق نکند.

9. Goetschalckx
10. Spiral
11. Montreuil
12. Richard Muther
13. SLP (Systematic Layout Planning)
14. Eastman
15. Pfeffercorn
16. S-Relations
17. Foulds

REFERENCES

- Alexander, C. (1964). Notes on the Synthesis of Form. Cambridge: Harvard University Press.
- Al-Hakim, L.A. (1991). Two Graph Theoretic Procedures for an Improved Solution to the Facilities Layout Problem. *Int J Prod Res*, 29(8), 1701–1718. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207549108948041
- Al-Hakim, L.A. (1992). A Modified Procedure for Converting a Dual Graph to a Blok Layout. *Int J Prod Res*, 30(10), 2467–2476. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207549208948167
- Al-Hakim, L.A. (2001). A Note on Efficient Facility Layout Planning in a Maximally Planar Graph Model. *Int J Prod Res*, 39 (7), 1549-1555. https://www.researchgate.net/publication/261629024_A_note_on_'Efficient_facility_layout_planning_in_a_maximally_planar_graph_model'
- Alvarez, M., San Joe, M., & Rio, O. (2004). Use of an Adjacency Graph in Computer-Aided Drawing of Floor Plans.
- Batty, M. (2004). Distance in Space Syntax, Working, Paper 80, CASA, UCL, London.
- Boswell, S.G. (1994). A Reply to 'A Note on Similarity of a New Greedy Heuristic for Facility Layout by Graph Theory to an Existing Approach'. *Int J Prod Res*, 32(1), 235-240. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207549408956928
- Bozer, Y.A., Meller, R.D., & Erlebacher, S.J. (1994). An Improvementtype Layout Algorithm for Single and Multiple-Floor Facilities. *Manage Sci*, 40(7), 918-932. https://econpapers.repec.org/article/inmormnsc/v_3a40_3ay_3a1994_3ai_3a7_3ap_3a918-932.htm
- Caldas, L. (2008). Generation of Energy-Efficient Architecture Solutions Applying GENE_ARCH. *Advanced Engineering Informatics*, 22(1), 59-70. https://www.researchgate.net/publication/223275102_Generation_of_energy-efficient_architecture_solutions_applying_GENE_ARCH_An_evolution-based_generative_design_system
- Casalaina, V., & Rittel, H. (1967). Morphologies of Floor Plans. Conference on Computer-Aided Building Design.
- Chan, W.M., Chan, C.Y., & Ip, W.H. (2002). A Heuristic Algorithm for Machine Assignment in Cellular Layout. *Comput Ind Eng*. 44, 49-73.http://ira.lib.polyu.edu.hk/handle/10397/15162
- Chías, P., Abad, T., & García-Rosales, G. (2019). New Graphic Tools for Hospital's Spatial Analysis and Design. Graphic Imprints, 1283-1292.
- Diponegoro, A., & Sarker, B.R. (2003). Machine Assignment in a Nonlinear Multi-Product Flowline. *J Oper Res Soc*, 54(5), 472-489. https://link.springer.com/article/10.1057/palgrave.jors.2601488?shared-article-renderer
- Eastman, C. (1973). Automated Space Planning. In: Artificial Intelligence. 4, 41-64. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0004370273900088
- Flemming, U., & Woodbury, R. (1995). Software Environment to Support Early Phases in Building Design (SEED): Overview. *Journal of Architectural Engineering*, 1(4), 147-152. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%291076-0431%281995%291%3A4%28147%29
- Foulds, L.R., & Giffin, J.W. (1985). A Graph-Theoretic Heuristic for Minimizing Total Transportation Cost in Facilities Layout. *Int J Prod Res*. 23, 1247-1257. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207548508904779
- Foulds, L.R., Giffin, J.W., & Cameron., D.C. (1986). Drawing a Block Plan with Graph Theory and a Microcomputer. *Comput Ind Eng,* 10,109-116. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/036083528690032X
- Goetschalckx, M. (1992). An Interactive Layout Heuristic Based on Hexagonal Adjacency Graphs. *Eur J Oper Res*, 63, 304-321. https://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v63y1992i2p304-321.html
- Grason, J. (1970a). A Dual Linear Graph Representation for Space Filling Location Problems of the Floor Plan Type. M.I.T. Press, 170-178.
- Grason, J. (1970b). Fundamental Description of a Floor Plan Design Program. North Carolina University, 175-182.
- Grason, J. (1970c). Methods for the Computer-Implement Solution of a Class of 'Floor Plan' Design Problems. Ph.D. Thesis, Carnegie-Mellon University, Pittsburg.
- Grason, J. (1971). An Approach to Computerized Space Planning Using Graph Theory, 170-179. https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/800158.805070
- Gero, J., & Kazakov, V. (1998). Evolving Design Genes in Space Layout Planning Problems. https://www.researchgate.net/publication/222502570_Evolving_design_genes_in_space_layout_planning_problems/references
- Hajian, M., & Tajik, S.A. (2017). Evaluation of Convex and Crossover Methods of Graph Theory in Analysis of Architectural Space, *Naghshe Jahan*, 2-7.
- Hart, R.A., & Moore, G.T. (1973). The Development of Spatial Cognition: A Review. Place and Perception Report7. Department of Geography, Clark University.
- Hassan, M.M.D., & Hogg, G.L. (1987). A Review of Graph Theory Applications to the Facilities Layout Problem. *Omega,* 15, 291-300. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/030504838790017X
- Hassan, M.M.D., & Hogg, G.L. (1991). On Constructing a Block Layout by Graph Theory. *Int J Prod Res*. 29(6), 1263-1278. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207549108930132
- Jacobs, F.R. (1987). A Layout Planning System with Multiple Criteria and a Variable Domain Representation. *Manage Sci*, 33,1020-1034

- Jagielski, R., & Gero, J.S. (1997). A Genetic Programming Approach to the Space Layout Planning Problem. In: R. Junge (ed.), CAAD Futures, 875-884. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-5576-2_67
- Kaku, K., & Rachamadugu, R. (1992). Layout Design for Flexible Manufacturing Systems. *Eur J Oper Res*. 57, 224-230. https://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v57y1992i2p224-230.html
- Krejcirik, M. (1969). Computer-Aided Plant Layout, 7-19. *https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001044856980028X*
- Foulds, L. (1983). Techniques for Facilities Layout: Deciding Which Pairs of Activities Should Be Adjacent, *Management Sci*. 29(12), 1414-1426. https://econpapers.repec.org/article/inmormnsc/v_3a29_3ay_3a1983_3ai_3a12_3ap_3a1414-1426.htm
- Leung, J. (1992). A Graph Theoretic Heuristic for Designing Looplayout Manufacturing Systems. Eur J Oper Res. 57, 243-252. https://www.researchgate.net/publication/222371615_A_graph-theoretic_heuristic_for_designing_loop-layout_manufacturing_systems
- Levin, P.H. (1964). Use of Graphs to Decide the Optimum Layout of Buildings. *The Architects's Journal*. 809-817.
- Liggett, R. (1985). Optimal Spatial Arrangement as a Quadratic Assignment Problem, in: J. Gero (Ed.), Design Optimization, *Academic Press*. 1-40. https://www.semanticscholar.org/paper/1-%E2%80%93-Optimal-spatial-arrangement-as-a-quadratic-Liggett/6a4dd8a8e12e14ae711cc05bcb4a9bcf3e5bd2d1
- Liggett, R., & Mitchell, W. (1981). Optimal Space Planning In Practice. *Computer-Aided Design*. 13(5), 277-288. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0010448581903171
- Liggett, R.S. (2000). Automated Facilities Layout: Past, Present and Future, Automation In Construction. 9(2), 197-215, ISSN 0926-5805. http://users.metu.edu.tr/baykan/arch586/Readings/Layout/Background/Liggett00.pdf
- March, L., & Steadman, P. (1971). The Geometry of Environment. London: RIBA Publications. https://books.google.com/books/about/The_Geometry_of_Environment.html?id=Bz20AAAAIAAJ
- Montreuil, B., Ratliff, H.D., & Goetschalckx, M. (1987). Matching Based Interactive Facility Layout. *IIE Trans*. 19(3), 271-279. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07408178708975396
- Montreuil, B., Venkatadri, U., & Ratliff, H.D. (1993). Generating a Layout from a Design Skeleton. *IIE Trans*. 25(1), 3-15. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07408179308964261
- Mourshed, M., Manthilake, I., & Wright, J.A. (2009). Automated Space Layout Planning for Environmental Sustainability. IN: SASBE 2009, Proceedings of the 3rd CIB International Conference on Smart and Sustainable Built Environments, Delft, The Netherlands. 15-19 June 2009. https://repository.lboro.ac.uk/articles/Automated_space_layout_planning_for_environmental_sustainability/9432275
- Muther, R. (2015). Systematic Layout Planning. http://hpcinc.com/wp-content/uploads/2016/07/Systematic-Layout-Planning-SLP-4th-edition-soft-copy.pdf
- Michalek, J., Choudhary, R., & Papalambros, P. (2002). Architectural Layout Design Optimization. https://www.cmu.edu/me/ddl/publications/2002-Michalek,Choudhary,Papalambros-EO-ArchLayout.pdf.
- Nassar, K. (2010). New Advances in the Automated Architectural Space Plan Layout Problem. In: Proceedings Computing in Civil and Building Engineering. https://www.semanticscholar.org/paper/New-advances-in-the-automated-architectural-space-Nassar/5ebe2e80f6e0c94df293ad95f33ea00622aece0a
- Penn, A., Hillier, B., Banister, D., & Xu, J. (1998). Configurational Modelling of Urban Movement Networks. *Environ Plan B Plan Design*. 25(1), 59-84. https://journals.sagepub.com/doi/10.1068/b250059
- Rosenblatt, M.J., & Golany, B. (1992). A Distance Assignment Approach to the Facility Layout Problem. *Eur J Oper Res*. 57, 253-270. https://web.iem.technion.ac.il/images/user-files/golany/papers/EJOR_92.pdf
- Roth, J., Hashimshony, R., & Wachman, A. (1985). Generating Layouts with Non-Convex Envelopes .*Building & Environment*. 20, 211-219. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0360132385900368
- Singh, S.P., & Sharma, R.R.K. (2006). A Review of Different Approaches to the Facility Layout Problems, *Int J Adv Manuf Technol*. 30, 425-433. https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-005-0087-9
- Steadman, P. (1983). Architectural Morphology: An Introduction to the Geometry of Building Plans. London: Pion Ltd. https://books.google.com/books/about/Architectural_Morphology.html?id=ppIOAAAAQAAJ
- Teague Lavette, C. (1970). Network Models of Configurations of Rectangular Parallelepipeds. M.I.T. Press. 162-169.
- Wang, S., & Sarker, B.R. (2002). Locating Cells with Bottleneck Machines in Cellular Manufacturing systems. *Int J Prod Res*. 40 (2), 403-424. https://www.researchgate.net/publication/232926950_Locating_cells_with_bottleneck_machines_in_cellular_manufacturing_systems

نحوه ارجاع به این مقاله

رحمتی گواری، رمیصاء؛ قدوسی‌فر، هادی؛ طاهباز، منصوره و زارع میرک‌آباد، فاطمه. (۱۳۹۹). بررسی رویکردهای الگوریتمیک در چیدمان فضایی (با تأکید بر نظریه گراف). نشریه معماری و شهرسازی آرمان‌شهر، ۱۳(۳۲)، ۹۹-۱۱۱.

DOI: 10.22034/AAUD.2020.120061

URL: http://www.armanshahrjournal.com/article_120061.html