تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۳ | تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴
نوع مقاله: پژوهشی
شماره صفحه ۵-۲۴

سه‌بعدی‌سازی مقرنس بر اساس آرای حسین لرزاده*

عاطفه کرباسی
استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، استان تهران، شهر تهران (نویسنده مسئول مکاتبات)
E-mail: atf.karbasi@gmail.com

سلمان مفید
کارشناس ارشد مطالعات معماری ایران، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، استان تهران، شهر تهران
E-mail: salman.mofid@gmail.com

چکیده

مقرنس، چگونگی استنباط نقشه‌های آن و نحوهٔ ساخت سه‌بعدی ترسیمی‌اش از مباحث مناقشه‌برانگیز در میان مورخان و معماران بوده است. آنچه از گذشته دربارهٔ مقرنس باقی مانده محدود به نقشه‌های دوبعدی مقرنس و نمونه‌های ساخته شده است و کمتر دربارهٔ چگونگی ساخت سه‌بعدی بر اساس نقشه‌ها اثری باقی مانده است. حسین لرزاده (۱۲۸۵-۱۳۸۳) از آخرین معمارانی است که فنون ساخت مقرنس را مبتنی بر نظام استاد-شاگردی فرا گرفته و در آثار مکتوب خویش توضیح داده است. هدف مقالهٔ پیش رو تبیین روش لرزاده برای سه‌بعدی‌سازی مقرنس و تلاش برای سه‌بعدی‌سازی ترسیمی مقرنس براساس آثار و آموزه‌های شفاهی او است. مقاله حاضر از خلال مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه با شاگردان لرزاده سامان یافته و در ضمن استفاده از روش تحقیق کیفی، مفاهیم اصلی مقرنس از نظر لرزاده گردآوری و توضیح داده شده است. در مقالهٔ حاضر برای به‌روزرسانی روش ترسیم دوبعدی و سه‌بعدی‌سازی از نرم‌افزارهای اتوکد و کُرل استفاده شده و با توضیح یک نمونه، کاربرد آرای لرزاده در عمل نشان داده شده است. در این تحقیق برای پیشبرد روند سه‌بعدی‌سازی، قواعد و نتایجی از آرای لرزاده در باب سه‌بعدی‌سازی استخراج شده است که می‌تواند در سه‌بعدی‌سازی دیگر نقشه‌ها و تحقیق‌های آتی راهگشا باشد. اهم این نتایج شامل موارد زیر است: ارتفاع قطار، زمینه، نقشهٔ دوبعدی، انتقال خطوط در مقرنس نیمکار، حدود نسبی انتخاب‌ها، ذوقی بودن انتخاب‌ها و اختیارات مجری.

کلیدواژه‌ها: حسین لرزاده، مقرنس، سه‌بعدی‌سازی.

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مطالعات معماری ایران سلمان مفید با عنوان «زبان بصری و کلامی مقرنس در نوشته‌ها و نقشه‌های استاد حسین لرزاده» است که با راهنمایی دکتر عاطفه کرباسی در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی انجام شده است.

مقدمه

مقرنس، چگونگی استنباط نقشه‌های آن و نحوهٔ ساخت سه‌بعدی ترسیمی‌اش از مباحث مناقشه‌برانگیز در میان مورخان و معماران بوده است. آنچه از گذشته دربارهٔ مقرنس باقی مانده محدود به نقشه‌های دوبعدی مقرنس و نمونه‌های ساخته شده است و کمتر دربارهٔ چگونگی ساخت سه‌بعدی بر اساس نقشه‌ها اثری باقی مانده است. تاکنون محققان معماری متعددی در این حوزه فعالیت کرده‌اند و با توجه به نمونه‌های موجود، آرای مختلفی را ابراز نموده‌اند. حسین لرزاده (۱۲۸۵-۱۳۸۳) از آخرین معمارانی است که فنون ساخت مقرنس را مبتنی بر نظام استاد- شاگردی فراگرفته و در آثار مکتوب خویش توضیح داده است. با توجه به اهمیت نگاه لرزاده به مقرنس، تبیین روش لرزاده و استفاده از روش او در امر سه‌بعدی‌سازی مقرنس حائز اهمیت است که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

هدف مقالهٔ پیش رو تبیین روش لرزاده برای سه‌بعدی‌سازی مقرنس و تلاش در جهت سه‌بعدی‌سازی ترسیمی مقرنس براساس آثار و آموزه‌های شفاهی او است. برای این منظور ابتدا با سیری کلی در تحقیق‌های مرتبط با سه‌بعدی‌سازی ترسیمی مقرنس تا به امروز، نقد کوتاهی بر روش محققان حوزه مقرنس انجام و تصمیمات اتخاذ شده در خلال این روش‌ها با نظرات لرزاده مقایسه می‌شود تا با برجسته کردن ویژگی‌های آرای لرزاده، روشی مطابق دیدگاه او برای سه‌بعدی‌سازی مقرنس پیشنهاد و ترسیم گردد. عمده مسائل مطرح شده درباب سه‌بعدی‌سازی در تحقیق‌های پژوهشگران را می‌توان در پنج حیطه گنجاند و با آرای لرزاده در این حیطه‌ها قیاس کرد: تعریف مقرنس و آلت‌های آن، مرجع‌های مورد استفاده، اصلاح هندسی نقشه‌ها، گسترهٔ نقشه‌های بررسی شده و نحوهٔ دسته‌بندی و قرارگیری مقرنس در زمینه. سپس با توجه به تجربه‌ها و نکاتی که از این بررسی‌ها فهمیده می‌شود، روشی در سه‌بعدی‌سازی که مطابق دیدگاه لرزاده و نیز به کمک رایانه قابل انجام است را می‌توان در سه بخش توضیح داد: فهم نقشه، انتخاب‌های سه‌بعدی‌سازی و ساخت. توضیح روش نهایی در مقالهٔ حاضر با مثالی همراه شده است تا قابلیت انطباق آن با انواع نقشه‌ها نیز نشان داده شود.

به این ترتیب مقاله حاضر از خلال مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه با شاگردان لرزاده سامان یافته[۱] و ضمن بهره‌گیری از روش تحقیق کیفی، مفاهیم اصلی مقرنس از نظر لرزاده گردآوری گردیده و اهم آرای او در باب مقرنس توضیح داده شده است. مرور پیشینه سه‌بعدی‌سازی ترسیم مقرنس از این رو بایسته است که به چگونگی تنظیم و دسته‌بندی آرای لرزاده در قالب روشی منسجم یاری می‌رساند. سه‌بعدی‌سازی مقرنس با روش‌های دیگر (مثلاً ماکت) کمتر در تحقیق‌های این حوزه مطرح شده است و در محدوده تحقیق حاضر جا نمی‌گیرد. در مقالهٔ حاضر برای به‌روزرسانی روش ترسیم دوبعدی و سه‌بعدی از نرم‌افزارهای اتوکد و کرل استفاده شده است.

پیشینهٔ نظری تحقیق

تنها مکتوبی که درباب آرای لرزاده درباره مقرنس منتشر شده *کتاب احیای هنرهای از یاد رفته* (رئیس‌زاده و مفید، ۱۳۷۴) است. مؤلفان این کتاب منتخبی از نقشه‌های مقرنس لرزاده را زیر نظر او با دَر کردن لب قطارها ترسیم کامپیوتری کرده‌اند. پیش از آن نیز لرزاده در کتابی به خط خود (با توجه به امکانات زمانش) با ترسیم‌های دستی سه‌بعدی‌سازی مقرنس را توضیح داده است. اما تحقیق‌های حوزهٔ بازسازی و سه‌بعدی‌سازی ترسیمی مقرنس غیر از لرزاده، بسیارند.[۲] این تحقیق‌ها در سه دسته قابل دسته‌بندی هستند: برخی صرفاً به بررسی و بازسازی یک مقرنس زندهٔ موجود می‌پردازند؛ برخی یک نقشهٔ مقرنس باقی‌مانده

از گذشته را موضوع قرار می‌دهند و سعی می‌کنند با یافتن شواهدی از منابع مکتوب و مقرنس‌های زندهٔ قدیم آن را بازسازی کنند؛ برخی تحقیق‌ها نیز با توجه به یافته‌های تحقیق‌های پیشین سعی می‌کنند روشی کلی برای سه‌بعدی‌سازی ترسیمی مقرنس ارائه دهند. در ادامه ضمن ارائه مصداقی از هر یک از این روش‌ها، به معرفی مختصر آنها پرداخته شده است.

سه‌بعدی‌سازی یک نمونه مقرنس زنده و موجود: در این دسته تحقیقات، محقق با انتخاب یک مقرنس زنده و موجود در عالم واقع، به بازسازی همان مقرنس می‌پردازد. در این قبیل تحقیق‌ها منبع اصلی تحقیق تصاویری است که از مقرنس تهیه شده و سعی تحقیق نزدیک کردن نتیجه نهایی به تصاویر است. هدف چنین تحقیق‌هایی از سه‌بعدی‌سازی، تجزیه و تحلیل اجزای مقرنس و استخراج هندسه مشخص از انتظام آلت‌ها است. بازسازی مقرنس مناره نظنز (Seifi, n.d.) نمونه‌ای از این دسته است. محقق با معیار قرار دادن چند تصویر از زوایای مخلف از مقرنس مناره سعی در بازسازی آن در نرم‌افزار دارد. بدیهی است که با توجه به تأثیرگذاری پرسپکتیو ، بازسازی متکی بر عکس نمی‌تواند چندان دقیق باشد.

سه‌بعدی‌سازی یک نقشه مقرنس کهن: انتخاب یک نقشه مقرنس قدیمی از الواح و طومارهای کهن و بازسازی آن با توجه به منابع مکتوب قدیمی و مقرنس‌های زنده کهن اساس کار تحقیق‌های این دسته است. بازسازی یک مقرنس نیمکار از طومار توپقاپی (الاسد، ۱۳۸۴، ۴۰۷-۴۲۴) نمونه خوبی از این تحقیق‌هاست. محقق ضمن انتخاب یک نقشه مقرنس از طومار، با توجه به قواعد هندسی آن را اصلاح و ترسیم مجدد می‌کند (الاسد، ۱۳۸۴، ۴۱۱). سپس با توجه به نوشته‌های غیاث‌الدین جمشید کاشانی در کتاب *مفتاح الحساب*، بعد سوم را با توجه به نقشه دوبعدی طراحی می‌نماید (الاسد، ۱۳۸۴، ۴۱۳). کاشانی ارتفاع مقرنس را در مثالی دو برابر عمقش فرض می‌کند. بخش مقوس مقرنس در مثال او نصف ارتفاع قطار است. با توجه به این دستورالعمل‌ها می‌توان سه‌بعدی هر قطار را رسم کرد. محقق انتخاب ارتفاع قطار و نوع خط واصل بین قطارها را به ذوق طراح واگذار کرده است. در پایان تحقیق با سوار کردن قطارها بر روی هم، مقرنس از زوایای مختلف (اما خارج از زمینه) نمایش داده می‌شود (الاسد، ۱۳۸۴، ۴۱۷). این روش نیز دارای اشکالاتی است که در بخش بعدی بدان خواهیم پرداخت.

ارائه روش کلی برای سه‌بعدی‌سازی مقرنس: تحقیق‌های این دسته ضمن ارائه سه‌بعدی‌سازی یک نمونه از نقشه‌های مقرنس، دعوی پیشنهاد روشی (الگوریتمی) برای سه‌بعدی‌سازی رایانه‌ای همه انواع نقشه‌های مقرنس را دارند. مقاله «مدل‌سازی مقرنس» نمونه‌ای از این دسته تحقیق‌ها است (Hamekasi, 2011, 129-136). محقق با ذکر اینکه تعداد نقشه‌های غیرهندسی مقرنس بسیار کم است و غیرهندسی بودن معلول خطای ترسیمی است، مسئله تحقیق را «تهیه مدل‌های دقیق از نقشه‌های غیردقیق» معرفی می‌کند (Hamekasi, 2011, 129-130). در ادامه با واگذار کردن انتخاب‌های لازم در طراحی بعد سوم به «ذوق طراح»، کار سه‌بعدی‌سازی رایانه‌ای را پیش می‌برد و این روش را قابل تعمیم به انواع نقشه‌های مقرنس می‌داند (Hamekasi, 2011, 135). به‌کار بردن الگوریتم برای ساده کردن ارتفاع دادن و چینش قطارها بر روی هم (بخش مکانیکی کار) مقبول است، لیکن تعمیم الگوریتم به کل فرآیند سه‌بعدی‌سازی رایانه‌ای، باعث نادیده گرفتن جنبه‌های هنرمندانه مقرنس و فروکاستن کل فرآیند به عملی مکانیکی می‌شود.

نقد روش تحقیق‌های انجام شده

مروری اجمالی بر تحقیق‌های انجام شده در حوزه مقرنس، ضعف‌هایی را نشان می‌دهد که در نظر داشتن آنها در تنظیم روشی جدید بایسته است. نقاط ضعف این روش‌ها در سه بخش پیش رو معرفی می‌شود.

محدودیت مرجع‌های مورد استفاده: اکثر تحقیق‌های سه‌بعدی‌سازی مقرنس به نمونه‌های اولیهٔ یافته شده از نقشه‌های مقرنس پرداخته‌اند و کمتر به نمونه‌های متأخر توجه کرده‌اند، بنابراین تعداد نقشه‌های بررسی شده بسیار محدود است. محدودیت تعداد نقشه‌ها برای تحقیق‌هایی که داعیهٔ ارائهٔ روشی کلی برای سه‌بعدی‌سازی دارند، باعث می‌شود تا روش پیشنهادی شمول جامعی نداشته باشد. اهم نقشه‌های مورد توجه عبارت‌اند از: لوحهٔ نقش یافت شده در تخت سلیمان، چند نقشهٔ مقرنس از طومار توپقاپی، چند نقشه از طومار تاشکند.[۳] تعدادی از تحقیق‌ها نیز به بررسی و بازسازی نمونه‌ای مقرنس زنده پرداخته‌اند.[۴] تحقیق‌های زیادی در جست‌وجوی مرجعی مکتوب در گذشته برای بحث دربارهٔ مقرنس هستند.[۵] غیاث‌الدین جمشید کاشانی در کتاب مفتاح‌الحساب بحثی مختصر دربارهٔ مقرنس دارد تا مساحت آن را حساب کند. او برای تعریف مسئله، مقرنس ساده‌ای را در نظر گرفته و آن را به بیت‌هایی تجزیه می‌کند، و آلات مقرنس را همان می‌داند (Dold-samplonius & Harmsen, 2005, 87). نکتهٔ مهم در این موضوع این است که کاشانی معمار نبوده و به‌عنوان ریاضیدان سعی می‌کند تا اولاً مسئله را به قیود هندسی در آورد تا بتواند آن را حل کند، ثانیاً مسئله را تا حد امکان ساده کند تا نتایجی که ارائه می‌دهد عام باشد. بنابراین استفاده از این متن به‌عنوان دستورالعمل سه‌بعدی‌سازی مقرنس صحیح نیست، چراکه با ساده کردن مسئله، بسیاری از مسائل نقشه‌های پیچیده را نادیده باقی می‌گذارد. افزون بر این معماران مقرنس‌کار عصر حاضر نیز دانسته‌هایشان با اظهارات کاشانی در کتاب تفاوت فاحشی دارد، مثلاً در شناخت آلت‌ها. آلت‌هایی که کاشانی معرفی کرده شاپرک، ترنج، طاس و تخت است، اما او به قواعد قرارگیری و چگونگی ترکیبشان اشاره‌ای نمی‌کند. اجزا و حالت‌هایی در مقرنس مانند تنوره، آویز، تخت لوزی، دروازه، تخت عمود[۶] و... را مطرح نمی‌کند. اشاره نکردن کاشانی به اشکال ممکنِ هر حالت باعث شده تا محققان ترسیم‌های او را حکم لایتغیر فرض کنند. استفادهٔ محققان از آلات معرفی شدهٔ کاشانی، مسائل دور از ذهن و عجیبی مانند جهت آلت‌ها را پیش می‌آورد که در مسائل جاری مقرنس دیده نمی‌شود (Reinelt & Hogendijk, 2006, 87).

در مسئلهٔ سه‌بعدی‌سازی و ارتفاع قطارها، کاشانی برای پیشبرد محاسبات خود اندازه‌ای را فرض می‌کند تا حل مسئله را براساس آن پیش ببرد. «فرض» کاشانی مرجع سه‌بعدی‌سازی تحقیق‌ها شده است، در حالی که اندازه‌های بعد سوم باید با توجه به زمینهٔ کار، نوع مقرنس، ذوق سازنده و... تعیین شود و ارائهٔ حکمی قطعی برای همه مقرنس‌ها صحیح نیست.

محدودیت گسترهٔ نقشه‌های بررسی شده: در اکثر تحقیق‌های سه‌بعدی‌سازی مقرنس، یک یا دو نقشه ساده بررسی می‌شود. با توجه به محدودیت تعداد نقشهٔ بررسی شده، چنین تحقیق‌هایی نمی‌تواند داعیهٔ ارائهٔ روشی کلی برای سه‌بعدی‌سازی مقرنس را داشته باشد، چراکه در هر بررسی تنها یک یا دو نمونه از نقشه‌های ساده بررسی می‌گردد و برخی از انتخاب‌های مرتبط با سه‌بعدی‌سازی اصلاً مطرح نمی‌شوند، مثلاً ارتفاع تنوره.[۷] سایر انتخاب‌های سه‌بعدی[۸] این تحقیق‌ها اکثراً با توجه به *مفتاح‌الحساب* انتخاب شده‌اند[۹] یا به شیوهٔ خلاقانه (آزاد).[۱۰] در حالی که حکمی که در *مفتاح‌الحساب* آمده صرفاً برای مقرنس‌های ساده با ترک‌های برابر است.

توجه نداشتن به قرارگیری مقرنس در زمینه: هیچ‌یک از تحقیقاتی که در حوزهٔ سه‌بعدی‌سازی مطرح شده‌اند، به چگونگی قرارگیری مقرنس در زمینه توجه نکرده‌اند. چنانکه مشهود است مقرنس‌های نیمکار باید با قوس نیمکار هماهنگ و دستگردان شوند تا لبهٔ کار تو رفته یا بیرون زده نباشد. در هیچ یک از نمونه‌ها این تطبیق انجام نشده و اصلاً این مسئله مطرح نشده است، با اینکه عدم تطابق آن به شکل فاحشی به چشم می‌خورد.[۱۱] در مقرنس‌های چشمه، سرستون و ... سخنی از لزوم تناسب اندازهٔ ارتفاع قطار با اندازه‌های زمینه مطرح نشده است، در حالی که تناسب مقرنس و زمینه بخشی از طرح مقرنس است.

روش‌شناسی تحقیق

هرچند موضوع اصلی قابل توجه مقاله سه‌بعدی‌سازی مقرنس از نگاه لرزاده است، اما خالی از لطف نیست که به منظور فهم کامل نگاه لرزاده به مقرنس، دامنه بحث در این قسمت را از مبادی مورد نظر وی در باب مقرنس، در قالب تعریف مقرنس و بیان آلت‌های آن تا نوع نگاه به اصلاح هندسی نقشه‌ها و آلت‌ها، تصمیم در باب ارتفاع قطارها، چگونگی نقشه‌های مقرنس لرزاده و جنبه هنری مقرنس بیان نماییم. در این مسیر که از خلال مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه با شاگردان لرزاده سامان یافته و با استفاده از روش تحقیق کیفی، مفاهیم اصلی مقرنس از نظر لرزاده گردآوری و اهم آرای او در باب مقرنس توضیح داده شده است. در ادامه پس از تدقیق نگاه لرزاده دربارهٔ مقرنس، برای به‌روزرسانی روش ترسیم دوبعدی و سه‌بعدی‌سازی ترسیمی از نرم‌افزارهای اتوکد و کرل استفاده شده و با توضیح یک نمونه، کاربرد آرای لرزاده در عمل نشان داده شده است.

وجوه خاص و متفاوت آرای لرزاده در موضوع مقرنس

در این بخش سعی شده با تکیه بر آرای لرزاده به اهم تفاوت‌های روش دیگر صاحب‌نظران با روش وی پرداخته شود و روشی برای سه‌بعدی‌سازی ترسیمی تعریف گردد. افزون بر این، شناسایی اشتباه‌های رایج در دیگر بررسی‌ها می‌تواند دلیل تشتت فراوان در آرای مرتبط با سه‌بعدی‌سازی مقرنس را نشان دهد.

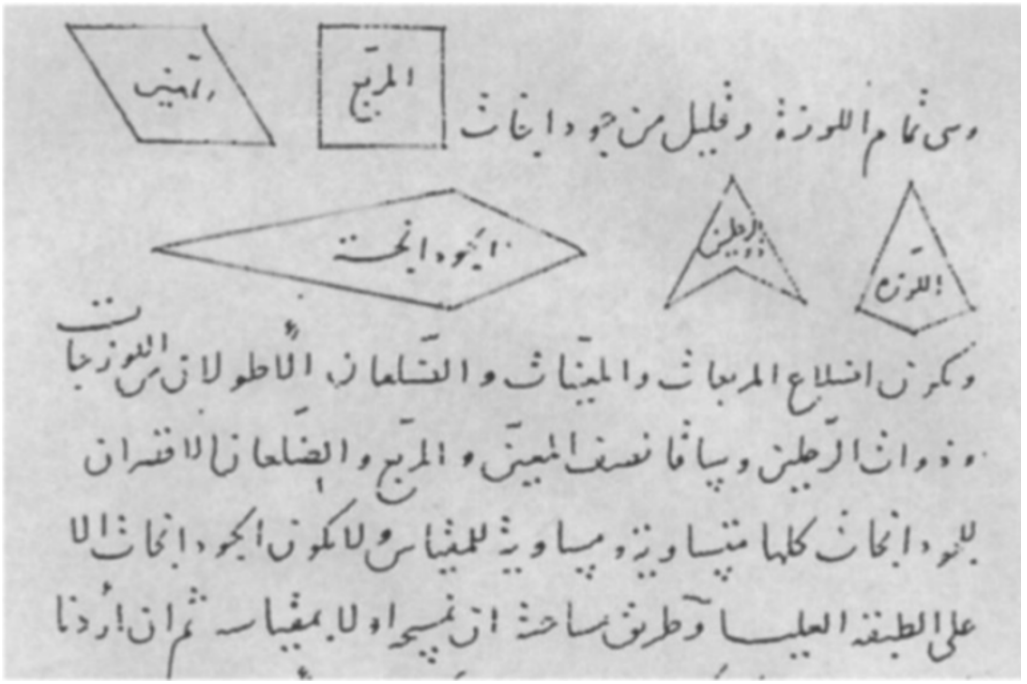
– تعریف مقرنس و آلت‌های آن از نگاه لرزاده

نخستین گام در مواجههٔ با مقرنس ارائهٔ تعریفی از آن است. تعریف مقرنس باعث می‌شود که تمایز آن با هر ساختار سه‌بعدی دیگر فهمیده شود و اجزا و چگونگی آنها مشخص باشد. از نظر لرزاده لفظ مقرنس به آنچه نسبت داده می‌شود که به شکل نردبان و پله‌پله و مانند آویزه‌های قندیل‌مانند ساخته شده باشد و مرکب از آلت‌ها (اجزا)ی معینی است (رئیس‌زاده و مفید، ۱۳۷۴، ۸۵). طاس، ترنج، شاپرک، تخت، تی و مدنی اهم آلت‌های تشکیل‌دهندهٔ مقرنس است (لرزاده، ۱۳۶۰، ۵۸–۱۰۰). قرارگیری این آلت‌ها در کنار هم با قواعد خاصی صورت می‌گیرد، به این صورت که طاس، تخت و مدنی آلت‌های اصلی هستند که با آلت‌های واسط، ترنج و شاپرک به یکدیگر متصل می‌شوند. درست تعریف نشدن مقرنس و خلط آن با هرگونه ساختار سه‌بعدی دیگر در سقف مسئلهٔ رایجی در تحقیق‌های این حوزه است.[۱۲] مقرنس ساختار سه‌بعدی پله‌پله شکلی است که از آلت‌های معین و محدودی ساخته شده است (لرزاده، ۱۳۵۸، ۹۰؛ لرزاده، ۱۳۶۰، ۵۳) و اگر آلت‌های خارج در این ساختار قرار گیرد، مقرنس خوانده نمی‌شود.[۱۳] گسترهٔ وسیع جهان اسلام و تنوع فرهنگی حاکم بر آن باعث تفاوت‌هایی در تعریف مقرنس در نقاط مختلف شده است. لذا معیارهایی که در ایران برای مقرنس برشمرده شده مثلاً در شمال آفریقا نمی‌تواند صادق باشد (لرزاده، ۱۳۵۸، ۷۳).

– آلت‌های مقرنس از نگاه لرزاده

اگر در ابتدای هر تحقیق تعریف معینی از مقرنس، اجزا و چگونگی آن به دست داده نشود، ممکن است آلت‌های (اجزا) شناخته شدهٔ مقرنس نادیده گرفته شوند و هر شکلی ذیل اجزای مقرنس قرار گیرد. نادیده گرفتن آلت‌های شناخته شدهٔ مقرنس منجر به تلاش محقق برای فهم اجزا بر اساس تعدادی محدود از نقشه‌های موجود و در نتیجه آلت‌شناسی اشتباه می‌شود.[۱۴] در طی فهم نقشه، آلت‌شناسی اشتباه باعث می‌شود تا لبْ قطار در کردن و فهم نقشه نیز عملیاتی پیچیده جلوه کند و جواب‌های مختلفی را باعث

شود.[۱۵] محققان لفظ «تحلیل هندسی» (نجیب اوغلو، ۱۳۸۴، ۴۰۷) و «رمزگشایی» (یغانی، ۱۳۸۱، ۳۳) را برای استنباط طرح سه‌بعدی نقشه‌های دوبعدی به‌کار برده‌اند، در صورتی که اگر آلت‌شناسی صحیحی بر روی نقشه اعمال شود، فهم چگونگی لب قطار در کردن[۱۶] نقشه‌های مورد بررسی دشوار نخواهد بود.

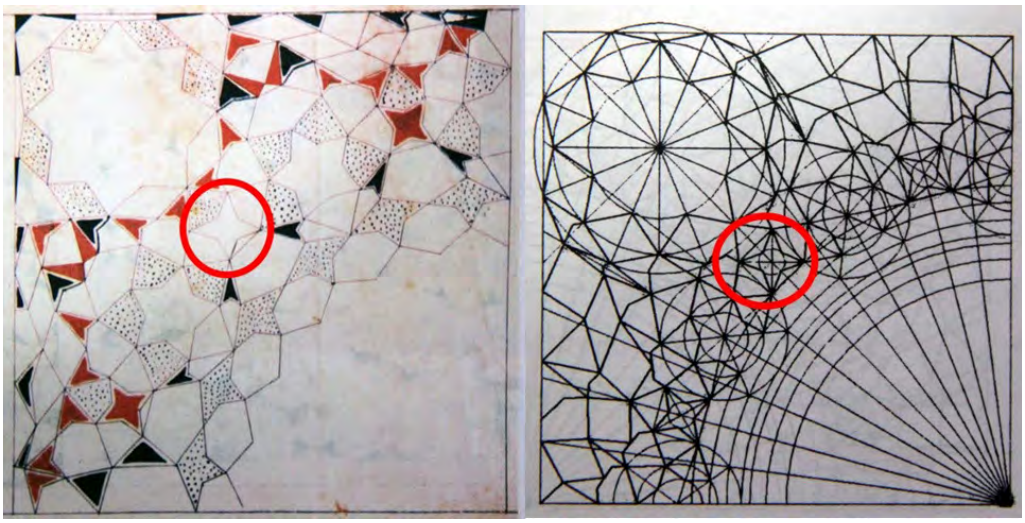


شکل ۱. آلت‌های مقرنس معرفی شده در مفتاح الحساب

منبع: Dold-samplonius & Harmsen, 2005, 86

– نظر لرزاده در باب اصلاح هندسی نقشه‌ها و آلت‌ها

معدود نقشه‌های مقرنس به‌دست آمده از گذشته نقشه‌های کارگاهی و برای اجرا هستند، نقشه‌هایی که استادکار برای اجرای طرح ترسیم کرده است. اکثر این نقشه‌ها کاملاً هندسی نیستند و بخش‌هایی از آلت‌های آن بنا به صلاح‌دید طراح دستگردان شده‌اند. اما در همهٔ تحقیق‌های سه‌بعدی‌سازی مقرنس، نقشه‌ها «رمزگشایی» و با توجه به زیرنقش هندسی تشخیص داده شدهٔ محقق اصلاح هندسی شده‌اند. معدود طرح‌های کاملاً هندسی باقی مانده نیز ممکن است زیرنقشی برای یک طرح اصلی باشد که احتمالاً به دست ما نرسیده است. اصلاح هندسی نقشه‌های مقرنس مطابق با زیرنقش هندسی یا اصلاح آلات با قواعد هندسی، کاری است که در اکثر تحقیقات مرتبط با حوزهٔ مقرنس انجام شده است.[۱۷] مرجع این کار دو منبع است: گفته‌های کاشانی و آثار محدود باقی‌مانده از زیرنقش در لوحهٔ تخت سلیمان و نقشه‌های طومار توپقاپی.[۱۸] این در حالی است که از نظر لرزاده ترسیم نقشه‌های مقرنس گرچه گاهی در ابتدا به کمک زیرنقش هندسی انجام می‌شود، اما در هنگام طراحی برای زمینه‌ای خاص و در حین اجرا، با توجه به مقتضیات، خارج از قواعد هندسی تغییراتی می‌کند.[۱۹] این تغییرات گرچه ممکن است نقشهٔ دوبعدی را از قاعده هندسی خارج کند، اما تمهیدی برای تناسب بهتر مقرنس در نتیجهٔ نهایی سه‌بعدی‌سازی است. اصلاح هندسی نقشه‌های نهایی، تمهیداتی که طراح در این باب اندیشیده را نادیده می‌گیرد.[۲۰] بنابراین ارجاع و تکیهٔ تحقیق‌هایی این چنین بر نقشه‌های قدیمی مقرنس استوار نیست، چراکه اصلاح و هندسی کردن این نقشه‌ها سندیت آنها را مخدوش می‌سازد و طرح جدید را نمی‌توان طرح طراح گذشتهٔ آن قلمداد کرد.



شکل ۲. نمونهٔ اصلاح هندسی آلت تخت در نقشه‌ای از طومار توپقاپی

منبع: نجیب اوغلو، ۱۳۸۴، ۱۸۱و۲۱۳

– نظر لرزاده درباب ارتفاع قطارهای مقرنس

تغییر ارتفاع قطار در یک قطار به‌خصوص مقدور نیست و ارتفاع همه قطارها (بجز قطار اول) باید برابر باشد. لرزاده صریحاً در کتاب احیای هنرهای از یاد رفته اشاره می‌کند که در مقرنس «قطارهایی با فواصل مساوی از هم مستقر می‌شوند» (رئیس‌زاده و مفید، ۱۳۷۴، ۸۵). بنابراین پیروی از دستورالعمل کاشانی صرفاً در مقرنس‌هایی با ترک‌های برابر ممکن است و برای مقرنس‌های پیچیده کاربرد ندارد. سایر انتخاب‌های لازم برای سه‌بعدی‌سازی نیز در کمتر تحقیقی مطرح شده و اکثراً کار بر اساس ترسیم‌های کاشانی در مفتاح‌الحساب پیش رفته است.[۲۱]

– جنبهٔ هنرمندانهٔ مقرنس در نگاه لرزاده

برخی از تحقیقات هدف را ارائهٔ یک «الگوریتم» برای سه‌بعدی‌سازی مقرنس معرفی کرده‌اند (نظیر: Hamekasi, 2011; Samavati & Nasri, 2011). تنظیم یک روش کلی برای انجام بخشی از کار سه‌بعدی‌سازی با الگوریتم مناسب است، چراکه عملیات مشترکی در طول سه‌بعدی‌سازی برای تبدیل نقشه به مقرنس وجود دارد.[۲۲] اما اینکه تمام کار به الگوریتم محوّل و نتیجهٔ آن به‌عنوان نتیجهٔ نهایی عرضه شود صحیح نیست، چراکه جنبهٔ هنرمندانهٔ مقرنس را نادیده می‌گیرد و آن را به کاری مکانیکی تقلیل می‌دهد. از نظر لرزاده هر مقرنس مسائل خاص خود را با توجه به زمینه‌اش دارد، مثلاً اندازه موش‌پا، حمیل، جَوَک، امتداد موش‌پا روی دیوار و.... که امکان تمهیدشان بر روی الگوریتم وجود ندارد، چراکه بسته به هر نقشه و البته ذوق سازنده متفاوت است. همچنین نقشه‌هایی که برای سه‌بعدی‌سازی انتخاب می‌شوند، گاه نقشه‌هایی ناتمام هستند و چندین حالت مختلف صحیح سه‌بعدی را از آنها می‌توان استنباط کرد.[۲۳]

– نقشه‌های مقرنس در آثار لرزاده

آثار مکتوب بجا مانده از لرزاده دربرگیرندهٔ تعداد زیادی از نقشه‌های دوبعدی مقرنس است. اکثر این نقشه‌ها در جلد دوم کتاب *احیای هنرهای از یاد رفته* و پس از آن در ویرایش جدید همان کتاب منتشر شده است. نقشه‌های مقرنس طیف متنوعی از مقرنس‌ها را از نظر تعداد قطار، زمینه، پیچیدگی، گسترهٔ

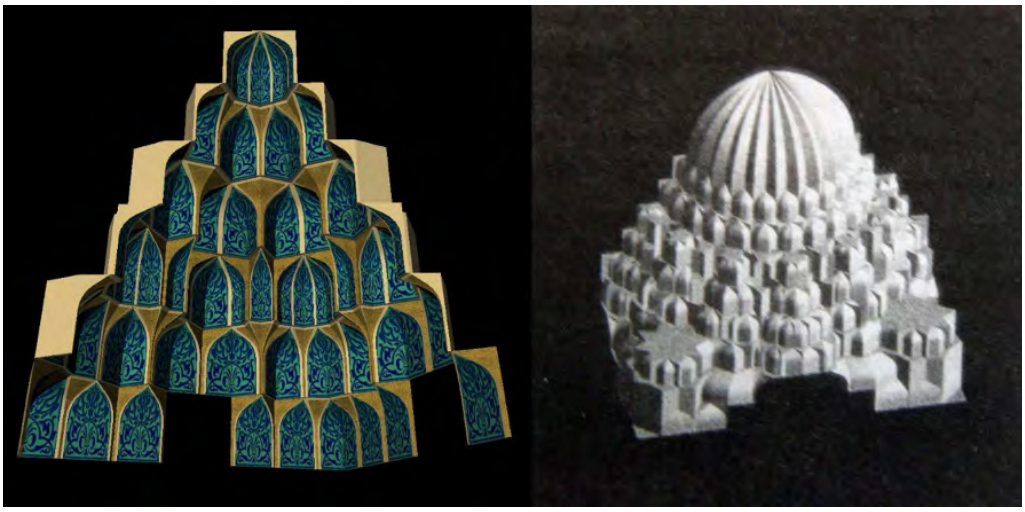
پوشش و شیوهٔ طراحی و رسم دربر می‌گیرد. در ادامه به مهم‌ترین مؤلفه‌ها و ویژگی‌ها در نقشه‌ای دوبعدی مقرنس لرزاده پرداخته شده است.

تنوع میزان اطلاعات نقشه‌ها در آثار لرزاده: برخی نقشه‌ها صرفاً نقشهٔ کلی مقرنس را بدون خطوط راهنما ارائه می‌دهد. نقشه‌های پیشرفته‌تر لب هر قطار را مشخص کرده است (اصطلاحاً لب قطار در شده) و سرانجام در کنار معدودی از نقشه‌ها به چگونگی تبدیل نقشه دوبعدی به مقرنس سه‌بعدی با ترسیم‌هایی اشاره و مقدماتی در باب طراحی بعد سوم مقرنس مطرح شده است. هر یک از این مراحل گام‌هایی برای فهم بهتر نقشه مقرنس است. در مقرنس‌های با زمینهٔ گسترده و توأم با پیچیدگی طرح، فهم نحوه انتظام آلات و لب قطار در کردن کار مشکلی است و نیازمند آشنایی با مقرنس و مشق در این حوزه است. (لرزاده، ۱۳۵۸، ۶۱).

پیچیدگی نقشه‌ها در آثار لرزاده: گسترده شدن زمینه کار، پرکار بودن مقرنس و کثرت انواع آلات، دستگردان شدن نقشه، تعداد قطار و نوع زمینه عوامل متنوعی هستند که جایگاه یک نقشه مقرنس را در طیف ساده یا پیچیده بودن نقشه معین می‌کنند. بنابراین قرار دادن یک نقشه در یک دسته ساده یا پیچیده کار صحیحی نیست و به عوامل زیادی بستگی دارد (لرزاده، ۱۳۶۰، ۲۱-۱۰۰).

مقرنس زنده در آثار لرزاده: لرزاده برای اشاره به مقرنس‌هایی که ساخته شده‌اند از اصطلاح «مقرنس زنده» استفاده می‌کند و چند نمونه از آنها را در ضمن طومار آباد و چند نمونه از کارهای خودش را در کتاب ارائه می‌دهد (لرزاده، ۱۳۶۰، ۲۳۷). مقرنس‌های زنده از این حیث حائز اهمیت هستند که می‌توان با مراجعه به آنها چگونگی رسیدن از نقشه دوبعدی به مقرنس ساخته شده سه‌بعدی را فهمید. لرزاده اشاره می‌کند که برداشت صحیح نقشه مقرنس از روی یک مقرنس زنده کار مشکلی است (امروزه دوربین عکاسی این کار را بسیار ساده‌تر کرده است). لرزاده از این رو مقرنس‌های زنده را مطرح می‌کند تا خوانندگان کتاب را با مسائل و تنگناهایی که طراح درباره آلت‌ها، زمینه و ... مواجه است آشنا سازد و نحوه حل مسئله توسط استادکاران را نشان دهد.

زمینه‌ها، اساس دسته‌بندی مقرنس در آثار لرزاده: زمینه مهم‌ترین عامل در شکل نهایی مقرنس در حین طرح و اجرا است و نظم خود را به مقرنس دیکته می‌کند. مقرنس همواره برای بستری خاص طراحی می‌شود و در قناس‌ترین زمینه‌ها نیز مقرنس با زمینه تطابق تام دارد. اصولاً طراحی مقرنس بر اساس زمینه راهی برای پنهان کردن کژی‌های زمینه است. بنابراین نوع زمینه مقرنس بازتابنده بسیاری از ویژگی‌های مقرنس است و زمینه‌های مشابه مسائل مشابهی را برای هر مقرنس پیش می‌کشند. از این رو است که در دسته‌بندی صحیح از نقشه‌ها لازم است زمینه در نظر گرفته شود.[۲۴] افزون بر مرحله طراحی، در مرحله سه‌بعدی‌سازی (ساخت) هم زمینه مقرنس نقش بسیار مهمی دارد و تعیین اندازه‌های نهایی بعد سوم منوط به اندازه‌های زمینه است و تناسبات نهایی بر این اساس تمهید می‌شود. همچنین برخی زمینه‌ها مسائل خاص خود را دارد، مثلاً نیمکار. زمینه‌های اصلی مقرنس عبارت‌اند از: سرستون، مناره، گیلویی، قاب‌سازی، چشمه، نیمکار (و فیلگوش در تعداد کمتر). انواع پیشرفته‌تر مقرنس‌ها از ترکیب همین زمینه‌های ساده به دست می‌آیند، مثلاً دو نیمکار پشت به پشت یا ترکیب قاب‌سازی با نیمکار. نمونه‌های استادانه این قبیل ترکیب‌ها در کتاب *احیای هنرهای از یاد رفته* ذکر شده است.



شکل ۳. دو نیمکار منتزع از زمینه با حاشیهٔ لبه‌لبه که با قوس نیمکار تطبیق داده نشده است
منبع سمت راست: نجیب اوغلو،۱۳۸۴، ۳۸۴ **و منبع سمت چپ منبع:** Schuldes, 2005, 9

تعداد قطارهای مقرنس در آثار لرزاده: تعداد قطار بنا به عوامل مختلفی چون وضعیت زمینه (گستره و ارتفاع)، پیچیدگی طرح، ذوق طراح و... تعیین می‌شود. نقشه‌های طرح شده در کتب لرزاده از دو تا بیست و سه قطار دارند. معمولاً مقرنس‌های گیلویی، سرستون و مناره تعداد قطارهای کمتری دارند. چون تعداد قطارهای مقرنس معیاری صرفاً کمّی است، لذا مقرنس‌های با تعداد قطار برابر الزاماً ویژگی‌های مشابهی ندارند.

شیوه رسم در آثار لرزاده: در تقسیم‌بندی کلی لرزاده، نقشه‌های مقرنس پرگاری یا دستگردان هستند. نقشه مقرنس پرگاری کاملاً مبتنی بر اصول هندسی است و ترسیم آن نیز به کمک قواعد هندسی انجام می‌شود. مقرنس دستگردان مقرنسی است که در رسم آن برخی از آلت‌ها بنا به دلایلی (تناسبات بهتر، تطبیق با زمینه و...) از حالت هندسی خارج شده‌اند

پیشنهادی برای سه‌بعدی‌سازی ترسیمی مقرنس برمبنای آرای لرزاده

سه‌بعدی‌سازی مقرنس بر اساس نقشه‌های دوبعدی ترسیمی لرزاده انجام می‌شود. روشی که در مقاله حاضر معیار کار قرار گرفته، در تلاش است ایرادات منطقی وارد به روشهای پیشین را نداشته و با آرای لرزاده در این باب منطبق باشد. این روش شامل سه مرحله است: ترسیم نقشه؛ تصمیم‌های سه‌بعدی‌سازی؛ ترسیم سه‌بعدی و پیرایش گرافیکی کار.

با توجه به محدودیت تعداد مقرنس‌های بررسی شده در تحقیق‌های حوزه مقرنس، کمتر تحقیقی است که نقشه‌ها را دسته‌بندی کرده باشد.[۲۵] تقسیم‌بندی‌های مطرح شده تاریخی یا جغرافیایی است (Shiro, n.d.) و به چگونگی نقشه نمی‌پردازد. تنها در یک نمونه (یغانی، ۱۳۸۱) تقسیم‌بندی با توجه به نقشه انجام شده که آنها را با توجه به هیئت قطار اول و چگونگی گسترش آن به سوی بالا به سه دسته تقسیم کرده است. گرچه این تقسیم‌بندی می‌تواند همهٔ انواع مقرنس را دربر بگیرد، اما ممکن است گونه‌های مختلفی در یک دسته قرار گیرند که ویژگی همسانی ندارند.[۲۶] البته این تقسیم‌بندی در پیشبرد هدف نویسنده مؤثر بوده است،[۲۷] اما نمی‌تواند معیار مناسبی برای یک دسته‌بندی عام باشد. دسته‌بندی صحیح به‌گونه‌ای است که انتخاب یک نمونه از هر دسته، اکثر مسائل مرتبط با نقشه‌های آن دسته را در طول فرآیند سه‌بعدی‌سازی مطرح کند.

– ترسیم نقشه با رعایت آرای لرزاده

مسوده نقشه‌های مقرنس تنها سندی است که از نقشه‌های مقرنس لرزاده برای آغاز کار سه‌بعدی‌سازی در اختیار است. کار سه‌بعدی‌سازی بر اساس همین سند آغاز می‌شود. در آغاز کار لازم است روشی برای ورود صحیح نقشه به رایانه اندیشید، به‌طوری که کمترین تغییر در نقشه مرجع حاصل شود. بر این اساس عکس نقشه‌ها از روی ترسیم لرزاده تهیه شده و از روی عکس، عیناً در نرم‌افزار اتوکد ترسیم مجدد شده است. در محیط این نرم‌افزار امکاناتی است که باعث آسان شدن کار می‌شود؛ مانند جداسازی لب قطارها از خطوط راهنما با معین کردن لایه‌های مختلف. همچنین سرشت خطی محیط نرم‌افزار امکان ترسیم‌های ابتدایی و سه‌بعدی خطی را فراهم می‌کند که کار را برای مرحله نهایی (پیرایش گرافیکی کار) آسان می‌سازد.

پس از رسم نقشه باید لبه هر قطار را در نقشه معین کرد. این کار چه در سه‌بعدی‌سازی و چه در ساخت واقعی مقرنس لازم است. پیدا کردن لبه قطار در یک نقشه بدون خطوط راهنما کار مشکلی است و مهارت در آن معمولاً با تجربه به‌دست می‌آید. در تحقیق حاضر، کتاب *احیای هنرهای از یاد رفته* پیشینه کار است که شماری از مقرنس‌ها در آن با مشخص کردن لبه قطار و خطوط راهنما رسم شده است. بنابراین در این تحقیق بحث پیدا کردن لبه قطار مطرح نیست و از اطلاعات کتاب یاد شده استفاده می‌شود.

پس از رسم نقشه، شناسایی آلت‌ها در نقشه دوبعدی کمک شایان توجهی به نحوه انتظام سه‌بعدی مقرنس می‌کند و از کنار هم قرار دادن اشتباه آلت‌ها در حین سه‌بعدی‌سازی جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، شناخت آلت‌ها باعث می‌شود که در حین سه‌بعدی‌سازی، اشکال نامتعارفی ساخته نشود و در هر قدم، محصول کار با آلت‌ها مطابقت داده شود.

طرح‌های مقرنس در زمینه‌های مختلف به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند: پرگاری، تکرارشونده و دستگردان. نقشه مقرنس‌های پرگاری کاملاً مبتنی بر اصول هندسی رسم می‌شوند. نقشه‌های تکرارشونده دارای یک الگو هستند که پس از طرح آن الگو و تکرار در زمینه، مقرنس ساخته می‌شود. مثلاً در نقشه مقرنس سرستون دایره، قطاع مقرنس یک‌هشتم دایره طرح می‌شود و بقیه سرستون با تکرار همان قطاع پر می‌گردد. اولین مرحله پس از مواجهه با یک نقشه مقرنس تشخیص دستگردان یا تکرارشونده بودن آن است. اگر مقرنس تکرارشونده باشد، باید قطاعی که تکرار می‌شود را به‌دست آورد.

پس از آن مسئله شیوه ترسیم مطرح می‌شود. آیا مقرنس مطابق اصول هندسی طرح شده و پرگاری است یا آلت‌های آن دستگردان شده‌اند؟ اگر نقشه از قسم نخست باشد، باید شیوه ترسیمی آن را فهمید و زیرنقش مقرنس را به دست آورد، اما اگر نقشه از قسم دوم باشد باید عیناً نقشه را از روی ترسیم مسوده رسم کرد.

ماحصل آنچه گفته شد، چهار مرحله در بخش ترسیم نقشه است: (۱) ترسیم پلان مقرنس مطابق مسوده نقشه؛ (۲) تشخیص لب قطارها در نقشه؛ (۳) شناسایی آلت‌ها در نقشه و نحوه قرارگیری آنها در کنار هم، برای تسهیل سیر کار در سه‌بعدی؛ و (۴) شناسایی قطاع تکرارشونده در صورت وجود.

– تصمیم‌های سه‌بعدی‌سازی بر اساس آرای لرزاده

پس از ترسیم نقشه در محیط نرم‌افزار، روند سه‌بعدی‌سازی مستلزم اتخاذ تصمیم‌هایی است که در نقشه‌های مقرنس لرزاده مستقیماً ذکری از آنها به میان نیامده است. مهم‌ترین این مسائل چگونگی ارتفاع دادن به قطارها و نحوه رسیدن قطارها به یکدیگر است. مطابق نظر لرزاده ارتفاع همه قطارها در یک مقرنس باید با یکدیگر برابر باشد، لذا مقدار انتخابی برای ارتفاع در شکل نهایی مقرنس بسیار تأثیرگذار است.

اگر بیشتر از حد لازم انتخاب شود مقرنس کشیده به نظر می‌رسد و اگر کمتر از حد لازم باشد، مقرنس کم خیز و خفته جلوه می‌کند. تشخیص میزان و چگونگی ارتفاع مقرنس مسئله‌ای است که تصمیم‌گیری آن بر عهده مجری مقرنس قرار داده شده است. برای تشخیص ارتفاع مناسب باید ارتفاع‌های مختلف آزموده و با رسم حالت‌های مختلف و دیدن آنها، ارتفاع مناسب انتخاب شود. در مقاله حاضر برای اجتناب از طولانی شدن عمل آزمون ارتفاع‌ها، روند کار بر اساس مقرنس‌های زنده ساخت استادان فن تنظیم شده است.[۲۸]

تصمیمی که بخش دیگری از تناسبات نهایی مقرنس را تعیین می‌کند، انتخاب نسبت بخش عمودی خط واصل بین دو قطار به ارتفاع هر قطار است. کم و زیاد شدن این نسبت در قیاس با مقدار لازم، باعث می‌شود مقرنس نامتناسب و بی‌قاعده به نظر برسد. انتخاب دیگری که بر عهده مجری مقرنس است، نوع قوسی است که یک قطار را به قطار بعدی می‌رساند. علاوه بر اینکه طیف وسیعی از قوس‌ها را می‌توان به کار برد، از خط مستقیم هم می‌توان استفاده کرد. البته در طول کار و با توجه به اندازه متفاوت خطوط واصل، ممکن است قوس‌های انتخابی تغییراتی در شکل خود داشته باشند. استفاده از هر نوع قوس یا خط، بسته به زمینه و محل کار می‌تواند مناسب باشد یا نباشد. در نهایت سازنده می‌تواند ارتفاع موش‌پا را تا آن اندازه که صلاح می‌داند روی دیوار پای کار ادامه دهد. بسته به عناصری که در اطراف مقرنس قرار دارند، امتداد موش‌پا می‌تواند مقرنس را با اطرافش بیشتر مرتبط سازد، گرچه چنانچه بی‌مورد امتداد داده شود جلوه خوشایندی ندارد.

این قبیل اطلاعات (درباره تصمیم‌های سه‌بعدی‌سازی) در ترسیم‌های نما و مقطع مقرنس دیده می‌شوند که در مسوده‌های لرزاده به‌ندرت چنین نمونه‌هایی به چشم می‌خورد. بنابراین برای سه‌بعدی‌سازی لازم است تصمیم‌هایی درباره چگونگی خطوط واصل میان قطارها و ارتفاع آنها بر اساس آرای لرزاده اتخاذ شود. این تصمیم‌ها از این قرارند: (۱) تعیین ارتفاع هر قطار؛ (۲) انتخاب نوع قوس یا خط واصل بین دو قطار؛ (۳) تعیین نسبت خط عمود واصل به ارتفاع بین دو قطار؛ و (۴) تعیین ارتفاع (یا طول) موش‌پا. این چهار انتخاب، تفاوت مجری باتجربه و خوش‌ذوق را با مجری تازه‌کار در حوزه ساخت یک نقشه مشخص می‌کند، مانند تفاوت دو نقاش ماهر و تازه‌کار که از یک منظره نقاشی می‌کنند.

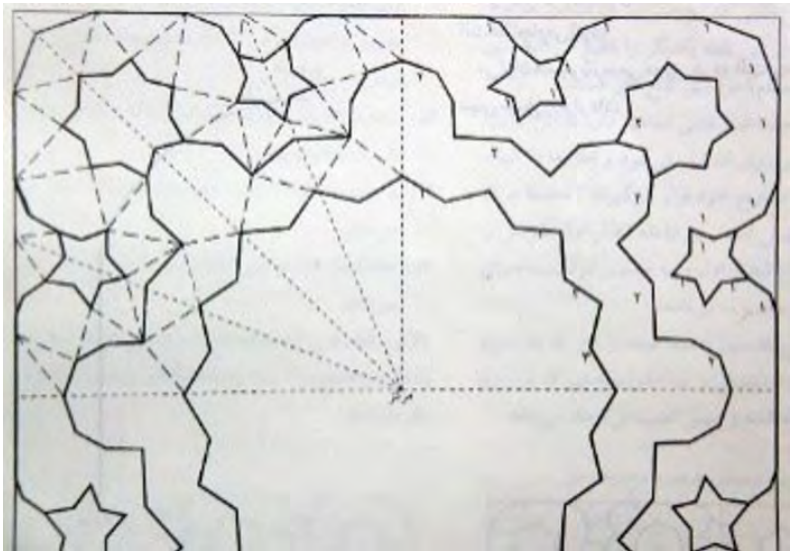
– ترسیم سه‌بعدی و پیرایش گرافیکی کار با مراعات آرای لرزاده

در این مرحله با توجه به تصمیم‌های اتخاذ شده در مرحله قبلی، قطارها در نرم‌افزار اتوکد ارتفاع داده می‌شوند تا سه‌بعدی هر قطار به‌دست آید. هر قطار مطابق با ارتفاع انتخابی باید در ارتفاع معین شده قرار گیرد. اگر ارتفاع هر قطار را مقدار «د» در نظر بگیریم، قطار اول در ارتفاع «د»، قطار دوم در ارتفاع «۲د» قرار می‌گیرند و مانند این. هریک از خطوط میان دو قطار معرف یک خط واصل میان دو قطار هستند. اضلاع میانی که در آنها خطی رسم نشده است، ترک‌های هر آلت را نشان می‌دهند. اگر همه خطوط واصل (میان آلت‌ها و ترک‌ها) رسم شود، همه اشکال در پلان مقرنس به صورت مثلث دیده می‌شود. خطوط واصل با توجه به تصمیم‌هایی که قبلاً اتخاذ شده است رسم می‌گردد. شناخت آلت‌ها در نقشه در این مرحله به کمک مجری می‌آید تا بررسی کند که با رسم خطوط واصلْ به آلت‌های مورد نظر دست یافته است یا خیر. پس از رسم خطوط واصل بین آلت‌ها، لازم است این خطوط در داخل آلت‌ها و در محل ترک‌های آلت رسم شود تا سه‌بعدی آلتْ خود را نشان دهد. در بررسی حاضر تفاوت خطوط واصل بین آلت‌ها و خطوط ترک‌ها با ضخامت متفاوت خطوط نشان داده شده است.

پس از این مرحله با در نظر گرفتن یک نقطه معیار (مرکز مقرنس) قطارها روی هم قرار می‌گیرند. با قرار

گرفتن قطارها روی هم، سه‌بعدی کامل یک قطاع ساخته شده است. با تکرار قطاع در زمینه، رسم سه‌بعدی کامل مقرنس به دست می‌آید. این کار معادلِ یافتن و کنترل هوای خروج در ساخت واقعی مقرنس است و جلوی اشتباه در قرارگیری پس و پیش قطارها را می‌گیرد. در ساخت مقرنس فاصله پیش‌آمده‌ترین نقطه هر قطار تا مرکز «هوای خروج» نامیده می‌شود. پس از قرار دادن قطارها روی هم، سه‌بعدی یک الگو (یا قطاع) به دست آمده است. اگر مقرنس دستگردان باشد در همین مرحله کار تمام است، چون طرح مقرنس قطاع تکرارشونده ندارد و یک زمینه کامل را پوشانده است. در غیر این صورت با تکرار الگو در زمینه، سه‌بعدی مقرنس به‌طور کامل به‌دست می‌آید.

حال لازم است خطوط راهنمای رسم و همچنین خطوط اضافی از رسم حذف شوند. منظور از خطوط اضافی، خط‌گیرها و نیز بخش‌هایی است که پشت بخش‌های دیگر قرار گرفته و در واقعیت دیده نمی‌شوند. علاوه بر حذف خطوط اضافه، لازم است بر اساس میزان اهمیت خطوط در ترسیم سه‌بعدی نهایی، ضخامت متفاوتی به هر دسته از خطوط اختصاص داد. لذا باید لبه‌های قطار، لبه‌های آلت‌ها و خطوط مشخص‌کننده ترک آلت‌ها به ترتیب ضخیم، متوسط و نازک رسم شوند. البته تفاوت ضخامت این دسته‌ها کم است، چون ضخامت زیاد خطوط باعث کم شدن دقت کار، به‌خصوص در محل اتصال خطوط می‌شود. حذف خطوط اضافی و تنظیم ضخامت خطوط در بررسی حاضر در نرم‌افزار کرل انجام شده است. در ادامه و به منظور گویاتر شدن روش طرح شده، سه‌بعدی‌سازی یک نمونه مقرنس نیمکار مطرح شده است.



شکل ۴. نقشه مقرنس نیمکار

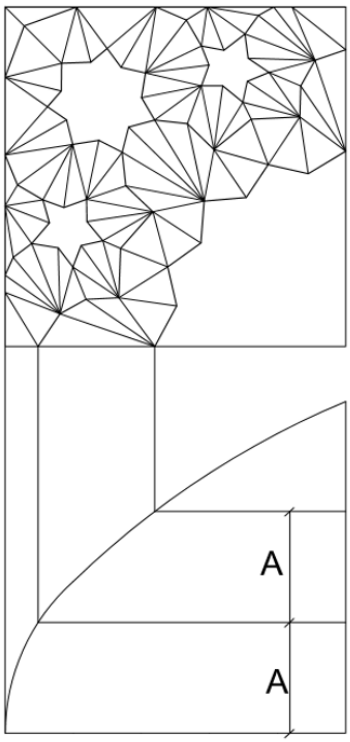
منبع: رئیس‌زاده و مفید، ۱۳۷۴، ۹۰

– سه‌بعدی‌سازی ترسیمی یک نمونه برمبنای آرای لرزاده: مقرنس نیمکار

مقرنس نیمکار مقرنسی است که در داخل نیمکار ایوان، محراب، سردر و مانند آن قرار می‌گیرد. معمولاً در نقشه‌های مقرنس، مقرنس نیمکار عبارت است از نصف مقرنس‌هایی که برای چشمه رسم می‌شود، اما در حوزه عمل تفاوت‌های مهمی با مقرنس چشمه دارد که باعث تمایز آن می‌شود.

طرح و ساخت مقرنس نیمکار علاوه بر احکام معمول دستورالعمل دیگری نیز دارد که مربوط به تطبیق و هماهنگ‌سازی قوس بیرونی نیمکار (لبه خارجی نیمکار) با مقرنس است. پیش از آغاز کار سه‌بعدی‌سازی، لازم است نقشه مقرنس با قوس نیمکار منطبق شود. در کتاب *احیای هنرهای از یاد رفته* در این باره چنین توضیح داده شده است (رئیس‌زاده و مفید، ۱۳۷۴، ۸۶): در مقرنس و به‌خصوص

مقرنس نیمکار ضروری است مقرنس چنان طراحی شود که نسبت به لبه دور، جلو نزند یا عقب نماند. بلکه کاملاً با لبه دور مماس گردد. این عمل در مقرنس با انتقال خطوط انجام می‌گیرد، به این ترتیب که: (۱) قوس نیمکار یا محراب را روی تخمیر رسم می‌کنیم. (۲) مقرنس مورد نیاز را با هر چند قطار که می‌خواهیم رسم می‌کنیم. (۳) ارتفاع عرقچین (شمسه) کار را با انتقال خطوط از خیز دور کسر می‌کنیم. (۴) قطار اول را در محل مناسب و دلخواه نشان می‌کنیم. این محل معمولاً پایین‌تر یا برابر پای قوس قرار می‌گیرد تا مقرنس اصطلاحاً قوز نداشته باشد. (۵) از محل قطار اول تا زیر عرقچین را به تعداد قطارها به‌طور مساوی تقسیم می‌کنیم. (۶) به ترتیب قطارها را در محل‌های تقسیم شده قرار می‌دهیم. (یعنی لبه کار را در نقشه طوری اصلاح می‌کنیم که لبه قطارها در محل‌های تقسیم‌شده قرار بگیرد). (۷) حد فاصل قطار بالایی تا تیزه، قوس شمسه را تشکیل می‌دهد. بالاترین قطار (زیر شمسه) به اندازه سر ترنج از دیگر قطارها بلندتر خواهد بود و شمسه نیز با آهنگ قوس تا سر تیزه بالا خواهد رفت.

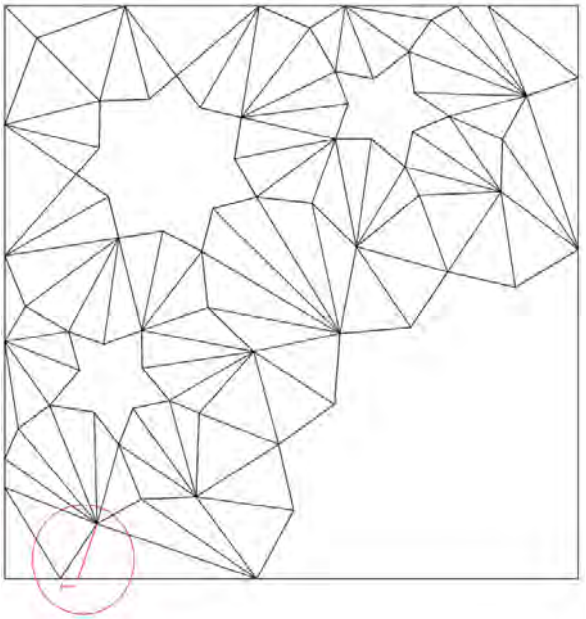


شکل ۵. رسم مقرنس نیمکار و انتقال خطوط برای تطبیق با لب دور

ترسیم نقشه: مقرنس انتخابی در کتاب *احیای هنرهای از یاد رفته* با عنوان «مقرنس نیمکار یا چشمه سه قطاره» معرفی شده است. بنا به اشاره صریح ذیل نقشه مقرنس در کتاب، این مقرنس پرگاری نیست، چنانکه از شکل آلت‌های تخت آن مشهود است. بنابراین ترسیم نقشه مقرنس عیناً از روی نقشه چاپ شده در کتاب انجام شده است. پس از ترسیم نقشه، انتقال خطوط انجام می‌گیرد. برای این کار باید بستری برای مقرنس نیمکار مفروض باشد. برای آغاز کار باید مقداری برای نوع قوس و عرض نیمکار در نظر گرفت تا بتوان سایر اندازه‌ها را به‌طور نسبی در قیاس با آن به‌دست آورد. در مقاله حاضر قوس انتخابی قوس ۷-۲-۵ با عرض ۱۱۹.۳ واحد است. مطابق با این اندازه، عمق نیمکار ۵۶.۶ واحد خواهد بود. این اندازه با توجه به نسبت دو ضلع مقرنس نیمکار در نقشه به دست می‌آید. برای اینکه مقرنس نیمکار در داخل زمینه (بستر) مشخصی قرار گیرد، ارتفاع کف تا تیزه نیمکار ۱۹۲ واحد فرض شد. این انتخاب

به‌طور مستقیم تأثیری بر چگونگی مقرنس ندارد، اما بخشی از زمینه مقرنس را تعیین می‌کند و بر نتیجه بصری نهایی تأثیرگذار است.

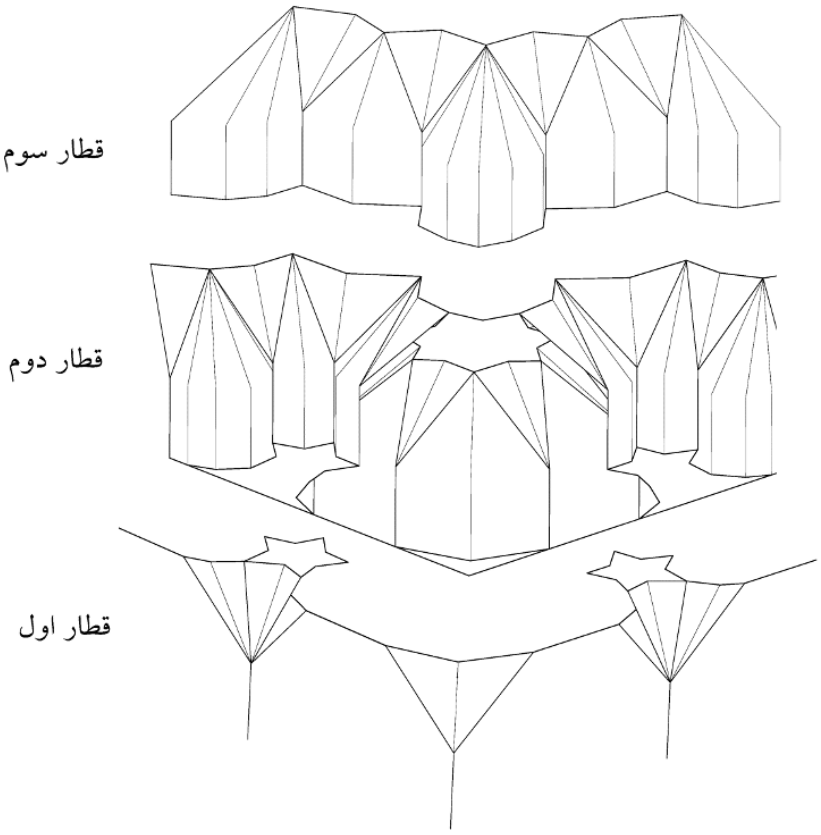
پس از رسم قوس و انتقال خطوط، ارتفاع شمسه مشخص می‌شود. با توجه به تعداد قطارها، مابقی ارتفاع از پای قوس تا قطار آخر را نصف می‌کنیم تا جای هر قطار مشخص شود. پس از آن لازم است لبه هر قطار با خطوط انتقالی از قوس هماهنگ باشد، لذا لب قطار دوم باید مقداری جابجا شود. «شکل ۶» نمایانگر جابجایی است: شکل طاس برای انطباق با قوس اندکی فشرده می‌شود. این تمهید در همه مقرنس‌های نیمکار برای انطباق با قوس به کار برده می‌شود. چنان که در تصویر دیده می‌شود، در قطار ماقبل پایانی طاس حاشیه قوس به‌قدری کش آمده تا در کنار آن به صورت منطبق قرار گیرد.



شکل ۶. ترسیم مجدد نقشه و تطبیق آن با قوس نیمکار

شکل ۷. انتظام آلت‌ها در مقرنس نیمکار

تصمیم‌های سه‌بعدی‌سازی: در بخش قبل به اندازه‌های (نسبی) زمینه کار اشاره شد. با توجه به اندازه‌های زمینه، ارتفاع هر قطار (از طریق انتقال خطوط، اندازه A در شکل ۵) معادل ۱۹.۵ واحد به دست می‌آید. نوع خط واصل شکسته فرض شد و نسبت بخش عمود خط واصل به کل آن ۰.۵ است. ارتفاع قطار موش‌پا نیز معادل ارتفاع سایر قطارها است، هرچند در اینجا مانعی برای افزایش آن وجود ندارد. با اطلاعات پیش رو به راحتی می‌توان قطارهای نیمکار را رسم کرد و نقشه مقرنس، آلت‌های موجود در آن را بدون ابهام نشان می‌دهد (شکل۷). در حین رسم کار اهمیت انتقال خطوط مشخص می‌شود: آلت‌های لبه قوس دقیقاً مماس با قوس قرار می‌گیرند و دیگر نیازی به دستی‌سازی آنها نیست.



شکل ۸. ترسیم جداگانه قطارها و قرارگیری روی هم

شکل ۹. مقرنس تکمیل شده در بستر انتخابی، دید از رو به رو سمت چپ

شکل ۱۰. مقرنس تکمیل شده در بستر انتخابی، دید از رو به رو سمت چپ، بزرگ‌نمایی شکل ۹

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با شناخت زبان لرزاده در بحث درباره مقرنس، سه‌بعدی‌سازی ترسیمی یک نمونه را با توجه به آرای او مطرح کرد. برای پیشبرد روند سه‌بعدی‌سازی، قواعد و نتایجی از آرای لرزاده در باب سه‌بعدی‌سازی استخراج شده است که می‌تواند در سه‌بعدی‌سازی دیگر نقشه‌ها و تحقیق‌های آتی راهگشا باشد. در این بخش اهم این نتایج مرور شده است.

ارتفاع قطار: یکی از تصمیم‌های ابتدایی سه‌بعدی‌سازی «ارتفاع قطار» است. در همه مقرنس‌ها ارتفاع قطارها به استثنای قطار موش‌پا باید برابر باشد. قطار موش‌پا می‌تواند تا هر اندازه‌ای بر روی دیوار پای کار ادامه یابد. تحقیق‌های دیگر هیچ یک این حکم را تصریح نکرده‌اند و اگر هم ارتفاع قطارها در نهایت مساوی فرض شده باشد، مبتنی بر قاعده‌ای خاص نبوده است (مثل: نجیب اوغلو، ۱۳۸۴) و صرفاً برای سهولت کار سه‌بعدی‌سازی چنین فرضی را صلاح دانسته‌اند.

زمینه: برای ساخت، سه‌بعدی‌سازی یا تصور یک مقرنس باید زمینه‌ای برای آن در نظر گرفت، چراکه بعضی از تصمیم‌گیری‌ها درباره چگونگی مقرنس بر اساس زمینه مقرنس انجام می‌شود. قرار گرفتن مقرنس در خارج از زمینه علاوه بر اینکه دیدی غیر واقعی از مقرنس ارائه می‌دهد، مانع از طرح برخی از مسائل مقرنس می‌شود؛ مثلاً چگونگی اتصال مقرنس به لبه دور نیمکار. در تحقیق‌های سه‌بعدی‌سازی که به مقرنس نیمکار پرداخته‌اند، نبود زمینه باعث شده تا موضوع انتقال خطوط و تطبیق با لبه قوس مطرح نشود و کار نیمه‌تمام، خاتمه یافته تلقی شود.[۲۹]

نقشه دوبعدی: نقشه مقرنس در آغاز تنها مدرک در دست مجری است. اگر نقشه برای همان زمینه طرح شده باشد مجری مجاز به تغییر و اصلاح نقشه نیست. اما گاهی مقرنس برای زمینه طرح نشده و مجری با توجه به اندوخته پیشین خود و زمینه‌های مقرنسی که بلد است، طرحی را برمی‌گزیند و با تغییر آن، نقشه را به زمینه جدید «می‌خوراند». این تغییرات در حوزه طراحی مقرنس است و مجری مقرنس در این موارد طراح نیز هست. بنابراین در پژوهش‌هایی که سه‌بعدی‌سازی مقرنس را مطرح می‌کنند، تغییر نقشه و اصلاح آن صحیح نیست؛ چون زمینه مقرنس در آنها بر اساس طرح مقرنس انتخاب می‌شود (و لذا نیازی به تطبیق نقشه و زمینه نیست) و پژوهش‌ها ادعای سه‌بعدی‌سازی نقشه قدیمی را دارند.[۳۰] اگر نقشه مطابق با برخی دستورها تغییر کند، نقشه جدیدی است و نمی‌توان آن را به نقشه قدیمی نسبت داد. تنها استثنا در این باب نقشه‌های پرگاری است.

انتقال خطوط در مقرنس نیمکار: مقرنس نیمکار به دلیل زمینه خاص خود افزون بر دیگر قواعد، قاعده‌ای برای تطبیق مقرنس با زمینه و لبه دور دارد. انتقال خطوط از نقشه به لب دور و تنظیم نقشه بر اساس ارتفاع قطارها تمهیدی است برای اینکه آلت‌های مقرنس از لبه دور جلوتر یا عقب‌تر قرار نگیرد و این دو به هم برسند. اگر این اصل رعایت نشود، مقرنس و قوس نیمکار هماهنگ با یکدیگر قرار نخواهد گرفت. در تحقیق‌هایی که زمینه‌ای برای مقرنس در نظر گرفته نشده است، این مسئله مطرح نمی‌شود که باعث نیمه‌تمام ماندن کار است (Dold-Samplonius & Harmsen, 2005).

حدود نسبی انتخاب‌ها: روش تحقیق حاضر برای طراحی بعد سوم مبتنی بر انتخاب‌های سه‌بعدی‌سازی برای هر نقشه درنظر گرفته شده است. پس از اینکه مجری نسبت‌های مشخص شده را انتخاب کند، می‌توان مقرنس را ساخت. انتخاب‌ها نسبی‌اند و با توجه به هر زمینه، نوع نقشه و مصالح می‌توانند متفاوت باشند. بنابراین برای هر مقرنس نمی‌توان یک انتخاب نهایی در نظر گرفت و بسته به زمینه، ذوق مجری و ... انتخاب‌ها متفاوت خواهد بود. اما می‌توان قائل به محدوده‌های نسبی برای انتخاب‌ها شد که انتخاب‌های نهایی در آن محدوده‌ها قرار می‌گیرند.

در سه‌بعدی‌سازی مقرنس با نرم‌افزارهای کامپیوتری تصمیم‌های اتخاذ شده به صورت اعداد ارائه می‌شوند. اما آنچه مهم و قابل استفاده است، نسبت میان اعداد است نه ارزش کمی آنها. روند تصمیم‌گیری نیز بر اساس نسبت‌ها پیش می‌رود. مثلاً تصمیم درباره ارتفاع قطار، با توجه به اندازه زمینه و فاصله قطارها در نقشه و در نسبت با آنها تعیین می‌شود، گرچه در پایان یک عدد نشان‌دهنده ارتفاع است. برای تسهیل انتخاب می‌توان محدوده‌هایی نسبی برای ارتفاع قطار قائل شد. انتخاب‌های کمتر یا بیشتر از این مقدار در زمینه انتخاب شده نامتناسب به نظر می‌رسند. البته این محدوده برای هر زمینه‌ای متفاوت است و ممکن است یک محدوده نسبی مناسب برای مقرنس مناره، در نیمکار مقرنسی نامتناسب را پدید بیاورد.

ذوقی بودن انتخاب‌ها: برخی از انتخاب‌هایی که در حوزه سه‌بعدی‌سازی صورت می‌گیرد، ذوقی است و با توجه به زمینه و بستر گسترده کار انجام می‌شود؛ لذا ملاکی قطعی برای داوری درباره آنها و تعیین درست و غلط بودنشان وجود ندارد. مثالی درباره این نتیجه، تصمیم‌گیری درباره مقوس یا شکسته بودن خط واصل قطارها در مقرنس است. هر دوی این انتخاب‌ها می‌تواند منجر به مقرنسی متناسب و زیبا شود و حکمی قطعی برای رجحان یکی بر دیگری نیست؛ این بخش کاملاً به تجربه و ذوق مجری مقرنس بستگی دارد.

اختیارات مجری: واپسین نتیجه در تحقیق حاضر، اختیاراتی است که مجری در پیرایش مقرنس دارد، بدون اینکه در نقشه مقرنس تغییری بدهد. انتخاب مصالح و شیوه آرایش آن (مثلاً چینش آجرها و چگونگی آن) بر عهده مجری است. تزیین‌های ظریفی مانند جوک و حمیل و چگونگی آنها (مثل چند ردیفی بودن، نحوه پیوستن کاشی‌های حمیل به هم و ...) از مسائلی است که کاملاً بر عهده مجری است. قطار موش‌پا به دلیل انتخابی بودن تداوم آن بر روی دیوار، امکان خوبی برای پیوند بهتر دیوار پای کار و مقرنس به طراح ارائه می‌کند. افزون بر این قطار، طراح می‌تواند با نقاشی تداوم قطار اول بر روی دیوار، قطاری کاذب و عمودی زیر قطار موش‌پا طراحی کند. این قطار البته جزئی از مقرنس نیست، اما احساس تداوم مقرنس و متعدد بودن قطارها را به ناظر القا می‌کند. نمونه‌ای از این کار در مقرنس گیلویی مسجد لرزاده تهران دیده می‌شود. پیگیری این قبیل اختیارات و استفاده‌هایی که معماران از این امکانات کرده‌اند، برخی از راه‌های طراحی طراحان مقرنس را آشکار می‌سازد.

در پایان لازم به ذکر است که سه‌بعدی‌سازی ترسیمی مقرنس گرچه برای تصور فضایی و تحلیل اجزای مقرنس مفید است، لیکن نمی‌تواند برای تحلیل مقرنس جایگزین مقرنس زنده شود، چراکه بسیاری از مسائل مرتبط با مقرنس در سه‌بعدی‌سازی ترسیمی مطرح نمی‌شوند. تداخل مصالح با هم، چگونگی قرارگیری و جور شدن مصالح، نحوه ساخت و انتقال و نصب مقرنس برخی از مسائلی است که در حین سه‌بعدی‌سازی مطرح نمی‌گردد، اما در ساخت واقعی مقرنس از مسئله‌های مهم به شمار می‌رود.

مقاله حاضر به منزله مقدمه‌ای برای سه‌بعدی‌سازی ترسیمی دیگر نقشه‌های مقرنس و به‌خصوص نمونه‌های پیچیده‌تر است. هر نقشه مقرنس مسائل خاص خود را دارد و با بررسی نمونه‌های دیگر، مسائل و قاعده‌های بیشتری به‌دست خواهد آمد. اضافه کردن مؤلفه‌های دیگر برای تکمیل مقرنس از قبیل کاشی‌کاری، شیوه آجرچینی، جوک و حمیل و... قدم‌های تحقیقات بعدی در تکمیل سه‌بعدی‌سازی ترسیمی و در جهت تقریب آن به نمونه‌های ساخته شده واقعی است.

پی‌نوشت‌ها

۱. مصاحبه و طرح پرسش‌های مرتبط با حسین مفید، شاگرد استاد لرزاده صورت گرفته است.

۲. نمونه‌هایی از این تحقیق‌ها در بخش فهرست منابع ذکر شده است.
۳. از منابع مورد استفاده تحقیق حاضر شش تحقیق به لوحه تخت سلیمان، دو تحقیق به طومار توپکاپی و یک تحقیق به طومار تاشکند پرداخته‌اند. تفصیل بررسی این مقالات در پایان‌نامه آمده است.
۴. دو تحقیق مقرنس زنده را مطرح کرده‌اند.
۵. در همهٔ تحقیق‌ها مرجع مکتوب کتاب *مفتاح‌الحساب* است، برخی تحقیق‌ها مقرنس‌های زنده را نیز در کنار آن لحاظ کرده‌اند.
۶. توضیح چگونگی آلت‌های مقرنس از نظر لرزاده در این منبع آمده است: رئیس‌زاده و مفید، ۱۳۷۴، ۸۶.
۷. بجز مسئلهٔ تعداد و سادگی نقشه‌ها، دلیل این نقصان نبود دسته‌بندی کارآمد است.
۸. انتخاب‌های سه‌بعدی‌سازی ارتفاع قطار، نوع خط واصل، نسبت بخش عمود خط واصل به ارتفاع قطار و اندازه امتداد موش‌پا است.
۹. نه تحقیق انتخاب‌ها را بر اساس *مفتاح‌الحساب* سامان داده‌اند. توضیح مبسوط در پایان‌نامه آمده است.
۱۰. یک تحقیق انتخاب‌ها را به شیوه خلاقانه سامان داده است.
۱۱. نه تحقیق مقرنس را در زمینه قرار نداده‌اند و یک تحقیق مقرنس را در زمینه قرار داده است، اما تطبیقی میان زمینه و مقرنس دیده نمی‌شود. توضیح مبسوط در پایان‌نامه آمده است.
۱۲. نقشهٔ ترسیمی در لوحهٔ تخت سلیمان نمونه‌ای از ساختارهای سه‌بعدی است که به دلیل داشتن آلت‌های خارج، مقرنس نیست. ابهام در تعریف مقرنس در تحقیق‌های دیگر نیز مشهود است. برخی از نقشه‌های طومار تاشکند که مطرح شده‌اند یزدی‌بندی هستند، اما محققان تفاوتی میان آنها و دیگر ترسیم‌ها نمی‌بینند. مبسوط نقد این تحقیق‌ها در پایان‌نامه آمده است.
۱۳. این قاعده در مورد گره و نقوش هندسی نیز صادق است. نقوشی که آلت‌های خارج از آلات گره داشته باشند، گرچه مانند گره گسترش‌پذیر، هندسی یا تکرارشونده باشند، اما گره خوانده نمی‌شوند.
۱۴. تفصیل چگونگی هر یک از تحقیق‌ها در مرور پیشینه مفصل پایان‌نامه آمده است.
۱۵. مثلاً اینکه آلتی به شکل مربع در نقشه دوبعدی هم به صورت تخت و هم به صورت طاس فهمیده می‌شود.
۱۶. منظور از لب قطار در کردن تشخیص لبه قطارها در نقشه دوبعدی مقرنس است.
۱۷. همهٔ تحقیق‌ها با توجه به گفتهٔ کاشانی در باب آلت‌ها اصلاح هندسی را انجام داده‌اند و توضیح مفصل آن در پایان‌نامه آمده است.
۱۸. برخی محققان اشاره کرده‌اند که برخی از نقشه‌ها در حد یادداشت هستند و جزئیات آنها کار نشده است، در حالی که نبود جزئیات می‌تواند قرینه‌ای برای زیرنقش بودن لوحه قلمداد شود. نقشه‌های طومار توپقاپی نیز اکثراً دارای آلت‌های غیرهندسی هستند که در ترسیم دوباره اصلاح هندسی شده‌اند. لازم به ذکر است که با توجه به شرایطی که لرزاده در تعریف مقرنس ذکر می‌کند، نقشهٔ لوحهٔ تخت سلیمان مقرنس نیست.
۱۹. این تغییرات می‌تواند هم در حین طرح و هم در حین اجرای کار صورت گیرد.
۲۰. به این عمل «دستگردان کردن» می‌گویند.
۲۱. کاشانی بخش عمود ترک‌ها را نصف ارتفاع قطار فرض و نوع خط واصل را مقوس ترسیم کرده است.
۲۲. پس از تعیین ارتفاع قطار و تعیین نسبت بخش عمود به ارتفاع قطار، مرحلهٔ ارتفاع دادن قطارها را می‌توان به کمک الگوریتمی پیش برد. نکتهٔ مهم این است که نتیجهٔ کار هر الگوریتم نیازمند بازبینی و احیاناً اصلاحات دستی است، مثلاً اگر اندازهٔ ترک‌ها گسترهٔ وسیعی داشته باشد، باید بررسی شود که الگوریتم قوس‌های ترک‌ها را هماهنگ کار کرده باشد.
۲۳. مثلاً نقش روی لوحهٔ تخت سلیمان زیرنقش است و ناتمام و امکان استنباط‌های مختلفی از آن وجود دارد و الگوریتم نیازمند دخالت دستی است. البته پیشتر اشاره شد که طرح لوحهٔ تخت سلیمان مقرنس نیست.
۲۴. در دسته‌بندی کامل مقرنس‌های لرزاده بر اساس زمینه، همه نقشه‌ها را می‌توان در شش دسته مناره، سرستون، نیمکار، چشمه، قاب‌سازی و گیلویی طبقه‌بندی کرد (رئیس‌زاده و مفید، ۱۳۷۴، ۸۴-۹۶).
۲۵. هدف اکثر تحقیق‌ها رمزگشایی یک نقشه است.
۲۶. مثلاً یک چشمهٔ سه قطاره با یک مقرنس مرکب سر به هم هجده قطاره.
۲۷. هدف یغانی از دسته‌بندی نشان دادن این است که مقرنس‌های یک دورهٔ خاص، از الگویی خاص در قطار اول پیروی می‌کرده‌اند و بنابراین برای سه‌بعدی‌سازی نقش روی لوحهٔ تخت سلیمان باید آن الگو را در نظر داشت.
۲۸. توضیح مفصل‌تر روش آزمون و خطای ارتفاع‌ها در سه‌بعدی‌سازی شش نمونه از مقرنس‌های لرزاده به قلم نویسنده آمده است.

۲۹. مثلاً نجیب اوغلو (۱۳۸۴) نیمکاری را مطرح می‌کند و در پایان سه‌بعدی آن را از همه زوایا، بجز روبه‌رو نشان می‌دهد، چراکه تطبیق ندادن قوس و مقرنس باعث بیرون زدن مقرنس از زمینه شده و جلوه ناخوشایندی به آن داده است. در حالی که مؤلف آن را از پشت نمایش می‌دهد و اشاره می‌کند چنین نمایی برای درک مقرنس بهتر است.

۳۰. مثلاًنجیب اوغلو (۱۳۸۴) نقشه طومار توپقاپی را هندسی می‌کند، در حالی که نقشه به‌طور واضحی دستگردان شده است.

فهرست منابع

- الاسد، محمد (۱۳۸۴). «مقرنس تحلیل هندسی» در: نجیب اوغلو، گلرو (۱۳۸۴). *هندسه و تزئین در معماری اسلامی (طومار توپقاپی)* (مترجم: مهرداد قیومی). تهران: روزنه.
- لرزاده، حسین (۱۳۵۸). *احیای هنرهای از یاد رفته*. تهران: ناشر مؤلف.
- لرزاده، حسین (۱۳۷۴). *احیای هنرهای از یاد رفته*، تدوین مهناز رئیس‌زاده و حسین مفید. تهران: مولی.
- لرزاده، حسین (۱۳۶۰). *احیای هنرهای از یاد رفته*، فنون مقرنس. تهران: ناشر مؤلف.
- نجیب اوغلو، گلرو (۱۳۸۴). *هندسه و تزئین در معماری اسلامی (طومار توپقاپی)* (مترجم: مهرداد قیومی). تهران: روزنه.
- یغانی، محمدعلی جلال (۱۳۸۱). رمزگشایی نقشهٔ الگوی دوبعدی یافت شده در تخت سلیمان به اشکال سه‌بعدی مقرنس، (مترجم: باقر آیت‌الله زاده شیرازی). *نشریهٔ اثر*، ۳۳، ۳۳-۵۳.

- Dold-Samplonius, Y., & Harmsen, S. L. (2005). The Muqarnas Plate Found At TAKHT-I SULAYMAN: A New Interpretation. *Muqarnas,* 22, 85-94.
- Hamekasi, N., Samavati, F. F., & Nasri, A. (2011). Interactive Modeling of Muqarnas", CAe '11 Proceedings of the International Symposium on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization, and Imaging, 129-136.
- Reinel, G., & Hogendijk, J. (2006). *Algorithmic Computer Reconstructions of Stalactite Vaults – Muqarnas – in Islamic Architecture.* Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg.
- Schuldes, S. (2005). *Muqarnas in Blender: Modelling and Rendering.* Interdisciplinary Centre for Scientific Computing, University of Heidelberg.
- Seifi, A. (n.d.). Making of Natanz Minaret. retrieved from www.cgarene.com.
- Shiro, T. (n.d.). *Muqarnas: A Three-Dimensional Decoration of Islamic Architecture,* in: http://www.tamabi.ac.jp/idd/shiro/muqarnas.