چکیده

انتقال حرارت هدایتی دائم به منظور خنک‌کاری یک دیسک بر اساس تئوری ساختاری، با استفاده از رگه‌های با ضریب هدایتی بالا با توزیع ناقص در دیسک، مورد بررسی قرار گرفت. در این‌جا دو نوع آرایش شعاعی و درختی رگه‌ها در سطح دیسک مورد مطالعه قرار گرفت؛ به این صورت که مقاومت حرارتی به صورت تحلیلی برای این حالات بدست آمده و عملیات بهینه‌سازی روی آن انجام گردید. این عملیات برای ساختار درختی از دو مسیر جداگانه با دوپارامتر مختلف دنبال شد. گفتنی است حل تحلیلی ارائه شده، یک حل کلّی بوده که برای حالت خاص که بصورت رگه‌های کامل است نیز صادق می‌باشد. در این حالت تحت شرایط خاص، مقاومت حرارتی بهینه دیسک در حالت رگه‌های ناقص عملکرد بهتری نسبت به رگه‌های کامل داشت. در این پروژه همچنین از شبکه‌هائی با ضخامت‌های متغیردر ساختارهای شعاعی و درختی استفاده شد؛ ضخامت آنها با استفاده از روش آنالیز تغییرات به صورتی به دست آمد تا بالاترین دمای موجود در دیسک کمینه گردد. در ادامه مقاومت حرارتی برای هر دو ساختار با ضخامت‌های متغیر به صورت تحلیلی بدست آمده و نسبت به پارامترهای موجود بهینه گشت. نتیجه به این ترتیب بدست آمد که با استفاده از رگه‌های متغیر، مقاومت حرارتی برای تمامی شرایط کاهش یافته اما با افزایش پیچیدگی در سیستم جریان که عبارتست از متغیر در نظر گرفتن رگه‌های اصلی و فرعی، میزان کاهش در مقاومت حرارتی بهینه نسبت به حالت شعاعی کم‌تر بدست آمد که غیر مؤثر بودن افزایش پیچیدگی در سیستم جریانی مذکور را نشان می‌دهد. در ادامه تأثیر وابستگی به دمای ضرایب هدایتی بر کاهش مقاومت حرارتی دیسک با رگه‌های ناقص در ساختارهای شعاعی و درختی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. از آن‌جا که محدوده دمائی در شرایط مسئله محدود می‌باشد، تابعیت دمائی ضرائب هدایتی به صورت خطی در نظر گرفته شد. در این شرایط رگه‌ها را به صورت ضخامت ثابت و متغیر در نظر گرفته و تأثیر آن با تأثیر وابستگی دمایی ضرائب هدایتی ادغام گردید. در نهایت از آن‌جا که در طی حل تحلیلی از یکسری تقریبات استفاده شد و همچنین حل تحلیلی ارائه شده بر مبنای تئوری ساختاری می‌باشد، بیشینه دمای قطاع دایروی بر مبنای پارامترهای هندسی به صورت عددی نیز بهینه گشته و نتایج حاصل از آن با حل تحلیلی مقایسه شد. نتیجه این مقایسه نشان‌دهنده رفتار مشابه و سازگاری قابل قبول بین نتایج عددی و تحلیلی بود. از نتیجه آخر این‌گونه می‌توان استنباط نمود که استفاده از تئوری ساختاری به منظور بهینه-سازی مقاومت حرارتی بسیار سودمند بوده و نتایج حاصل از آن به مقادیر بهینه بسیار نزدیک است که خود عاملی است که می‌توان از این تئوری برای بهینه نمودن ساختارهائی با چند مرحله انشعاب استفاده نمود تا ساختارهای جریانی مشابه آنچه که در طبیعت موجود است ایجاد گردد.

کلمات کلیدی: تئوری ساختاری، رگه‌های با ضریب هدایتی بالا، ساختارهای درختی، خنک‌کاری

فصل اوّل

مقدمه

مقدمه

در دهه گذشته با آغاز یک اصل فیزیکی جدید، تغییرات قابل توجهی در زمینه علم ترمودینامیک انجام گرفته است؛ این اصل عبارتست از تئوری ساختاری[1] که برای اوّلین بار در سال 1996 پایه‌ریزی شد:

"به منظور این‌که یک سیستم جریانی محدود در طول زمان ادامه پیدا کند، ساختار آن نیز باید در طول زمان در جهت دسترسی آسان‌تر تکامل یابد."

آینده درخشان بشر از این حقیقت نشأت می‌گیرد که طبیعت دارای شکل، ساختار، پیکربندی، الگو، ریتم و تشابه است؛ از این بستر، دانش متولد شده و با سرعت به رشد خود ادامه داده و مسئول رفاه جسم و روح نوع بشر می‌باشد. تئوری ساختاری یک دیدگاه ذهنی است که در آن تولید ساختارهای جریان که در طبیعت دیده می‌شود از قبیل بستر رودخانه‌ها، شش موجودات زنده، گردش هوای اتمسفر و غیره، می‌تواند بر مبنای اصول تکاملی باشد که در طی آن دستیابی به این نوع جریان‌ها آسان‌تر می‌گردد؛ این اصول را قانون ساختاری می‌نامند. این تئوری پژوهشگران زیادی را در سراسر جهان گرد هم جمع کرده است تا در یک مسیر جدید گام بردارد؛ که عبارتست از استفاده از قانون ساختاری برای کارهای مهندسی بهتر و همین‌طور حرکت‌هائی با سازماندهی بیشتر. این مسیر را طراحی ساختاری گفته که به واسطه آن نه‌تنها هدف، یافتن ساختارهای بهتر بوده بلکه راهبردهای(استراتژی) بهتر نیز یکی از اهداف می‌باشد که امروزه در حال به فراموشی سپردن است. راهبردهائی که سریع‌تر، با هزینه کم‌تر، با مسیر مستقیم‌تر و مطمئن‌تر ما را در این مسیر یاری نماید[1].

[1] Constructal theory

آدرین بژان[1] بنیان‌گذار تئوری ساختاری است. او پیشگام بسیاری از روش‌های عددی در علوم حرارتی می‌باشد که می‌توان به نمونه‌هائی از قبیل کمینه‌سازی تولید انتروپی[2]، مقیاس طولی جابجایی[3]، خطوط جرمی و حرارتی[4]، طراحی محیط متخلخل[5] و قانون ساختاری طراحی در طبیعت، اشاره نمود. او در کتاب‌هایش [1-3] بیان کرده که نظریه ساختاری زمانی به ذهنش خطور کرد که در حال حل مسئله کمینه نمودن مقاومت حرارتی بین یک حجم در حال تولید حرارت و یک نقطه، از طریق استفاده از مواد با ضریب هدایتی بالا بود [3, 4]. برای حل بهینه این مسئله او یک " شبکه درختی" یافت و این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که هر ساختار درختی طبیعی نیز نتیجه بهینه نمودن عملکرد جریان حجمی– نقطه‌ای می‌باشد. او گمان کرد که بهینه نمودن ساختار باید یک اصل جدید باشد و آن را قانون ساختاری نامید. پس از آن طراحی با استفاده از تئوری ساختاری به صورت گسترده‌ای در مهندسی و برای بهینه نمودن سیستم‌های جریان، به کار گرفته شد [1، 2، 5].

هم‌اکنون تئوری ساختاری با سرعت زیاد از جنبه‌های مختلف در حال پیشرفت می‌باشد. بدنه این کار دارای دو وجه اساسی است: یکی استفاده از قانون ساختاری برای پیش‌بینی و توجیه ساختارهای موجود در جریان‌های طبیعی بی‌جان[6] و جاندار[7] [6-8] و دیگر کاربرد تئوری ساختاری به عنوان یک اصل فیزیکی در کارهای مهندسی می‌باشد؛ به این ترتیب که باید در نظر داشت که طبیعت پاسخ بسیاری از مسائل موجود را در خود دارد.

در این‌جا باید اذعان داشت که حتّی سیستم‌های طبیعی نیز کامل مطلق نیستند. بنابراین در آینده نیز مطمئناً خبری از طراحی‌های مطلق و ایده‌آل نخواهد بود؛ بلکه آینده متعلق به طراحی‌های ناقصی[8] است که در آن میزان نقص به حداقل خود رسیده باشد[1]. این جهت‌گیری اصلی برای تکامل طراحی‌ها در شاخه‌های مختلف از قبیل تکنولوژی، زیست-شناسی، زمین‌شناسی و حتّی سازمان‌دهی اجتماعی در سال‌های گذشته بوده است [6، 9-13].

اصول بنیادی، الگوهای موجود در طبیعت را شکل داده و طراحی‌های مهندسی را به درستی هدایت می‌کند. امروزه تازه‌ترین بحث در علوم طبیعی، الهام گرفتن از طراحی‌های موجود در طبیعت می‌باشد. این امر پدیده‌هائی از قبیل خودسازماندهی شدن[9]، خود بهینه‌شدن[10]، قوانین طراحی جان‌دار و همین‌طور طیف وسیعی از روابط مقیاسی[11] در شاخه-های مختلف ژئوفیزیک، بیوفیزیک، پویش شناسی اجتماعی[12] و تکامل تکنولوژی را شامل می‌شود. طراحی‌های موجود در طبیعت همواره تصاویر بسیار محرکی را برای بررسی‌های علمی ایجاد کرده است.

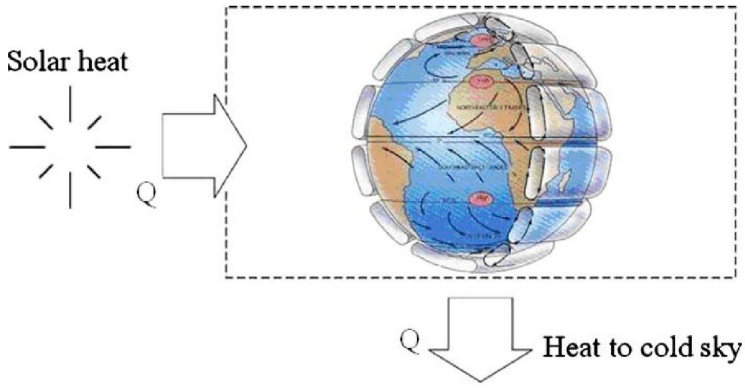
---

[1] Adrian Bejan
[2] Entropy generation minimization
[3] Scale analysis of convection
[4] Heat lines and mass lines
[5] Designed porous media
[6] Inanimate
[7] Animate
[8] Imperfect design
[9] Self-organization
[10] Self-optimization
[11] Scaling relations
[12] Social dynamics

تصاویر همان چیزی است که باعث زایش علوم طبیعی گشته و در یونان باستان به آن "هندسه[1]" اطلاق می‌شد. میکل آنژ[2] این موضوع را به این ترتیب بیان کرده است: " طراحی ... عبارتست از منبع، بدنه نقاشی، پیکرتراشی و معماری ... و همین‌طور ریشه تمامی علوم"

طراحی‌های موجود در طبیعت بسیار جذاب، مفید و بعضاً دارای ابهام می‌باشد. منظور از طراحی در این‌جا همان ساختار، تصاویر، الگوها و همین‌طور نقش و نگارهائی است که در اطرافمان دیده و یا شنیده می‌شود. این معنی اصلی کلمه بوده که کلّی بوده و مورد تأیید عموم می‌باشد. تمامی طبیعت از رودخانه‌ها گرفته تا ریه موجودات زنده، همگی در چارچوب الگوها و ریتم‌های خاصی در حال جریانند. علوم طبیعی تلاشی است برای یافتن اصولی که در پدیده‌های طبیعی وجود دارد.

در این‌جا با یک نگرش کلّی ، کره زمین را در نظر می‌گیریم؛ همان‌طور که در شکل 1-1 نشان داده شده است، آسان-ترین مدل برای آن، نمایش یک توپ با دمای یکسان در سراسر سطحش می‌باشد. ما قادر خواهیم بود ابعاد مهم طراحی را در طبیعت با این مدل بسیار ساده نیز پیش‌بینی کنیم.



شکل 1-1 مقدار حرارت خورشیدی (Q) که به سطح زمین برخورد کرده و در نهایت به چاه حرارتی در جهان سرد منتقل می‌گردد. دمای زمین بین دمای خورشید و دمای آسمان به صورت پایدار در نظر گرفته شده است.

خورشید حرارتی را که در خود تولید می‌کند در تمامی جهات به صورت شعاعی می‌تاباند؛ بخشی از آن قطع شده و از آن‌جا که زمین یک جسم کدر است توسط آن جذب می‌گردد. چون دمای خورشید از دمای زمین بیشتر است، این حرارت همیشه از سمت خورشید به زمین می‌باشد. این جهت جریان لازمه قانون دوم ترمودینامیک است.

سپس بدلیل بالاتر بودن دمای زمین از آسمان، یک جهت انتقال انرژی نیز باید از زمین به سمت آسمان وجود داشته باشد. به این دلیل که در مدل مذکور زمین یک سیستم بسته در حالت پایدار در نظر گرفته شده است، در زمین هیچ‌گونه ذخیره و یا تلفات حرارت صورت نمی‌گیرد. و این به معنی برابر بودن میزان حرارت انتقالی از خورشید به زمین با حرارت انتقالی

[1] Geometry
[2] Michelangelo

از زمین به آسمان می‌باشد و از این برابری می‌توان به این نتیجه رسید که دمای زمین باید برابر مقدار پایدار و مشخصی بین دمای خورشید و آسمان باشد. در این فرایند، زمین یک نقطه میانی در بین مسیر خورشید به آسمان است.

از توضیحات بالا می‌توان نتیجه گرفت که دمای زمین حالت پایدار داشته و قابل پیش‌بینی است؛ به این معنی که دمای زمین خارج از کنترل نبوده و در تمام طول انتقال حرارت از خورشید به زمین حالت مشخصی دارد. نتیجه دیگر این‌که زمین دارای یک ویژگی بوده و آن " اوضاع جوی" می‌باشد که در صورت درست بودن مدل ساده پیشنهادی، این ویژگی نیز قابل پیش‌بینی است.

از آن‌جا که زمین یک توپ انعطاف پذیر است [14]، موارد زیادی را در زمینه اوضاع جوی مانند محدوده‌های دمائی[1]، بادها و تغییرات روز و شب را می‌توان پیش‌بینی نمود. بر طبق تئوری ساختاری، تمامی این موارد زنده هستند؛ به این معنا که در حال تولید ساختارهای جدید بوده و پیکربندی خود را در طول زمان تکامل می‌بخشند.

1-1 قانون ساختاری و ترمودینامیک

از طریق مشاهده دقیق طبیعت و بدن موجودات زنده، می‌توان به یک اصل دست یافت که اگر یک سیستم جریان، آزادی کافی برای تغییر ساختارش داشته باشد، این سیستم ساختارهائی ارائه می‌کند که مسیرهای دسترسی بهتر و پیشرفته‌تری برای جریان فراهم نماید. این اصل همان قانون ساختاری است که پایه تئوری ساختاری در تولید سیستم‌های جریان است؛ به این ترتیب که در نهایت ساختارهای بدست آمده بر اساس این تئوری، مشابه ساختارهای موجود در طبیعت خواهد شد (شکل 1-2). امروزه همه این تلاش‌ها، یک پیشرفت جدیدی در ترمودینامیک را ارائه می‌کند که آن ترمودینامیک سیستم‌های غیرتعادلی[2] همراه با پیکربندی می‌باشد [15-17].

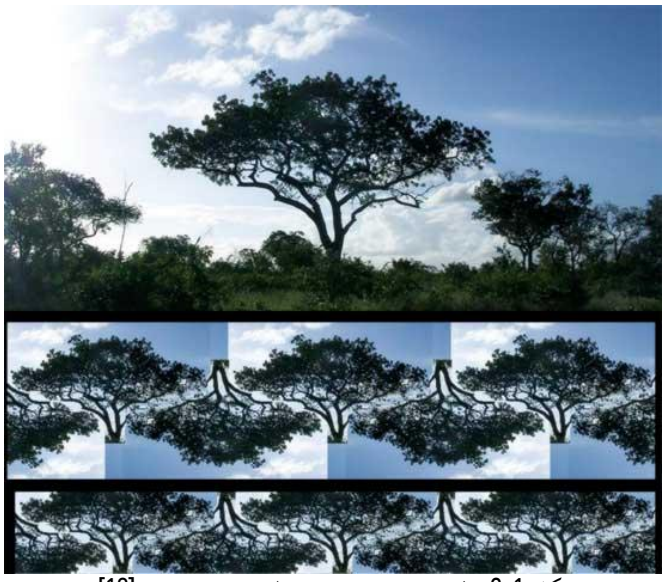
برای اینکه اثبات شود چرا قانون ساختاری یک قانون ترمودینامیکی (فیزیکی) است، این سؤال مطرح می‌گردد که چرا قانون ساختاری با قوانین دیگر ترمودینامیک متفاوت بوده و یا مکمل آن‌هاست. یک سیستم ترمودینامیکی ایزوله را درنظر بگیرید که در ابتدا در حالت غیر یکنواخت درونی است؛ بطور مثال مناطقی با فشار یا دمای بالاتر و پایین‌ترکه قسمت‌های مجزاشده توسط دیواره‌های داخلی بطور ناگهانی شکسته شوند. قانون اوّل و دوم ترمودینامیک برای مشاهدات انجام شده در طول زمان، دلیل موجه می‌آورند: اگر زمان کافی بگذرد، سیستم ایزوله به حالت تعادلی می‌رسد. قانون اوّل و دوم از یک جعبه سیاه و تاریک صحبت می‌کنند. آنها درباره‌ی ساختار چیزهایی که جاری می‌شوند، صحبتی به میان نمی‌آورند. اگرچه همان‌طور که در جدول 1-1 نشان داده شده است، تشابهاتی بین مفاهیم موجود در ترمودینامیک و تئوری ساختاری وجود دارد.

ترمودینامیک کلاسیک به ساختارهای سیستم‌های جریان غیرتعادلی مربوط نمی‌شود. آخرین یادداشت‌های کارنو درباره بهبود ساختارهای ماشین در طول زمان می‌باشد. در این کشف کسانی که بهینه سازی کارایی ترمودینامیکی در حوزه‌های مجزا (مهندسی، زیست شناسی، ژئوفیزیک و اقتصاد) را دنبال می‌کردند، سهیم شدند. تولید ساختار جریان یک پدیده طبیعی است و به ترمودینامیک تعلق دارد.

---

[1] Temperature zones

[2] Thermodynamics of nonequilibrium systems



شکل 1-2 تولید ساختار جریان در طبیعت و مهندسی [18].

جدول 1-1 تشابهات بین ترمودینامیک و تئوری ساختاری [19]

تئوری ساختاری	ترمودینامیک
معماری جریان (هندسه، ساختار)	حالت
تغییر ساختار	پروسه
اهداف و قیود کلّی	ویژگی‌ها
ساختار جریان تعادلی	حالت تعادل
روابط بنیادی	روابط بنیادی
ساختارهای غیر تعادلی	حالات تعادلی اجباری[1]
افزایش آزادی ساختار[2]	برداشتن قیود
اصل بیشینه نمودن دسترسی جریان	اصل کمینه نمودن مصرف انرژی

قانون دوم بیان می‌دارد که تعادل برای یک سیستم آدیاباتیک، در زمان به اندازه کافی طولانی ایجاد می‌گردد؛ زمانی که تمامی قیود ورودی از بین رفته باشند. در حالی‌که از دیدگاه قانون ساختاری، مفهوم تعادل برای یک ساختار جریان زمانی خواهد بود که تمامی احتمالات افزایش درجه آزادی از بین رفته باشد [2، 15، 17].

طبیعت و مهندسی می‌توانند به دو روش تجربی و تئوری با یکدیگر در نظر گرفته شوند. از دیدگاه تجربی، در ابتدا مشاهده و الگوگیری از طبیعت انجام گرفته و از آن به عنوان مبنا برای مدلسازی، توصیف و مهندسی بکار گرفته می‌شود. در تئوری ساختاری فرایند فکری برخلاف دیدگاه تجربی است. ابتدا از قانون ساختاری استفاده شده و از این اندیشه،

[1] Constrained equilibrium states
[2] Increased freedom to morph

ساختار جریان نتیجه می‌شود. در پایان ساختار تئوری با طبیعت مقایسه گشته و مطابقت این دو، قانون ساختاری را معتبر می‌سازد. در ادامه برخی پدیده‌های طبیعی از منظر تئوری ساختاری بررسی می‌شوند.

کشف درختان به عنوان ساختار جریان به منظور دسترسی بیشینه بین یک نقطه و بی نهایت نقطه در حالت کلّی به ساختارهای درختی مواد با قابلیت رسانش بالا، محدود نمی شود. عمومیت کشف ساختارهای درختی از طریق جدول 1-2 بیان شده است، که نشان می دهد"چطور" ترکیب می شوند و"چه" جریانی از آن‌ها عبور می‌کند. شرایطی که در آن ساختار درختی تولید می شود (از طریق یک تعادل بین مقاومت بالا و مقاومت کم) با صرف نظر از تنوع جریان‌های موجود در آن، در بسیاری از موارد مشابه یکدیگرند. دیدن اصلی که ساختارهای جریان را کنار هم قرار می‌دهد سخت‌تر از دیدن تنوع سیستم‌های جریان در طبیعت و مهندسی است.

جدول 1-2 چگونگی تعادل جریان مقاومت- بالا با جریان مقاومت- پایین در دامنه وسیعی از سیستم‌های جریان [19]

کاربرد	نوع جریان	کانال‌های درختی	فضای غالب شبکه
بسته‌های الکترونیکی	حرارت	رگه‌های مواد با هدایت بالا	مواد با هدایت پائین
ترافیک شهری	انسان‌ها	خیابان‌هائی با بار ترافیکی بیشتر	خیابان‌های شلوغ در ساختارهای شهری
بستر رودخانه	آب	رودخانه‌های با مقاومت جریان کمتر	جریان سیال در مواد ومتخلخل
شش	هوا	مسیرهای جریان هوا با مقاومت کمتر	پخش جریان در بافت‌های دارای منافذ ریز
سیستم گردش در بدن	خون	رگ‌های خونی با مقاومت جریام کمتر	پخش جریان خون در مویرگ

1-2 ساختارهای جریان در اجسام بیجان

برخی از ساختارهای جریان بیجان که در عمل با آن سروکار داشته‌ایم، شامل شکل‌های سطح مقطع کانال‌ها، شکل‌های سطح مقطع رودخانه ، فواصل داخلی[1]، ساختارهای جریان مغشوش، ساختارهای درختی شکل، پدیده جابجایی بنارد[2] و جریان کلّی آب و هوا می‌باشد [6]. در این قسمت یکی از این ساختارهای جریان، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

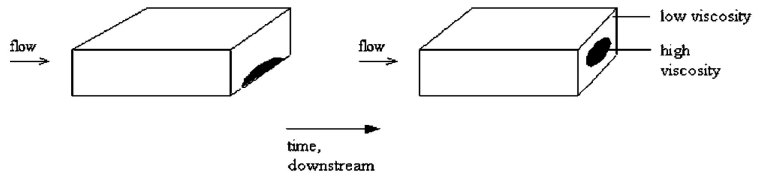
1-1-1 سطح مقطع‌های کانال

رگ‌ها و معابر جریان هوا در ریه دارای سطح مقطع‌های دایروی هستند. رودخانه‌های زیرزمینی، مسیرهای تخلیه آتشفشانی، راهروهای لانه کرم‌های خاکی و مورچه‌ها نیز سطح مقطع‌های دایروی دارند. این تعدد پدیده‌های تولید ساختارهای جریان برای یک کانال خاص و یا یک سیستم جریان بزرگتر که در آن تعدادی کانال در کنار هم قرار گرفته‌اند، با استفاده از تئوری ساختاری توجیه می‌گردد. اگر کانال دارای اندازه محدود (سطح مقطع ثابت A) و همچنین دارای آزادی تغییر شکل سطح مقطع آن باشد، شکل آن در طول زمان چنان تکامل می‌یابد که جریانی که از کانال عبور می‌کند دارای کمترین مقاومت جریان باشد. اگر یک سیستم بزرگتر ایزوله بوده و شامل کانال و دو منبع فشار در دو انتهای آن باشد آنگاه ساختار کانال چنان تکامل خواهد یافت که تمام سیستم با سریع‌ترین زمان به تعادل برسد.

[1] Internal spacing
[2] Bénard convection

سطح مقطع کانال در طول زمان بالاخره به شکل دایره تکامل می یابد. این تکامل در رگ‌ها و مسیرهای ریوی نمی‌تواند شاهدی داشته باشد زیرا مقیاس زمانی مشاهدات ما (دوره‌ی زندگی) در مقایسه با مقیاس زمانی تکامل سیستم زنده بسیار کوتاه است. تغییرات مسیرهای دایروی را می‌توان در مدت فرایند فرسایش در خاک در پی بارش ناگهانی باران مشاهده نمود. همچنین این تغییرات در تکامل گذرگاه گدازه‌های آتشفشانی در جایی که گدازه‌ها با لزجت پایین‌تر، دیواره‌ی گذرگاه را پوشانده و گدازه‌های با لزجت بالاتر، خودشان را در قسمت میانی سطح مقطع قرار می‌دهند، قابل رؤیت است[20، 21]. حالت عکس که در آن لزجت بالاتر روی محیط و لزجت پایین‌تر در مرکز قرار داشته باشد، با قانون ساختاری در تناقض است. همه‌ی پدیده‌های خودروانکار[1] نیز مطابق با قانون ساختاری هستند.

با شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی جریان گدازه‌ی با لزجت بالا، قانون ساختاری مورد تأیید قرار گرفت (شکل1-3). در ابتدا مواد وارد شده با لزجت بالا، دارای یک سطح مقطع تخت بوده که در نزدیکی دیواره مسیر عبوری قرار داده شده است. بالاخره با گذشت زمان یعنی در پایین‌دست جریان، مواد وارد شده نه تنها به سمت مرکز سطح مقطع حرکت می‌کنند بلکه یک سطح مقطع دایروی را نیز در خود ایجاد می‌کنند. این تمایل با آنچه بطور کلّی هنگام پاشش یک جت (آرام یا مغشوش) درون یک منبع سیال مشاهده می‌شود، سازگار است [22، 23]. اگر جت یک سطح مقطع تخت داشته باشد، کمی پایین‌تر از جریان یک یا چند جفت ضخیم‌تر با سطح مقطع دایروی بوجود خواهد آمد. عکس این رویه مشاهده نمی‌شود: به این صورت که جت با سطح مقطع دایروی به جت تخت تبدیل شود.



شکل 1-3 تکامل در ساختار سطح مقطع عرضی یک جریان که از دو سیال تشکیل شده باشد: یکی با لزجت کم و دیگری لزجت زیاد. با گذشت زمان سیال با لزجت کم جداره‌ها را پوشانده و سیال با لزجت زیاد به سمت مرکز حرکت می کند [6].

امتیاز شکل دایروی نسبت به بقیه‌ی شکل‌ها موضوع بحثی است که به آن سیستم‌های غیرتعادلی ترمودینامیکی اطلاق می‌گردد: ترمودینامیک سیستم‌های ساختاری [2، 15، 17]. بعنوان مثال اگر کانال مستقیم باشد و محیط سطح مقطع ثابت A آن برابر با P (متغیّر) باشد، آنگاه افت فشار (ΔP) بر واحد طول (ΔL) برابر است با $\Delta P/\Delta L = (2f/D_h)\rho V^2$. قطر هیدرولیکی برابر با $D_h = 4A/P$ بوده، V سرعت میانگین سیال (ثابت، $\dot{m}/\rho A$) و f ضریب اصطکاک می‌باشد. اگر رژیم سیال آرام و توسعه یافته باشد آنگاه $(f = Po/Re)$، که در آن $Re = D_h V/v$ و Po یک ضریب (که ثابت پوازی[2] نامیده می‌شود) بوده که تنها به شکل سطح مقطع، وابسته است. مقاومت جریان کانال به صورت زیر است.

1 Self-lubrication
2 Poiseuille constant

$$\frac{\Delta P/\Delta L}{\dot{m}} = \frac{\upsilon}{8A^2}\left(Po\frac{p^2}{A}\right) \quad (1\text{-}1)$$

عبارت داخل پرانتز فقط به شکل سطح مقطع بستگی دارد. این گروه جهت تغییرات را تعیین می‌کند. جدول 1-3 مقادیر عبارت $Po.p^2/A$ برای چندین سطح مقطع بصورت چندضلعی منتظم را نشان می‌دهد. هرچند شکل دایره‌ای بهترین شکل است، ولی اشکال نسبتاً گرد تقریبا بهمان خوبی عمل می‌کنند. تفاوت در $Po.p^2/A$ از شش وجهی به دایره فقط 3/7% است. امّا کانال‌های شش وجهی فایده بزرگی دارند که می‌توانند در کنار هم در داخل بسته‌ها قرار گیرند. کانال‌های مربعی نیز هم فایده‌ای برای بسته‌بندی داشته و هم مقاومت جریان آنها تنها 9/1% از کانال‌های شش وجهی بیشتر است. حتّی اگر سطح مقطع کانال‌ها دارای عیب باشند- که شامل خصوصیاتی نظیر گوشه‌های تیزکه باعث تمرکز اصطکاک سیال می‌گردد- کارایی‌اش تقریباً بدان اندازه که امکان دارد، خوب می‌باشد. تنوع (چندین شکل نسبتاً بهینه) مطابق با قانون ساختاری است و نه برخلاف آن. بعلاوه بهترین کارایی از بین تمام سطح مقطع‌های ممکن، زمانی به صورت دقیق محقق می‌گردد که قیدهای کلّی $\left(A، \dot{m}\right)$ مشخص شوند.

جدول 1-3 مقاومت های جریان آرام کانال هایی با سطح مقطع‌های عرضی n ضلعی منتظم [24]

n	$\mathbf{P_0}$	$p/A^{1/2}$	$p^2\mathbf{P_0}/A$
3	13.33	4.559	277.1
4	14.23	4	227.6
6	15.054	3.722	208.6
8	15.412	3.641	204.3
∞	16	$2\pi^{1/2}$	201.1

1-2 ساختارهای جریان در جانداران

پدیده تولید ساختار جریان در جای‌جای سیستم‌های موجودات زنده وجود دارد. ساختارهای جریان درختی از طراحی-های موجود در بدن موجودات زنده بدست آمده است. زیرا آن‌ها آسان‌ترین راه برای جریان بین بی‌نهایت نقطه (حجم، سطح) و یک نقطه هستند. شش‌ها، کلیه‌ها، بافت‌های آوندی و سیستم عصبی نمونه‌هائی از معماری درختی بوده که از نقطه نظر تئوری ساختاری مورد بررسی قرار گرفته است [2، 3، 25]. این بخش شامل مرور یکسری از پیشرفت‌های تئوری بوده که در آن قانون ساختاری و معماری‌های ساختاری منجر به پیش‌بینی‌های مستقیم و ساده حیرت‌آوری در طراحی موجودات زنده، در همه طبقات شده است. این رفتار بر مبنای دید وسیعی است که بیان می‌دارد، اصولی که در سیستم-های جریان در فیزیک و مهندسی بکارگرفته می‌شوند باید در سیستم‌های جریان بیولوژیکی نیز مورد استفاده قرار گیرند [26-29].

از این جهت علوم مهندسی علومی هستند که در ارتباط با دانش علمی در حال پیشرفت به منظور استفاده‌های سودمند می‌باشد؛ و این نکته‌ای کلّی بوده که گوناگونی نوین رشته‌های علمی این تأثیر را به دنبال آورده است که علوم طبیعی و مهندسی دو مقوله کاملاً جدا از هم بوده تا این حد که مهندسین تنها ایده‌هائی را که بوسیله دانشمندان تولید می‌گردند را

اجرا می‌کنند. این نظریه کاملاً اشتباه است؛ همان‌طوری که افرادی از قبیل کارنو[1]، گیبس[2] و پرنتل[3] این موضوع را در طی تاریخ اثبات کردند. این افراد همگی مهندس بوده‌اند (به بیان امروزی مهندس مکانیک) و تاکنون سهم اینان در علم فیزیک آن‌قدر چشم‌گیر بوده که در قرن‌های گذشته تصور بر این بوده که این افراد فیزیکدان بودند. در ادامه یکی از پیکربندی‌های مربوط به موجودات زنده، از نقطه‌نظر ساختاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مطالعه موارد دیگر به [6] مراجعه گردد.

1-2-1 اندازه اندام

دنبال‌کردن هندسه و ریتم جریان، اندازه بهینه یک مؤلفه جریان (یک عضو) در یک سیستم پیچیده‌تر را نتیجه می‌دهد [30، 31]. اگزرژی کلّی (غذا و سوخت) که یک موجود زنده یا وسیله برای حرکت در یک مسافت خاص L باید مصرف کند، از مرتبه MgL است، که در آن M جرم موجود زنده می‌باشد. برای اثبات این گفته به این ترتیب عمل می‌گردد که میزان تلفات اگزرژی در واحد مسافت برای پرواز یک جسم به جرم M از رابطه زیر بدست می‌آید [6].

$$\frac{W}{L} \sim \frac{MgH}{V(H/g)^{1/2}} + \rho_a V^2 L_b^2 \qquad (2\text{-}1)$$

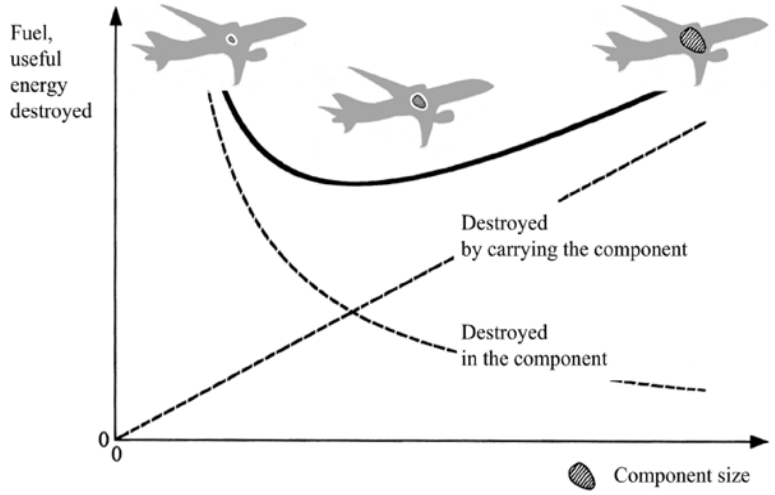
که جمله اول سمت راست معادله، مقدار مصرف انرژی لازم برای حرکت جسم در جهت عمودی به سمت بالا بوده و جمله دوم میزان انرژی لازم برای غلبه بر اصطکاک زمین در جهت افقی می‌باشد. که در آن H مسافت عمودی در مدت زمان حرکت است. ارتفاع اوج بدست آمده در مدت هر ضربه پرزدن H توسط مقیاس طولی بال اعمال می‌شود، که برابر با مقیاس طولی جسم در حال پرواز $H \sim L_b$ می‌باشد. با کمینه کردن W/L، میزان سرعت بهینه پرواز به صورت رابطه زیر خواهد شد.

$$V_{opt} \sim \left(\frac{\rho_b}{\rho_a}\right)^{1/3} g^{1/2} \rho_b^{-1/6} M^{1/6} \qquad (3\text{-}1)$$

حال اگر V_{opt} در رابطه 1-2 جایگذاری گردد، ادعای بالا ثابت می‌شود. یک مؤلفه جریان (ریه، قلب، مبدل حرارتی) در یک موجود زنده و یا هواپیمای در حال پرواز را در نظر بگیرید. اندازه این مؤلفه نامعلوم است؛ زیرا وقتی بزرگتر باشد اگزرژی کمتری تخریب می‌کند. بعنوان مثال،کانال‌ها با سطح مقطع عرضی بزرگتر به قدرت پمپاژ کمتری نیاز دارند (اگزرژی تلف شده توسط اصطکاک سیال)؛ همچنین مبدل حرارتی با سطح حرارت بزرگتر اگزرژی کمتری را تخریب می‌کند. اوّلین فکری که بنظر می رسد اینست که ابعاد بزرگتر، بهتر است. این عقیده بوسیله منحنی رو به پایین شکل1-4 مشخص شده است. این نتیجه در تعارض با تئوری ساختاری حرکتی[4] است (بخش $IIIC$ و $IIIE$ در[6]). به این ترتیب که وسایل و موجودات زنده باید مقداری از اگزرژی (سوخت یا غذا) متناسب با جرم اجزاء را مصرف نمایند. قیمت جابجائی اجزا متناسب با جرم آن‌ها می‌باشد. دومین ایده توسط خط صعودی در شکل1-4 ارائه شده است.

[1] Carnot
[2] Gibbs
[3] Prandtl
[4] Locomotion

آن‌چه که دارای اهمّیت است، مصرف سوخت و غذای کلّی بوده که با توجه به منحنی سوم نشان داده شده در شکل 4-1، در می‌یابیم که اجزاء جریان دارای یک اندازه بهینه می‌باشند. بهترین عضو، آن چیزی نیست که توسط ترمودینامیک اجزاء به تنهایی پیشنهاد می شود: که بی نهایت بزرگ باشد. بهترین شش برای پرنده آن نیست که مسیرهای هوایی بزرگی داشته باشد؛ بلکه باید فشرده و ظریف[1] باشد. البتّه این ابعاد نیز ایده‌آل مطلق نیست چون اصطکاک سیال باعث تخریب اگزرژی می‌گردد. شاید این‌گونه برداشت شود که "طبیعت اشتباه می کند" اما این‌گونه فکرکردن از دست دادن عمق فکر و راضی شدن به مفاهیم سطحی است. اجزاء ظاهراً ناکامل، سیستم جریان کلّی را به بهترین حالتی که می تواند باشد (کمترین عیب) در می آورند.



شکل4-1 تأثیرتغییرات اندازه یک مؤلفه جریان از یک سیستم بزرگ بر روی مصرف انرژی [18].

3-1 ساختارهای جریان مهندسی شده

همان‌طور که در بالا به آن اشاره شد، یک سیر تکاملی در ساختارهای جریان سیستم‌های بیجان و جان‌دار وجود دارد. این تکامل، یکپارچگی همه ساختارهای جریان را بیان نموده که به معنی عمومیت داشتن پدیده تولید ساختار جریان می‌باشد. در قسمت ساختارهای جان‌دار مشاهده گشت که جابجایی موجودات زنده، گروه دیگری از سیستم‌های جریان بوده که با سیستم های جریان بیجان سازگاری و همزیستی قابل قبولی دارد. ساختار و ریتم این سیستم‌ها در مسیرهای قابل پیش بینی تکامل می‌یابد. در این قسمت یکی از محتواهای عملی تئوری ساختاری در تولید هندسه و ریتم در طبیعت مورد بحث قرار می‌گیرد. برای مثال ما هم‌اکنون می‌دانیم که آسان‌ترین راه برای جریان بین یک نقطه (چشمه، چاه) و تعداد بیشماری نقاط (سطح، حجم) به صورت درختی است. البتّه نه هر نوع درختی، بلکه منظور یک درخت خاص با ابعاد، تعداد کانال‌ها، طرح اولیه و با پیچیدگی مشخص می‌باشد.

[1] Svelte

امروزه طراحی به عنوان یک الگوی علمی با افرادی از دانشگاه‌های مختلف در سراسر دنیا در حال رشد سریع می‌باشد. از منظر ساختاری هر چیزی که جریان یابد و جریانش مانند جریان در بستر رودخانه ادامه یابد، یک سیستم "زنده" می-باشد. این نظریه مطابق با سخن لئوناردوداویچی [1] بوده که " حرکت علّت هرگونه زندگی است".

قانون ساختاری به دنبال ساختارهائی با مقاومت‌های جریانی کم‌تر با زمان می‌باشد؛ که این با موازنه نمودن تمامی مقاومت‌های جریان ورودی بدست می‌آید. مقاومت‌هائی که جریان بر آن‌ها غلبه می‌کند را تلفات ترمودینامیکی و یا برگشت‌ناپذیری [2] گویند. از مقاومت‌ها نباید چشم‌پوشی کرد؛ سطح مقطع یک کانال با جریان سیال و یا سطح انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی را نباید نامحدود در نظر گرفت. تلفات ناشی از مقاومت‌های جریان را می‌توان با توزیع مقاومت‌ها در سراسر فضای مورد نظر به گونه‌ای طراحی کرد که تأثیر کلّی آن به مقدار حداقل برسد. این عمل توزیع، همان ساخت آرایش‌های مناسب برای بدست آوردن مقاومت جریانی کمینه می‌باشد. در بستر رودخانه، شکل بدست آمده کاملاً شبیه ریه می‌باشد. تماشا کردن تشکیل این ساختار درختی شبیه تماشا نمودن یک فیلم بوده که در آن قانون ساختاری همان جهت‌گیری است که در آن فیلم ادامه می‌یابد و ساختارهای جریانی موجود جای خود را به آن دسته ساختارهای جریانی می‌دهد که به طور کلّی آسان‌تر جریان می‌یابند.

1-3-1 ساختارهای درختی برای انتقال حرارت هدایتی

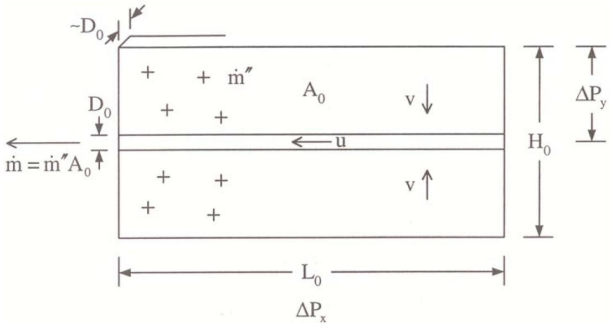
در خنک‌کاری تجهیزات الکتریکی در سال‌های اخیر تولید قطعات در جهت اندازه‌های کوچک‌تر و ظرافت‌های بیشتر پیش می‌رود. نکته‌ای وجود دارد که در این روندکوچک‌ترسازی، خنک‌کاری به روش جابجایی امری ناکارا خواهد بود، زیرا کانالهای سیال حجم زیادی می‌گیرند. در این شرایط، تنها راه انتقال گرما به بیرون قطعه، بوسیله انتقال حرارت هدایتی است. از این بحث، این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که برای خنک‌نمودن حجم های دارای تولید حرارت داخلی، بهتر است از فیبرها و رگه‌های با ضریب رسانش بالا به صورت ساختارهای درختی در سراسر قطعه استفاده شود.

هم اکنون ساختارهای درختی برای خنک‌کاری هدایتی، یک دانش در حال رشد است [16، 32-47]؛ که در فصل آینده،کارهای انجام‌شده در این زمینه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. اوّلین ساختارهای درختی برای این هدف، با استفاده از تئوری ساختاری به صورت شکل‌های 1-5 و 1-6 تولید شدند.

در سطح المانی شکل 1-5، مستطیل $H_0 \times L_0$ از ماده‌ای با ضریب رسانش پایین k_0 ساخته شده که گرما را در حجم و بصورت یکنواخت $q''' [w/m^3]$ تولید می کند. یک رگه با ضخامت ثابت D_0 و ضریب رسانش بالای k_p در امتداد محور بزرگتر مستطیل تعبیه شده است. چاه با دمای T_0 در انتهای چپ رگه قرار دارد. نقاط با بالاترین دمای T_{max} در گوشه‌های راست مستطیل ایجاد می‌گردند. جریان گرمایی کل برابر مقدار $q' = q''' H_0 L_0$ است. اندازه $H_0 L_0$ ثابت بوده، اما شکل H_0/L_0 ممکن است دستخوش تغییر گردد. مقاومت گرمایی المان $(T_{max} - T_0)/q'$ در شرایط زیر به مقدار کمینه خواهد رسید.

---

[1] Leonardo da Vinci
[2] Irreversibility

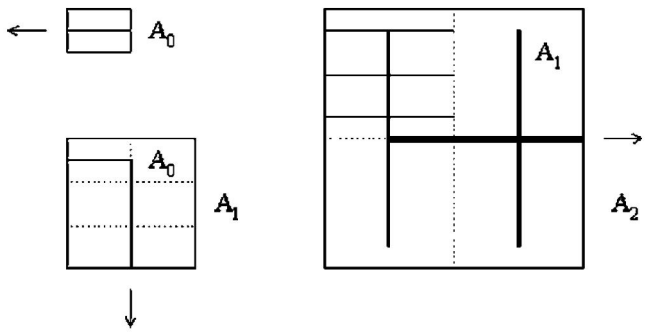


شکل 5-1 سطح المان مستطیلی $L_0 \times H_0$ از ماده‌ای با ضریب رسانش پایین k_0 با نرخ تولید یکنواخت حرارت داخلی $q''' [w/m^3]$ که یک رگه با ضخامت ثابت D_0 و ضریب رسانش بالای k_p در امتداد محور بزرگتر مستطیل قرار دارد [6].

$$H_0/L_0 = \left(k_0 H_0/k_p D_0\right)^{1/2} \qquad (4\text{-}1)$$

این رابطه یک خصوصیت هندسی برای ساختار مربوط به شکل 5-1 می‌باشد. همان‌طور که در شکل 6-1 نشان داده شده، تولید ساختار درختی در مقیاس‌های بزرگ با چیدن تعداد بهینه‌ای از ساختارهای کوچک‌تر در کنار هم حاصل می‌گردد.

با افزایش درجه آزادی در ساختار درختی می‌توان به کارائی بهتری از این ساختار دست یافت [15، 17، 34]. لدزما و همکارانش[1] [33] از دیدگاه کاملاً عددی استفاده نموده و در آن ساختارهای موجود در شکل 6-1 را با شبیه‌سازی‌های عددی در محدوده کامپوزیتی k_p و k_0، جایگزین نموده است؛ که در آن تمامی مشخصه‌های هندسی، اجازه آزادی دارند. در ابتدا، آنها فرض ثابت بودن ضخامت رگه با ضریب هدایت بالا را در نظر نگرفتند.



شکل6-1 مراحل ساختاری چیدمان و بهینه سازی آن با استفاده از المان سطحی بهینه A_0 تا جریانهای سطح به نقطه بزرگتر[6].

همان‌طور که در 6-1 نشان داده شده است، پروفیل بهینه ضخامت رگه با ضریب k_p طوری است که D_0 به صورت تابع $x^{1/2}$ افزایش می‌یابد، که x از گوشه المان اندازه‌گیری شده باشد. نسبت به طراحی با استفاده از معادله 4-1، کاهش در مقاومت گرمایی کلّی المان حجمی برابر 6% خواهد شد. کاهش بیشتر در مقاومت حرارتی کلّی ، نتیجه در نظر

[1] Ledezma et al.

نگرفتن المان به صورت مستطیلی است [32]. پایین‌ترین طرح در شکل 1-7 نشان می‌دهد همان‌طور که برای رگه با ضریب هدایت k_p شکل بهینه وجود دارد، یک المان برگی شکل بهینه نیز وجود خواهد داشت. افزایش درجه آزادی برای تغییر شکل ساختار، سطح کارایی بالاتری را به همراه داشته و ساختار جدید، به ساختارهای موجود در طبیعت نزدیک‌تر خواهد بود.

در شکل 1-7 حالتی را که انشعابات k_p بر تنه‌شان (قسمت اصلی) عمود هستند [34] نیز آورده نشده است. بطور مثال، در اولین ساختار با $\tilde{k} = k_p/k_0 = 50$ و $\phi_1 = V_{p1}/V = 0.1$، چنین برداشت می شود که زاویه بهینه طوری است که انحراف انشعاب از عمود $4°$ بوده و در این هندسه اصلاح شده، مقاومت کلّی به میزان 5/8% کمتر از قبل خواهد شد. انشعابات زاویه‌دار کارایی کلّی را افزایش داده باعث می‌گردند تا مانند قبل ساختار بدست آمده به ساختار طبیعی نزدیک‌تر گردد.

لدزما و همکارانش [33] المان‌های بزرگتر را از کنارهم گذاشتن المان‌های کوچک‌تر ساخته و در محدوده کامپوزیتی مانند شکل 1-8، تعداد و مکان‌های هر رگه با ضریب هدایتی بالا را بهینه نمودند. در این شکل، سه ضخامت تیغه $D_0 < D_1 < D_2$ با قابلیت رسانش k_p وجود دارد. افزایش درجه آزادی در فرمول‌بندی عددی، امکان حذف انشعابات نازک (D_0) که به تنه (D_2) متصل‌اند را ممکن می‌سازد.

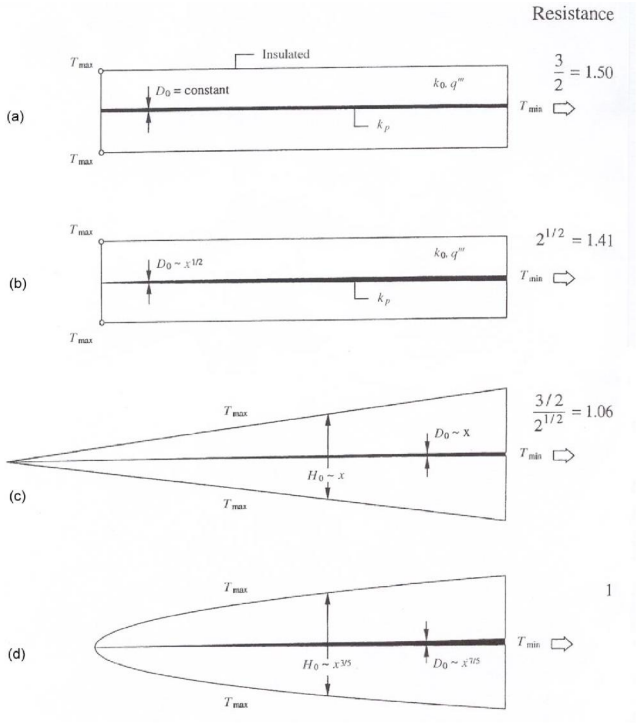
شکل 1-8 برای $\tilde{k} = k_p/k_0 = 300$ ، $\phi_2 = V_{p2}/V = 0.1$ ، $D_1/D_0 = 5$، $D_2/D_1 = 2$ و هشت تیغه D_0 که متصل به یک تیغه D_1 می‌باشند، رسم شده است. هدف این شکل نشان دادن اثر تعداد تیغه‌های D_1، n_2، برروی کارایی کلّی می‌باشد. از(الف) به (ج)، مقاومت حرارتی کلّی بی بعد، $\Delta T_2 k_0/q''' A_2$ برابرمقادیر 0/0379 ، 0/0354 و 0/0374 بوده، که در آن A_2 مساحت کلّی المان مستطیلی بوده و ΔT_2 برابر اختلاف دمای بین قسمت داغ (گوشه چپ) و چاه گرمایی(نقطه میانی قسمت راست) است. طراحی‌های مختلف در شکل 1-8، نشان می‌دهد که مورد (ب) که در آن تعداد رگه‌های با ضخامت D_1 برابر $n_2 = 4$ باشد، در میان سه مورد نشان داده شده بهترین طراحی است.

شکل1-8 همچنین نشان می‌دهد که کارایی طرح‌های(الف) و(ج) خیلی با طراحی(ب) متفاوت نیست. این بدان معنی است که ساختارهای جریان درختی اگر بطور جزئی و یا کلّی بهینه شوند، تغییر شدیدی در آن‌ها اتفاق نیفتاده و یا اصطلاحاً "محکم[1]" هستند. با استفاده از نتایج جدول [2]، می‌توان نشان داد که در طی مراحل ساخت تحلیلی، یک ساختار با مقاومت کلّی $(\Delta T_2 k_0/q''' A_2)$ را می‌توان ساخت که مقدار آن هم‌مرتبه بزرگی مقاومت در شکل 1-8 بوده ولی اندازه‌اش بزرگتر خواهد بود. در شکل‌هائی مانند 1-6 و 1-8 ساختارهای درختی که دسترسی جریان را بیشینه می کنند، نشان داده شد. هر جزء از هندسه درختی، نتیجه اعمال قانون ساختاری است.

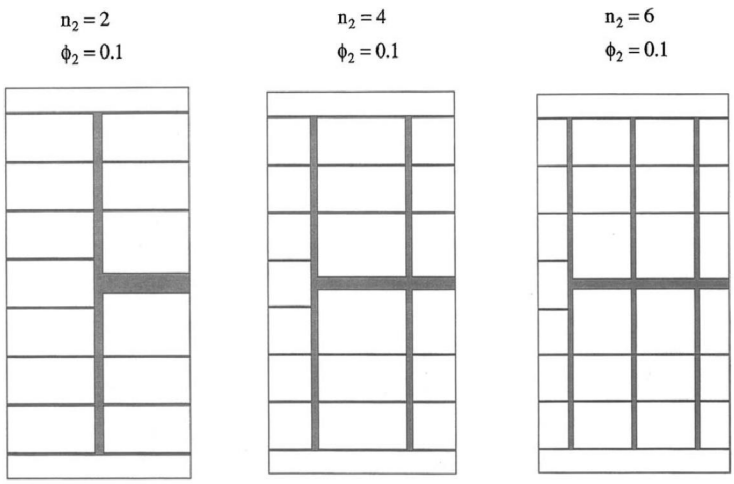
شکل 1-9 ورقه‌های مستطیلی را نشان می‌دهد که به منظور خنک‌کاری،کانال‌های جریان درختی در آن‌ها تعبیه شده است. میزان شدت حرارت به صورت یکنواخت و در جهت عمود بر شکل می‌باشد. سیال خنک‌کن از مرکز وارد شده و از مجراهائی واقع در محیط آن خارج می‌گردد. ساختار آوندی دارای این توانائی است که نقاط داغ موجود را به صورت

[1] Robust

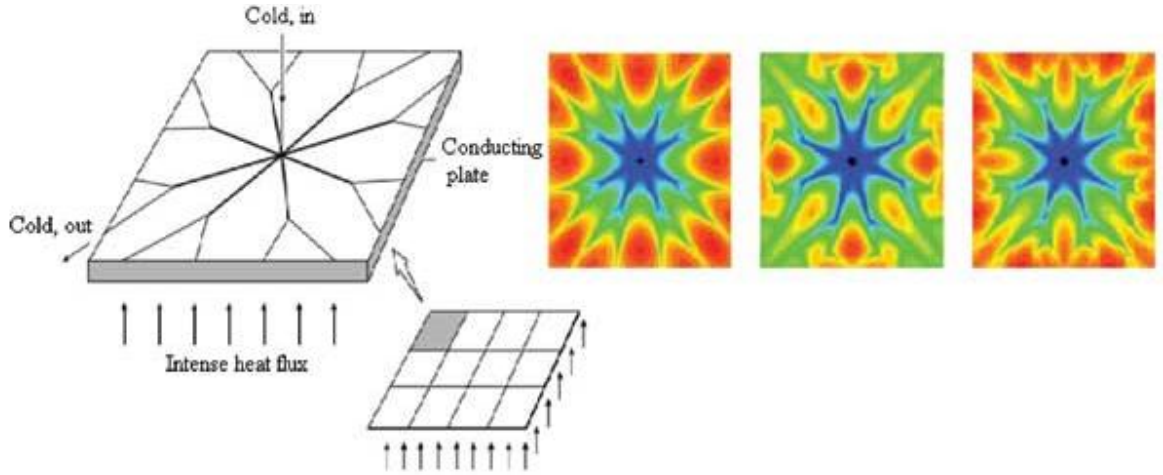
یکنواخت‌تری بر روی سطح و یا حجم مورد نظر توزیع کند. در این شکل ساختارهای درختی از سمت چپ به راست به ترتیب دارای یک، دو و سه مرحله انشعاب می‌باشند.



شکل1-7 المان حجمی با افزایش تدریجی درجه آزادی و همین‌طور افزایش تدریجی کارائی از بالا به پائین [32].



شکل 1-8 ساختار بهینه شده بصورت عددی و تاثیر تغییر در n_2: تعداد رگه‌های با ضریب هدایتی بالا با ضخامت D_1 [34].



شکل 1-9 ساختارهای درختی با یک، دو و سه مرحله انشعاب (به ترتیب از چپ به راست) به منظور خنک‌کاری ورقه مستطیلی [18]

1-3-2 ساختارهای درختی برای جریان سیال

نمونه‌هائی از ساختارهای جریان درختی در شکل‌های 1-5 و 1-6 برای سیستم‌های جریان سیال طبیعی نشان داده شده است؛ که از آن‌ها می‌توان برای کارهای مهندسی الهام گرفت. یکی از اهداف می‌تواند توزیع جریان از یک ورودی تا یک سطح یا حجم باشد. هدف دیگر می‌تواند جمع آوری جریان باشد یعنی دوباره ترکیب کردن و هدایت آن از کل سطح و حجم به یک خروجی. هر دو عملکرد در مبدلهای حرارتی دو جریانی اجرا می شوند.

ساختارهای درختی که از آن سیال عبور می‌کند در مهندسی کاربردهای فراوانی دارد. تلاش زیادی برای فهمیدن خصوصیات ساختارهای جریان درختی شکل انجام گرفته است؛ به این ترتیب که مثلاً چه ویژگی‌هائی آنها را بهتر می‌کند و یا این‌که طراح برای بدست آوردن ساختارهای بهینه و یا نزدیک به آن باید چه نوع استراتژی را به کار برد تا دسترسی بهتر و همچنین هزینه کم‌تر را به همراه داشته باشد. این دیدگاه در ساختار درختی مورد نظر، استفاده می‌گردد؛ مخصوصاً در حالتی که با این ساختار محیط یک دیسک را به مرکزش متصل می‌کنند [48، 49]. چاه و یا چشمه حرارتی در مرکز دیسک قرار داشته و دایره شامل بی‌نهایت نقطه می‌باشد که در طراحی‌های مربوط به خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، با تعداد زیادی ورودی یا خروجی متساوی الفاصله تقریب زده می شود (شکل1-10). جریان در رژیم پوازی بوده و نسبت قطرهای متوالی لوله‌ها بر مبنای قاعده هس- مورای[1] انتخاب شده است، که یک ویژگی معماری مطابق با قانون ساختاری می‌باشد. گونه‌های سه بعدی از این طبقه‌بندی درختان، یک ساختار درختی است که یک نقطه را به صفحه‌ای که در یک فاصله از نقطه قرار دارد، متصل می کند [50]. همان‌طور که در شکل 1-10 نشان داده شده، ساختار درختی ایجاد شده در نهایت شبیه سردوشی می‌گردد. رابطه مقاومت کلّی بی‌بعد، بین مرکز و محیط دیسک به صورت زیر است.

[1] Hess- Murray

$$f = \frac{\Delta P}{\dot{m}} \frac{V^2}{8\pi L^3} \quad (5\text{-}1)$$

که $\dot{m}$، ΔP، V و L به ترتیب نرخ دبی جرمی کلّی ، اختلاف فشار، حجم همه لوله ها و شعاع دیسک می‌باشد. قیود مسئله اندازه خارجی L و اندازه داخلی $V^{1/3}$ بوده و به این معناست که ظرافت همه ساختارهای نشان داده شده در شکل 1-10 یکسان است. ظرافت[1] در یک ساختار درختی را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$Sv = \frac{\text{مقیاس طولی خارجی}}{\text{مقیاس طولی داخلی}} = \frac{L}{V^{1/3}} \quad (6\text{-}1)$$

مطابق قانون ساختاری، تکامل ساختارهای درختی در شکل1-10 باید به سمت چپ حرکت کند. این حرکت با مجاز بودن در تغییر آزادانه طول لوله‌ها امکان‌پذیر می‌شود. ساختارهای b تا d، با بهینه کردن طول لوله در هر مرحله بدست آمده است[48]. تعداد دفعاتی که لوله از مرکز تا محیط دایره انشعاب پیدا می کند برابر p بوده، و تعداد لوله‌ها که به مرکز می رسند n_0 می‌باشد. در ساختارهای (a)و(b)، $p=4$ نیز بعنوان یک قید اضافی بوده که نشان می دهد چطور آزادی طول لوله‌ها، باعث بهبود در کارایی (یعنی دست‌یابی به مقدار f کم‌تر)خواهد شد. اگر p همچنان اجازه تغییر داشته باشد عملکرد بهترامکان‌پذیر خواهد بود. در روش تغییر شکل بهینه ساختار درختی، ساختاری با پیکربندی d که در آن $p=6$ بوده ساختار بهینه خواهد بود که به آن ساختار جریان تعادلی[2] گویند [15، 17]؛ زیرا در حوالی فضای طراحی و حتّی با افزایش آزادی بیشتر برای ساختار، کارایی تغییر نخواهد کرد.

نکته مهم آنست که بهترین ساختار جریان دارای پیچیدگی محدودی است $(p = 6)$ و ساختار با بیشترین پیچیدگی بهترین ساختار نیست. کارایی بیشینه و آزادی تغییر شکل در زمان (قانون ساختاری) به معنی بیشینه بودن پیچیدگی نیست.

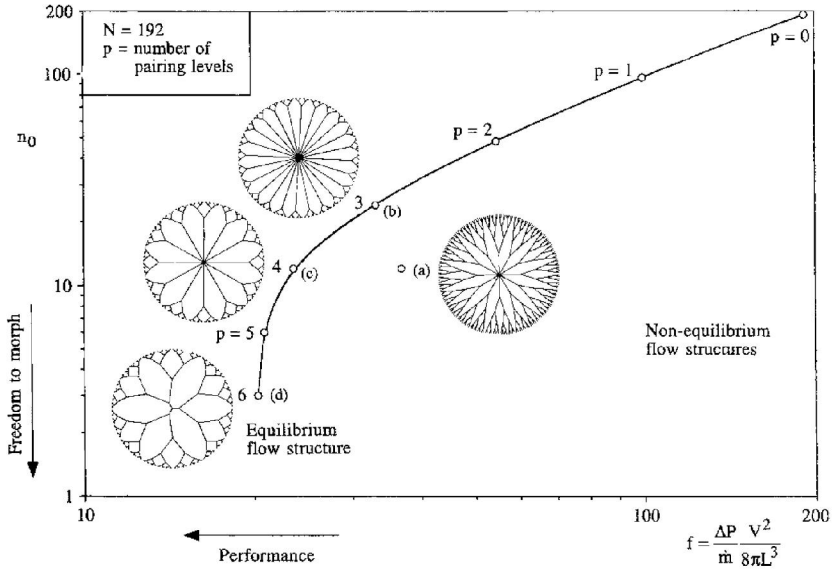
راه‌حل‌های قدرتمندی برای شتاب بیشتر در بررسی ساختارهای جریان درختی شکل بهینه پدیدار شده است؛ به این ترتیب که از قوانین مؤثری در این زمینه استفاده می کند. از آن میان می‌توان به قاعده هس- مورای برای قطرهای متوالی درکانال، انشعاب دوتائی برای جریان پوازی (شکل 1-10) و قاعده چهارتائی شدن[3] برای جریان مغشوش اشاره نمود.

یک میانبر بسیار مؤثر دیگر، انتخاب طولهای کانال بوسیله کمینه نمودن طول هر کانال در سطح جریان مربوط به خودش می‌باشد [50]. از اینجا شکل هر سطح جریان از کوچک‌ترین تا بزرگ‌ترین در دو یا سه بعد، بدست می‌آید. ترفند دیگر تصدیق کردن آنست که در پیکربندی d شکل1-10، زاویه بهینه محل تلاقی تقریبا $75°$ است. این نتیجه شبه نامتغیر[4]، با بهینه‌کردن سازه‌های Y شکل از سه لوله [48، 51، 52] بدست آمده و می تواند بعنوان قاعده‌ای برای ساخت سریعتر ساختارهای درختی استفاده شود؛ که عملکردی نزدیک به مرزهای $b - d$ در شکل 1-10 است.

تجمع طراحی‌های نزدیک به بهینه در نزدیکی ساختار جریان تعادلی، نتیجه محکمی ساختارهای درختی شکل می‌باشد. ساختارهای درختی که بهترین نیستند در عمل بخوبی بهترین درخت، کارایی دارند.

---

[1] Sveltness
[2] Equilibrium flow structure
[3] Quadrupling
[4] Quasi-invariant



شکل1-10 کارایی سیستم جریان در مقابل آزادی برای جریان‌هایی که مرکز را به N نقطه متساوی الفاصله روی دایره متصل می‌کنند [53].

این یک ویژگی جذاب است که ما را به استفاده از جریان‌های درختی در مهندسی وا می‌دارد. محکمی ساختار حل، با نصب کانال‌های با مسیر حلقوی [54] در مقیاسهای کوچک و متوسط افزایش بیشتری می‌یابد؛ بطوری‌که اگر یک کانال آسیب ببیند سیال بتواند از یک راه دیگر در اطراف حلقه جریان یافته و کارایی کلّی جریان درختی را حفظ نماید. کاربردهای بیشتر ساختارهای جریان سیال درختی شکل در مهندسی عمران و طراحی شهری در مراجع [55، 56] بررسی شده است.

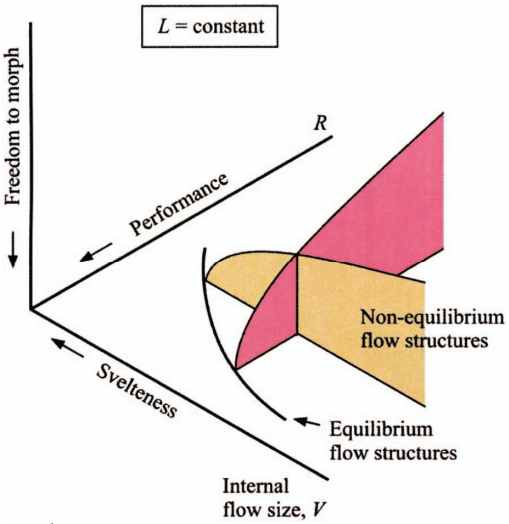
4-1 ترمودینامیک سیستم‌های با ساختار غیر تعادلی

در تئوری ساختاری اندازه جسم، ساختار و پیچیدگی همگی جزئی از نتایج هستند، نه فرضیات. آنها قسمت‌های اصلی ساختار هستند: ساختار بهینه که سیستم جریان در طول زمان مطابق با قانون ساختاری تمایل به آن دارد. این تمایل اخیراً یک مبنای تحلیلی را پوشش داده که عبارتست از ترمودینامیک سیستم های با ساختار غیر تعادلی [6، 7، 14]؛ همان‌طور که در بالا اشاره شد این یک تحول جدید در علم ترمودینامیک بوده که در شکل 1-11 خلاصه شده است.

1-4-1 خصوصیات

یک سیستم جریان (مثلا یک درخت)دارای "خصوصیات" بوده که آن‌را از سیستم های استاتیک (بدون جریانی) متمایز می‌کند. خصوصیات یک سیستم جریان عبارتند از (1) اندازه خارجی کلّی ، مثلاً، مقیاس طولی جسم L که سیستم جریان درختی در آن قرار گرفته است؛ (2) اندازه داخلی کلّی ، مثلاً، حجم کلّی کانال V؛ (3) حداقل یک هدف کلّی یا کارایی، مثلاً مقاومت جریان کلّی درخت؛ (4) ساختار، شکل، معماری و (5) آزادی برای تغییر شکل، یعنی دارای

آزادی برای تغییر ساختار. اندازه خارجی و داخلی کلّی (V, L) بدان معنی است که سیستم جریان دارای دو مقیاس طولی L و $V^{1/3}$ می‌باشد. این‌ها یک نسبت بدون بعد (ظرافت Sv) را تشکیل می دهند که یک خصوصیت کلّی جدید برای ساختار جریان می باشد.



شکل1-11 کارایی نسبت به آزادی برای تغییر ساختار، در اندازه خارجی کلّی ثابت [15، 17].

ساختارهای جریان که توسط قانون ساختاری پوشش داده شده‌اند، در صفحه V ثابت $(V = const)$ تجمع یافته و جابجا می‌شوند که در شکل 1-11 نشان داده شده است. این صفحه یک دیاگرام کارایی در مقابل آزادی را بنا می کند: در طول زمان اگر ساختار، آزادی برای تغییر داشته باشد، (در L و V ثابت) مقاومت جریان R کاهش می‌یابد(یعنی کارایی افزایش می یابد). این ساختار با کمترین مقدار R بیانگر ساختار جریان تعادلی است. مثالی از تکامل ساختار جریان در طول زمان (در L و V ثابت) در شکل 1-10 نشان داده شده است. پارامتر افقی f مقاومت جریان بی‌بعد کلّی برای جریان پوازی بین مرکز دایره و تعداد 192 نقطه توزیع شده متساوی الفاصله روی دایره می‌باشد. پارامتر f مربوط به پارامتر کارایی R در شکل 1-11 می‌باشد. در حالت d، ساختارجریان بیشترین کارایی و آزادی برای تغییر شکل را دارد.

1-4-2 بقا با افزایش کارایی

تکامل ساختارها در برش V- ثابت (همچنین در L ثابت، شکل1-11) بیانگر بقاء در افزایش کارایی است. در شکل 1-11 مکان هندسی ساختارهای تعادلی، یک منحنی با شیب منفی است $((\partial R/\partial V)_{\mathrm{L}} < 0)$. به دلیل فیزیک جریان، مقاومت با افزایش اندازه فضای داخلی پر شده توسط جریان، کاهش می یابد. این شیب بدان معنی است که ساختارهای جریان غیرتعادلی، فضایی را پر می کنند که توسط سطح سه بعدی نشان داده در شکل 1-11 پیشنهاد شده است. تکامل زمانی ساختارهای جریان غیرتعادلی بسمت لبه پایینی سطح (ساختارهای تعادلی) پیش می‌رود؛ که نتیجه قانون ساختاری برای ساختار جریان می‌باشد.

1-4-3 بقا با افزایش ظرافت(فشردگی)

پیکان زمان مشابهی می تواند متناوباً با مراجعه به یک برش R- ثابت از فضای سه بعدی شکل 1-11 توصیف شود. ساختارهای جریان با یک کارایی کلّی مشابه R و اندازه کلّی L بسمت فشردگی و ظرافت پیش می‌روند. به تفسیر قانون ساختاری می توان تکامل را در مقادیر L و R ثابت اینگونه توصیف کرد:

یک سیستم با اندازه کلّی و کارایی ثابت برای بقا در زمان، باید طوری تکامل یابد که ساختار جریانش نسبت کوچک-تری از فضای در دسترس را اشغال نماید؛ و این به معنای استفاده بیشینه از فضای در دسترس است. بقا با افزایش ظرافت (فشردگی) معادل بقا با افزایش کارایی است: هر دو بیان قانون ساختاری هستند.

1-4-4 بقا با افزایش قلمرو جریان[1]

سومین بیان معادل قانون ساختاری در شرایطی ظاهر می‌شود که بعد طولی L- ثابت در شکل 1-11 جای خود را به فضای طراحی V- ثابت شکل 1-12 دهد. در شکل مورد نظر برش L- ثابت، شبیه دیاگرام کارایی در برابر آزادی برای تغییر پیکربندی شکل 1-11 است، و قانون ساختاری به معنای بقا با افزایش کارایی است. شیب منحنی در صفحه پایینی $(\partial R/\partial L)_V$ بخاطر فیزیک جریان مثبت است؛ که به معنای افزایش مقاومت جریان با افزایش مسافت طی شده توسط جریان می‌باشد. فضای طراحی‌های ممکن می تواند در برش R- ثابت شکل 1-12 مشاهده شود. دوباره ساختارهای جریان به سمت ظرافت‌های بیشتر تکامل می یابد. بنابراین بیان قانون ساختاری چنین بیان می‌شود:

در یک سیستم جریان با مقاومت کلّی ثابت R و اندازه داخلی V برای پایداری در زمان، باید ساختار جریان طوری تحول یابد که قلمروهای بزرگتری را پوشش دهد. حدی برای گسترش ساختار جریان وجود دارد و آن با خصوصیات کلّی مانند کارایی (تکنولوژی) و حجم‌های جریان داخلی تنظیم می گردد.

دلتاهای رودخانه در صحرا، گونه های حیوانی در قلمروشان و امپراطوری‌های مختلف هر یک به نوعی در محدوده‌شان گسترده شده‌اند. قانون ساختاری نیز با افزایش قلمرو برای جریان و جابجایی، گسترش می‌یابد. اکنون ما می دانیم چرا باید چنین باشد [53].

جهان واقعی (طبیعت، فیزیک) دارای معماری، سازمان و الگو می‌باشد. ساختارهای سیستم جریان مانند شبکه جامعه و همه بافت‌های بیولوژیکی، ساختارهای بهینه شده‌اند. بالا بردن سطح کارایی، یک تلاش منظم و همه جانبه است: تعادل بین جریان های به ظاهر غیر مرتبط ، قلمروها و گروه‌های منظم.

هیچ رودخانه بدون جلگه مرطوبش وجود ندارد. هیچ شهری بدون مزارع و فضاهای بازش پیشرفت نخواهد کرد. هر چیزی که امروزه جاری و زنده است، برای بقا با جریان‌هایی که آنرا احاطه و نگه داشته‌اند، یک تعادل بهینه برقرار کرده است. این عمل تعادل (توزیع بهینه عیوب) طرح‌های زیادی از فرایندها، نیروگاه، شهر، جغرافیا و اقتصاد را تولید می کند.

در این فصل بر مبنای تئوری ساختاری، پدیده فیزیکی تولید ساختار جریان در طبیعت بررسی گردید؛ که اکنون با ترمودینامیک سیستم‌های جریان غیرتعادلی تحت پوشش قرار گرفته است [15، 17].

---

[1] Flow territory