زیست سپهر
Biosphere

مروری

مروری بر مبانی ریخت‌سنجی هندسی

فرزانه قنبری[1*]، سهیل ایگدری[2]

[1] گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

[2] گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

نویسنده مسئول: فرزانه قنبری
ایمیل: f.ghanbari66@yahoo.com

چکیده

روش ریخت‌سنجی هندسی روشی بر پایه مختصات لندمارک‌ها یا خط سیر پیرامونی است که برای آنالیز تغییرات شکل نمونه‌های مورد مطالعه، استفاده می‌گردد. به‌طور معمول در مطالعات ریخت‌سنجی سنتی آنالیزهای آماری چند متغیره برای بررسی مجموعه‌ای از داده‌های فاصله‌ای از قبیل طول، عرض و ارتفاع به کار می رود. اما در روش‌های ریخت سنجی هندسی داده‌هایی از قبیل مختصات لندمارک‌ها، برای استخراج داده‌های شکل مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مقاله یک مروری از مبانی و اصطلاحات این روش نوین را ارائه می‌دهد.

واژه های کلیدی: ریخت سنجی هندسی، تحلیل شکل، لندمارک، اندازه، فرم

مقدمه

در تحقیقات زیست‌شناسی، سؤالات بسیاری در زمینه شکل (shape) مورد توجه قرار می‌گیرد،که برخی از این سؤالات عبارتند از: میانگین شکل یک استخوان/عضو/ساختار در جمعیت چیست؟ الگوی تغییر شکل در جمعیت ومیانگین آن چگونه است؟ گروه‌ها چطور در شکل متفاوت هستند؟ اهمیت عملی این تفاوت‌ها چیست؟ این سوالات می‌توانند با استفاده از ابزار یا علم ریخت‌سنجی پاسخ داده شوند. واژه‌ی ریخت‌سنجی به اختصار به معنای اندازه‌گیری شکل می‌باشد. ریخت سنجی (Morphometrics) علم مربوط به روش‌های تجزیه و تحلیل شکل موجودات زنده می‌باشد. این علم، شاخه‌ای ازعلم زیست‌شناسی است که به بررسی خصوصیات ریختی موجودات زنده و توصیف انواع حالات آن می‌پردازد (Mitteroeckerand Gunz, 2009).

از نظر لغت‌شناسی Morphometric از دو کلمه Morph به معنی شکل و Metron به معنی اندازه-گیری تشکیل شده است (Slice *et al*., 2001). اگرچه ریخت‌سنجی می‌تواند برای توصیف فرم هر شی مورد استفاده قرار گیرد، اما عمدتاً در زیست-شناسی برای توصیف کمی فرم موجودات استفاده می‌شود و روش کمی‌سازی امکان مقایسه شکل موجودات مختلف را برای محققان فراهم می‌سازد (Zelditch *et al*., 2004). همچنین طبقه‌بندی موجودات و بررسی تنوع زیستی موجودات زنده، بر اساس توصیف فرم‌های ریختی بنا شده است (Adams *et al*., 2004). انواع فرایندهای زیست شناسی، مانند بیماری، فردزایی، سازگاری با فاکتور-

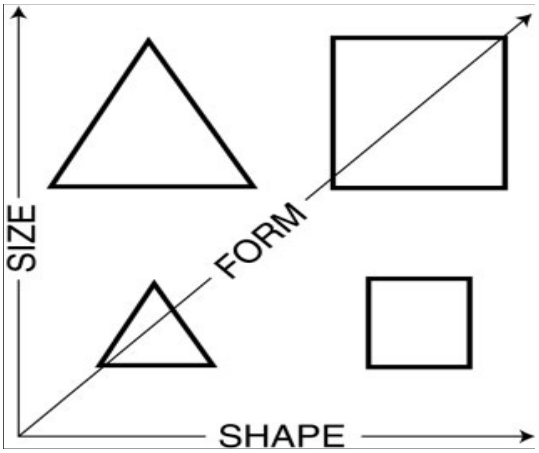
های محیطی و یا تنوع تکاملی درازمدت، باعث ایجاد تفاوت در شکل بین افراد یا قسمت‌هایی از آن‌ها می‌شود و آنالیز شکل براساس روش‌های ریخت سنجی روشی برای بررسی علت‌های مختلف چنین تغییر شکل‌های ریختی است (Zelditch *et al*., 2004; Rohlf, 1998, 2002).

فرم (Form)، شکل (Shape) و اندازه (Size):

ریخت‌سنجی، علمی مرتبط با مطالعه‌ی ساختارهای ریختی موجودات و ارائه‌ی نتایج تجزیه و تحلیل آن‌ها می‌باشد. بنابراین در آن کلماتی از قبیل اندازه یا اندازه (Size) و شکل (Shape) که در محاورات روزمره کاربرد دارند، معانی فنی جدیدی به خود می‌گیرند که تا حدی با معانی رایج متفاوت می‌باشند. از این رو در ریخت‌سنجی هندسی، تمایز عنوان‌های فرم و شکل ضروری است.

فرم به کل ریخت یک شی اشاره دارد یعنی شامل اطلاعات اندازه (Size) و شکل (Shape) است (Form=shape+size). شکل به مولفه‌های تغییر ریختی که مستقل از تغییر اندازه هستند، اشاره دارد یعنی ویژگی‌های هندسی یک شی که نسبت به مکان (Location)، مقیاس (Scale) و چرخش (Rotation) یکسان هستند (Slice *et al*. 1998). برای درک بهتر این تفاوت می‌توان از شکل ۱ کمک گرفت (Richtsmeir *et al*., 2002).

طبق تعریف کندال (۱۹۷۷) از شکل: زمانی که مکان، مقیاس و چرخش از یک شی حذف گردد، اطلاعات هندسی باقی مانده همان شکل است. مفهوم تعریف کندال این است که تفاوت بین موقعیت‌های لندمارک‌ها در یک مطالعه ریخت‌سنجی که به طور نسبی در مکان، مقیاس و چرخش متفاوت هستند، حذف گردد و تنها تفاوت در شکل باقی بماند (Zelditch *et al*., 2004). بعد از حذف موارد فوق، که به تفاوت‌های شکلی مرتبط نمی‌باشند (یعنی این فرایندهای فوق الذکر شکل را تغییر نمی‌دهد)، می‌توانیم از مختصات جایگاه‌های پایانی برای تجزیه و تحلیل تفاوت‌های شکل استفاده کنیم (Zelditch *et al*., 2004).



شکل(۱) جایگاه اندازه، فرم و شکل

داده مربوط به اندازه (Size)، برای استخراج داده شکل باید حذف گردد. مفهوم این مطلب این است که اندازه یک تعریفی مستقل از شکل دارد. در ریخت سنجی هندسی، اطلاعات راجع به اندازه کلی یک شی، در متغیری به نام مرکز اندازه (Centroid Size) حفظ می‌شود.

ریخت سنجی هندسی (Geometric Morphometric)

تکنیک‌های ریخت‌سنجی به دو روش (۱) ریخت‌سنجی سنتی که روشی‌های برپایه تحلیل‌های آماری فواصل اندازه‌گیری شده بر روی ساختار زیستی از قبیل طول، عرض، عمق و گاهی اوقات نسبت‌ها و زاویه‌ها و (۲) ریخت‌سنجی هندسی به مجموعه‌ای ازروش‌ها که ازداده‌هایی مانند لندمارک‌ها، منحنی-

های خط سیر پیرامونی (Outline) و نیمه لندمارک-ها (Semi-Landmark) برای گرفتن اطلاعات هندسی ازساختارهای زیستی استفاده می‌کند، تقسیم می‌شوند (Adams *et al*., 2004).

در ریخت‌سنجی سنتی اندازه‌گیری فاصله‌های خطی همبستگی بالایی با اندازه موجود دارد و این تحلیل شکل را مشکل می‌سازد و نمایش گرافیکی نتایج نیز ناممکن است. پیدایش ابزار ریخت سنجی هندسی به همراه کاربرد آمارهای چند متغییره منجر به چیره شدن بر محدودیت‌های ریخت سنجی و تحول در آن شد (Zelditch *et al*., 2004). در ریخت-سنجی هندسی روش لندمارک پایه، مقایسه بین فرم‌ها بر اساس اطلاعات نقاط لندمارک می‌باشد (Zelditch *et al*., 2004). بزرگترین مزیت این روش حفظ موقعیت هندسی لندمارک‌ها در آنالیز آن‌ها می‌باشد و این امکان ارائه نتایج به صورت گرافیکی در قالب شبکه‌های تغییر شکل (Deformations Grids) و Wireframe را می‌دهد و تفسیر آن بسیار آسانتر از تفسیر جداول ضرایب عددی در روش ریخت سنجی سنتی می‌باشد.

لندمارک

در روش ریخت‌سنجی هندسی لندمارک-پایه، مقایسه بین فرم‌ها توسط جمع‌آوری اطلاعات مکان نقاط مجزا که لندمارک نامیده می‌شود، انجام می-گیرد. لندمارک‌ها، لوکوس‌های (Loci) قابل شناسایی در موجودات هستند که از نظر زیستی از یک موجودبه موجود دیگر همولوگ هستند از قبیل ساختارهایی مانند نوک پوزه و محل اتصال بال به بدن (Booketein, 1991). لندمارک‌ها توسط مختصات دو بعدی (x,y) و یا مختصات سه بعدی (x,y,z) نقاط همولوگ توصیف می‌شوند (Zelditch *et al*., 2004).

مجموعه لندمارک‌های ثبت شده روی یک شی، به عنوان یک جایگاه لندمارک (Lanmark Configuration) در نظر گرفته می‌شود و زمانی که لندمارک‌ها به طور کافی در سرتاسر یک نمونه انتخاب شوند، جایگاه لندمارک می‌تواند به عنوان یک نمایش از شکل نمونه آنالیز شود (Tjarks, 2009). زمانی که برروی تصاویر نمونه‌های مورد مطالعه، لندمارک‌ها قرار داده می‌شوند، لندمارک-هایی که در مکان‌های مشابه قرار دارند، اصطلاحاً به آن‌ها لندمارک‌های متناظر گفته می‌شود. مثلاً لندمارک شماره ۱ که در نوک بینی شی A قرار دارد متناظر با لندمارک شماره ۱ واقع در نوک بینی شی B می‌باشد.

لندمارک‌ها، بیش‌ترین داده به کار برده شده در مطالعات ریخت سنجی هندسی می‌باشد که دلیل آن تا حدی به خاطر تعداد زیاد ابزارهای تحلیلی قابل دسترس برای این سری داده‌ها، مخصوصاً برای لندمارک‌های دوبعدی است (Loy and Slice, 2010). نتایجی که توسط این روش به دست می‌آید، مستقیماً به کیفیت لندمارک‌ها بستگی دارد. مجموعه‌ی لندمارک‌های تعریف شده برای نمونه مورد مطالعه، باید در تمام نمونه‌ها موجود باشد حتی اگر یک لندمارک در یکی از نمونه‌ها وجود نداشته باشد، یا باید معادل آن به طور تقریب انتخاب شود یا آن لندمارک باید از تمامی نمونه‌ها حذف گردد.

تصاویر دو بعدی و سه بعدی برای آنالیز ریخت سنجی

مختصات لندمارک‌ها می‌تواند دو بعدی یا سه بعدی باشند برای این مجموعه داده‌ها برای استفاده در

آنالیزهای ریخت‌سنجی، از تصاویر دیجیتال دو بعدی و سه بعدی استنتاج می شوند (Loy and Slice, 2010). لندمارک‌های دوبعدی معمولاً برروی تصاویر دیجیتال گذاشته می‌شوند، عکس‌ها می‌توانند توسط دوربین‌های دیجیتال یا دوربین‌های فیلمی یا میکروسکپ‌های دیجیتال گرفته شوند (Loy and Slice, 2010). مزیت کار با لندمارک‌های دو بعدی این است که به راحتی از تصاویر دیجیتال توسط نرم افزارهایی مانند TPSdig که به راحتی در دسترس هستند، رقومی می‌شوند (Slice , 2007; Mitteroecker and Gunz, 2009).

لندمارک‌های سه بعدی تمامی اطلاعات شکل را حفظ می‌کند (Bookestein, 1991) و این مطلب به خصوص درمورد ساختارهای سه بعدی مانند جمجمه صدق می‌کند. با وجود این مزیت، این گونه لندمارک‌ها با برخی محدودیت ها روبرو هستند (Loy and Slice,2010). مختصات سه بعدی می‌تواند از عکس‌های سه‌بعدی گرفته شده توسط اسکنرهای رقومی‌کننده سه بعدی (3D digitizer) ، CT (Computer Tomography) و MR (Magnetic Resonance) ثبت شوند. در روش سه‌بعدی، زمان زیادی صرف جمع‌آوری داده می‌شود و همچنین دارای محدودیت‌هایی در زمینه ثبت مجدد لندمارک‌ها بر روی نمونه‌ها برای اصلاح خطاها و ثبت لندمارک‌های جدید می‌باشد. این ابزارها، گران قیمت هستند و در مکانی که جمع‌آوری داده انجام می‌گیرد قابل دسترس نیستند (Loy and Slice, 2010). همچنین، روش‌های آماری برای تجزیه و تحلیل این قبیل داده‌های اضافی (سطح‌ها و حجم‌ها) در مراحل آغازی‌شان هستند. بنابراین اکثر مطالعات در زمینه ریخت سنجی هندسی با کمک داده‌های دو بعدی انجام می‌گیرد.

ثبت کردن مختصات لندمارک‌ها بر تصاویر

زمانی که تصاویر خوبی از نمونه‌های مورد مطالعه گرفته شد و همچنین لندمارک‌ها بر اساس معیارهای بیان شده تعریف گردیدند، مرحله بعد قرار دادن لندمارک‌ها بر روی تصاویر گرفته شده از نمونه‌ها می‌باشد که به این فرایند رقومی سازی لندمارک‌ها اطلاق می‌گردد.

تغییر شکل داده‌ها

همان‌طور که در قبل گفته شد، روش‌های ریخت سنجی هندسی لندمارک-پایه با جمع‌آوری مختصات‌های دوبعدی و سه بعدی لندمارک‌های قابل تعریف، آغاز می‌گردد و تجزیه و تحلیل مستقیم این مختصات به عنوان متغیر نامناسب می‌باشد، زیرا طبق تعریف کندال (۱۹۷۷) از شکل: زمانی‌که مکان، مقیاس و چرخش از یک شی حذف گردد، اطلاعات هندسی باقی مانده همان شکل است. بنابراین برای اینکه مقایسه درستی درمورد شکل نمونه‌های مورد مطالعه صورت گیرد باید تفاوت در مختصات‌ها به علت چرخش و انتقال نمونه‌ها در طی جمع‌آوری داده حذف گردد و بعد از حذف این اثرات، ماتریس متغیرهای شکل به دست خواهد آمد (Loy and Slice, 2010) و تمامی تغییرات باقی مانده در مختصات جایگاه لندمارک‌های روی هم‌گذاری شده حاوی اطلاعات کامل راجع به تغییر شکل است و به عنوان تفاوت‌های خالص در شکل و مقایسه آماری می‌توانند تجزیه و تحلیل شوند (Klingeberg *et al*., 2003; Tjark, 2009).

روش‌های روی هم گذاری (Superimposition Methods)، تغییرات غیر شکل در جایگاه لندمارک‌ها را بر طبق برخی معیارها حذف می‌کنند. تمامی تکنیک‌های روی هم گذاری شامل سه مرحله زیر می‌باشند:

۱-تعیین فرم‌های میانگین در یک جهت مخصوص و نامیدن آن به عنوان شکل مرجع
۲-انتقال و چرخش فرم‌های میانگین به طوری که با شکل مرجع تطبیق پیدا کنند.
۳-بررسی میزان و جهت تفاوت بین فرم‌ها در هر لندمارک

متغیرهای شکل

زمانی که تجزیه و تحلیل آماری با هدف مقایسه شکل‌ها انجام می‌گیرد، متغیرهای شکل مورد نیاز است. متغیرهای شکل در مکان، جهت و سایز یکسان هستند، بنابراین مختصات لندمارک‌های روی هم گذاری شده متغیرهای شکل هستند و مختصات خام اصلی (ابتدایی) متغیر شکل نیستند. از متغیرها می‌توان در انواع آزمون‌های چندمتغیره برای تعیین مقدار و ساختار کوواریانس و تفاوت‌های گروهی استفاده کرد (Slice, 2007).

تجزیه و تحلیل متغیرهای شکل

زمانی که متغیرهای شکل به دست آمد، باید مجموعه متغیرها را برای پیدا کردن نظم و ساختارها (شباهت‌ها، تفاوت‌ها و گروه‌بندی) تجزیه و تحلیل شوند.که اساساً با استفاده از آزمون‌های آماری چند متغیره انجام می‌شوند که از آن‌ها می‌توان تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، مقیاس‌گذاری چندبعدی پارامتریک (NMDS)، تحلیل عاملی (FA)، رگرسیون چندمتغیره، حداقل مربعات جزیی (PLS)، و تجزیه واریانس (ANOVA) را نام برد (Baltanas and Danielopol, 2011). از آنجا که هر لندمارک دو بعد (x,y) یا سه بعدی (x,y,z) دارد، تجزیه و تحلیل‌های آماری لزوماً چند متغیره هستند.

هنگامی که مختصات شکل (متغیرها) را به دست آوردیم، می‌توانیم به سؤالات خود مانند آیا این نمونه‌ها در شکل متفاوت هستند؟ پاسخ دهیم. پاسخ این سؤال بله یا خیر است که توسط آزمون‌های آماری به دست می‌آید. تجزیه و تحلیل آماری در ریخت سنجی هندسی با استفاده از مختصات شکل پراکراست انجام می‌شود و از چندین جنبه از روش-های ریخت‌سنجی سنتی متفاوت است. در ریخت سنجی سنتی، آمارهای چند متغیره برای یک مجموعه از اندازه گیری‌ها شامل فاصله‌ها، نسبت فاصله‌ها و زاویه، حجم و غیره به کار برده می‌شود. این قبیل متغیرها اغلب واحد مشترک ندارند. تجزیه و تحلیل آماری در این روش معمولاً بر روی ماتریس همبستگی استوار است. در ریخت‌سنجی هندسی تمامی متغیرهای شکل دارای واحدهای مشابه هستند. بنابراین تجزیه و تحلیل بر روی ماتریس کوواریانس استوار است و یک معیار اندازه‌ای (متریک) خوب تعریف شده (اندازه پراکراست) وجود دارد (Mitteroecker and Gunz, 2009). روش‌های آماری برای داده‌های شکل دو بعدی و سه بعدی مشابه می‌باشد و تنها ممکن است که نوع نمایش متفاوت باشد (Mitteroecker and Gunz, 2009).

همچنین بسته به نوع تجزیه و تحلیل داده‌ها، ایجاد گرافیک‌هایی برای مصورسازی تنوع‌های ریختی مربوط به موجودات تحت مطالعه در روش ریخت-سنجی هندسی امکان‌پذیر می‌باشد. برای مثال، این مصورسازی‌ها می‌توانند تغییرات ریختی در پاسخ به شرایط محیطی، تأثیر ژن‌های خاص یا تغییرات انتوژنیک یا فردزایی در ارتباط با رشد باشند. این مصورسازی‌ها در روش‌های ریخت‌سنجی، به راحتی توسط محقق زیست‌شناس قابل تفسیر باشد، می-باشد.

جمع بندی

روش ریخت سنجی هندسی روشی نوین می‌باشد که لندمارک گذاری‌ها و کلیه آنالیزهای داده‌ها با

استفاده از نرم افزارها به آسانی انجام می‌شود. این برنامه‌ها اگرچه سبب صرفه جویی در زمان و هزینه می‌شوند اما از سویی دیگر به علت دسترسی آسان به برنامه‌های ریخت سنجی، آنالیزهای ریخت سنجی با درک کمی از پایه ریاضی یا استدلالی از روش انجام می‌شود که این موضوع نه تنها برای روش ریخت سنجی هندسی بلکه برای تمامی مباحث علمی که توسط برنامه‌های کامپیوتری مختلف آنالیز می شوند خطرناک است و این موضوع باید برای هر محققی مهم باشد. بنابراین قبل از استفاده از این برنامه‌ها برای آنالیزهای زیست سنجی، باید اساس و تئوری روش ریخت سنجی هندسی را دانست. مواردی که در این مقاله ارائه شده است می‌تواند شروع خوبی برای درک مفاهیم مورد نیاز ریخت-سنجی هندسی باشد.

منابع

Adams, D.C., Rohlf, F.J., Slice, D.E., 2004 . Geometric morphometrics: Ten years of progress following the ‘Revolution’. Italian Jourrnal of Zoology. 71: 5-16.

Bookstein,F.L., 1991. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology.Cambridge University Press, Cambridge.

Kendall, D., 1977. The diffusion of shape. Advances in Applied Probability. 9: 428–430.

Klingenberg, C.P., Barluenga, M., MEYER, A., 2003. Body shape variation in cichlid fishes of the Amphilophus citrinellus species complex. Biological Journal of the Linnean Society 80:397–408.

Loy, A., Slice, D.E., 2010. Image data banks and geometric morphometricsTools for Identifying Biodiversity: Progress and Problems. 243-248.

Mitteroecker, P., Gunz, P., 2009. Advances in Geometric Morphometrics. Evolutionary Biology. 36: 235-247.

Richtsmeier, J.T., Deleon, B., Lele, V., Subhash, R., 2002. The promise of geometric morphometrics. American Journal of Physical Anthropology. 119: 63-91.

Rohlf, F.J., 1998. On application of geometric morphometric to studies of ontogeny and phylogeny. Systematic Biology. 47:147-158

Rohlf, F.J.,2002. Geometric morphometrics and phylogeny. In Morphology, Shape and Phylogeny 175–193. Taylor & Francis.

Slice, D.E., 2007. Geometric morphometrics. Annual Review of Anthropology,36: 261-281.

Slice, D.E., Bookstein, F.L., Marcus, L.F., Rohlf, F.J., 2001. A Glossary Geometric Morphometrics.http:/www.life.bio.cunysb.edu/morph/glossary.

Tjarks, H., 2009. Geometric morphometric analysis of head shape in Thamnophiselegans. A thesis presented to the faculty of California State University, Chico.1-30.

Zelditch, M.L.,Swiderski, D.L., Sheets, H.D., Fink, W.L., 2004. Geometric Morphometrics for biologists: a primer. London: Elsevier Academic Press.