الگوبرداری انسان از جاندار سخت‌دوست و تاب‌آور: تاردیگریدها

محمدحسین خدابنده‌لو[۱]، علی‌اکبر موسوی موحدی[۱،۲،۳،*]

چکیده

این مقاله به بررسی تاردیگریدها، موجودات میکروسکوپی با توانایی خارق‌العاده در تحمل شرایط محیطی سخت، و ارتباط آنها با مفهوم تاب‌آوری انسانی و شاخص‌های توسعه انسانی (HDI) می‌پردازد. تاردیگرید یا خرس آبی، یک گروه از بی‌مهرگان میکروسکوپی هستند که به‌دلیل مقاومت بالایشان در برابر شرایط محیطی بسیار سخت شناخته می‌شوند. این موجودات میکروسکوپی از نظر اندازه معمولاً بین ۰/۳ تا ۰/۵ میلی‌متر هستند و در محیط‌های مختلف از جمله اقیانوس‌ها، جنگل‌ها و حتی بر روی خزه‌ها و گلسنگ‌ها زندگی می‌کنند. تاردیگریدها با استفاده از مکانیسم‌هایی نظیر کریپتوبیوزیس که نوعی حالت متابولیکی خاص و برگشت‌پذیر است، قادرند در محیط‌هایی با دماهای شدید، کم‌آبی، تشعشعات مضر و فشارهای بالا زنده بمانند. تاب‌آوری نیز به‌عنوان معیاری برای سنجش توسعه انسانی، بر توانایی کشورها و جوامع در مقابله با معضلات اقتصادی و اجتماعی تأکید دارد. کریپتوبیوز حالتی از عدم فعالیت شدید در پاسخ به شرایط نامطلوب محیطی است. در این مقاله، شباهت‌ها و تفاوت‌های بین تاب‌آوری تاردیگریدها و شاخص توسعه انسانی مورد بحث قرار گرفته و پیشنهادهایی برای بهره‌برداری از طریق الگو و الهام‌گیری مولکولی از سازگاری تکاملی تاردیگریدها، نظیر پروتئین‌های شوک حرارتی و سازوکارهای ترمیم DNA، مطرح می‌شود. البته در این مقاله نگاهی دیگر بر تعریف شاخص‌های توسعه انسانی شده‌است، بدین معنی که انسان توسعه یافته، وجودی با ضمیر متعالی است که قوانین الهی و ملکوتی پدیده‌های طبیعت را می‌شناسد و با علم و ایمان خود تاب‌آوری دارد تا در اشیا و پدیده‌های طبیعت غواصی نماید و گوهرها را بیابد و برای تسهیل امور خود و جامعه از آن بهره‌مند شوند.

واژگان کلیدی: تاردیگرید، شاخص توسعه انسانی، ضمیر متعالی، تاب‌آوری، سخت‌دوست، طبیعت، زیست‌فناوری

* عهده‌دار مکاتبات: استاد. تلفن: ۶۶۴۰۹۵۱۷ (۹۸۲۱)، نمابر: ۶۶۴۰۴۶۸۰ (۹۸۲۱)، نشانی الکترونیکی: moosavi@ut.ac.ir

[۱] مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران

[۲] USERN ، شبکه جهانی علمی، آموزش و پژوهش ، مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک ، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۳] عضو پیوسته فرهنگستان علوم ایران، عضو پیوسته آکادمی جهانی علوم (تواس)، عضو پیوسته آکادمی علوم جهان اسلام

مقدمه

انسان و طبیعت دو جزء جدایی‌ناپذیر هستند و انسان خود زیرمجموعه سیستم‌های طبیعی می‌باشد [۱]. در مقاله‌های بسیاری بر نحوه استفاده از الگو و الهام‌گیری از طبیعت برای بهبود سیستم‌های ساخت دست بشر تأکید شده است [۳،۲]. برای نمونه مقاله‌ای درباره اهمیت بهره‌گیری از سیستم‌های زیستی برای بهبود سیستم شهری و کشاورزی به‌چاپ رسیده است [۴]. در مقاله‌ای دیگر درباره جایگاه اجتماعی مورچه‌ها و زنبورهای عسل در کندوهایشان و استفاده از الگوهای رفتاری آنها پژوهش شده و نتایج بررسی علمی ژنوم و علوم اعصاب آن با رفتارهای اجتماعی انسان مقایسه گردیده است [۵]. در بعضی از مقالات بهره بردن از روش‌های مهندسی ژنتیکی در جاندارانی مانند تاردیگرید به‌صورت مستقیم گزارش شده است [۶-۸]. تاردیگرید یا خرس آبی یک گروه از بی‌مهرگان میکروسکوپی هستند که به‌دلیل مقاومت بالایشان در برابر شرایط محیطی بسیار سخت شناخته می‌شوند. این موجودات میکروسکوپی از نظر اندازه معمولاً بین ۰/۳ تا ۰/۵ میلی‌متر هستند و در محیط‌های مختلف از جمله اقیانوس‌ها، جنگل‌ها و حتی بر روی خزه‌ها و گلسنگ‌ها زندگی می‌کنند. تاردیگریدها دارای بدنی کوچک و فشرده هستند که شامل ۸ پا است. هر یک از این پاها دارای چنگال‌های کوچکی هستند که به آنها در حرکت کمک می‌کند. یکی از ویژگی‌های منحصر به‌فرد تاردیگریدها این است که می‌توانند در شرایط فوق‌العاده سخت مانند فشارهای بالا، دمای بسیار سرد یا بسیار گرم، تابش اشعه‌های مضر و حتی در خلاء فضایی زنده بمانند. این موجودات توانایی قرار گرفتن در حالت کریپتوبیوزیس را دارند، یعنی می‌توانند فعالیت‌های متابولیکی خود را متوقف کنند و به حالتی شبیه مرگ موقت وارد شوند که به آنها اجازه می‌دهد تا زمانی که شرایط محیطی بهبود پیدا کند، زنده بمانند [۹].

این موجودات به‌دلیل مقاومت شگفت‌انگیزشان موضوع تحقیقات فراوانی در زیست‌شناسی و زیست‌فناوری هستند [۶-۸]. در این مقاله، سازگاری تاردیگریدها به‌عنوان یک الگو از طبیعت برای تعریف شاخص‌های توسعه انسانی از جمله تحمل و تاب‌آوری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

طبیعت

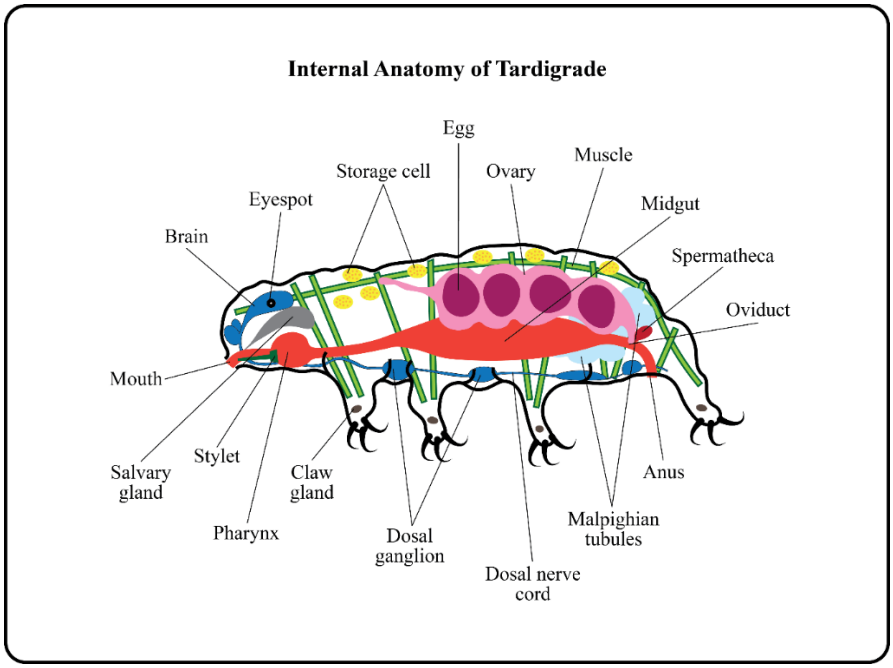
طبیعت همواره در تلاطم است تا سیستم‌هایی مقرون به صرفه ایجاد کند. سیستم‌های طبیعی زمان خیلی زیادی در دسترس داشته‌اند که طبق قوانین موجود به بهترین شکل ممکن تکامل پیدا کنند. انسان خود به‌عنوان یک سیستم مقرون به صرفه پیچیده به وجود آمده است و از ابتدای آفرینش دائماً در حال مطالعه و کشف قوانین حاکم بر طبیعت بوده است. یکی از این سیستم‌های مقرون به صرفه تاردیگرید است؛ این موجود به گونه‌ای سازگاری پیدا کرده است که در طیف گسترده‌ای از شرایط بحرانی توانایی زندگی کردن و یا حداقل جان سالم به در بردن را دارا می‌باشد.

تاردیگرید: معرفی و ویژگی‌ها

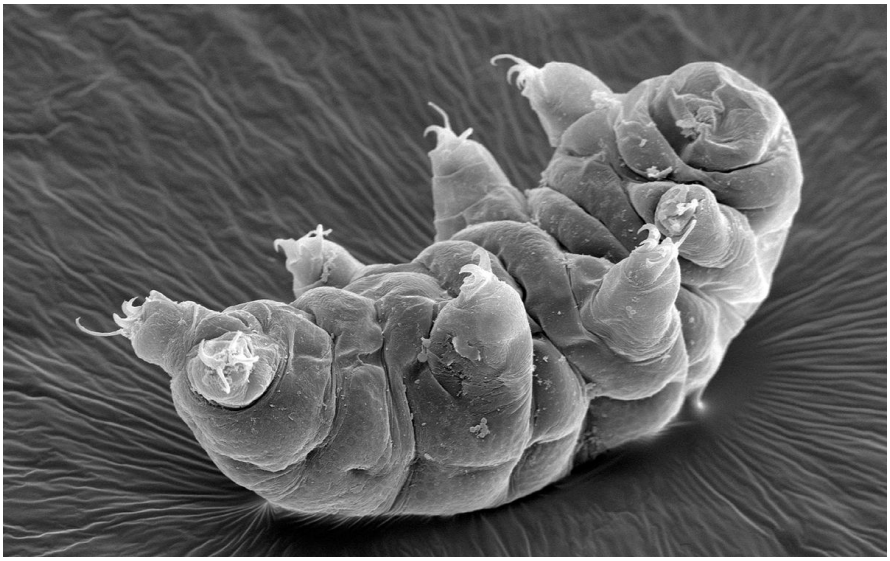
تاردیگرید[1] در زبان عامیانه و محلی، تحت عنوان خرس آبی و یا خوکچه خزه‌ای شناخته می‌شود [۹]. آنها جزو شاخه‌ی ریز–جانوران هشت‌پای قطعه قطعه می‌باشند [۱۰]؛ احتمالا این موجود در سال ۱۷۷۳ میلادی شناسایی و توصیف، و سپس در سال ۱۷۷۷، تاردیگریدا[2]، به معنای آهسته‌گامان، نامیده شده‌اند [۱۱]. آنها در مناطق مختلف بیوسفر[3] از قله کوه‌ها گرفته تا اعماق دریاها، جنگل‌های بارانی استوایی و حتی قطب جنوب یافت شده‌اند. تاردیگریدها یکی از انعطاف‌پذیرترین و سازگارترین جانوران شناخته شده هستند [۱۲]. گونه‌هایی منحصر به فرد هستند که می‌توانند در شرایط بسیار سخت زنده بمانند [۱۰]. تاردیگریدها همچنین پس از این که در معرض فضای خارجی کره زمین قرار گرفتند توانایی بقا داشتند و از این آزمایش‌ها نیز جان سالم به در برده‌اند [۱۳]. حدود ۱۳۰۰ گونه شناخته شده در شاخه تاردیگریدها وجود دارد که بخشی از ابرشاخه[4] اکدیسوزوآ[5] می‌باشد؛ این ابرشاخه متشکل از جانورانی مانند بندپایان[6] و نماتودها[7] است که توسط پدیده اکدیسیس[8] رشد می‌کنند. اولین اعضای حقیقی شناخته شده متعلق به این گروه در کهربایی مربوط به دوران کرتاسه[9] (۱۴۵ تا ۶۶ میلیون سال پیش) و در آمریکای شمالی یافت شدند؛ احتمالاً منشأ اولیه‌ی آنها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای قدمتی بیشتر دارد. نزدیک‌ترین خویشاوندان آن منشأ اولیه مربوط به دوران کامبرین[10] (بیش از ۵۰۰ میلیون سال پیش) می‌باشد [۱۴].

[1] Tardigrade
[2] Tardigrada
[3] Biosphere
[4] Superphylum
[5] Ecdysozoa
[6] Arthropods
[7] Nematodes
[8] Ecdysis
[9] Cretaceous
[10] Cambrian

معمولاً در صورتی‌که تاردیگریدها به‌طور کامل رشد کنند، حدود نیم میلی‌متر طول خواهند داشت. آنها کوتاه و فربه بوده، بدن پنج بخشی شامل چهار قطعه مجزا به‌علاوه قطعه سر دارند. هر کدام از آن چهار بخش دارای یک جفت پا می‌باشد؛ هر یک از پاها به تعدادی پنجه (معمولاً چهار تا هشت) یا دیسک مکشی ختم می‌شود. بدن تاردیگرید حدودا از ۱۰۰۰ سلول تشکیل شده و دارای اندام‌های کوچک در آناتومی مخصوص خود می‌باشد [۱۵]. تاردیگریدها در خزه‌ها و گلسنگ‌ها به وفور یافت می‌شوند و از سلول‌های گیاهی، جلبک‌ها و بی‌مهرگان کوچک‌تر تغذیه می‌کنند. در فرایند جمع‌آوری، می‌توان آنها را زیر یک میکروسکوپ با بزرگنمایی کم نیز مشاهده کرد [۱۶]. شکل ۱ آناتومی داخلی عمومی این جانور را نشان داده است. شکل ۲، تصویر حقیقی یک تاردیگرید را در زیر میکروسکوپ الکترونی نشان داده است.



شکل ۱: آناتومی داخلی تاردیگرید؛ نمای جانبی.



شکل ۲: تصویر حقیقی یک تاردیگرید زیر میکروسکوپ الکترونی؛ تصویر از وب‌سایت LiveScience آورده شده‌است.

تاردیگرید: سازگاری‌های تکاملی

تاردیگریدها توانایی بالایی در تحمل شرایط محیطی بسیار سخت دارند و از مکانیسم کریپتوبیوزیس[۱] برای بقا در شرایط نامطلوب استفاده می‌کنند [۱۷]. در زبان یونانی crypto به معنی پنهان نمودن و biosis به‌معنی حالت زندگی است. کریپتوبیوزیس شامل چهار حالت اصلی است: آنهیدروبیوزیس[۲] (خشکی)، کرایوبیوزیس[۳] (انجماد)، آنوکسی‌بیوزیس[۴] (کمبود اکسیژن)، و اسموبیوزیس[۵] (غلظت نمک بالا) [۱۸]. از میان این حالت‌ها، آنهیدروبیوزیس و کرایوبیوزیس بیشتر مطالعه شده‌اند. در حالت آنهیدروبیوزیس، تاردیگریدها به ساختاری به نام تون[۶] وارد می‌شوند که با انقباض بدن و تنظیم فعال همراه است و به آنها امکان بقا در شرایط خشک، یخ‌زدگی، و مواجهه با مواد شیمیایی سمی را می‌دهد [۱۹-۲۱]. این موجودات دارای مکانیسم‌های حفاظتی پیشرفته‌ای هستند که شامل سنتز کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌های خاص، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ترمیم DNA می‌شوند. علاوه‌بر کریپتوبیوزیس، برخی از تاردیگریدها وارد حالت دیاپوز[۷] می‌شوند که شامل تشکیل کیست‌ها است و به این وسیله در برابر شرایط محیطی خیلی سخت مقاوم می‌باشند [۱۷،۲۲]. حتی در حالت فعال، تاردیگریدها می‌توانند نوسانات شوری و دمای بسیار پایین را تحمل کنند، مانند گونه *هالوبیوتوس کریسپا*[۸] که تا منفی ۲۰ درجه سانتی‌گراد زنده می‌ماند [۲۰].

کریپتوبیوزیس به حالتی متابولیک و برگشت‌پذیر اشاره دارد که موجودات زنده در شرایط محیطی نامساعد مانند خشکی یا انجماد به آن وارد می‌شوند تا زنده بمانند. یکی از انواع آن، آنهیدروبیوزیس است که در مواجهه با خشکی رخ می‌دهد و در آن موجودات از طریق مکانیسم‌هایی مانند کاهش آب بدن به بقای خود کمک می‌کنند [۲۲]. کرایوبیوزیس نیز نوعی دیگر از کریپتوبیوزیس است که در دماهای بسیار پایین و یخ‌زدگی به کار می‌رود. در مقابل، آنوکسی‌بیوزیس برای مقابله با کمبود اکسیژن و اسموبیوزیس برای مواجهه با غلظت بالای نمک به‌کار می‌روند [۲۳]. در این شرایط، تاردیگریدها ساختاری به نام تون را ایجاد می‌کنند که یک حالت فشرده شده از بدن آنها است و در پاسخ به خشکی یا شرایط سخت ایجاد می‌شود. برخی از گونه‌ها به جای کریپتوبیوزیس وارد مرحله دیاپوز می‌شوند، که نوعی استراحت طولانی‌مدت است و آنها را از طریق تشکیل کیست‌ها در برابر شرایط نامساعد محافظت می‌کند [۲۴]. سیکلومورفوزیس[۹] به تغییرات فصلی مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی اشاره دارد که در برخی گونه‌ها برای تحمل شرایط سخت محیطی رخ می‌دهد، مشابه آنچه در لاروهای داوئر[۱۰] *سینورابتیدیس الگانس*[۱۱] دیده می‌شود [۲۵].

علاوه بر گونه‌های کریپتوبیوتیک تاردیگرید که تشکیل ساختار تون را در آنها مشاهده می‌کنیم، گونه‌هایی را نیز می‌یابیم که انواع کیست‌ها را تشکیل می‌دهند و وارد فرایند دیاپوز می‌شوند. نکته

---

[۱] کریپتوبیوزیس (Cryptobiosis): یک حالت متابولیک برگشت‌پذیر در تاردیگریدها و برخی موجودات دیگر که در شرایط محیطی ناگوار مانند خشکی، انجماد یا کمبود اکسیژن رخ می‌دهد. در این حالت، فعالیت زیستی متوقف شده و موجود تا بهبود شرایط محیطی زنده می‌ماند.

[2] Anhydrobiosis

[3] Cryobiosis

[4] Anoxybiosis

[5] Osmobiosis

[۶] تون (Tun): حالتی در تاردیگریدها که بدن آنها برای مواجهه با شرایط سخت مانند خشکی یا دماهای پایین به شدت منقبض شده و آب بدن به حداقل می‌رسد. این مکانیسم به آنها امکان زنده ماندن در شرایط نامساعد را می‌دهد و با کاهش فعالیت‌های زیستی مرتبط است.

[۷] دیاپوز (Diapause): حالتی از استراحت طولانی‌مدت در برخی موجودات زنده، از جمله تاردیگریدها، که به تشکیل کیست‌ها و مقاومت در برابر شرایط محیطی سخت منجر می‌شود.

[8] Halobiotus crispae

[۹] سیکلومورف (Cyclomorphosis): تغییرات فصلی مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی که برای تطبیق با شرایط محیطی سخت در موجودات رخ می‌دهد. در تاردیگریدها، این تغییرات شامل شکل‌گیری حالت‌های مقاوم به انجماد است.

[۱۰] Dauer larvae: یک مرحله خاص در چرخه زندگی کرم‌های نماتود مانند Caenorhabditis elegans است که در پاسخ به شرایط نامطلوب محیطی، مانند کمبود غذا، تراکم بالای جمعیت یا استرس، ایجاد می‌شود. در این مرحله، لاروها رشد و تولیدمثل خود را متوقف کرده و به حالتی مقاوم در برابر خشکی، گرسنگی و استرس وارد می‌شوند. این مرحله با تغییرات متابولیکی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی همراه است که به بقا در شرایط سخت کمک می‌کند. زمانی که شرایط محیطی بهبود یابد، لاروها می‌توانند از این مرحله خارج شده و به رشد طبیعی خود ادامه دهند.

[11] Caenorhabditis elegans

مهم این است که نشان داده شده است که تاردیگریدها حتی در حالت فعال خود به‌شدت نسبت به استرس محیطی مقاوم هستند. برخلاف مطالعات نسبتاً کمی که روی فیزیولوژی طبیعی تاردیگریدها انجام شده است پاسخ‌های فراوانی توسط محققین در مورد این که چگونه آنها این افراط‌ها را تحمل می‌کنند داده شده است. گزارش شده است که تاردیگرید ساحلی *هالوبیوتوس کریسپا* نوسانات زیاد شوری خارجی را می‌تواند کنترل کند و تا دمای حدود منهای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در مرحله فعال خود از انجماد جلوگیری می‌کند. در این گونه نوعی تغییرات چرخه‌ای فصلی در مورفولوژی و فیزیولوژی به عنوان سیکلومورفوزیس مشاهده می‌شود؛ این تغییر یکی از مراحل سیکلومورفیک مقاومت و تحمل در برابر یخ‌زدگی است [۲۶]. تغییرات مورفولوژیکی که در طول سیکلومورفوزیس در تاردیگرید ساحلی *هالوبیوتوس کریسپا* رخ می‌دهد از بسیاری جهات شبیه به تشکیل لاروهای داوئر در *سینورابتیدیس الگانس* است [۲۶].

کریپتوبیوزیس در تاردیگریدها

تاردیگرید *ریکترسیوس کورونیفر*[1] که به‌عنوان «خرس آبی زرد غول‌پیکر» شناخته می‌شود، می‌تواند شرایط بسیار سخت مانند خشکی شدید، خلاء فضایی، و دماهای بسیار پایین (تا ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد) را تحمل کند [۲۷]. این موجود در حالت تون، که در آن بدن منقبض شده و آب بدن کاهش می‌یابد، مقاومت بیشتری در برابر این شرایط نشان می‌دهد. با این حال، در دماهای بالاتر از ۷۰ درجه سانتی‌گراد، بقا کاهش می‌یابد و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد هیچ نمونه‌ای زنده نمی‌ماند [۲۸]. طول عمر تاردیگریدها در حالت آنهیدروبیوتیک حدود ۵ سال است که کمتر از برخی گونه‌های دیگر است [۲۹]. آسیب به DNA و مولکول‌های دیگر در طی دوره‌های خشکی باعث کاهش طول عمر کریپتوبیوتیک می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که متابولیسم آنتی‌اکسیدانی نقش مهمی در مقابله با آسیب‌های اکسایشی ناشی از کم‌آبی دارد و هر چه مدت بیشتری در حالت بی‌آبی سپری شود، آسیب به DNA افزایش یافته و زمان بازیابی پس از آب‌رسانی طولانی‌تر می‌شود [۳۰]. تون حالتی است که در آن تاردیگریدها بدن خود را منقبض کرده و آب بدنشان را به‌شدت کاهش می‌دهند تا در برابر شرایط محیطی سخت مانند خشکی یا دماهای بسیار پایین مقاومت کنند [۳۱]. این حالت مرتبط با آنهیدروبیوتیک است که به توانایی موجودات برای بقا در شرایط خشکی شدید با کاهش آب بدن اشاره دارد. کریپتوبیوزیس نیز یک حالت متابولیک برگشت‌پذیر است که موجودات در پاسخ به شرایط نامطلوب مانند خشکی، انجماد، یا کمبود اکسیژن به آن وارد می‌شوند [۳۲]. در این حالت، تاردیگریدها با کاهش فعالیت‌های زیستی خود، زنده می‌مانند. متابولیسم آنتی‌اکسیدانی نیز فرآیندی است که موجودات از طریق آن با تولید آنزیم‌ها و مواد محافظ، از سلول‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از رادیکال‌های آزاد و اکسایش، به ویژه در زمان کم‌آبی یا شرایط استرس‌زا محافظت می‌کنند [۳۳].

تجمع ترهالوز

مطالعات نشان می‌دهند که کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌های خاص نقش مهمی در محافظت از سلول‌ها در طی ورود و خروج از حالت کریپتوبیوزیس دارند. ترهالوز[2]، نوعی دی‌ساکارید، در برخی بی‌مهرگان کریپتوبیوتیک مانند میگوی آب شور *آرتمیا فرانسیسکانا*[3] و برخی تاردیگریدها انباشته می‌شود [۳۴] و به‌عنوان تثبیت‌کننده مولکولی در زمان خشکی عمل می‌کند [۳۵]. این ماده با جایگزینی آب و تشکیل ساختارهای شیشه‌ای از سلول‌ها محافظت می‌کند. با این حال، میزان ترهالوز در تاردیگریدها متغیر است و در برخی گونه‌ها بسیار کم یا حتی غیرقابل اندازه‌گیری است [۳۴]. این نشان می‌دهد که تجمع ترهالوز یک مکانیسم حفاظتی عمومی برای ورود به کریپتوبیوزیس در تمام تاردیگریدها نیست [۳۵]. ترهالوز یک اسمولیت و پایدار کننده ساختار پروتئین‌ها و آنزیم‌ها است [۳۶].

بیان پروتئین‌های شوک حرارتی

فرایند کریپتوبیوزیس به سنتز چاپرون‌های[4] مولکولی از جمله پروتئین‌های شوک حرارتی (HSP) وابسته است که در تا شدن صحیح پروتئین‌ها و حفاظت از آنها در برابر استرس نقش دارند.

[1] Richtersius coronifer

[2] Trehalose

[3] Artemia franciscana

[4] چاپرون (Chaperone): پروتئین‌هایی که در تاردیگریدها و دیگر موجودات، در پاسخ به استرس، مانند خشکی یا دماهای بالا، تولید می‌شوند. این پروتئین‌ها از تخریب سایر پروتئین‌ها جلوگیری کرده و به تا شدن صحیح آن‌ها کمک می‌کنند.

محققان بیان متفاوت ایزوفرم‌های Hsp70 و Hsp90 را در گونه‌های مختلف تاردیگریدها طی آنهیدروبیوزیس بررسی کردند. نتایج نشان داد که تنها برخی از این پروتئین‌ها در پاسخ به خشک شدن یا استرس‌های محیطی تنظیم می‌شوند و نقش محدودی در بقای کریپتوبیوتیک دارند. علاوه‌بر HSPها، پروتئین‌های LEA نیز به‌عنوان محافظ‌های زیستی مهم مطرح شده‌اند، اما تحقیقات بیشتری برای درک دقیق مکانیسم‌های کریپتوبیوزیس لازم است [۳۵، ۳۷-۳۹].

بقای غیرکریپتوبیوتیک در تاردیگریدها

تاردیگریدها بیشتر به توانایی‌هایشان در مواجهه با شرایط محیطی سخت و ورود به حالت کریپتوبیوزیس شناخته می‌شوند، اما کمتر به توانایی حفظ متابولیسم و فعالیت آنها در شرایط ناپایدار محیطی پرداخته شده است. تاردیگریدها جانورانی آبزی هستند که برای تغذیه و تولیدمثل به آب وابسته‌اند و در محیط خاک تنها با ورود به حالت کریپتوبیوتیک قادر به بقا هستند. همچنین، تاردیگریدهای خاکی که می‌توانند وارد حالت تون شوند، ممکن است در مواجهه با شرایط محیطی سخت مانند مواد شیمیایی، این سازوکار را فعال کنند؛ شرایطی که گونه‌های دریایی را به کریپتوبیوزیس نیازمند نمی‌کند.

مقاومت در برابر پرتوها

بررسی‌ها نشان داده‌اند که تاردیگریدها مانند *ریکترسیوس کرونیفر* و *میلنسیوم تاردیگریدیوم*[1] توانایی بالایی در تحمل دوزهای بالای پرتوهای گاما و یون‌های سنگین دارند. جانوران در هر دو حالت هیدراته و خشک می‌توانند دوزهای تا ۸ کیلوگرم را تحمل کنند، که این مقاومت به مکانیسم‌های کارآمد ترمیم DNA نسبت داده شده و به محافظت‌های بیوشیمیایی حالت کریپتوبیوتیک وابسته نیست. همچنین مطالعات مرتبط با ماموریت BIOPAN 6/Foton-M3نشان داد که تاردیگریدها می‌توانند در برابر شرایط سخت فضای خارج از جو زنده بمانند و *میلنسیوم تاردیگریدیوم* به‌عنوان مقاوم‌ترین گونه شناخته شده است [۲۹، ۴۰-۴۱].

تنظیم اسمزی

تحقیقات روی تاردیگرید *هالوبیوتوس کریسپا* نشان داده که این موجود می‌تواند در برابر نوسانات شدید شوری و دما مقاومت کند، بدون ورود به حالت کریپتوبیوزیس. برخلاف دیگر تاردیگریدهای کریپتوبایونت، *هالوبیوتوس کریسپا* با مصرف انرژی و تنظیم اسمزی در حالت فعال به شرایط افراطی پاسخ می‌دهد. این جاندار همچنین مرحله‌ای به نام P1[2] دارد که در آن به یخ‌زدگی مقاوم است، اما نمی‌تواند دماهای زیر منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند. تحقیقات نشان داده‌اند که مقاومت این تاردیگرید به نوسانات محیطی ناشی از تنظیم اسمزی و کنترل حجمی است، و با تغییرات شدید شوری و دما نیز مقابله می‌کند. مکانیسم‌های مورد استفاده تاردیگریدها برای بقا در شرایط افراطی سرنخ‌هایی برای درک پدیده کریپتوبیوزیس ارائه می‌دهند، که همچنان یک معمای زیستی باقی‌مانده است [۴۲].

تاردیگرید: گستره تحمل شرایط بحرانی

در این قسمت جزئیاتی در مورد دامنه تحمل دما، اسیدیته، شوری، فشار و تشعشاتی که تاردیگریدها می‌توانند در آن شرایط از خود مقاومت نشان داده و زنده بمانند، آورده شده است. اگرچه تاردیگریدها می‌توانند در طیف وسیعی از دما زنده بمانند، محدوده دمای ایده‌آل آنها برای زندگی فعال بین ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۴۳]. تاردیگریدها در محیط‌هایی بسیار اسیدی و بسیار قلیایی یافت شده‌اند. آنها می‌توانند محیط‌های دارای سطح pH پایین که به‌دلیل باران اسیدی ایجاد شده است را نیز تحمل کنند [۴۴]. همچنین تاردیگریدها در طیف وسیعی از سطوح شوری زنده می‌مانند. آنها را می‌توان در آب‌های شیرین، آب دریا و حتی محیط‌های بسیار شور مانند نمک‌دان‌ها یافت. آنها می‌توانند سطح شوری را تا ۱۰۰۰ برابر بیش‌تر از شوری آب دریا تحمل کنند [۴۵]. تاردیگریدها در محیط‌هایی با فشار بالا و پایین نیز یافت شده‌اند. آنها می‌توانند فشارهایی تا ۶۰۰۰ اتمسفر را تحمل کنند، که شش برابر فشار در گودال ماریانا[3]، عمیق‌ترین قسمت اقیانوس است [۲۱]. تاردیگریدها به‌دلیل توانایی خود برای زنده ماندن در سطوح بالای تشعشع شناخته می‌شوند. آنها می‌توانند در دوزهای

[1] Milnesium tardigradum

[2] مرحله P1: حالتی در تاردیگریدهای خاص، مانند Halobiotus crispae، که در آن موجود به یخ‌زدگی مقاوم است، اما نمی‌تواند دماهای بسیار پایین‌تر از منهای ۸۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند. این حالت به تنظیم اسمزی مرتبط است.

[3] Mariana

تشعشعات تا ۵۰۰۰ گری زنده بمانند که هزاران برابر بیشتر از دوز کشنده آن برای انسان است [۴۶].

جدول ۱. گستره تحمل شرایط بحرانی تاردیگریدها.

پارامتر	گستره مقاومت	رفرنس
دما	۲۷۲- تا ۱۵۱ درجه سانتی‌گراد	[۳۷]
اسیدیته (pH)	۱.۲ تا ۱۰.۵	[۳۸]
شوری	۳۵۰۰۰ppt	[۳۸]
فشار	۶۰۰۰ atm	[۱۸]
تشعشعات	۵۰۰۰ Gy	[۲۷]

توجه به این نکته مهم است که محدوده شرایطی که تاردیگریدها می‌توانند در آن زنده بمانند بسته به گونه و سازگاری خاص هر یک از آنها ممکن است متفاوت باشد. با این حال، به‌طور کلی، تاردیگریدها به‌صورتی باورنکردنی انعطاف‌پذیر هستند و توانسته‌اند با طیف وسیعی از محیط‌ها و شرایط محیطی سازگار شوند.

انسان و شاخص توسعه انسانی:

شاخص توسعه انسانی یا همان HDI[1] میزانی از توسعه و پیشرفت انسان‌ها است که در سال ۱۹۹۰ مطرح شده‌است. شاخص توسعه انسانی برای فراهم کردن مقیاس دقیق‌تری از سلامتی و حال خوش طراحی شده است. شاخص توسعه انسانی دقت بیشتری نسبت به شاخص‌های اقتصادی قدیمی‌تر مانند تولید ناخالص داخلی[2] دارد. این دقت به واسطه ورود معادلات عواملی مانند تحصیلات، تندرستی و استانداردهای زندگی می‌باشد[۴۷]. البته معیارهای تعریف شده برای شاخص توسعه انسانی دارای انتقاداتی می‌باشند که این موارد از دیدگاه‌های مختلف قابل بحث است.

نتیجه‌گیری

تاردیگریدها و شاخص توسعه انسانی به عنوان دو مفهوم مستقل با هم شباهت‌ها و تفاوت‌های زیادی دارند. هر دو با مفهوم تاب‌آوری مرتبط هستند ولی در سطح و سیستم‌های مختلف به‌کار می‌روند. هر دو نشان دهنده انعطاف‌پذیری و سازگاری در برابر چالش‌های گوناگون هستند ولی با استفاده از معیارهای مختلف سنجش می‌شوند. هر دو دارای قابلیت بهبود و ارتقاء هستند؛ اما با روش‌های مختلف. در نهایت، هر دو به شیوه خود، به نوعی نشان دهنده قدرت و توانایی زنده ماندن در شرایط سخت هستند. با توجه به این که در اکثر موارد الگو و الهام‌گرفتن از قوانین طبیعت به بهبود کارایی و نوآوری منجر می‌شود، و از توان زیادی که تاردیگرید در نحوه مقاومت و تاب‌آوری دارد می‌توان برای بازنگری در شاخص‌های توسعه انسانی کمک گرفت.

انسان همیشه و در طول تاریخ با نگاه به طبیعت و تفسیر قوانین الهی و حکمت‌های آن توانسته است دست به اختراعات و نوآوری‌های مهم بزند و توانا در پیش‌بینی اتفاقات باشد؛ به عبارتی انسان با داشتن علم و حکمت می‌تواند از طبیعت که صنع الهی است الگوبرداری نماید و به‌عنوان سبک زندگی از آن بهره‌مند شود. دوری نسبی انسان امروز از طبیعت و فطرت اصل خویش باعث به وجود آمدن اختلالات ناشناخته جسمی و روانی شده است [۴۸]. انسان می‌باید از فطرت اصیل خود شناخت پیدا کند و از هم‌گامی با فطرت و طبیعت بهره‌مند شود و بر مبنای الهام از طبیعت برای آموزش و پرورش انسان از آن بهره‌برداری نماید. تاب‌آوری و سازگاری محیطی تاردیگریدها از مسیر طولانی تکامل عبور نموده است و به‌طور غریزی تابع قوانین الهی که در تکامل جاری است این توانایی را به‌دست آورده است. لذا انسان برای الگوبرداری از طبیعت می‌باید از قوانین الهی نهفته در طبیعت، شناخت پیدا نماید تا بتواند از جاندار سخت دوستی مانند تاردیگرید برای توانا ساختن خود بهره‌برداری نماید. آنچه در زمین و آسمان‌ها است خلقت الهی است که همگی حق و درست است اما دسترسی به شناخت ملکوتی آنها نیاز به انسان دانا و توانا دارد که بتواند با ضمیر متعالی در اشیا و پدیده‌ها غواصی نماید. این دیدگاه می‌تواند انسان توسعه یافته را پرورش دهد که با دیدگاه امروز شاخص‌های توسعه انسانی تفاوت دارد.

فهرست منابع

[1]. T. Järvilehto, “The theory of the organism-environment system: I. Description of the theory,” *Integrative Physiological and Behavioral Science*

[1] Human Development Index (HDI)

[2] Gross Domestic Product (GDP)

1998 33:4, vol. 33, no. 4, pp. 321–334, 1998, doi: 10.1007/BF02688700.

[2]. صدیقه عابدان زاده؛ علی اکبر موسوی موحدی، "نقش دانش زیست الگو (بیومیمتیک) در زندگی بشر" نامه علوم پایه (فرهنگستان علوم)، مجلد ۲-۳، صفحات ۱۸۸-۱۹۴، سال ۱۴۰۰.

[3]. علی اکبر موسوی موحدی، "زیست الگو: همگرایی در علم و حکمت" نشریه نشا علم، مجلد۴، شماره ۱، صفحات ۶-۹، سال ۱۳۹۲.

[4]. Y. Uchiyama, E. Blanco, and R. Kohsaka, "Application of Biomimetics to Architectural and Urban Design: A Review across Scales," *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 9813*, vol. 12, no. 23, p. 9813, Nov. 2020, doi: 10.3390/SU12239813.

[5]. S. D. Kocher, R. Mallarino, B. E. R. Rubin, D. W. Yu, H. E. Hoekstra, and N. E. Pierce, "The genetic basis of a social polymorphism in halictid bees," *Nature Communications 2018 9:1*, vol. 9, no. 1, pp. 1–7, Oct. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06824-8.

[6]. N. Kasianchuk, P. Rzymski, and Ł. Kaczmarek, "The biomedical potential of tardigrade proteins: A review," *Biomedicine & Pharmacotherapy*, vol. 158, p. 114063, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.BIOPHA.2022.114063.

[7]. S. Giwa *et al.*, "The promise of organ and tissue preservation to transform medicine," *Nature Biotechnology 2017 35:6*, vol. 35, no. 6, pp. 530–542, Jun. 2017, doi: 10.1038/nbt.3889.

[8]. C. I. Biggs, T. L. Bailey, Ben Graham, C. Stubbs, A. Fayter, and M. I. Gibson, "Polymer mimics of biomacromolecular antifreezes," *Nature Communications 2017 8:1*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, Nov. 2017, doi: 10.1038/s41467-017-01421-7.

[9]. A. Gagyi-Palffy and L. C. Stoian, "A short review on tardigrades–some lesser-known taxa of polyextremophilic invertebrates," *Extreme Life Biospeology Astrobiol*, vol. 3, no. 1, pp. 13–26, 2011.

[10]. F. Olivieri, F. Prattichizzo, F. Lattanzio, A. R. Bonfigli, and L. Spazzafumo, "Antifragility and Antiinflammaging: can they play a role for a healthy longevity?" *Ageing Res Rev*, p. 101836, 2022.

[11]. A. Verkhratsky, "Early evolutionary history (from bacteria to hemichordata) of the omnipresent purinergic signalling: A tribute to Geoff Burnstock inquisitive mind," *Biochem Pharmacol*, vol. 187, p. 114261, 2021.

[12]. J. Schenk and D. Fontaneto, "Biodiversity analyses in freshwater meiofauna through DNA sequence data," *Hydrobiologia*, vol. 847, no. 12, pp. 2597–2611, 2020.

[13]. C. Hesgrove and T. C. Boothby, "The biology of tardigrade disordered proteins in extreme stress tolerance," *Cell Communication and Signaling*, vol. 18, pp. 1–15, 2020.

[14]. R. Guidetti and R. Bertolani, "Tardigrade taxonomy: an updated check list of the taxa and a list of characters for their identification," *Zootaxa*, vol. 845, no. 1, pp. 1–46, 2005.

[15]. D. R. Nelson, "Current status of the Tardigrada: evolution and ecology," *Integr Comp Biol*, vol. 42, no. 3, pp. 652–659, 2002.

[16]. M. M. McFatter, H. A. Meyer, and J. G. Hinton, "Nearctic freshwater tardigrades: a review," *J Limnol*, vol. 66, p. 84, 2007.

[17]. J. C. Wright, "Cryptobiosis 300 years on from van Leuwenhoek: what have we learned about tardigrades?" *Zoologischer Anzeiger-A Journal of Comparative Zoology*, vol. 240, no. 3–4, pp. 563–582, 2001.

[18]. J. H. Crowe, F. A. Hoekstra, and L. M. Crowe, "Anhydrobiosis," *Annu Rev Physiol*, vol. 54, no. 1, pp. 579–599, 1992.

[19]. P. Westh, J. Kristiansen, and A. Hvidt, "Ice-nucleating activity in the freeze-tolerant tardigrade Adorybiotus coronifer," *Comp Biochem Physiol A Physiol*, vol. 99, no. 3, pp. 401–404, 1991.

[20]. R. O. Schill, "Anhydrobiotic abilities of tardigrades," *Dormancy and resistance in harsh environments*, pp. 133–146, 2010.

[21]. K. I. Jönsson, E. Rabbow, R. O. Schill, M. Harms-Ringdahl, and P. Rettberg, "Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit," *Current biology*, vol. 18, no. 17, pp. R729–R731, 2008.

[22]. N. Møbjerg, A. Jørgensen, J. Eibye-Jacobsen, K. A. Halberg, D. Persson, and R. M. Kristensen, "New records on cyclomorphosis in the marine eutardigrade Halobiotus crispae (Eutardigrada: Hypsibiidae)," *J Limnol*, vol. 66, p. 132, 2007.

[23]. D. D. Horikawa *et al.*, "Radiation tolerance in the tardigrade Milnesium tardigradum," *Int J Radiat Biol*, vol. 82, no. 12, pp. 843–848, 2006.

[24]. K. A. Halberg, D. Persson, N. Møbjerg, A. Wanninger, and R. M. Kristensen, "Myoanatomy of the marine tardigrade Halobiotus crispae (Eutardigrada: Hypsibiidae)," *J Morphol*, vol. 270, no. 8, pp. 996–1013, 2009.

[25]. A. M. Burnell, K. Houthoofd, K. O'Hanlon, and J. R. Vanfleteren, "Alternate metabolism during the dauer stage of the nematode Caenorhabditis elegans," *Exp Gerontol*, vol. 40, no. 11, pp. 850–856, 2005.

[26]. R. M. Kristensen, "The first record of cyclomorphosis in Tardigrada based on a new genus and species from Arctic meiobenthos 1," *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, vol. 20, no. 4, pp. 249–270, 1983.

[27]. U. Fritz *et al.*, "Mitochondrial phylogeography and subspecies of the wide-ranging sub-Saharan leopard tortoise Stigmochelys pardalis (Testudines: Testudinidae)–a case study for the pitfalls of pseudogenes and GenBank sequences," *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, vol. 48, no. 4, pp. 348–359, 2010.

[28]. K. I. Jönsson, S. Borsari, and L. Rebecchi, “Anhydrobiotic survival in populations of the tardigrades Richtersius coronifer and Ramazzottius oberhaeuseri from Italy and Sweden,” *Zoologischer Anzeiger-A Journal of Comparative Zoology*, vol. 240, no. 3–4, pp. 419–423, 2001.
[29]. K. Ingemar Jönsson, M. Harms-Ringdahl, and J. Torudd, “Radiation tolerance in the eutardigrade Richtersius coronifer,” *Int J Radiat Biol*, vol. 81, no. 9, pp. 649–656, 2005.
[30]. A. Jørgensen, N. Møbjerg, and R. M. Kristensen, “A molecular study of the tardigrade Echiniscus testudo (Echiniscidae) reveals low DNA sequence diversity over a large geographical area,” *J Limnol*, vol. 66, p. 77, 2007.
[31]. H. Ramløv and P. Westh, “Cryptobiosis in the eutardigrade Adorybiotus (Richtersius) coronifer: tolerance to alcohols, temperature and de novo protein synthesis,” *Zoologischer Anzeiger-A Journal of Comparative Zoology*, vol. 240, no. 3–4, pp. 517–523, 2001.
[32]. P. Westh and R. M. Kristensen, “Ice formation in the freeze-tolerant eutardigrades Adorybiotus coronifer and Amphibolus nebulosus studied by differential scanning calorimetry,” *Polar Biol*, vol. 12, pp. 693–699, 1992.
[33]. A. M. Rizzo *et al.*, “Antioxidant defences in hydrated and desiccated states of the tardigrade Paramacrobiotus richtersi,” *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol*, vol. 156, no. 2, pp. 115–121, 2010.
[34]. J. S. Clegg, “The origin of threhalose and its significance during the formation of encysted dormant embryos of Artmia salina,” *Comp Biochem Physiol*, vol. 14, no. 1, pp. 135–143, 1965.
[35]. J. S. Clegg, “Cryptobiosis—a peculiar state of biological organization,” *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol*, vol. 128, no. 4, pp. 613–624, 2001.
[36]. E. Sharifi *et al.*, “Inhibitory effects of beta-cyclodextrin and trehalose on nanofibril and AGE formation during glycation of human serum albumin,” *Protein Pept Lett*, vol. 16, no. 6, pp. 653–659, Jun. 2009, doi: 10.2174/092986609788490212.
[37]. A. H. Warner *et al.*, “Evidence for multiple group 1 late embryogenesis abundant proteins in encysted embryos of Artemia and their organelles,” *The Journal of Biochemistry*, vol. 148, no. 5, pp. 581–592, 2010.
[38]. E. Schokraie *et al.*, “Proteomic analysis of tardigrades: towards a better understanding of molecular mechanisms by anhydrobiotic organisms,” *PLoS One*, vol. 5, no. 3, p. e9502, 2010.
[39]. A. Reuner *et al.*, “Stress response in tardigrades: differential gene expression of molecular chaperones,” *Cell Stress Chaperones*, vol. 15, pp. 423–430, 2010.
[40]. L. Rebecchi, M. Cesari, T. Altiero, A. Frigieri, and R. Guidetti, “Survival and DNA degradation in anhydrobiotic tardigrades,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 212, no. 24, pp. 4033–4039, 2009.
[41]. A. C. Suzuki, “Life history of Milnesium tardigradum Doyère (Tardigrada) under a rearing environment,” *Zoolog Sci*, vol. 20, no. 1, pp. 49–57, 2003.
[42]. K. A. Halberg, D. Persson, H. Ramløv, P. Westh, R. M. Kristensen, and N. Møbjerg, “Cyclomorphosis in Tardigrada: adaptation to environmental constraints,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 212, no. 17, pp. 2803–2811, 2009.
[43]. R. Guidetti, T. Altiero, and L. Rebecchi, “On dormancy strategies in tardigrades,” *J Insect Physiol*, vol. 57, no. 5, pp. 567–576, May 2011, doi: 10.1016/J.JINSPHYS.2011.03.003.
[44]. C. Johansson, S. Calloway, W. R. Miller, and E. T. Linder, “Are urban and rural tardigrade (Tardigrada) communities distinct and determined by pH: a case study from Fresno County, California,” *Pan-Pac Entomol*, vol. 87, no. 2, pp. 86–97, 2011.
[45]. D. D. Horikawa, “Survival of tardigrades in extreme environments: a model animal for astrobiology,” in *Anoxia: evidence for eukaryote survival and paleontological strategies*, Springer, 2011, pp. 205–217.
[46]. G. Horneck *et al.*, “Microbial rock inhabitants survive hypervelocity impacts on Mars-like host planets: first phase of lithopanspermia experimentally tested,” *Astrobiology*, vol. 8, no. 1, pp. 17–44, 2008.
[47]. R. J. Barro and J.-W. Lee, “A New Data Set of Educational Attainment in the World, 1950-2010,” *Journal of Development Economics*, Apr. 2010, doi: 10.3386/W15902.
[48]. A. A. Moosavi-Movahedi, “Rationality and Scientific Lifestyle for Health,” 2021, Springer, doi: 10.1007/978-3-030-74326-0.

Human Adaptations Inspired by an Extremophile and Resilient Organism:The Tardigrades

Mohammad Hossein Khodabandehloo[1], Ali Akbar Moosavi-Movahedi[1,2,3,*]

This article explores tardigrades, microscopic invertebrates renowned for their resilience to extreme environmental conditions and examines parallels to human resilience and the Human Development Index (HDI). Tardigrades use unique mechanisms like cryptobiosis to survive harsh conditions, including extreme temperatures, dehydration, radiation, and high pressures. In parallel, resilience as a component of HDI reflects a society's ability to face economic and social challenges. This article highlights these organisms' adaptive traits, such as heat shock proteins and DNA repair, as inspiration for human development and offers an alternative view on HDI, proposing that true human development embodies a transcendent understanding of nature's laws, enabling individuals to harness knowledge and faith for societal benefit.

Keywords: Tardigrade, Human Development Index, Transcendental Virtue, Resilience, Extremophile, Nature, Biotechnology.

[*] Corresponding Author, Professor, Tel: +9821-66409517, Fax: +9821-66404680, E-mail: moosavi@ut.ac.ir
[1] Institute of Biochemistry and Biophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] Universal Scientific Education and Research Network (USERN), Institute of Biochemistry and Biophysics (IBB), University of Tehran, Tehran, Iran
[3] Fellow, Iran Academy of Sciences; Fellow, The World Academy of Sciences (TWAS); Fellow Islamic World Academy of Sciences