التیام، دوره ۱۲، شماره ۲: ۶۱-۴۷، ۱۴۰۴ Eltiam 12 (2): 47-61, 2025

التیام
شاپا الکترونیکی:۲۷۸۳۳۲۹۱
eltiam.ivsa@yahoo.com
http://eltiamjournal.ir/

مقاله مروری

نقش و مقایسه‌ی روش‌های تصویربرداری (اولتراسونوگرافی، رادیوگرافی و ترموگرافی فروسرخ) در تشخیص و پایش لنگش در گاوهای شیری

رسول رحیم زاده[۱*]، عرفان افتخار[۲]، عرفان مهماندوست[۲]، کیمیا عظیمی[۲]

۱. گروه علوم بالینی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج، ایران

۲. دانشجوی دکترای دامپزشکی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج.

drtwor@gmail.com*

https://doi.org/10.61882/eltiamj.12.2.4

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸، تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۰۶/۳۱

کپی‌رایت © مجله التیام: دسترسی آزاد؛ کپی‌برداری، توزیع و نشر برای استفاده کامل با ذکر منبع آزاد است، © نویسندگان. ناشر: انجمن جراحی دامپزشکی ایران.

چکیده

زمینه و نوع مطالعه: لنگش یکی از مهم‌ترین مشکلات بهداشتی و اقتصادی در گاوهای شیری است که با کاهش رفاه حیوان، افت تولید شیر و افزایش حذف دام همراه می‌باشد. این مطالعه مروری (Review Study) با هدف بررسی نقش روش‌های تصویربرداری در تشخیص افتراقی، پایش درمان و پیشگیری از لنگش انجام شد.

هدف: هدف اصلی، تحلیل توانمندی‌ها و محدودیت‌های روش‌های مختلف تصویربرداری شامل رادیوگرافی (X-ray)، اولتراسونوگرافی (Ultrasonography)، توموگرافی کامپیوتری (Computed Tomography; CT)، تصویربرداری تشدید مغناطیسی (Magnetic Resonance Imaging; MRI) و ترموگرافی فروسرخ (Infrared Thermography; IRT) در شناسایی ضایعات استخوانی و بافت نرم مرتبط با لنگش بود.

روش کار: این مقاله با مرور نظام‌مند منابع علمی منتشرشده بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵، یافته‌های کلیدی در زمینه کاربرد تصویربرداری در دامپزشکی را گردآوری و تحلیل کرد. تمرکز بر مطالعاتی بود که به ارزیابی دقت تشخیصی، قابلیت پایش درمان و امکان استفاده در شرایط مزرعه پرداخته بودند.

نتایج: اولتراسونوگرافی به دلیل قابلیت استفاده در مزرعه و ارزیابی بافت‌های نرم، به‌عنوان کارآمدترین روش عملی) نسبت کارایی به هزینه (Cost–Effectiveness Ratio) 0.85 شناخته شد .این روش در تشخیص آرتریت سپتیک حساسیت ۰.۹۷ را نشان داد . رادیوگرافی در تشخیص شکستگی‌های فالانژیال و ضایعات مزمن استخوانی نقش اصلی خود را حفظ کرد .ترموگرافی فروسرخ (IRT) به‌عنوان یک ابزار غربالگری غیرتهاجمی و سریع، قادر به تشخیص التهاب (افزایش دمای سطح سم تا حدود ۳۴.۵°C) با حساسیت ۸۰٪ و ویژگی ۹۲.۴٪ بود .روش‌های پیشرفته‌تر CTو MRIبیشترین دقت (۹۵٪ تا ۹۸٪) را در جزئیات ساختاری استخوان و بافت نرم ارائه دادند ، اما استفاده گسترده آن‌ها محدود به موارد پیچیده و پژوهشی است .همچنین، کاهش ضخامت بالشتک انگشتی در اولتراسونوگرافی و MRI با BCSپایین و افزایش ضایعات استخوانی در رادیوگرافی با LSبالا همبستگی معنی‌داری داشت.

نتیجه‌گیری نهایی :ادغام چندین روش تصویربرداری می‌تواند دقت تشخیص و پیش‌آگهی لنگش را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. استفاده از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی در تحلیل تصاویر، آینده‌ای روشن برای پایش خودکار و پیشگیرانه سلامت گاوهای شیری ترسیم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اولتراسونوگرافی، لنگش، رادیوگرافی، ترموگرافی فروسرخ، گاو شیری

مقدمه

لنگش یکی از مهم‌ترین نشانه‌های کلینیکی در حیوانات، به‌ویژه در گاوهای شیری است که با کاهش رفاه، کاهش تولید شیر، و افزایش حذف دام همراه می‌باشد (۱). تشخیص سریع و دقیق علت لنگش برای بهبود پیش‌آگهی و جلوگیری از پیشرفت ضایعات بسیار حیاتی است (۲). در دهه‌های اخیر، روش‌های تصویربرداری به‌عنوان ابزار کلیدی در تشخیص افتراقی، تعیین شدت ضایعات، و برنامه‌ریزی درمانی جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند (۳). این روش‌ها با فراهم کردن داده‌های آناتومیکی و فیزیولوژیکی دقیق، می‌توانند شک بالینی را به یک تشخیص مستند و قابل اطمینان تبدیل کنند (۴).

مروری بر روش‌های تصویربرداری

روش‌های پایه

رادیوگرافی (X-ray) نخستین و در دسترس‌ترین ابزار ارزیابی ساختارهای استخوانی است. این روش به‌ویژه در شناسایی شکستگی‌های فالانژیال، آرتریت، پریوستیت، و نفوذ اجسام خارجی در سم کاربرد دارد (۵، ۶). با وجود محدودیت در تصویربرداری از بافت‌های نرم، رادیوگرافی همچنان ابزار پایه در تشخیص اختلالات اسکلتی محسوب می‌شود (۷).

روش‌های پیشرفته

سونوگرافی (Ultrasound) نقش مهمی در ارزیابی بافت‌های نرم، تاندون‌ها و مفاصل دارد. استفاده از پروب‌های خطی ۷.۵ MHz امکان تشخیص دقیق ضایعات نرم کف سم، آرتریت عفونی و شکستگی‌های بسته استخوان پدال را فراهم می‌سازد (۸، ۹). علاوه بر این، این روش ابزاری مقرون‌به‌صرفه و در دسترس برای بررسی ساختارهای زیرسطحی است (۳).اسکن استخوان (Bone Scan)با حساسیت بالا برای شناسایی ضایعات متابولیک و التهابی مفید است، هرچند در دامپزشکی کمتر در مقایسه با انسان استفاده می‌شود. توموگرافی کامپیوتری (CT) امکان ارزیابی دقیق ساختارهای استخوانی و نواحی آناتومیکی پیچیده مانند مفصل تارسوس را فراهم می‌کند (۱۰). تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) به عنوان استاندارد طلایی برای بررسی بافت‌های نرم و مغز استخوان شناخته می‌شود. تصاویر MRI عرضی می‌توانند ساختارهای آناتومیکی مرتبط با لامینیت یا التهاب بافت‌های نرم سم را با وضوح بالا نشان دهند (۱۱).

روش‌های تخصصی

آرتروگرافی (Arthrography) و میلوگرافی (Myelography)برای بررسی ضایعات مفصلی یا نخاعی به‌کار می‌روند و می‌توانند مکمل MRI یا CT در موارد خاص باشند (۱۲).

بیماری‌های شایع عامل لنگش و نقش تصویربرداری

اختلالات مفصلی

آرتریت عفونی یا سپتیک از علل مهم لنگش حاد است که تشخیص آن با سونوگرافی دقیق‌تر از معاینه بالینی است (۸). رادیوگرافی نیز در تشخیص تغییرات استخوانی مزمن ناشی از استئومیلیت و آرتریت کمک‌کننده است (۶).

بیماری‌های بافت نرم

ضایعات بافت نرم مانند بورسیت و تاندونیت به کمک اولتراسونوگرافی به‌خوبی قابل شناسایی هستند (۱۳). در گاوها، تورم بافت نرم اطراف مفصل یا غلاف تاندون در بررسی‌های سونوگرافیک مشخص می‌شود (۱۴).

ضایعات استخوانی

CTو MRI در شناسایی شکستگی‌های پنهان، تغییرات استخوان پدال، و تحلیل استخوان (استئولیز) اهمیت زیادی دارند (۱۵). ترموگرافی فروسرخ (Infrared Thermography)نیز می‌تواند افزایش دمای موضعی ناشی از التهاب استخوان و بافت نرم را تشخیص دهد (۱۶).

علل نورولوژیک

در برخی حیوانات، لنگش ممکن است ناشی از فشردگی اعصاب یا استنوز کانال نخاعی باشد. در چنین مواردی، MRIو میلوگرافی اطلاعات ارزشمندی درباره فشردگی‌های نخاعی فراهم می‌سازند (۱۲).

تشخیص موفق لنگش مستلزم ترکیب یافته‌های بالینی با نتایج تصویربرداری است. انتخاب روش تصویربرداری باید بر اساس شک کلینیکی، نوع بافت درگیر، و امکانات موجود انجام گیرد (۶). در بسیاری از موارد، ترکیب اولتراسونوگرافی با رادیوگرافی می‌تواند منجر به تشخیص قطعی و طرح درمانی دقیق‌تر شود (۱۴). پیشرفت فناوری در حوزه‌هایی چون تصویربرداری خودکار و هوش

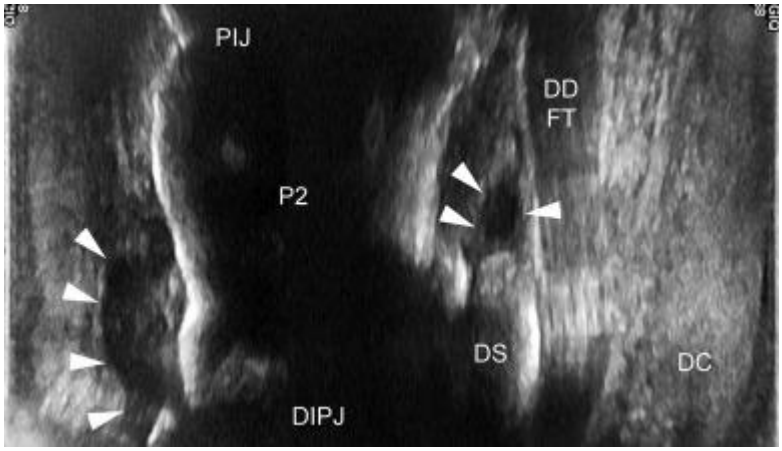
مصنوعی، آینده‌ای روشن برای تشخیص زودهنگام لنگش در دام‌ها رقم خواهد زد (۱۷).

نتایج

کاربرد روش‌های تصویربرداری در ارزیابی لنگش، دیدگاه‌های ارزشمندی در زمینه تغییرات کمی و کیفی در بافت‌های نرم، مفاصل، استخوان‌ها و ساختار سم فراهم کرده است. ادغام چندین روش تصویربرداری باعث افزایش دقت در تشخیص، پیش‌بینی سیر بیماری و ارزیابی اثربخشی درمان‌ها شده است (۶، ۸).

یافته‌های اولتراسونوگرافی (Ultrasonographic Findings)

در سال‌های اخیر، اولتراسونوگرافی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین ابزارهای غیرتهاجمی در تشخیص و پایش لنگش در گاوهای شیری مطرح شده است. این روش به دلیل قابلیت استفاده در شرایط مزرعه، عدم نیاز به بیهوشی، هزینه پایین و توانایی در ارزیابی بافت‌های نرم کف سم، در مقایسه با سایر روش‌ها برتری دارد (۶، ۱۱). بررسی‌های انجام‌شده بر روی سم‌های سالم و مبتلا به ضایعات ناشی از اختلال شاخی شدن سم (Claw Horn Disruption Lesions; CHDL) نشان داد که تفاوت آشکاری در اکوژنیسیته (Echogenicity) و ضخامت بافت‌های نرم وجود دارد. در سم‌های سالم، بافت‌ها عمدتاً آنِکوئیک یا هیپواکوئیک بودند، در حالی که در سم‌های بیمار افزایش بازتاب صوتی و تغییرات ناهمگن در بافت‌های نرم مشاهده شد (۱۸).



تصویر۱: آرتریت سپتیک مفصل بین‌فالانژیال دیستال (Septic Arthritis of the Distal Interphalangeal Joint) به وسیله اولتراسونوگرافی (۸)

اندازه‌گیری شاخص‌های طولی و عرضی ضایعه (L1 و L2) نشان داد که این مقادیر به‌طور مستقیم با شدت لنگش و درجه‌ی التهاب همبستگی دارند. در مطالعه‌ای که توسط Kofler و همکاران (۲۰۱۴) انجام شد، مشخص گردید که در موارد لنگش متوسط تا شدید، ضخامت بافت نرم بین استخوان پدال و دیواره‌ی شاخی سم به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. این تغییرات ناشی از ادم، نفوذ سلول‌های التهابی و فیبروز ثانویه در ناحیه دیجیتال است. یکی از برجسته‌ترین کاربردهای اولتراسونوگرافی، تشخیص زودهنگام شکستگی‌های استخوان پدال (Pedal Bone Fracture) و پایش فرآیند ترمیم آن‌ها است. برخلاف رادیوگرافی که تنها ضایعات استخوانی پیشرفته را آشکار می‌کند، اولتراسونوگرافی قادر است شکستگی‌های تازه و ضایعات تحت‌بالینی را از طریق شناسایی خطوط هیپراکوئیک و سایه‌های آکوستیک مشخص کند (۸). همچنین در روند ترمیم شکستگی، افزایش تدریجی اکوژنیسیته در ناحیه ضایعه و پر شدن فضای بین قطعات استخوانی با بافت‌های گرانولاسیونی مشاهده می‌شود که بیانگر تشکیل کالوس و بازسازی استخوان است (۱۹).

افزون بر کاربردهای تشخیصی، اولتراسونوگرافی نقش مهمی در پایش اثرات درمانی و ارزیابی پاسخ به مداخلات نیز دارد. به‌عنوان مثال، در موارد درمان آرتریت سپتیک مفصل بند انگشتی (Distal Interphalangeal Joint; DIPJ)، بررسی اولتراسونوگرافیک کاهش تدریجی ضخامت کپسول مفصلی و مایع سینوویال را طی دوره درمان نشان می‌دهد (۸). این ویژگی سبب می‌شود اولتراسونوگرافی به ابزاری مؤثر برای ارزیابی اثربخشی درمان و تصمیم‌گیری درباره‌ی ادامه یا تغییر پروتکل دارویی تبدیل شود.

مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که این روش می‌تواند پیش از بروز علائم کلینیکی قابل مشاهده، تغییرات پاتولوژیک را شناسایی کند Werema .و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که در گاوهای در معرض خطر لنگش، کاهش ضخامت بالشتک انگشتی (Digital Cushion)در اسکن‌های اولتراسونوگرافیک چند هفته قبل از مشاهده‌ی علائم حرکتی آشکار می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که اولتراسونوگرافی می‌تواند در سیستم‌های غربالگری پیشگیرانه (Preventive Screening Programs) مورد استفاده قرار گیرد.

در سطح بافتی، تغییرات مشاهده‌شده در اولتراسونوگرافی شامل افزایش اکوژنیسیته چربی‌های بالشتک انگشتی، تورم ساختارهای اطراف تاندون عمقی فلکسور و تغییر شکل غلاف سینوویال بوده است (۱۴). این یافته‌ها با تغییرات هیستوپاتولوژیک گزارش‌شده در مطالعات کالبدگشایی مطابقت دارند و نشان‌دهنده‌ی ارزش بالای هم‌پوشانی میان یافته‌های تصویربرداری و آسیب‌شناسی است (۱۱).

از نظر فنی، انتخاب پروب مناسب نقش کلیدی در کیفیت تصاویر دارد. استفاده از پروب خطی (Linear) با فرکانس ۷.۵ تا ۱۲ مگاهرتز برای ارزیابی ساختارهای سطحی کف سم و مفصل بند انگشتی توصیه می‌شود. در مقابل، پروب‌های مایکروکان و محدب (Microconvex) با عمق نفوذ بیشتر برای ارزیابی ساختارهای عمیق‌تر مفید هستند (۶).

در مجموع، یافته‌های این بخش تأکید می‌کنند که اولتراسونوگرافی نه‌تنها ابزار تشخیصی دقیق برای شناسایی ضایعات نرم و استخوانی در مراحل اولیه است، بلکه نقش مهمی در پایش روند ترمیم، پیشگیری از لنگش، و ارزیابی تأثیر عوامل مدیریتی بر سلامت سم دارد.

یافته‌های رادیوگرافی و بررسی ضایعات استخوانی (Radiographic Findings and Osseous Lesions)

رادیوگرافی (X-ray) از نخستین و همچنان اساسی‌ترین ابزارهای تصویربرداری در ارزیابی ضایعات استخوانی مرتبط با لنگش در گاو محسوب می‌شود. این روش، با وجود قدمت بالا، همچنان برای تشخیص ضایعات استخوانی عمیق، شکستگی‌های فالانژیال، و تغییرات مزمن استخوان بند سوم (Pedal Bone; P3) اهمیت حیاتی دارد (۵،۶).

در بررسی‌های انجام‌شده بر روی گاوهای دارای لنگش مزمن، شکستگی‌های فالانژیال به‌عنوان یکی از شایع‌ترین یافته‌های رادیوگرافیک شناخته شدند و در حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد موارد گزارش گردیدند (۷). این شکستگی‌ها معمولاً در استخوان پدال رخ داده و با تغییر زاویه مفصل بند انگشتی و افزایش تراکم استخوانی در نواحی اطراف ضایعه همراه بودند. در رادیوگراف‌های جانبی، خطوط شکستگی هیپواوپک با حاشیه‌های نامنظم مشاهده می‌شوند که در موارد حاد معمولاً با واکنش پریوستئال و افزایش ضخامت استخوانی همراه است (۶).

تصویر۲: واکنش پریوستئال و افزایش ضخامت (۶)

از دیگر یافته‌های مهم، استئومیلیت (Osteomyelitis) و پریوستیت(Periostitis) هستند که معمولاً در پی عفونت‌های باکتریایی ثانویه به زخم‌های نافذ کف سم ایجاد می‌شوند. در تصاویر رادیوگرافی، این ضایعات به‌صورت نواحی لوسنت مرکزی همراه با زون‌های اسکلروتیک محیطی قابل مشاهده‌اند (۱۵). در برخی موارد، استئومیلیت با تخریب کامل بند سوم و جابجایی خط مفصلی همراه می‌شود که تشخیص افتراقی آن از استئولیز ناشی از تومورهای استخوانی ضروری است.

تزاید استخوانی (Exostosis) یکی دیگر از یافته‌های شاخص در گاوهای دارای لنگش مزمن است. این تغییر معمولاً در محل اتصال تاندون عمقی فلکسور (Deep Digital Flexor Tendon)به استخوان پدال رخ داده

و در رادیوگرافی به صورت زوائد اپاک استخوانی در سطح کاودال P3 دیده می‌شود (۳). این تغییرات غالباً با آرتریت مزمن و استئولیز موضعی همراه بوده و به‌عنوان نشانه‌ای از پاسخ تطبیقی بدن به فشارهای مکانیکی غیرطبیعی تفسیر می‌شود (۵).

در بررسی‌های تطبیقی بین گاوهای سالم و مبتلا، تغییرات در تراکم و ساختار استخوان بند سوم بسیار چشمگیر بوده است. در گاوهای سالم، تراکم استخوانی یکنواخت و مرز کورتیکال واضح دیده می‌شود، در حالی‌که در گاوهای مبتلا به CHDL ، کاهش تراکم استخوانی، تحلیل استخوانی (Osteolysis) و افزایش دانسیته نواحی محیطی (Reactive sclerosis) مشاهده می‌شود (۷).

یکی از نقاط قوت رادیوگرافی، توانایی آن در ارزیابی پیشرفت درمان است. در مطالعات پیگیری، پس از ۴ تا ۶ هفته درمان، کاهش ناحیه لوسنت مرکزی و افزایش بازتاب استخوانی در ناحیه ترمیم‌شده نشانه‌ی تشکیل کالوس ثانویه بود (۱۹). بدین ترتیب، رادیوگرافی به‌ویژه در درمان شکستگی‌ها و ضایعات استخوانی مزمن، ابزار استاندارد ارزیابی روند بهبودی محسوب می‌شود.

با این حال، رادیوگرافی محدودیت‌هایی نیز دارد. به دلیل ماهیت دوبعدی تصاویر، تفسیر برخی ضایعات، به‌ویژه در مناطق هم‌پوشان استخوانی مانند مفصل تارسوس یا مفصل متاکارپوفالانژیال، دشوار است (۷). همچنین در مراحل اولیه التهاب، تغییرات استخوانی قابل مشاهده نیستند، زیرا حداقل ۳۰٪ از تراکم معدنی باید از بین برود تا در تصویر آشکار شود (۳).

در پاسخ به این محدودیت‌ها، ترکیب رادیوگرافی با اولتراسونوگرافی پیشنهاد شده است. این رویکرد، امکان ارزیابی هم‌زمان ساختارهای استخوانی و بافت‌های نرم اطراف را فراهم می‌سازد و می‌تواند تشخیص‌های افتراقی مانند آرتریت سپتیک و بورسیت را با دقت بیشتری انجام دهد (۸، ۱۱).

از نظر آماری، حساسیت رادیوگرافی در تشخیص ضایعات استخوانی شدید حدود ۸۸٪ و ویژگی آن بیش از ۹۰٪ گزارش شده است، در حالی که در مراحل ابتدایی التهاب استخوان، این میزان به کمتر از ۵۰٪ کاهش می‌یابد (۶). این داده‌ها تأکید می‌کنند که تکیه‌ی صرف بر رادیوگرافی برای تشخیص زودهنگام لنگش ممکن است منجر به خطا شود و باید با سایر روش‌های تصویربرداری تکمیل گردد.

در سطح عملی، رادیوگرافی همچنان به‌دلیل در دسترس بودن، هزینه‌ی پایین و قابلیت استفاده در محیط‌های بالینی **و مزرعه‌ای**، ابزار اصلی در تشخیص ضایعات استخوانی است. به‌ویژه در کشورهایی که فناوری‌های پیشرفته مانند MRI یا CT به‌صورت گسترده در دسترس نیستند، نقش رادیوگرافی در مدیریت لنگش غیرقابل جایگزین است.

یافته‌های ترموگرافی فروسرخ (Infrared Thermography; IRT)

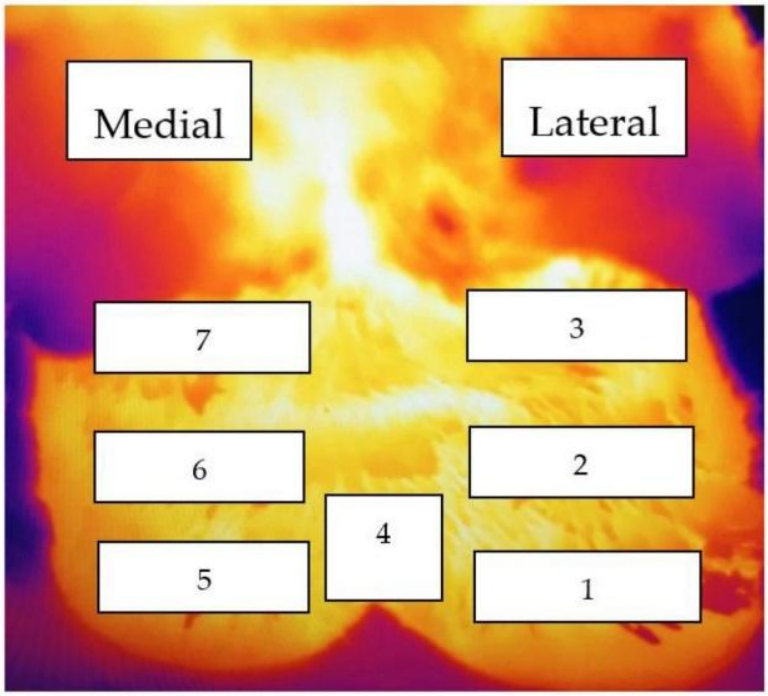
ترموگرافی فروسرخ (IRT) در سال‌های اخیر به‌عنوان یک ابزار تشخیصی نوین و غیرتهاجمی برای پایش وضعیت سلامت سم و تشخیص زودهنگام لنگش در گاوهای شیری معرفی شده است. این روش با استفاده از حسگرهای فروسرخ، تابش حرارتی سطح بدن را به نقشه‌های حرارتی تبدیل می‌کند و بر اساس آن، تغییرات دمایی ناشی از التهاب یا اختلال در جریان خون قابل ارزیابی است (۲۱). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افزایش دمای سطح سم به‌طور مستقیم با بروز و شدت لنگش مرتبط است. در پژوهشی که بر روی ۸۰ رأس گاو شیری انجام شد، گاوهای دارای امتیاز لنگش (Locomotion Score)بالاتر از ۳، میانگین دمای سطح سم بالاتری نسبت به گاوهای سالم داشتند (میانگین ۳۵.۲ °C در برابر ۳۲.۹°C). رابطه بین دمای سطح سم و امتیاز لنگش در این مطالعه قوی و معنادار گزارش شد ($r = 0.84, p < 0.01$) (۲۱).

یافته‌های این مطالعه نشان داد که دمای آستانه برای تشخیص لنگش ۳۴.۵° است که با حساسیت ۸۰ درصد و ویژگی ۹۲.۴ درصد، گاوهای دارای لنگش را شناسایی می‌کند. از این شاخص دمایی می‌توان به‌عنوان معیاری استاندارد برای غربالگری اولیه در سطح گله استفاده کرد. مطالعات مشابه توسط Bobić و همکاران (۲۰۲۵) نیز این مقدار را تأیید کرده‌اند و نشان داده‌اند که افزایش دمای سطح سم معمولاً ۲ تا ۵ روز پیش از بروز علائم حرکتی قابل شناسایی است.

از منظر فیزیولوژیکی، افزایش حرارت در ناحیه سم نشان‌دهنده‌ی افزایش جریان خون موضعی، نفوذ سلول‌های التهابی و فعالیت متابولیک بالاتر در بافت‌های آسیب‌دیده است (۱۱). در مقابل، کاهش غیرطبیعی دما در برخی نواحی ممکن است نشانگر ایسکمی (کاهش جریان خون) یا نکروز بافتی باشد. این ویژگی دوگانه سبب

شده که IRT نه‌تنها در تشخیص التهاب، بلکه در پایش روند ترمیم پس از درمان یا جراحی‌های سم‌چینی نیز کاربرد داشته باشد (۱۵).

یکی از مزایای برجسته ترموگرافی، امکان غربالگری هم‌زمان چند حیوان بدون نیاز به تماس مستقیم است. این ویژگی خطر انتقال عفونت‌های ثانویه را کاهش داده و استرس حیوان را به حداقل می‌رساند (۱۶). در واحدهای بزرگ شیری، نصب دوربین‌های حرارتی در مسیر خروجی سالن شیردوشی ، امکان پایش بلادرنگ تغییرات حرارتی را فراهم کرده و داده‌ها را برای تحلیل خودکار توسط نرم‌افزارهای هوش مصنوعی ارسال می‌کند (۲۳). این سامانه‌ها می‌توانند حیوانات مشکوک به لنگش را در مراحل اولیه شناسایی کرده و هشدارهای مدیریتی صادر نمایند.



تصویر ۳: ترموگرافی فروسرخ حرارتی ناحیه کف پای عقب راست که هفت ناحیه تعریف شده برای اندازه‌گیری دمای سطحی بر روی آن نمایش داده شده است. در پنجه خارجی: ناحیه ۱: باند تاجی(CB) ، ناحیه ۲: بالای باند تاجی(ACB) ، ناحیه ۳: زیر انگشت اضافی(BAD) ، ناحیه ۴: فضای بین انگشتی .(IDS) نواحی ۵ تا ۷ معادل نواحی ۱ تا ۳ هستند اما در پنجه داخلی قرار دارند. (۲۱)

در عین حال، IRT نیز محدودیت‌هایی دارد. دقت آن به‌شدت تحت‌تأثیر عوامل محیطی از جمله دمای محیط، رطوبت نسبی، وجود گل یا رطوبت روی سطح سم و حتی مدت‌زمان ایستادن حیوان بر روی زمین سرد است (۲۱). برای کاهش این خطاها، مطالعات پیشنهاد کرده‌اند که اندازه‌گیری‌هاباید در محیط کنترل‌شده، حداقل ۳۰ دقیقه پس از شست‌وشوی سم و در دمای ثابت ۲۰–۲۵°C انجام شوند (۲۴).

از نظر تحلیلی، الگوهای حرارتی ثبت‌شده در گاوهای مبتلا به لنگش معمولاً شامل افزایش موضعی حرارت در ناحیه دیواره جانبی سم و پاشنه و در موارد التهاب شدید، گسترش حرارت به سطح پشتی مفصل بند انگشتی است(۱۶). این تغییرات با یافته‌های اولتراسونوگرافیک در خصوص افزایش ضخامت و ادم بافت‌های نرم در همان نواحی همبستگی بالایی دارند (۹).

ترموگرافی همچنین به‌عنوان ابزاری برای پایش اثربخشی درمان‌های ضدالتهابی و اصلاحی مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعه‌ای که توسط Werema و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد، پس از درمان گاوهای مبتلا به لامینیت با ضدالتهاب‌های غیراستروئیدی، کاهش ۱.۲ درجه‌ای میانگین دمای سم طی ۷۲ ساعت گزارش شد که با بهبود امتیاز لنگش هم‌زمان بود.

در پژوهش‌های جدیدتر، تلاش‌هایی برای کالیبراسیون خودکار داده‌های حرارتی با داده‌های رفتاری حیوان انجام گرفته است Siachos .و همکاران (۲۰۲۵) الگوریتمی مبتنی بر یادگیری عمیق توسعه دادند که تصاویر حرارتی را با داده‌های حرکتی از حسگرهای پوشیدنی ترکیب کرده و توانست با دقت ۹۴٪، حیوانات مبتلا به لنگش را شناسایی کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ادغام IRT با فناوری‌های هوش مصنوعی، مسیر آینده پایش سلامت

دام را به‌سمت سیستم‌های خودکار، بی‌وقفه و هوشمند سوق می‌دهد.

از نظر مدیریتی، مزیت دیگر IRT آن است که می‌توان از آن برای ارزیابی تأثیر مداخلات مدیریتی مانند سم‌چینی پیشگیرانه، بهبود کیفیت بستر، و اصلاح جیره غذایی بر سلامت سم استفاده کرد. کاهش تدریجی میانگین دمای سم در گاوهای تحت مدیریت بهینه، شاخصی از کاهش التهاب مزمن و بهبود سلامت بافت‌های کف سم است (۲۵).

در مجموع، ترموگرافی فروسرخ در کنار اولتراسونوگرافی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل برای تشخیص زودهنگام، پایش درمان، و غربالگری گله‌های شیری مورد استفاده قرار گیرد. مزیت غیرتهاجمی و قابلیت خودکارسازی این روش، آن را به یکی از آینده‌دارترین فناوری‌های تشخیصی در پزشکی دامپزشکی بدل کرده است.

یافته‌های CT و MRI (توموگرافی کامپیوتری و تصویربرداری تشدید مغناطیسی)

روش‌های تصویربرداری پیشرفته مانند توموگرافی کامپیوتری (Computed Tomography; CT) و تصویربرداری تشدید مغناطیسی (Magnetic Resonance Imaging; MRI)طی دهه‌ی اخیر، تحولی عمیق در درک آسیب‌شناسی لنگش ایجاد کرده‌اند. این دو روش، با فراهم‌سازی داده‌های سه‌بعدی و وضوح بالا از ساختارهای استخوانی و بافت‌های نرم، امکان مشاهده و تحلیل دقیق فرآیندهای التهابی، تخریبی و ترمیمی را فراهم کرده‌اند (۱۴ و ۱۵).

توموگرافی کامپیوتری(CT)

CT به‌واسطه‌ی توانایی در ایجاد تصاویر برش‌نگاری سه‌بعدی از ساختارهای سخت بدن، ابزاری بی‌نظیر در ارزیابی ضایعات استخوانی پیچیده محسوب می‌شود . Hagagو همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که در بررسی مفصل تارسوس و بند انگشتی گاو، CTقادر است ضایعات استخوانی میکروسکوپی، خطوط شکستگی زیرسطحی و استئولیزهای اولیه را آشکار کند؛ یافته‌هایی که در رادیوگرافی معمولی قابل تشخیص نبودند.

در مواردی که گاوها دارای لنگش مزمن بدون یافته‌های مشخص در رادیوگرافی بودند، CTتوانست تحلیل استخوان بند سوم، تخریب مفصل بین‌فالانژیال و تشکیل استئوفیت‌های کوچک را با دقت بالا نشان دهد (۶). به‌ویژه در موارد لامینیت مزمن، تغییر شکل استخوان پدال (Rotation of P3) و کاهش ارتفاع دیستال آن در تصاویر سه‌بعدی به‌صورت کاملاً واضح قابل مشاهده بود (۷).

یکی از مزیت‌های مهمCT ، امکان اندازه‌گیری دقیق حجم استخوان و تراکم مواد معدنی (Bone Mineral Density; BMD)است. در مطالعه‌ای که توسط Arianو همکاران (۲۰۱۸) انجام شد، مشخص گردید که گاوهای مبتلا به لنگش مزمن، کاهش ۱۵ تا ۲۲ درصدی در تراکم استخوان بند سوم نسبت به گاوهای سالم دارند. این کاهش تراکم ارتباط مستقیمی با طول دوره لنگش و امتیاز وضعیت بدنی (BCS) داشت و به‌عنوان شاخص کمی قابل اعتماد برای پایش سلامت استخوانی پیشنهاد شد.

افزون بر تحلیل ساختار استخوان،CT امکان شناسایی ضایعات متابولیک، استئومیلیت تحت‌بالینی، و ارزیابی دقیق محل تزریق در مفصل یا تاندون را نیز فراهم می‌سازد. برای مثال، در مطالعه‌ای بر روی گاوهای مبتلا به آرتریت سپتیک، CTتوانست نواحی نکروتیک استخوان را از بافت‌های زنده تمایز دهد و به تصمیم‌گیری در مورد نیاز به دبریدمان جراحی کمک کند (۱۵).

تصویربرداری تشدید مغناطیسی(MRI)

MRI به عنوان «استاندارد طلایی» در بررسی بافت‌های نرم شناخته می‌شود و در ارزیابی آسیب‌های عضلانی، تاندونی، مفصلی و حتی مغز استخوان در گاوهای مبتلا به لنگش ، نقشی کلیدی دارد (۱۱). این روش بر پایه اختلاف در پاسخ پروتون‌های هیدروژن در بافت‌های مختلف نسبت به میدان مغناطیسی عمل می‌کند و به همین دلیل، قادر است تغییرات بافتی در مراحل اولیه التهاب را که در سایر روش‌ها غیرقابل مشاهده است، آشکار کند.

در گاوهای مبتلا بهCHDL ، MRIکاهش قابل‌توجهی در حجم بالشتک انگشتی (Digital Cushion Volume) را نسبت به گاوهای سالم نشان داد Hagag .و Tawfiek (2018)گزارش کردند که میانگین حجم بالشتک انگشتی در گاوهای دارای لنگش ۱.۴ سانتی‌متر مکعب کمتر از گروه کنترل بود. این تغییرات با کاهش قابلیت جذب ضربه و افزایش فشار مکانیکی بر بافت‌های

کف سم ارتباط مستقیم داشت و به‌عنوان یکی از عوامل اصلی در بروز لنگش مزمن شناخته شد.

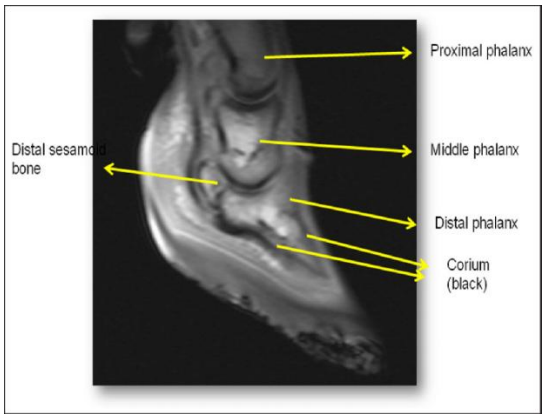
علاوه بر بالشتک انگشتی، MRIتغییرات گسترده‌ای در بافت‌های سینوویال و مفصلی نیز نشان داد. در تصاویر T2-weighted، افزایش سیگنال در کپسول مفصلی، مایع مفصلی و غلاف تاندون مشاهده شد که نشانگر التهاب فعال بود (۸). این یافته‌ها به‌ویژه در تفکیک آرتریت سپتیک از آرتریت غیرعفونی بسیار کمک‌کننده هستند، زیرا شدت سیگنال در موارد عفونی بیشتر و الگوی آن نامنظم‌تر است (۴).

از منظر بالینی، MRIاین امکان را فراهم می‌کند که تغییرات عملکردی و فیزیولوژیک را هم‌زمان با تغییرات ساختاری ارزیابی کند. برای نمونه، با استفاده از تکنیک Dynamic Contrast-Enhanced MRI (DCE-MRI)، می‌توان جریان خون موضعی در بافت‌های سم را اندازه‌گیری کرد. این اطلاعات می‌تواند برای ارزیابی زنده‌مانی بافت‌ها پس از سم‌چینی‌های عمیق یا جراحی‌های اصلاحی بسیار سودمند باشد (۱۱).

از دیدگاه پژوهشی، استفاده از MRI باعث روشن شدن نقش مغز استخوان پدال در فرآیندهای التهابی مزمن شده است. در گاوهای مبتلا به لنگش طولانی‌مدت، افزایش سیگنال در تصاویر T1-weighted نشانه‌ی تغییرات فیبروتیک و جایگزینی چربی با بافت التهابی در مغز استخوان بود. این یافته فرضیه‌ی وجود «استئومیلیت مزمن پنهان» را تقویت می‌کند که ممکن است مسئول تداوم درد و لنگش حتی پس از درمان‌های ظاهراً موفق باشد (۱۴).

MRI همچنین در شناسایی پارگی‌های جزئی تاندون‌های عمقی فلکسور (DDFT) و التهاب بورس‌های مفصلی دقت بسیار بالایی دارد. در یک مطالعه موردی، MRI توانست پارگی ۲۰ درصدی تاندون فلکسور را در مرحله‌ای تشخیص دهد که هیچ علامت رادیوگرافیکی یا بالینی قابل مشاهده‌ای وجود نداشت (۴).

از نظر کاربرد بالینی، محدودیت اصلی MRI و CT در هزینه بالا، نیاز به بیهوشی عمومی و دسترسی محدود به تجهیزات است (۱۴). با این حال، در مراکز دانشگاهی و پژوهشی، این روش‌ها ابزاری کلیدی برای شناخت مکانیسم‌های آسیب‌شناختی دقیق لنگش محسوب می‌شوند و داده‌های ارزشمندی برای توسعه درمان‌های هدفمند فراهم می‌کنند (۱۱).



تصویر ۴: تصاویر MRI از تاندون‌ها، عروق خونی، حفره synovial و corium سم. (11)

در نهایت، ترکیب یافته‌های CT و MRI تصویری جامع از ارتباط میان ساختارهای استخوانی و نرم فراهم می‌کند. CTجزئیات آناتومیکی استخوان را آشکار می‌سازد، در حالی‌که MRI تغییرات بافتی و التهابی را نمایش می‌دهد. این رویکرد ترکیبی، به‌ویژه در موارد لنگش‌های پیچیده یا نامشخص، می‌تواند دقت تشخیص را تا بیش از ۹۵٪ افزایش دهد (۱۶).

تحلیل تطبیقی روش‌های تصویربرداری (Comparative Analysis of Imaging Modalities)

ارزیابی تطبیقی روش‌های تصویربرداری نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از روش‌ها به‌تنهایی قادر به تشخیص تمام ابعاد آسیب‌های مرتبط با لنگش نیستند، بلکه ترکیب هوشمندانه‌ی آن‌ها می‌تواند تصویری جامع از پاتوفیزیولوژی ضایعات ارائه دهد. در این میان، تفاوت‌های اساسی میان اولتراسونوگرافی، رادیوگرافی، ترموگرافی فروسرخ، CT و MRI از نظر نوع داده، حساسیت تشخیصی، محدودیت‌های کاربردی و هزینه وجود دارد (۳، ۱۴).

مزایا و محدودیت‌ها

اولتراسونوگرافی به دلیل قابلیت استفاده در مزرعه و امکان ارزیابی بلادرنگ بافت‌های نرم، به‌عنوان کارآمدترین روش در محیط‌های عملی شناخته می‌شود (۹). این روش در تشخیص آرتریت سپتیک مفصل بند انگشتی و بورسیت دقت بالایی دارد، اما کیفیت نتایج آن به شدت وابسته به مهارت اپراتور و زاویه تماس پروب است (۸). همچنین در ارزیابی ساختارهای سخت مانند استخوان پدال محدودیت دارد، زیرا بازتاب بیش از حد امواج صوتی از سطوح متراکم موجب از بین رفتن جزئیات می‌شود.

رادیوگرافی ابزار کلاسیک تشخیص ضایعات استخوانی است که برای بررسی شکستگی‌ها، آرتریت‌های مزمن و تزایدهای استخوانی کارایی بالایی دارد (۷). با این حال، در مراحل ابتدایی التهاب یا لنگش تحت‌بالینی، تغییرات استخوانی قابل مشاهده نیستند. افزون بر آن، ماهیت دوبعدی تصاویر باعث هم‌پوشانی ساختارها و احتمال تفسیر اشتباه در نواحی پیچیده مانند مفصل تارسوس می‌شود (۱۴).

ترموگرافی فروسرخ (IRT) با فراهم کردن داده‌های حرارتی از سطح سم، امکان تشخیص التهاب را پیش از بروز علائم بالینی فراهم می‌کند. این روش غیرتماسی، سریع و مناسب برای غربالگری گله است (۲۱). با این حال، دقت آن تحت‌تأثیر عوامل محیطی مانند دما و رطوبت قرار دارد. در شرایط کنترل‌شده، دقت این روش در شناسایی لنگش تا ۹۰ درصد گزارش شده است (۱۶).

CT و MRI به‌عنوان روش‌های پیشرفته، بیشترین دقت را در نمایش جزئیات ساختاری و فیزیولوژیکی دارند. CT در ارزیابی استخوان و MRI در ارزیابی بافت نرم برتری دارند. هرچند هزینه بالا و نیاز به بیهوشی، استفاده گسترده آن‌ها را در دامپزشکی محدود کرده است (۱۱،۱۵).

حساسیت و ویژگی تشخیصی

در مطالعات تطبیقی، اولتراسونوگرافی در تشخیص آرتریت سپتیک مفصل بند انگشتی حساسیت ۰.۹۷ و ویژگی ۱.۰ نشان داد (۸). در حالی‌که رادیوگرافی در همان شرایط، حساسیت ۰.۷۲ و ویژگی ۰.۸۸ داشت (۶). این داده‌ها نشان می‌دهد که در مراحل اولیه التهاب مفصلی، اولتراسونوگرافی دقیق‌تر از رادیوگرافی است.

در مقابل، CT بالاترین دقت را در شناسایی تغییرات استخوانی زیرسطحی و شکستگی‌های میکروسکوپی دارد و در مطالعه‌ی Hagag و همکاران (۲۰۱۶) دقت آن ٪۹۵ گزارش شد .MRI نیز با دقت ٪۹۸ در ارزیابی آسیب‌های تاندونی و بالشتک انگشتی عملکرد بی‌رقیب داشت (۱۱). ترموگرافی فروسرخ با حساسیت حدود ٪۸۰ و ویژگی ٪۹۲ در شناسایی لامینیت، ابزاری ارزشمند برای غربالگری سریع است، ولی به‌دلیل وابستگی به دمای محیط، برای تشخیص نهایی نیازمند تأیید با سایر روش‌هاست (۲۱).

تحلیل هزینه و کارایی عملی

از دیدگاه مدیریتی، انتخاب روش تصویربرداری باید با توجه به هدف تشخیص، منابع موجود و شرایط محیطی انجام گیرد. در مزرعه‌های بزرگ، اولتراسونوگرافی و ترموگرافی به‌دلیل قابلیت حمل و سرعت بالا، گزینه‌های ایده‌آل هستند. در مقابل، در مراکز تخصصی یا دانشگاهی، استفاده از CT و MRI برای شناسایی ضایعات پیچیده و مطالعات پژوهشی توصیه می‌شود.(25)

در بررسی تطبیقی انجام‌شده در سال ۲۰۲۴، نسبت کارایی به هزینه (Cost–Effectiveness Ratio) برای روش‌های مختلف چنین گزارش شد: IRT (1.0)، Ultrasonography (0.85)، Radiography (0.65)، CT و MRI (0.35) (FAVE, 2025). این داده‌ها نشان می‌دهد که در شرایط بالینی، IRT و اولتراسونوگرافی بیشترین بازده اقتصادی و عملی را دارند، در حالی‌که CT و MRI برای موارد خاص و پیچیده توجیه‌پذیر هستند.

ترکیب چند روش(Multimodal Imaging) رویکرد جدید در تشخیص لنگش بر تلفیق روش‌های تصویربرداری تأکید دارد. برای مثال، ترکیب اولتراسونوگرافی و رادیوگرافی امکان تحلیل هم‌زمان ساختارهای نرم و سخت را فراهم کرده و خطای تشخیص را کاهش می‌دهد .(4) همچنین استفاده از IRT برای غربالگری اولیه و سپس تأیید نتایج با اولتراسونوگرافی، یک مسیر منطقی و کم‌هزینه برای پایش سلامت گله است (۲۲).

در مطالعات اخیر، استفاده از الگوریتم‌های ادغام داده‌ها (Data Fusion) برای ترکیب خروجی‌های چند روش، دقت تشخیص را تا ٪۹۶ افزایش داده است (۲۳). این سیستم‌ها با بهره‌گیری از یادگیری ماشینی، قادرند الگوهای مشترک بین دمای سطحی(IRT) ، ضخامت بافتی (US) و دانسیته استخوانی (CT) را شناسایی و بر اساس آن پیش‌بینی وقوع لنگش را انجام دهند.

اهمیت استانداردسازی

یکی از چالش‌های اساسی در مقایسه‌ی روش‌ها، نبود پروتکل‌های استاندارد تصویربرداری است. تفاوت در زاویه‌گیری، فرکانس پروب، فاصله از سطح سم، یا پارامترهای محیطی موجب ناهمگونی داده‌ها و دشواری در تفسیر نتایج می‌شود (۲۴). بنابراین، توسعه‌ی دستورالعمل‌های یکپارچه برای تصویربرداری و ثبت

داده‌های دیجیتال امری ضروری است. این موضوع، امکان مقایسه‌ی داده‌های بین‌المللی و تحلیل فراگیر (Meta-analysis) در حوزه‌ی لنگش را فراهم می‌کند.

به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که هیچ‌کدام از روش‌های تصویربرداری به‌تنهایی کفایت ندارند، اما تلفیق علمی و هدفمند آن‌ها می‌تواند دقت تشخیص، سرعت مداخله و اثربخشی درمان را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

ارتباط یافته‌های تصویربرداری با شاخص‌های بالینی و مدیریتی

یافته‌های تصویربرداری، به‌ویژه در حوزه‌ی لنگش، تنها زمانی ارزش کاربردی پیدا می‌کنند که بتوان آن‌ها را با شاخص‌های بالینی، مدیریتی و فیزیولوژیک حیوان مرتبط ساخت. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که فاکتورهایی مانند نمره وضعیت بدنی (Body Condition Score; BCS)، نمره حرکت (Locomotion Score; LS)، مرحله شیردهی، دفعات زایش (Parity) و مدیریت سم‌چینی تأثیر چشمگیری بر سلامت بافت‌های سم و یافته‌های حاصل از تصویربرداری دارند (۱, ۲۲).

ارتباط بین نمره وضعیت بدنی و یافته‌های تصویربرداری کاهش نمره وضعیت بدنی یکی از شاخص‌های خطر برای بروز لنگش محسوب می‌شود. بررسی‌های اولتراسونوگرافیک نشان داده‌اند که گاوهایی با BCS کمتر از ۲.۵، ضخامت بالشتک انگشتی (Digital Cushion Thickness)کمتری دارند و در نتیجه، مقاومت بافتی آن‌ها در برابر فشارهای مکانیکی کاهش می‌یابد (۴). در این حیوانات، تصاویر اولتراسونوگرافی اغلب افزایش اکوژنیسیته در ناحیه چربی زیرسمی را نشان می‌دهد که ناشی از فیبروز و کاهش حجم چربی محافظ است (۹). مطالعه‌ای که توسط Werema و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد نشان داد که گاوهای دارای BCSپایین، ۱.۸ برابر بیشتر از سایرین به ضایعات CHDLمبتلا می‌شوند. در این گروه، هم در اولتراسونوگرافی و هم در MRI کاهش قابل‌توجهی در حجم بالشتک انگشتی مشاهده شد. ارتباط مثبت بین BCSو ضخامت بالشتک انگشتی در تمامی مراحل شیردهی برقرار بود.($r = 0.71, p < 0.01$)

ارتباط نمره حرکت با یافته‌های تصویربرداری

نمره حرکت (LS) شاخصی رفتاری است که وضعیت حرکتی دام را از ۱ (سالم) تا ۵ (لنگش بسیار شدید) طبقه‌بندی می‌کند .(25) در گاوهایی با LS بالاتر از ۳، یافته‌های تصویربرداری تغییرات مشخصی را در ساختار کف سم نشان می‌دهد. در اولتراسونوگرافی، افزایش ضخامت بافت نرم، ادم و ناپیوستگی در غلاف تاندون عمقی فلکسور مشاهده شده است (۳).

در رادیوگرافی این گاوها، نشانه‌هایی از تزاید استخوانی (Exostosis)و استئومیلیت در نواحی فالانژ دیستال (Distal Phalanx)یا استخوان بند سوم(P3) گزارش گردید (۷). در تصاویر حرارتی نیز افزایش میانگین دمای سطح سم تا ۳۴.۸°C مشاهده شد که با شدت لنگش همبستگی مستقیم داشت (۲۱). بنابراین، افزایش نمره لنگش اغلب با نشانه‌های واضح تصویربرداری در سه سطح استخوان، بافت نرم و عملکرد فیزیولوژیک هم‌زمان است.

تأثیر مرحله شیردهی و دفعات زایش

یکی از یافته‌های مهم در مطالعات اخیر، تأثیر مرحله شیردهی و دفعات زایش بر تغییرات ساختاری سم و ضایعات مرتبط با آن است. گاوهای در مراحل اولیه شیردهی (به‌ویژه ۳۰ تا ۷۰ روز پس از زایش) به‌دلیل فشار متابولیکی بالا، کاهش چربی بدن و کاهش ضخامت بالشتک انگشتی، بیش از سایر دوره‌ها مستعد لنگش هستند (۱).

در بررسی‌هایMRI ، کاهش حجم بالشتک انگشتی در این مرحله تا ۱۸٪ نسبت به دوره خشک گزارش شده است (۱۵). این تغییر ساختاری سبب می‌شود که فشار وارده از استخوان پدال به بافت شاخی کف سم بیشتر شده و خطر بروز خونریزی کف سم و CHDL افزایش یابد (۱۱).

از سوی دیگر، با افزایش تعداد زایش، تغییرات دژنراتیو در مفصل بند انگشتی و تاندون‌های فلکسور شایع‌تر می‌شود. در اولتراسونوگرافی گاوهای مسن‌تر، نازک شدن کپسول مفصلی و تغییر شکل تاندون‌ها مشهود است، در حالی که در رادیوگرافی، واکنش‌های پریوستئال در محل اتصال تاندون به استخوان پدال افزایش یافته است (۵،۹).

نقش مدیریت سم‌چینی در یافته‌های تصویربرداری

مدیریت صحیح سم‌چینی از عوامل کلیدی در پیشگیری و کنترل لنگش است. در مطالعات میدانی، گاوهایی که هر ۶ ماه یک‌بار سم‌چینی پیشگیرانه دریافت می‌کردند، در مقایسه با گاوهای بدون مراقبت منظم، ضخامت کف سم بیشتری داشتند و در تصاویر اولتراسونوگرافی، اکوژنیسیته طبیعی و یکنواخت‌تر دیده شد (۲۲).

ترموگرافی نیز کاهش میانگین دمای سطح سم را پس از سم‌چینی صحیح گزارش کرده است که نشانگر کاهش التهاب مزمن در کف سم می‌باشد (۱۶). در مقابل، در موارد سم‌چینی غیراصولی یا بیش‌ازحد، افزایش گرمای سطحی و نازک شدن لایه شاخی در تصاویر حرارتی مشاهده شد که نشان‌دهنده تحریک بیش از حد بافت و احتمال بروز لنگش ثانویه است.

در گاوهایی که دچار لامینیت بودند، ترکیب داده‌های تصویربرداری نشان داد که سم‌چینی اصلاحی موجب افزایش ضخامت کف سم به میزان میانگین ۱.۲ میلی‌متر در مدت ۴ هفته و کاهش دمای سطحی سم به میزان ۰.۸ درجه سانتی‌گراد شد (۲۱). این نتایج بر ارزش تصویربرداری در ارزیابی کمی اثرات مداخلات مدیریتی تأکید دارد.

تأثیر شرایط محیطی و بستر نگهداری

عامل محیطی نیز نقش مهمی در یافته‌های تصویربرداری دارد. در گاوهایی که بر روی بسترهای سخت و خیس نگهداری می‌شوند، در تصاویر اولتراسونوگرافی ضخامت بالشتک انگشتی به‌صورت معنی‌داری کمتر و میزان ادم بافتی بیشتر است (۳). در ترموگرافی، این شرایط با افزایش دمای سطحی سم و توزیع نامتقارن حرارت همراه بوده است (۲۱). در مقابل، استفاده از بسترهای نرم و خشک (مانند ماسه) سبب کاهش دمای موضعی و یکنواختی الگوی حرارتی در سم‌ها می‌شود (۲۵).

تفسیر کلی

در مجموع، همبستگی بالایی بین پارامترهای مدیریتی و یافته‌های تصویربرداری وجود دارد BCS .پایین، نمره حرکت بالا، دوره‌های شیردهی اولیه و سم‌چینی نامنظم همگی به‌طور معنی‌داری با یافته‌های پاتولوژیک در اولتراسونوگرافی، رادیوگرافی و ترموگرافی مرتبط هستند. این داده‌ها تأکید می‌کنند که لنگش یک پدیده‌ی چندعاملی است و تشخیص مؤثر آن نیازمند تلفیق یافته‌های تصویربرداری با داده‌های مدیریتی و بالینی است تا رویکردی جامع برای پیشگیری و درمان فراهم شود (۱،۲۵)

تصویربرداری در پایش و پیشگیری از لنگش

ارزیابی‌های تکرارشونده با اولتراسونوگرافی و رادیوگرافی برای پیگیری روند بهبودی بسیار ارزشمند بودند. در طی ترمیم شکستگی‌ها، افزایش تدریجی اکوژنیسیته و شکل‌گیری پل استخوانی قابل مشاهده بود (۱۹). هم‌زمان، ترموگرافی کاهش تدریجی دمای سطح سم را در طی بهبودی ثبت کرد که نشان‌دهنده‌ی کاهش التهاب بود (۱۶).

اولتراسونوگرافی قادر است تغییرات بافتی را پیش از بروز علائم بالینی تشخیص دهد و بنابراین به‌عنوان ابزاری پیشگیرانه در مدیریت سلامت گله اهمیت ویژه‌ای دارد (۳). در سال‌های اخیر، استفاده از هوش مصنوعی برای تحلیل خودکار تصاویر تصویربرداری و ترکیب آن با سیستم‌های امتیازدهی خودکار لنگش، افق‌های جدیدی در تشخیص سریع و پایش مستمر ایجاد کرده است.(23)

چشم‌انداز آینده

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، ناهمگونی در روش‌های تصویربرداری و تفاوت در معیارهای تفسیر همچنان یکی از چالش‌های اساسی است. استانداردسازی پروتکل‌های تصویربرداری، کالیبراسیون تجهیزات ترموگرافی و تدوین مقادیر مرجع ویژه گاو برای مقایسه بین مطالعات ضروری است (۲۴). در آینده، تلفیق داده‌های حاصل از اولتراسونوگرافی، ترموگرافی و سنسورهای حرکتی می‌تواند زمینه‌ساز پایش مستمر و هوشمند سلامت سم در گله‌های شیری باشد (۲۲).

نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه مروری نشان داد که بهره‌گیری از روش‌های تصویربرداری در مدیریت بالینی لنگش در گاوهای شیری، تحولی بنیادین در تشخیص، پایش و پیشگیری از این اختلال ایجاد کرده است. هر یک از روش‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند، اما استفاده تلفیقی از آن‌ها می‌تواند دقت تشخیص و تصمیم‌گیری درمانی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

اولتراسونوگرافی به دلیل قابلیت استفاده در محیط‌های مزرعه، عدم نیاز به بیهوشی، و توانایی در ارزیابی زودهنگام تغییرات بافت نرم، به‌عنوان کاربردی‌ترین روش

عملی شناخته می‌شود. این روش می‌تواند تغییرات زیر بالینی در بالشتک انگشتی و مفاصل بند انگشتی را شناسایی کرده و ابزار مؤثری برای پایش پاسخ به درمان فراهم آورد.

رادیوگرافی همچنان به‌عنوان ابزار پایه در ارزیابی ضایعات استخوانی و تشخیص شکستگی‌ها و استئومیلیت مطرح است. ترکیب آن با سونوگرافی، به‌ویژه در موارد پیچیده، موجب تکمیل دید تشخیصی و کاهش خطای بالینی می‌شود.

ترموگرافی فروسرخ (IRT) به‌عنوان روشی غیرتهاجمی و سریع، امکان شناسایی زودهنگام التهاب و پایش حرارتی گله را فراهم می‌کند. ادغام داده‌های حرارتی با سیستم‌های هوش مصنوعی و حسگرهای حرکتی، چشم‌اندازی نوین در غربالگری خودکار و بی‌وقفه لنگش ارائه می‌دهد.

روش‌های پیشرفته مانند CT و MRI نیز بالاترین دقت را در بررسی ساختارهای پیچیده استخوانی و بافت‌های نرم دارند و برای مطالعات پژوهشی و موارد بالینی دشوار ارزشمندند .MRI به‌ویژه در تحلیل تغییرات فیزیولوژیک بالشتک انگشتی و مغز استخوان نقش تعیین‌کننده‌ای دارد.

از منظر مدیریتی، ارتباط تنگاتنگ بین یافته‌های تصویربرداری با شاخص‌های بالینی مانند نمره وضعیت بدنی(BCS) ، نمره حرکت (LS) و مرحله شیردهی نشان می‌دهد که لنگش پدیده‌ای چندعاملی است و تنها با رویکردی چندوجهی قابل کنترل است. به‌کارگیری تصویربرداری در کنار اصلاح مدیریت تغذیه، بستر و سم‌چینی، می‌تواند منجر به کاهش شیوع لنگش و بهبود رفاه حیوان گردد.

در نهایت، آینده‌ی تشخیص و پایش لنگش در گرو توسعه‌ی سیستم‌های هوشمند تصویربرداری چندوجهی، استانداردسازی پروتکل‌های تصویربرداری و ادغام داده‌های چندمنبعی (Multi-modal Data Integration)است. این رویکردها می‌توانند نه‌تنها دقت تشخیص را افزایش دهند، بلکه با فراهم کردن پایش بلادرنگ سلامت سم، هزینه‌های درمانی را کاهش داده و بهره‌وری اقتصادی و رفاه حیوان را در صنعت گاوداری شیری ارتقا دهند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافعی را در این پژوهش شناسایی نکردند.

منابع:

1. Bicalho RC, Oikonomou G. Control and prevention of lameness associated with claw lesions in dairy cows. Livest Sci. 2013;156(1-3):96-105. doi:10.1016/j.livsci.2013.06.007
2. Shearer JK, Van Amstel SR, Brodersen BW. Clinical diagnosis of foot and leg lameness in cattle. Vet Clin North Am Food Anim Pract. 2012;28(3):535-56. doi:10.1016/j.cvfa.2012.07.003
3. Kofler J. Ultrasonography as a diagnostic aid in bovine musculoskeletal disorders. Vet Clin North Am Food Anim Pract. 2009;25(3):687-731. doi:10.1016/j.cvfa.2009.07.011
4. Kofler J, Geissbühler U, Steiner A. Diagnostic imaging in bovine orthopedics. Vet Clin North Am Food Anim Pract. 2014;30(1):11-53. doi:10.1016/j.cvfa.2013.11.003
5. Nigam JM, Singh AP. Radiography of bovine foot disorders. Mod Vet Pract. 1980;61(7):621-4. PMID: 7432345.
6. Anees R, Dinesh PT, Nithin CJ, Sooryadas S, Chandy G, David PV. Radiographic Changes in Hoof Affections of Dairy Cattle. J Vet Anim Sci (Kerala). 2022;53(2):158-62. doi:10.51966/jvas.2022.53.2.158-162
7. Rodrigues da Silva WP, Queiroz PJB, da Cunha PHJ, Noronha Filho ADF, Arnhold E, de Resende Fernandes JJ, et al. Radiographic Analysis of the Beef Cattle Digits Slaughtered after 114 Days of Confinement. Vet Med Int. 2024;2024:5512555. doi:10.1155/2024/5512555
8. Heppelmann M, Rehage J, Kofler J, Starke A. Ultrasonographic diagnosis of septic arthritis of the distal interphalangeal joint in cattle. Vet J. 2009;179(3):407-16. doi:10.1016/j.tvjl.2007.10.017
9. Laschinger C, Rieger A, Auer U, Lischer C. Diagnostic imaging of the bovine digit: a retrospective analysis of 300 cases. Vet Rec. 2021;189(6):e248. doi:10.1002/vetr.248
10. Hagag U, Brehm W, Gerlach K, Tawfiek MG. Computed Tomography of the Normal Bovine Tarsus. Anat Histol Embryol. 2016;45(6):469-78. doi:10.1111/ahe.12233
11. Arican M, Hatiploglu F, Erol H, Kanat O, Yavuz O, Parlak K, et al. Comparison of Thermographic Imaging and Other Diagnostic Techniques in Diagnosis of Cattle with Laminitis. Acta Sci Vet. 2018;46:1575. doi:10.22456/1679-9216.87224
12. Nazhvani SD, Abbasi S, Tadjalli M. Arteriographic evaluation of the normal distal limb of the goat. Iran J Vet Surg. 2007;3(1):35-40.
13. Tryon KA, Clark CR. Ultrasonographic examination of the distal limb of cattle. Vet Clin North Am Food Anim Pract. 1999;15(2):275-300. doi:10.1016/s0749-0720(15)30183-3
14. Kofler J. Arthrosonography--the use of diagnostic ultrasound in septic and traumatic arthritis in cattle--a retrospective study of 25 patients. Br Vet J. 1996;152(6):683-98. doi:10.1016/s0007-1935(96)80122-9
15. Hagag U, Tawfiek MG. Ultrasonography, computed tomography and magnetic resonance imaging of the bovine metacarpo/metatarsophalangeal joint. Vet J. 2018;233:66-75. doi:10.1016/j.tvjl.2018.01.001
16. Bobić T, Raguž N, Oroz M, Gregić M, Mijić P, Kranjac D, et al. Application of Infrared Thermography in the Detection of Hoof Disease and Lameness in Cattle. Animals (Basel). 2025;15(8):1086. 10.3390/ani15081086
17. Siachos N, Griffiths BE, Wilson JP, Bedford C, Anagnostopoulos A, Neary JM, et al. Evaluation of a fully automated 2-dimensional imaging system for real-time cattle lameness detection using machine learning. J Dairy Sci. 2025;108(4):4206-24. doi:10.3168/jds.2024-25940

18. FAVE. Clinical and radiological evaluation of bovine hoofs: A postmortem study. FAVE Cienc Vet. 2025;24(1):e0043. doi:10.14409/favecv.2025.1.e0043
19. Ooshita K, Tsuka T, Itou Y. Ultrasonographic changes associated with the healing process in a fracture of the distal phalanx in a cow. J Vet Med Sci. 2020;82(9):1295-8. doi:10.1292/jvms.20-0113
20. Fabbri G, Gianesella M, Morgante M, Armato L, Bonato O, Fiore E. Ultrasonographic alterations of bovine claws sole soft tissues associated with claw horn disruption lesions, body condition score and locomotion score in Holstein dairy cows. Res Vet Sci. 2020;131:146-52. doi:10.1016/j.rvsc.2020.04.016
21. Werema CW, Laven L, Mueller K, Laven R. Evaluating Alternatives to Locomotion Scoring for Lameness Detection in Pasture-Based Dairy Cows in New Zealand: Infra-Red Thermography. Animals (Basel). 2021;11(12):3473. doi:10.3390/ani11123473
22. Werema CW, Laven LJ, Mueller KR, Laven RA. Evaluating the Effect of Preventative Trimming on Distance from the Sole Surface to the Distal Phalanx Using Ultrasonography for Lameness Prevention in Pasture-Based Dairy Cows. Vet Sci. 2023;10(2):77. doi:10.3390/vetsci10020077
23. Siachos N, Griffiths BE, Wilson JP, Bedford C, Anagnostopoulos A, Neary JM, et al. Evaluation of a fully automated 2-dimensional imaging system for real-time cattle lameness detection using machine learning. J Dairy Sci. 2025;108(4):4206-24. doi:10.3168/jds.2024-25940
24. Dutton-Regester KJ, Barnes TS, Wright JD, Alawneh JI, Rabiee AR. A systematic review of tests for the detection and diagnosis of foot lesions causing lameness in dairy cows. Prev Vet Med. 2018;149:53-66. doi:10.1016/j.prevetmed.2017.11.003
25. Van Nuffel A, Zwertvaegher I, Pluym L, Van Weyenberg S, Thorup VM, Pastell M, et al. Lameness Detection in Dairy Cows: Part 1. How to Distinguish between Non-Lame and Lame Cows Based on Differences in Locomotion or Behavior. Animals (Basel). 2015;5(3):838-60. doi:10.3390/ani5030387

Abstracts in English

The Role and Comparison of Imaging Modalities (Ultrasonography, Radiography, and Infrared Thermography) in the Diagnosis and Monitoring of Lameness in Dairy Cows

Rasoul Rahimzadeh[1]*, Erfan Eftekhar[2], Erfan Mehmandoost[2], Kimia Azimi[2]
1.Department of Clinical Sciences, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.
2.DVM Student, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.
drtwor@gmail.com*

Background and Study Type: Lameness is one of the most important health and economic problems in dairy cows, associated with reduced animal welfare, decreased milk production, and increased culling rates. This Review Study was conducted with the aim of investigating the role of imaging modalities in the differential diagnosis, treatment monitoring, and prevention of lameness.
Objective: The main objective was to analyze the capabilities and limitations of various imaging modalities, including Radiography (X-ray), Ultrasonography (USG), Computed Tomography (CT), Magnetic Resonance Imaging (MRI), and Infrared Thermography (IRT), in identifying bone and soft tissue lesions associated with lameness.
Methods: This article systematically reviewed scientific literature published between 1980 and 2025, collecting and analyzing key findings on the application of imaging in veterinary medicine. The focus was on studies that evaluated diagnostic accuracy, suitability for treatment monitoring, and feasibility for use in farm settings.
Results: Ultrasonography was identified as the most practical and efficient method (Cost–Effectiveness Ratio: 0.85) due to its field-use capability and soft tissue assessment. It demonstrated a sensitivity of 0.97 in diagnosing septic arthritis. Radiography maintained its primary role in diagnosing phalangeal fractures and chronic bone lesions. Infrared Thermography (IRT), as a non-invasive and rapid screening tool, was able to detect inflammation (hoof surface temperature increase up to approximately 34.5°C) with a sensitivity of 80% and a specificity of 92.4%. Advanced methods like CT and MRI offered the highest accuracy (95% to 98%) in structural detail of bone and soft tissue but their widespread use is limited to complex and research cases. Furthermore, a significant correlation was found between reduced digital cushion thickness in USG and MRI with a low BCS, and increased bone lesions in radiography with a high Lameness Score (LS).
Conclusion: Integrating multiple imaging modalities can significantly enhance the diagnostic accuracy and prognosis of lameness. The use of novel technologies such as Artificial Intelligence in image analysis promises a bright future for automated and preventive monitoring of dairy cow health.
Keywords: Ultrasonography, Lameness, Radiography, Infrared Thermography, Dairy Cow