

## مروری بر کاربردهای ترموگرافی در طب تصویری

زهرة ایمانی نژاد<sup>۱\*</sup>، خلیل خلیلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

<sup>۲</sup> عضو هیأت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\*مسئول مکاتبات: zohreh\_imaninejad@yahoo.com

### چکیده

### واژگان کلیدی

ترموگرافی  
تنظیم دمای بدن  
تشخیص بیماری  
طب تصویری

### تاریخچه مقاله

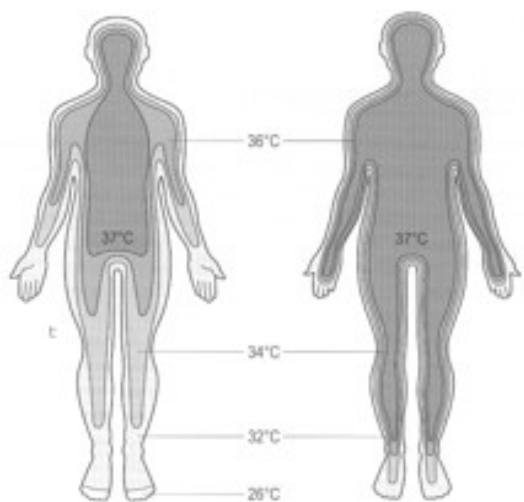
تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۶/۲۱

تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

با توجه به این که ابتلا به بسیاری از بیماری‌ها منجر به تغییر در دمای بافت هدف می‌شوند، لذا آگاهی از تغییرات دمایی بدن می‌تواند به تشخیص سریع و به موقع بیماری کمک کند. ترموگرافی یا تصویربرداری حرارتی با ثبت پرتوهای مادون قرمز ساطع شده از سطح پوست، بدون نیاز به تماس مستقیم با آن می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در تشخیص بیماری‌ها مورد استفاده قرار گیرد. از آنجا که دوربین‌های حرارتی هیچ گونه پرتویی از خود ساطع نمی‌کنند (روش غیرتهاجمی)، بنابراین بدون آسیب رساندن به بافت موردنظر، موقعیت و میزان تغییرات دمایی آن را گزارش می‌کنند. در سال‌های اخیر با ظهور دوربین‌های حرارتی پیشرفته، استفاده از آن در طب تصویری به عنوان روشی بی‌خطر برای تشخیص بیماری‌ها افزایش چشمگیری داشته است.

### ۱ مقدمه

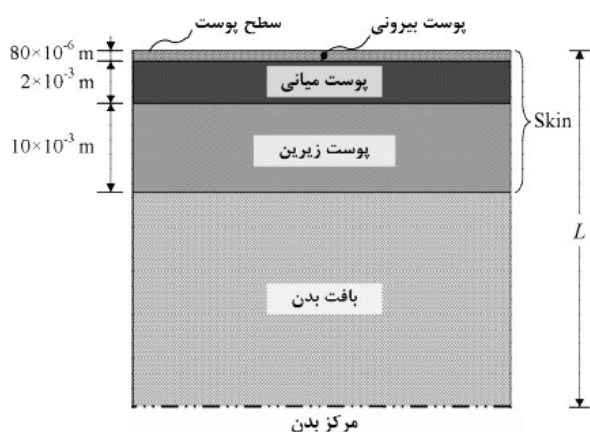
حرارت در بدن انسان از طریق پدیده‌های مختلفی مانند فعالیت‌های سلولی، اعمال متابولیسمی<sup>۱</sup> و مراحل گوارش تولید می‌شود. علاوه بر این دمای محیط پیرامون نیز بر دمای بدن تأثیرگذار است، اما بدن انسان قادر است از طریق تبادل حرارت با محیط پیرامون خود، همواره دمای مرکز خود را ثابت نگه دارد. دمای عادی هسته بدن یک فرد سالم تقریباً بین ۳۶/۲ تا ۳۷/۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است [۱، ۲]. شکل ۱ دمای تقریبی بدن یک فرد سالم در مواجهه با محیط‌های گرم و سرد را نشان می‌دهد [۳]. همان‌طور که مشخص است دمای اندام‌های حیاتی بدن در حدود ۳۷ درجه حفظ شده است. عوامل محیطی و بیماری‌ها می‌توانند سبب تغییر دمای بدن در یک محدوده کوچک بین ۳۳ تا ۴۲ درجه سانتی‌گراد گردند [۴]. ولی دمای خارج از این محدوده می‌تواند موجب مرگ انسان گردد. در شرایط محیطی با دمای مناسب، تغییرات هرچند اندک درجه حرارت بدن می‌تواند به عنوان نشانه‌ای از وجود بیماری باشد. اندازه‌گیری دمای بدن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تشخیص بیماری است [۵، ۶]. در زمان‌های قدیم، یونانیان باستان برای تشخیص محل بیماری، سطح بدن را با گل می‌پوشاندند. هر قسمت از بدن که زودتر خشک می‌شد، نشان‌دهنده وجود بیماری در آن قسمت بود [۷]. قرن‌ها از این روش برای تشخیص بیماری استفاده می‌شد تا این که در اوایل قرن شانزدهم اولین وسیله اندازه‌گیری دما توسط گالیله ابداع شد. پس از آن دماسنج‌های دقیق‌تری کم‌کم ساخته شدند که همگی قادر به اندازه‌گیری دما از طریق تماس فیزیکی مستقیم با جسم بودند [۸].



شکل ۱: دمای بدن در محیط سرد و گرم [۳].

در سال ۱۸۶۸ میلادی، واندرلیخ<sup>۲</sup> اولین دماسنج پزشکی را ابداع کرد که قادر به اندازه‌گیری محدوده دمای بدن یعنی حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد بود. وی با مقایسه دمای بدن بیماران با افراد سالم به کمک این دماسنج دریافت که دمای خارج از بازه تقریبی ۳۶/۲-۳۷/۵ درجه سانتی‌گراد می‌تواند نشانه بروز بیماری باشد [۲]. اندازه‌گیری دمای بدن به روش تماسی<sup>۳</sup> سال‌ها به عنوان تنها روش اندازه‌گیری دمای بدن انسان بود. کشف اشعه مادون قرمز<sup>۴</sup> در سال ۱۸۰۰ میلادی توسط ویلیام هرچل<sup>۵</sup> سرآغاز تحولی عظیم در روش‌های اندازه‌گیری دما بود. هرچل در تحقیقات خود سر یک دماسنج جیوه‌ای حساس را سیاه کرد و از آن برای اندازه‌گیری خواص حرارتی طول موج‌های مختلف نور

<sup>1</sup>metabolism <sup>2</sup>Wunderlich <sup>3</sup>contact-based <sup>4</sup>infrared <sup>5</sup>William Herschel



شکل ۲: شمایی از پوست و لایه‌های مختلف آن [۱۲].

ضریب تابشی<sup>۱۴</sup> پوست برای طول موج‌های ۱۴ - ۲ میکرومتر، تقریباً ثابت و برابر با ۰/۹۸ می‌باشد [۱۳، ۱۴]. ضریب تابشی نشان‌دهنده نسبت پرتوهای مادون قرمز ساطع شده از یک سطح به نسبت پرتوهای ساطع شده از جسم سیاه در همان دما می‌باشد و از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۵].

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2)$$

طبق قانون استفان-بولتزمن میزان انرژی تابشی از یک سطح واقعی نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۱].

$$E = \epsilon \sigma T^4, \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad (3)$$

در این رابطه  $\sigma$  ضریب استفان-بولتزمن<sup>۱۵</sup>،  $T$  دمای مطلق و  $\epsilon$  ضریب تابشی است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش دمای سطح، میزان انرژی ساطع شده از آن نیز افزایش می‌یابد. این انرژی توسط آشکارسازهای فروسرخ<sup>۱۶</sup> در دوربین حرارتی دریافت می‌شود.

### ۳ تاریخچه تصویربرداری حرارتی

پس از کشف پرتو مادون قرمز توسط ویلیام هرچل، اولین تصاویر حرارتی توسط پسرش جان هرچل<sup>۱۷</sup> ضبط شد. وی در سال ۱۹۳۴ میلادی با تصویربرداری حرارتی از پوست انسان، اعلام کرد که پوست انسان را می‌توان مانند یک رادیاتور جسم سیاه<sup>۱۸</sup> در نظر گرفت [۱۶]. به دلیل نبود تجهیزات و دانش کافی تا سال‌ها از ترموگرافی در پزشکی استفاده نمی‌شد. نخستین استفاده‌های ترموگرافی در پزشکی در سال ۱۹۶۰ میلادی گزارش شده است [۸]. در سال ۱۹۷۳ میلادی استکتیتی<sup>۱۹</sup> قابلیت تابش پوست سیاه، سفید و یا سوخته را در بافت زنده و آزمایشگاه مقایسه نمود و مشاهده کرد تفاوتی از این نظر وجود ندارد، در واقع تصویر حرارتی نمایشی از توزیع دمای سطح خارجی پوست است و رنگ پوست بر نتایج تأثیرگذار نیست [۱۴].

تا اواسط دهه ۸۰ میلادی، به دلیل محدودیت‌هایی نظیر رزولوشن مکانی<sup>۲۰</sup> پایین (عدم قطعیت تا ۱ cm<sup>۲</sup>)، رزولوشن دمایی<sup>۲۱</sup> پایین (قادر به درک

مرئی استفاده کرد و به طور کاملاً تصادفی متوجه شد که زمانی که دماسنج به مناطق تاریک بعد از نور قرمز نزدیک می‌شود، دما افزایش می‌یابد [۹]. امروزه این ناحیه از طیف الکترومغناطیس با عنوان مادون قرمز یا فروسرخ شناخته می‌شود. این بخش از طول موج گرچه توسط چشم انسان قابل رؤیت نیست، بلکه اطلاعات فراوانی در خود نهفته دارد. طبق قانون پلانک<sup>۶</sup> هر جسم با دمای بالاتر از صفر مطلق، امواج الکترومغناطیس از خود ساطع می‌کند که شدت پرتو ساطع شده متناظر با دمای جسم است و از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۰].

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)^{-1} \quad (1)$$

در این رابطه  $h$  ثابت پلانک،  $c$  سرعت انتشار نور در خلا و  $k$  ثابت بولتزمن<sup>۷</sup> می‌باشد. ترموگرافی<sup>۸</sup> یا تصویربرداری حرارتی به معنی ضبط پرتوهای مادون قرمز ساطع شده از سطح جسم به منظور اندازه‌گیری دمای آن می‌باشد. تصویربرداری حرارتی روشی غیرتماسی، غیرتهاجمی<sup>۹</sup> و با قابلیت تصویربرداری در زمان بسیار کوتاه و از فواصل نه چندان نزدیک می‌باشد [۱۱]. دوربین‌های حرارتی تنها تابش‌های مادون قرمز منتشر شده از سطح پوست بواسطه حرارت بدن را ضبط می‌کنند و هیچ اثری از اشعه مضر وجود ندارد، لذا برای استفاده‌های طولانی مدت و مکرر مناسب هستند. موارد ذکر شده سبب استفاده گسترده از ترموگرافی در علم پزشکی گردیده است.

### ۲ پوست؛ اندام تنظیم حرارت بدن انسان

پوست مهم‌ترین اندام تنظیم حرارت در بدن انسان است که علاوه بر محافظت از اندام‌های داخلی بدن در برابر آسیب‌های حرارتی و مکانیکی، ممانعت از ورود مواد شیمیایی و میکروب‌ها به بدن، تنظیم رطوبت بدن، دفع مواد مضر حاصل از متابولیسم و حفظ هورمون‌ها و آنزیم‌های داخل بدن، نقش مهمی در تنظیم دمای بدن دارد. توازن حرارتی بین گرمای تولید شده در بدن و اتلاف حرارت از آن توسط پوست صورت می‌پذیرد. مطابق شکل ۲ پوست از سه لایه اصلی تشکیل شده است [۱۲]. بیرونی‌ترین لایه پوست که عمدتاً از سلول‌های مرده تشکیل شده است و ترشح خون تقریباً در آن صفر است، روپوست یا پوست بیرونی<sup>۱۰</sup> نامیده می‌شود. لایه بعدی پوست که جرم اصلی پوست را تشکیل می‌دهد، پوست میانی<sup>۱۱</sup> نام دارد. رگ‌های خونی، اتصالات عصبی و غدد عرق در این لایه قرار دارند و مهم‌ترین لایه پوست محسوب می‌شود. آخرین لایه یا لایه زیرین که چربی میان‌بافتی<sup>۱۲</sup> نیز نامیده می‌شود، اتصال‌دهنده پوست به ماهیچه‌های بدن است. ضخامت این لایه از پوست در قسمت‌های مختلف بدن متفاوت است.

گرمای تولیدی در مرکز بدن از طریق جریان خون به پوست میانی و سپس از طریق رسانش<sup>۱۳</sup> به سطح پوست منتقل می‌شود. افت درجه حرارت به‌واسطه رسانش تقریباً ۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۱۳].

<sup>6</sup>Planck <sup>7</sup>Boltzmann <sup>8</sup>Thermography <sup>9</sup>non-invasive <sup>10</sup>epidermis <sup>11</sup>dermis <sup>12</sup>subcutaneous tissue <sup>13</sup>conduction <sup>14</sup>emissivity <sup>15</sup>Stefan-Boltzmann's constant <sup>16</sup>infrared detectors <sup>17</sup>John Herschel <sup>18</sup>black body <sup>19</sup>Steketeetee <sup>20</sup>spatial resolution <sup>21</sup>temperature resolution

دوربین‌ها با استقبال زیادی در علم پزشکی مواجه شده است. در ادامه به چند مورد از کاربردهای ترموگرافی در تشخیص بیماری‌ها اشاره می‌گردد.

#### ۱.۴ دیابت

بیش از ۶۰ درصد افراد مبتلا به دیابت از ضعف سیستم عصبی محیطی که نوروپاتی دیابتی<sup>۲۴</sup> نامیده می‌شود، رنج می‌برند [۲۰-۲۳]. نوروپاتی دیابتی می‌تواند سبب بروز عوارض جدی مانند زخم پای دیابتی و یا حتی قطع عضو گردد، لذا تشخیص به موقع آن نقش به‌سزایی در پیشگیری از این عوارض حاد خواهد داشت. دمای پای افراد مبتلا به دیابت می‌تواند به عنوان شاخصی برای بررسی وجود یا عدم وجود نوروپاتی مورد ارزیابی قرار گیرد، لذا ترموگرافی می‌تواند ابزاری کارآمد برای تشخیص به موقع نوروپاتی دیابتی باشد. یکی از اولین تحقیقات انجام‌شده در این زمینه توسط برین‌مارک<sup>۲۵</sup> و همکارانش در سال ۱۹۶۷ انجام شد. ایشان در تحقیقی که روی تعدادی فرد جوان مبتلا به دیابت انجام دادند، متوجه توزیع دمای غیرطبیعی در دست و پای این افراد شدند [۲۴]. هاردینگ<sup>۲۶</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۸ از تصویربرداری حرارتی برای تشخیص زخم پا در افراد مبتلا به نوروپاتی دیابتی استفاده کردند. ایشان مشاهده کردند که در افراد مبتلا به نوروپاتی دیابتی نه تنها دمای اطراف زخم، بلکه دمای تمام پا نسبت به افراد عادی بالاتر است. ایشان همچنین در این تحقیق روش ترموگرافی را به نسبت سایر روش‌های تشخیصی موجود مانند روش‌های تشعشی و ایزوتروپیک، روشی منطقی، مقرون به صرفه و عاری از تابش‌های مضر معرفی کردند [۲۵]. بارارا<sup>۲۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۶ مشاهده کردند که در مراحل اولیه نوروپاتی دیابتی دمای پا بالا می‌رود، در حالی که در مراجعات بعدی و با گذشت زمان به دلیل آسیب دیدن عروق خونی با افت دما مواجه است [۲۶]. در سال ۲۰۰۹، نیشیده<sup>۲۸</sup> و همکاران به بررسی التهاب‌های پنهان در پا به کمک ترموگرافی پرداختند و متوجه شدند که در ۱۰ درصد افراد مبتلا به دیابت، در حالی که هیچ نشانه‌ای از بروز التهاب وجود نداشت، دمای نواحی از پا حدود ۱/۶ تا ۲/۸ درجه سانتی‌گراد بالاتر بود که خطر زخم در این مناطق را نشان می‌داد [۲۷]. یک سال بعد بارارا و همکاران در تحقیقی زخم پای دیابتی را بررسی نمودند و برای اولین بار شاخصی برای ارزیابی زخم بر اساس اختلاف دما و مساحت آن ارائه نمودند [۲۸]. در سال ۲۰۱۲، بالینو<sup>۲۹</sup> و همکاران با ترموگرافی کف پا متوجه شدند که در افراد مبتلا به نوروپاتی دیابتی توزیع دما در بین انگشتان پا در افراد بدون عارضه نوروپاتی دیابتی منظم و یکنواخت است، در حالی که در افراد مبتلا به نوروپاتی توزیع حرارت پراکنده و نامنظم دیده می‌شود [۲۹]. شکل ۳ تصویر ترموگرافی از کف پای یک فرد مبتلا به نوروپاتی دیابتی و یک فرد سالم را نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۱۵، هرناندز<sup>۳۰</sup> و همکاران یک سیستم دسته‌بندی برای مشخص نمودن الگوهای دمایی افراد سالم و افراد مبتلا به دیابت ارائه کردند که بر اساس تکنیک‌های پردازش تصویر و استفاده از شبکه‌های عصبی قادر به تشخیص بیماران بود [۳۰، ۳۱].

اختلاف دماهای بیش از ۱ درجه سانتی‌گراد، سرعت پایین (برای هر تصویر حدود ۴ ثانیه زمان لازم بود)، سیستم‌های کالیبراسیون ضعیف و لنزهای با انحراف بالا، استفاده از دوربین‌های مادون قرمز در پزشکی مورد استقبال زیادی قرار نگرفت [۱۷].

در اواخر دهه ۹۰ میلادی دوربین‌های ترموگرافی با دقت بالاتر تولید شدند. این پیشرفت دوربین‌ها تقریباً همزمان با توسعه سیستم‌های پردازش تصویر همراه شد و امکان تبدیل تصاویر حرارتی به تصاویر دیجیتال و پردازش آن توسط کامپیوتر میسر گردید. از آن به بعد نرم افزارهای گوناگون پردازش تصاویر حرارتی که بر اساس الگوریتم‌های قوی طراحی شده‌اند، در اختیار کاربران قرار می‌گیرد.

اولین سیستم تصویربرداری حرارتی در صنعت پزشکی در سال ۲۰۰۷ موفق به دریافت مجوز CE گردید [۱۸]. پس از آن استفاده از تجهیزات تصویربرداری مادون قرمز در بخش‌های وسیعی از پزشکی جهت تشخیص سرطان سینه و بیماری‌های زنان، بیماری‌های نوزادان و کودکان، روماتولوژی و اورتوپدی، عصب شناسی، تصویربرداری از عروق، دیابت، غربالگری کامل بدن از طریق تست تنش‌های حرارتی، نظارت بر فشارخون، بیماری‌های چشمی، کبدی، کلیه، مغز، پوست، دندان و غیره افزایش یافت در بخش بعد به چند مورد از آن‌ها اشاره خواهد شد.

در سال ۲۰۱۴، کوئاس<sup>۲۲</sup> و همکاران با مروری بر تحقیقات انجام‌شده تا آن زمان، پارامترهای مؤثر بر نتایج ترموگرافی بدن انسان، را به سه دسته اصلی تقسیم کردند [۱۹]. جدول ۱ خلاصه‌ای از این دسته‌بندی را نشان می‌دهد.

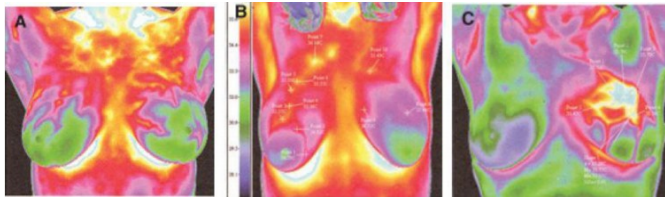
جدول ۱: پارامترهای مؤثر بر اندازه‌گیری دمای بدن توسط ترموگرافی.

| عوامل محیطی   | عوامل فردی  | عوامل فنی   |
|---|---|---|
| دمای محیط، رطوبت نسبی، فشار اتمسفر، ابعاد اتاق، منابع تابشی اطراف | سن، جنسیت، ژنتیک، سابقه پزشکی، جریان خون پوستی، تراکم مو، تناسب اندام، عواطف، ضریب تابشی پوست، سیکل شبانه‌روزی، نرخ متابولیک        | مشخصات دوربین، نحوه عملکرد، نرم‌افزار، ناحیه انتخابی برای پردازش، تحلیل آماری |
|   | فعالیت فیزیکی، مواد مصرفی (مانند الکل، تنباکو، غذا و ...)، مواد استفاده‌شده روی پوست (کرم و پماد نورخورشید و آب)، سابقه درمان پوستی |   |

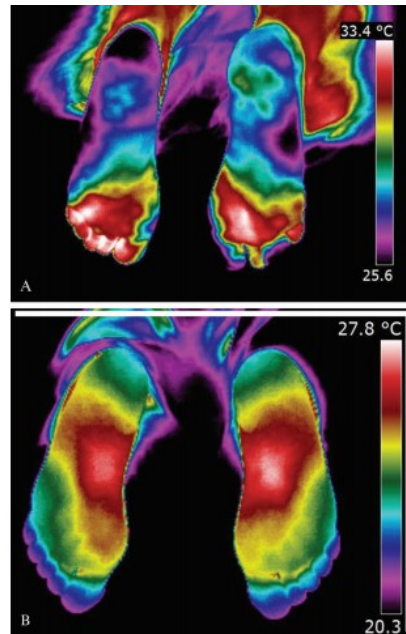
#### ۴ ترموگرافی در تشخیص بیماری‌ها

همان‌طور که قبلاً گفته شد به دلیل مزایای تصویربرداری حرارتی نسبت به سایر روش‌های طب تصویری<sup>۲۳</sup> و در دسترس بودن سیستم‌های تصویربرداری حرارتی با قیمت معقول و دقت کافی، در سال‌های اخیر استفاده از این

سانتی‌گراد بالاتر از بافت سالم است. توزیع دما در سطح پوست تابعی از اندازه تومور، موقعیت و عمق آن می‌باشد [۴۲].



شکل ۴: تصویر حرارتی از الف) سینه سالم، ب) مراحل اولیه سرطان در سینه راست، ج) سرطان پیشرفته در سینه چپ [۴۲].



شکل ۳: الف) توزیع غیریکنواخت دما در بین انگشتان فرد مبتلا به نوروپاتی دیابت؛ ب) توزیع یکنواخت دما در بین انگشتان فرد سالم [۲۹].

## ۱.۵ اختلال در سیستم عصبی

سلول‌های عصبی نقش بسیار مهمی در تنظیم دمای بدن دارند. تغییرات دمای پوست توسط گیرنده‌های عصبی که در زیر پوست قرار دارند به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل شده و سپس این سیگنال‌ها از طریق نخاع به مغز اطلاع داده می‌شود. حال چنانچه اعصاب پوستی که دمای محیط را درک می‌کند، دچار مشکل شود و یا در مسیر انتقال این سیگنال‌ها به مغز و یا مرکز تنظیم حرارت مغز اختلالی وجود داشته باشد، کنترل دمای بدن با مشکل مواجه خواهد شد. به طور مثال تنظیم درجه حرارت در افراد مبتلا به ضایعه نخاعی مسئله‌ای مهم است و بدن این افراد معمولاً برای حفظ دمای خود با مشکل مواجه می‌شود. عدم توانایی در حفظ دمای بدن در این افراد به دلیل اختلال در گیرنده‌های پوستی و عدم توانایی انبساط و انقباض عروقی و تعریق در ناحیه بی‌حس بدن است. معمولاً توصیه می‌شود تا افراد مبتلا به ضایعات نخاعی از قرار گرفتن در محیط‌های با دمای نامناسب پرهیز شود و همچنین دمای محیط اطراف این افراد نیز کنترل گردد. تب در این بیماران به اندازه افراد سالم علامت قابل اطمینانی بر وجود عفونت محسوب نمی‌شود و اغلب ناشی از اختلال در تنظیم دمای بدن است و به خودی خود از بین می‌رود. لذا توصیه می‌شود در ترموگرافی از این افراد دقت لازم به عمل آید.

یکی از اولین تحقیقات قرن حاضر در مورد استفاده از ترموگرافی در عصب‌شناسی در سال ۲۰۰۱ توسط رایدل<sup>۳۶</sup> و همکاران انجام شد. ایشان در این تحقیق به بررسی دمای پوست در تعدادی فرد سالم و افراد دچار سکتة مغزی پرداختند. ایشان دریافتند که آسیب‌های عصبی موضعی در اندام‌ها می‌تواند بر دمای پوست تأثیرگذار باشد [۴۳]. در سال ۲۰۰۲، بوتکوویچ<sup>۳۷</sup> الگوهای حرارتی در بدن افراد سالم و افراد دارای اختلال در سیستم عصبی محیطی در بخش‌هایی از بدن را مقایسه کردند و متوجه الگوهای حرارتی غیرمنظم در بیماران شدند [۴۴]. در سال ۲۰۰۳، استولین<sup>۳۸</sup> و همکاران در یک مقاله مروری به بررسی ناتوانایی‌های ترموگرافی در زمینه عصب‌شناسی پرداختند [۴۵]. بیماران دارای اختلالات جسمی و ذهنی اغلب از ضعف سیستم عصبی محیطی رنج می‌برند. بنابراین تشخیص به موقع این عارضه برای کمک به این افراد اهمیت دارد. سوزوکی<sup>۳۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ واکنش پوست این افراد نسبت به محرک‌های سرد را بررسی نمودند و برای

## ۵ سرطان سینه

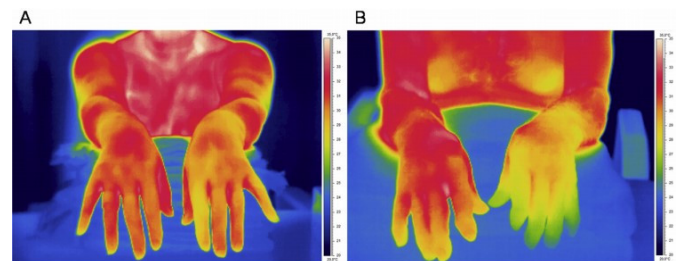
سرطان سینه یکی از رایج‌ترین انواع سرطان‌ها در میان زنان است. شانس زنده ماندن در صورت تشخیص به موقع آن ۸۵ درصد و در غیر این صورت تنها ۱۰ درصد است [۳۲]. سلول‌های سرطانی به دلیل نرخ متابولیک بالاتر و رگ‌زایی گرمای بیشتری نسبت به سایر سلول‌ها تولید می‌کنند [۳۳-۳۶]. حرارت بالاتر در مجاورت سلول‌های سرطانی می‌تواند به تشخیص زودهنگام این بیماری کمک کند. در سال ۱۹۸۲، اسپیتالیه<sup>۳۱</sup> و همکاران، گزارشی از مشاهدات ترموگرافی ۱۰ ساله خود روی ۶۱۰۰۰ زن را اعلام کردند. ایشان مشاهده کردند که در ۶۰ درصد موارد ترموگرافی اولین راه تشخیص به موقع سرطان سینه است [۳۷]. در همین سال در مقاله دیگری توسط لوئیس<sup>۳۲</sup>، الگوهای دمایی نامتقارن در تصاویر حرارتی را بزرگترین شاخص برای تشخیص سرطان در آینده معرفی شد [۳۸]. در سال ۱۹۵۶، لاوسون<sup>۳۳</sup> یکی از اولین محققانی بود که اندازه‌گیری دمای سطحی پوست را به عنوان ابزاری برای تشخیص سرطان سینه معرفی کرد [۳۹]. بعدها در سال ۱۹۶۳، لاوسون و چوگتای<sup>۳۴</sup> از اسکنرهای مادون قرمز برای اندازه‌گیری دمای ناحیه اطراف یک تومور استفاده کردند و مشاهده نمودند که دمای سطح مجاور تومور حدود ۲ درجه سانتی‌گراد بالاتر از سایر نواحی است [۴۰]. در سال ۱۹۹۳، هد<sup>۳۵</sup> و همکاران در تحقیقی که روی تعدادی فرد سالم و تعدادی فرد مبتلا به سرطان سینه انجام دادند، در حدود ۸۸ درصد افراد مبتلا به سرطان، الگوی حرارتی غیرطبیعی مشاهده کردند و تنها در ۲۸ درصد افراد سالم، توزیع حرارتی غیرطبیعی مشاهده شد [۴۱]. شکل ۴ تصاویر حرارتی از سینه فرد سالم، فردی در مراحل اولیه بیماری و فردی با سرطان پیشرفته را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بافت مجاور با تومور تقریباً ۲/۵ درجه

<sup>31</sup>Spitalier <sup>32</sup>Louis <sup>33</sup>Lawson <sup>34</sup>Chughtai <sup>35</sup>Head <sup>36</sup>Riedl <sup>37</sup>Butković <sup>38</sup>Stulin <sup>39</sup>Suzuki <sup>40</sup>Rubio <sup>41</sup>Parkinson <sup>42</sup>cold stress

*A Manual of Medical Thermometry*. New Sydenham Society, second ed. , 1871.

- [3] Sircus, Mark. Low body temperature symptoms and causes and how to treat it. Online, 2015. <https://drsircus.com/light-heat/low-body-temperature-symptoms-causes-treat/>.
- [4] Bouzida, Nabila, Bendada, Abdelhakim, and Maldague, Xavier P. Visualization of body thermoregulation by infrared imaging. *Journal of Thermal Biology*, 34(3):120 – 126, 2009.
- [5] Atkins, Elisha. Fever: The Old and the New. *The Journal of Infectious Diseases*, 149(3):339–348, 03 1984.
- [6] Atkins, E. Fever: its history, cause, and function. *The Yale journal of biology and medicine*, 55(3-4):283–289, 1982. 6758374[pmid].
- [7] Mary Diakides, Joseph D. Bronzino, Donald R. Peterson, ed. . *Medical Infrared Imaging: Principles and Practices*. CRC Press, 2013.
- [8] Ring, Francis. Thermal imaging today and its relevance to diabetes. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 4(4):857–862, 2010. PMID: 20663449.
- [9] Ring, E.F.J. The historical development of temperature measurement in medicine. *Infrared Physics & Technology*, 49(3):297 – 301, 2007.
- [10] Kandlikar, Satish G., Perez-Raya, Isaac, Raghupathi, Pruthvik A., Gonzalez-Hernandez, Jose-Luis, Dabydeen, Donnette, Medeiros, Lori, and Phatak, Pradyumna. Infrared imaging technology for breast cancer detection – current status, protocols and new directions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108:2303 – 2320, 2017.
- [11] Lahiri, B.B., Bagavathiappan, S., Jayakumar, T., and Philip, John. Medical applications of infrared thermography: A review. *Infrared Physics & Technology*, 55(4):221 – 235, 2012.
- [12] Zolfaghari, Alireza. *Modification of standard thermal comfort models by using the frequency thermal analysis of the human body*. Ph.D. thesis, Tarbiat Modares University, 2010. (In Persian).
- [13] JONES, B. F. A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine. *IEEE transactions on medical imaging*, pp. 1019–1027, 1998.
- [14] Steketee, J. Spectral emissivity of skin and pericardium. *Physics in Medicine and Biology*, 18(5):686–694, sep 1973.
- [15] Bergman, Theodore L, Incropera, Frank P, DeWitt, David P, and Lavine, Adrienne S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [16] Hardy, J. D. The radiation of heat from the human body: Iii. the human skin as a black-body radiator. *The Journal of clinical investigation*, 13(4):615–620, Jul 1934. 16694233[pmid].
- [17] Kerr, Jane. Review of the effectiveness of infrared thermal imaging (thermography) for population screening and diagnostic testing of breast cancer. *NZHTA TECH BRIEF SERIES*, 3(3):2–49, 2004.
- [18] Berz, Reinhold and Sauer, Helmut. The medical use of infrared-thermography history and recent applications, 2007.

این منظور از تصویربرداری حرارتی قبل و بعد از تحریک سرد استفاده کردند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که در افراد مبتلا به اختلالات حرکتی و ذهنی، فعالیت سیستم عصبی سمپاتیک بسیار ضعیف است [۴۶]. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۳، روییو<sup>۴۰</sup> و همکاران به کمک تصویربرداری حرارتی، دمای پوست دست افراد مبتلا به پارکینسون<sup>۴۱</sup> را پس از اعمال تنش‌های سرد<sup>۴۲</sup> بررسی کردند. ایشان متوجه توزیع حرارت غیرطبیعی در دست این افراد به دلیل ضعف در سیستم عصبی شدند. بنابراین ایشان روشی ساده برای ارزیابی عملکرد سیستم عصبی در این بیماران ارائه نمودند [۴۷]. شکل ۵ تصویر حرارتی از دستان فرد مبتلا به پارکینسون را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است به دلیل آسیب شدید سلول‌های عصبی دست چپ، این دست دمای پایین‌تری از دست راست دارد.



شکل ۵: عدم توازن حرارتی در دستان فرد مبتلا به پارکینسون [۴۷].

## ۶ نتیجه‌گیری

تشخیص زودهنگام بسیاری از بیماری‌ها که بدون هیچ‌گونه درد و علامت اولیه در بدن ایجاد می‌گردند، بدون استفاده از تکنیک‌های طب تصویری شاید غیرممکن باشد. بسیاری از این بیماری‌ها که به آن‌ها قاتلان خاموش نیز گفته می‌شود، مانند برخی سرطان‌ها و دیابت، سبب برهم زدن توازن حرارتی در اندام‌های بدن می‌گردند. ترموگرافی به کمک دوربین‌های مادون قرمز قادر به ارائه نقشه توزیع حرارت در سطح بدن است. این روش قادر است در زمانی بسیار کوتاه، بدون نیاز به تماس مستقیم، بدون داشتن هیچ‌گونه پرتو زیان‌بار و با هزینه نسبتاً پایین، توزیع حرارت در سطح وسیعی از بدن را نمایش دهد. پیشرفت‌های حاصل‌شده در تکنولوژی دوربین‌های مادون قرمز و به بازار آمدن دوربین‌های با رزولوشن بسیار بالا از یک سو و وجود الگوریتم‌های پردازش تصویر بسیار قوی از سوی دیگر، سبب امکان بررسی بسیار دقیق توزیع دما در سطح بدن و با کم‌ترین خطای انسانی شده است. در این مقاله مروری بر تحقیقات انجام‌شده در این زمینه انجام شده است و به نظر می‌رسد ترموگرافی می‌تواند به عنوان روشی قابل اطمینان برای تشخیص بیماری‌ها بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد.

## مراجع

- [1] Mackowiak, Philip A., Wasserman, Steven S., and Levine, Myron M. A Critical Appraisal of 98.6°F, the Upper Limit of the Normal Body Temperature, and Other Legacies of Carl Reinhold August Wunderlich. *JAMA*, 268(12):1578–1580, 09 1992.
- [2] Wunderlich, Carl August. *On the Temperature in Diseases*:

- [30] Hernandez-Contreras, D., Peregrina-Barreto, H., Rangel-Magdaleno, J., Ramirez-Cortes, J., Renero-Carrillo, F., and Avina-Cervantes, G. Evaluation of thermal patterns and distribution applied to the study of diabetic foot. in *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, pp. 482-487, May 2015.
- [31] Hernandez-Contreras, D., Peregrina-Barreto, H., Rangel-Magdaleno, J., Ramirez-Cortes, J., and Renero-Carrillo, F. Automatic classification of thermal patterns in diabetic foot based on morphological pattern spectrum. *Infrared Physics & Technology*, 73:149 – 157, 2015.
- [32] Ng, E. Y. K. and Sudharsan, N. M. Numerical computation as a tool to aid thermographic interpretation. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 25(2):53-60, 2001.
- [33] Foster, K. R. Thermographic detection of breast cancer. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 17(6):10-14, Nov 1998.
- [34] Qi, Hairong, Kuruganti, Phani Teja, and Snyder, Wesley E. Detecting breast cancer from thermal infrared images by asymmetry analysis. in *Medical Devices and Systems*, pp. 597-610. CRC Press, 2006.
- [35] Keith, L. G., Oleszczuk, J. J., and Laguens, M. Circadian rhythm chaos: a new breast cancer marker. *Int J Fertil Womens Med*, 46(5):238-247, 2001.
- [36] Koay, J., Herry, C., and Frize, M. Analysis of breast thermography with an artificial neural network. in *The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 1, pp. 1159-1162, Sep. 2004.
- [37] Amalric, R, Giraud, D, Altschuler, C, Amalric, F, Spitalier, JM, Brandone, H, Ayme, Y, and Gardiol, AA. Does infrared thermography truly have a role in present-day breast cancer management? *Progress in clinical and biological research*, 107:269-278, 1982.
- [38] Gautherie, M., Haehnel, P., Walter, J. P., and Keith, L. Long-term assessment of breast cancer risk by liquid-crystal thermal imaging. *Prog Clin Biol Res*, 107:279-301, 1982.
- [39] LAWSON, R. Implications of surface temperatures in the diagnosis of breast cancer. *Canadian Medical Association journal*, 75(4):309-311, Aug 1956. 13343098[pmid].
- [40] Lawson, R. N. and Chughtai, M. S. Breast cancer and body temperature. *Canadian Medical Association journal*, 88(2):68-70, Jan 1963.
- [41] Head, Jonathan F., Wang, Fen, and Elliott, Robert L. Breast thermography is a noninvasive prognostic procedure that predicts tumor growth rate in breast cancer patients. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 698(1):153-158, 1993.
- [42] Kennedy, Deborah A., Lee, Tanya, and Seely, Dugald. A comparative review of thermography as a breast cancer screening technique. *Integrative Cancer Therapies*, 8(1):9-16, 2009. PMID: 19223370.
- [19] Fernández-Cuevas, Ismael, Marins, Joao Carlos Bouzas, Lastras, Javier Arnáiz, Carmona, Pedro María Gómez, Cano, Sergio Piñonosa, Ángel García-Concepción, Miguel, and Sillero-Quintana, Manuel. Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: A review. *Infrared Physics & Technology*, 71:28 – 55, 2015.
- [20] Bagavathiappan, Subramnaiam, Philip, John, Jayakumar, Tammana, Raj, Baldev, Rao, Pallela Narayana Someshwar, Varalakshmi, Muthukrishnan, and Mohan, Viswanathan. Correlation between plantar foot temperature and diabetic neuropathy: a case study by using an infrared thermal imaging technique. *Journal of diabetes science and technology*, 4(6):1386-1392, Nov 2010.
- [21] Ahmad, Jamal. The diabetic foot. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 10(1):48 – 60, 2016.
- [22] Zubair, Mohammad, Malik, Abida, and Ahmad, Jamal. Clinico-microbiological study and antimicrobial drug resistance profile of diabetic foot infections in north india. *The Foot*, 21(1):6 – 14, 2011.
- [23] Zubair, Mohammad, Malik, Abida, and Ahmad, Jamal. Study of plasmid-mediated extended-spectrum - lactamase-producing strains of enterobacteriaceae, isolated from diabetic foot infections in a north indian tertiary-care hospital. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 14(4):315-324, 2012. PMID: 22225456.
- [24] Brånemark, P. I., Fagerberg, S. E., Langer, L., and Säve-Söderbergh, J. Infrared thermography in diabetes mellitus a preliminary study. *Diabetologia*, 3(6):529-532, Dec 1967.
- [25] Harding, J. R., Wertheim, D. F., Williams, R. J., Melhuish, J. M., Banerjee, D., and Harding, K. G. Infrared imaging in diabetic foot ulceration. in *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Vol.20 Biomedical Engineering Towards the Year 2000 and Beyond (Cat. No.98CH36286)*, vol. 2, pp. 916-918, Nov 1998.
- [26] Bharara, M., Cobb, J. E., and Claremont, D. J. Thermography and thermometry in the assessment of diabetic neuropathic foot: A case for furthering the role of thermal techniques. *The International Journal of Lower Extremity Wounds*, 5(4):250-260, 2006. PMID: 17088601.
- [27] Nishide, Kaoru, Nagase, Takashi, Oba, Miho, Oe, Makoto, Ohashi, Yumiko, Iizaka, Shinji, Nakagami, Gojiro, Kadowaki, Takashi, and Sanada, Hiromi. Ultrasonographic and thermographic screening for latent inflammation in diabetic foot callus. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 85(3):304 – 309, 2009.
- [28] Bharara, Manish, Schoess, Jeffrey, Nouvong, Aksone, and Armstrong, David G. Wound inflammatory index: A “proof of concept” study to assess wound healing trajectory. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 4(4):773-779, 2010. PMID: 20663437.
- [29] Balbinot, Luciane Fachin, Canani, Luis Henrique, Robinson, Caroline Cabral, Achaval, Matilde, and Zaro, Milton Antonio. Plantar thermography is useful in the early diagnosis of diabetic neuropathy. *Clinics*, 67:1419 – 1425, 12 2012.

- [43] Riedl, B., Beckmann, T., Neundörfer, B., Handwerker, H. O., and Birklein, F. Autonomic failure after stroke – is it indicative for pathophysiology of complex regional pain syndrome? *Acta Neurologica Scandinavica*, 103(1):27–34, 2001.
- [44] Butkević Soldo, Silva, Petravić, Damir, Alvir, Domagoj, Unušić, Lea, and Zurak, Nikša. Femoral isothermal pattern in peripheral nervous system lesions of lumbosacral localization. *Neurologia Croatica*, 51:183–198, 2002.
- [45] Stulin, I. D., Mnushkin, A. O., Musin, R. S., Sazonova, AG, Suleymanova, MV, Stulin, GI, Surikova, IL, Matskeplishvily, MT, Savin, AA, Seleznev, AN, et al. Is it possible to reanimate the dying interest to the thermovision in neurology? *Zhurnal Nevropatologii I Psikiatrii Imeni SS Korsakova*, pp. 1–15, 2003.
- [46] Suzuki, Yuka, Kobayashi, Midori, Kuwabara, Kozue, Kawabe, Mika, Kikuchi, Chiya, and Fukuda, Mitsumasa. Skin temperature responses to cold stress in patients with severe motor and intellectual disabilities. *Brain and Development*, 35(3):265–269, Mar 2013.
- [47] Antonio-Rubio, I., Madrid-Navarro, C.J., Salazar-López, E., Pérez-Navarro, M.J., Sáez-Zea, C., Gómez-Milán, E., Mínguez-Castellanos, A., and Escamilla-Sevilla, F. Abnormal thermography in parkinson's disease. *Parkinsonism & Related Disorders*, 21(8):852 – 857, 2015.