

## ارائه یک مدل ریاضی کاربردی به منظور برآورد استحکام تنه و ضریب اطمینان درختان با تاج گنبدی در مقابل نیروی باد

جلال برادران مطیع<sup>\*۱</sup> - محسن شاکری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۸

تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۶

### چکیده

یکی از راههای جلوگیری و کاهش خسارات ناشی از شکست درختان اجرای برنامه پایش وضعیت است. عیوبی نظیر پوسیدگی، پوکی و حفره در تنه درختان موجب کاهش مقاومت در برابر نیروهای وارده از تاج، نظیر باد می شود. در این مقاله با استفاده از تکنیک مدل سازی ریاضی بر پایه روش های مقاومت مصالح، پارامترهای اثرگذار در مقاومت مکانیکی تنه درختان با تاج گنبدی در مقابل باد بررسی، و مدلی کاربردی به منظور تعیین ضریب اطمینان استحکام تنه در برابر نیروهای ناشی از باد تهیه شد. در این مدل می توان با در دست داشتن برخی پارامترهای هندسی نظیر (ابعاد تاج و تنه، چگالی حجمی تاج، سطح و حجم تاج در مقابل باد، قطر مقطع و حفره، و پوسیدگی در مقطع تحت بررسی) و پارامترهای مکانیکی مانند (مدول الاستیسیته چوب، حداکثر تنش قابل تحمل، حداکثر سرعت باد در منطقه، وزن تاج و تنه) تنش کل ایجاد شده در مقطع مورد نظر را بدست آورد. با مقایسه حداکثر تنش کل در تنه با تنش قابل تحمل چوب درخت، ضریب اطمینان تنه، برای یک نمونه درخت چنار محاسبه گردید. همچنین این مدل نشان داد حداکثر تنش کل ایجاد شده در مقطع درخت تحت شرایط یکسان سرعت باد، ارتفاع درخت و چگالی تاج با تغییر قطر حفره داخلی از ۴۰ درصد قطر تنه به صورت تابع درجه چهار با  $R^2 = 0.99$  به طور ناگهانی افزایش یافت.

**واژه های کلیدی:** استحکام تنه، چگالی تاج، سرعت باد، ضریب اطمینان، مدل ریاضی

### مقدمه

به دو بخش پایش از نظر آفات نباتی و پایش مقاومت در برابر نیروهای خارجی تقسیم بندی می شود.

از جمله عواملی که موجب کاهش مقاومت درخت در برابر نیروهای خارجی می شود می توان به وجود حفره در تنه، پوکی و پوسیدگی بافت چوب اشاره نمود. روشهای مختلفی به منظور تشخیص و تعیین میزان و گسترش عوامل فوق الذکر وجود دارد. در روش سنتی، بازرسی درخت توسط یک فرد با تجربه صورت می گیرد. فرد با استفاده از چکش به تنه درخت ضرباتی وارد کرده و با توجه به طنین صدای ایجاد شده پی به وجود حفره و پوسیدگی چوب می برد. این روش قابلیت اطمینان پایینی دارد و ممکن است در یک تصمیم گیری اشتباه موجب قطع درختانی می شود که هنوز توانایی مقاومت در برابر باد و طوفان را دارند.

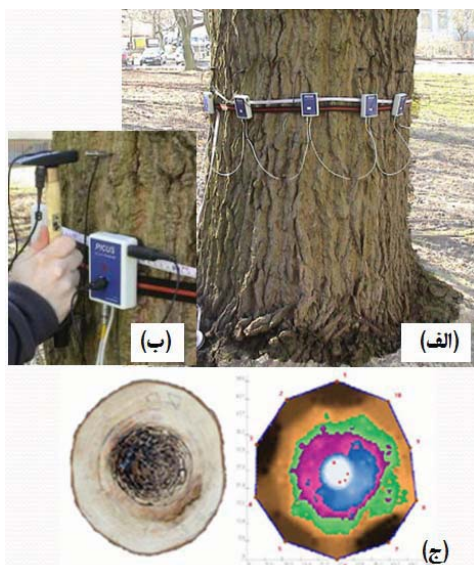
به منظور حذف خطای انسانی در مرحله بازرسی و پایش درختان روش های دیگری توسعه یافته اند. از جمله این روش ها می توان

با توجه به تراکم جمعیت در محیط های شهری و آلودگی های زیست محیطی ناشی از آن، حفظ و ایجاد فضاهای سبز از دغدغه های مدیران شهرها می باشد. از طرفی همه ساله در اثر عواملی نظیر باد، طوفان، برف، زمین لرزه و رانش زمین تعدادی از درختان سقوط کرده و خسارات جانی و مالی قابل توجهی ببار می آورند. از این رو تشخیص درختان پر خطر و تعیین حد آستانه نیروی قابل تحمل تنه آنها، می تواند در تصمیم گیری در مورد حفظ، تقویت و یا قطع و جایگزینی درختان تعیین کننده باشد. بدین منظور لازم است برنامه جامع پایش وضعیت درختان اجرا شود. این برنامه شامل سرشماری درختان و بازرسی های دوره ای می باشد. پایش وضعیت درختان در این برنامه

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و مربی گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: Jalal\_jbm@yahoo.com

\*) - نویسنده مسئول:



شکل ۲- روش صوت نگاری (الف) چیدمان گیرنده های صوتی (ب) ایجاد پالس صوتی به وسیله چکش مخصوص (ج) توموگراف، وضعیت داخلی تنه از نظر وجود حفره و پوسیدگی را نشان می‌دهد.

**استفاده از امواج رادار:** این روش بر پایه بازتابش امواج رادار ارسالی درون تنه درخت در اثر برخورد جسمی با خواص الکترومغناطیسی متفاوت بنا شده است. بدین منظور آنتن مخصوص که دارای فرستنده و گیرنده امواج رادار زمین نفوذ با فرکانس مشخص می‌باشد توسط کاربر ۳۶۰ درجه به دور تنه درخت دوران داده می‌شود (شکل ۳). قسمت هایی از چوب که دچار پوکی، پوسیدگی و یا حفره شده باشند خواص الکترومغناطیسی متفاوتی نسبت به سایر بخش های چوب سالم دارند، در نتیجه مقداری از موج ارسال شده بازتابش کرده و مقداری از آن نیز عبور می‌کند (۳). اطلاعات مربوط به ارسال و دریافت امواج درون واحد کنترل دستگاه که یک رایانه قابل حمل می‌باشد پردازش و ذخیره می‌شود.

این دستگاه به نام اسکن ام. ار. آی<sup>۴</sup> و یا یونیت رادار<sup>۵</sup> درخت شناخته می‌شود. با استفاده از دستگاه اسکن درختان، می‌توان به صورت غیر مخرب، پوکی، حفره و پوسیدگی بافت چوب (شکل ۴) و همچنین پراکنش ریشه در اطراف درخت را نیز تشخیص داد. روش های فوق الذکر تنها اطلاعات خامی از محل و اندازه حفره درون تنه درخت را در اختیار می‌گذارند، حال آنکه تصمیم گیری در مورد نگهداری یا قطع درخت بر اساس نتایج آنها، لازم است پارامترهای دیگری نظیر ارتفاع تاج، قطر تنه و حفره، ارتفاع محل قرار گیری حفره، حداکثر سرعت وزش باد در منطقه مورد نظر را مورد توجه قرار داد.

مقاومت نگاری<sup>۱</sup>، صوت نگاری<sup>۲</sup> و کاربرد امواج رادار زمین نفوذ<sup>۳</sup> را نام برد.

**مقاومت نگاری:** در این روش با استفاده از تجهیزات مخصوص سوراخ های ریزی درون درخت تا مرکز تنه ایجاد می‌شود. دریل سوراخ کن توانایی اندازه گیری و ذخیره مقاومت چوب در مقابل سوراخ شدن با مته در هر لحظه را دارد. با توجه به تغییرات مقاومت چوب می‌توان در مورد وجود حفره و پوکی تنه اظهار نظر کرد (۶) (شکل ۱). روش مقاومت نگاری از جمله روش های مخرب پایش وضعیت درختان می‌باشد زیرا موجب آسیب فیزیکی به چوب درخت می‌شود.

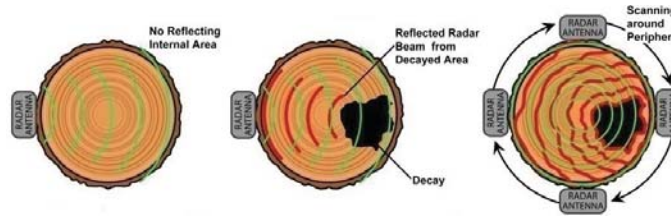


شکل ۱- پایش وضعیت تنه درخت بوسیله روش مقاومت نگاری (الف) دستگاه مقاومت نگار (رزیستوگراف) (ب) نوار گراف تغییرات سختی چوب در مسیر ورود مته به درون تنه

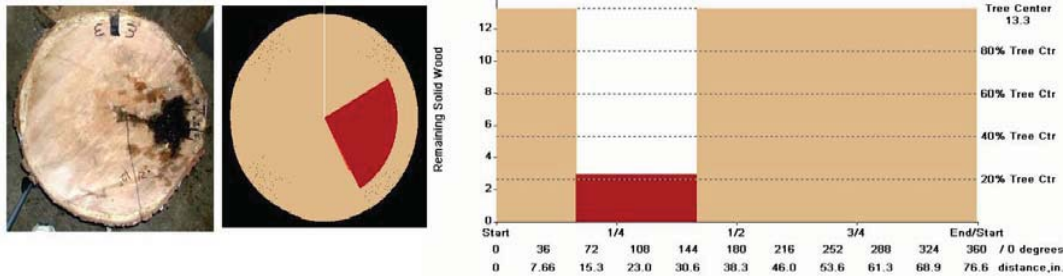
**روش صوت نگاری:** این روش بر پایه اندازه گیری سرعت صوت درون چوب تنه درخت بنا شده است. سرعت عبور صوت در چوب سالم بیشتر از چوب پوک و پوسیده می‌باشد. بدین منظور گیرنده‌های مختلفی در اطراف تنه نصب می‌شود سپس به وسیله چکش مخصوص به تنه ضربه زده می‌شود (شکل ۲). هر کدام از گیرنده ها سرعت عبور صدای ناشی از ضربه را در جهات مختلف اندازه گیری می‌کنند. یک نرم افزار رایانه ای می‌تواند داده های گیرنده ها را پردازش کرده و محل و اندازه حفره های موجود در تنه درخت را تشخیص دهد. این روش غیر مخرب بوده و آسیبی به درخت وارد نمی‌کند (۴).

- 1- Resistography
- 2- Sonic Tomography
- 3- Ground Penetrating Radar (GPR) Tomography, Tree Radar Unit (TRU)

4- Tree M.R.I. Scan  
5- Tree Radar Unit (TRU)



شکل ۳- گردش آنتن به دور تنه درخت و تشخیص محل حفره



شکل ۴- نمودار تعیین مقدار چوب باقی مانده در مقطع درخت و مقطع پیش بینی شده تنه درخت توسط دستگاه TRU

درختان در اثر نیروی وزن خود سقوط نمی کنند. در این بین نیروی باد مهمترین و مؤثرترین عامل شکست تنه و سقوط درخت به شمار می رود. تحلیل مقاومت درخت در برابر نیروی باد را می توان با داشتن چگالی و ارتفاع زنده تاج و نیز ارتفاع کل درخت انجام داد.

هنگامی که درخت تحت تأثیر نیروی باد قرار می گیرد دچار تغییر شکل و خمش می شود (شکل ۳). نیروی ایجاد شده در اثر برخورد باد با شاخ و برگ درخت به مراتب بیشتر از نیروی ناشی از برخورد باد با تنه آن می باشد، در نتیجه می توان از این نیرو در درختانی که تاج بزرگ و متراکمی (مانند چنار، بلوط، گردو) دارند صرفه نظر کرد. شاخ و برگ درخت در برابر باد ایجاد مقاومت کرده و متناسب با تراکم برگ ها و شاخه ها (چگالی تاج)، سرعت باد پس از عبور از تاج کاهش می یابد. اختلاف سرعت باد در دو طرف تاج سبب ایجاد اختلاف فشار هوا گردیده که موجب ایجاد نیروی فشاری به صورت بار گسترده بر تاج می شود. محل اثر برآیند بار گسترده ناشی از باد با توجه به شکل هندسه فضایی تاج متفاوت است اما به طور عموم می توان با تقریب خوبی در درختان با تاج گنبدی و مخروطی آن را در  $0.1/6$  ارتفاع تاج در نظر گرفت (۱). برآورد بزرگی این نیرو با روش های مختلفی نظیر نصب کرنش سنج و کابل کششی (۵) و مدل های ریاضی (۷ و ۸) امکان پذیر است.

کودر و همکاران پس از آزمایشات گسترده روی درختان با تاج مخروطی و شبه گنبدی جدولی به منظور برآورد نیروی درگ (نیروی باد) با داشتن سرعت باد و چگالی تاج در جهت وزش باد، تهیه کرده اند (جدول ۱). چگالی تاج را می توان بوسیله عکس برداری از درخت در جهات مختلف و به کمک نرم افزارهای پردازش تصویر تعیین نمود. بدین منظور تصاویر بایستی در راستای وزش باد (معمولاً

هدف از این تحقیق ارائه روشی به صورت یک مدل ریاضی بر اساس اصول مقاومت مصالح و استاتیک حاکم بر درخت می باشد که به کمک آن بتوان نتایج حاصل از روش های مختلف پایش وضعیت درختان را به سوی یک تصمیم گیری نسبتاً دقیق هدایت نمود. این مدل می تواند مورد استفاده کارشناسان فضاها های سبز شهری واقع شود.

## مواد و روش ها

در این تحقیق به منظور تعیین وضعیت تنه از نظر وجود حفره های داخلی و تشخیص محل و اندازه حفره ها دستگاه TRU به علت سرعت بالا و نتایج با دقت مناسب، پیشنهاد می شود. در این دستگاه آنتن، مجهز به چرخ لاستیکی می باشد که روی سطح تنه درخت در حین دوران می چرخد. چرخش چرخ میزان پایش روی آنتن را مشخص نموده و دستگاه به ازای هر ۵ میلی متر پیشروی یک پالس موج الکترومغناطیس به سمت مرکز تنه ارسال می نماید. رزولوشن نتایج دستگاه در چوب ۳ سانتی متر می باشد. همچنین ارتفاع مؤثر اسکن توسط دستگاه ۳۰ سانتی متر است که می توان به راحتی در چند ارتفاع عمل اسکن را انجام داد.

## نیروها و معادلات حاکم بر تنه درخت

نیروی وزن و نیروی باد دو نیروی عمده وارد بر تاج و تنه درخت می باشند. بررسی مقاومت ساختاری درخت در مقابل این دو نیرو به دلیل نبود اطلاعات کافی از شرایط درخت و نیرو های وارد بر آن فرایندی پیچیده است. با توجه به نحوه رشد تنه، عموماً هیچگاه

$$x_1 = \frac{Fh_3^3}{3EI} \quad (۲)$$

$$\theta = \frac{Fh_3^2}{2EI} \quad (۳)$$

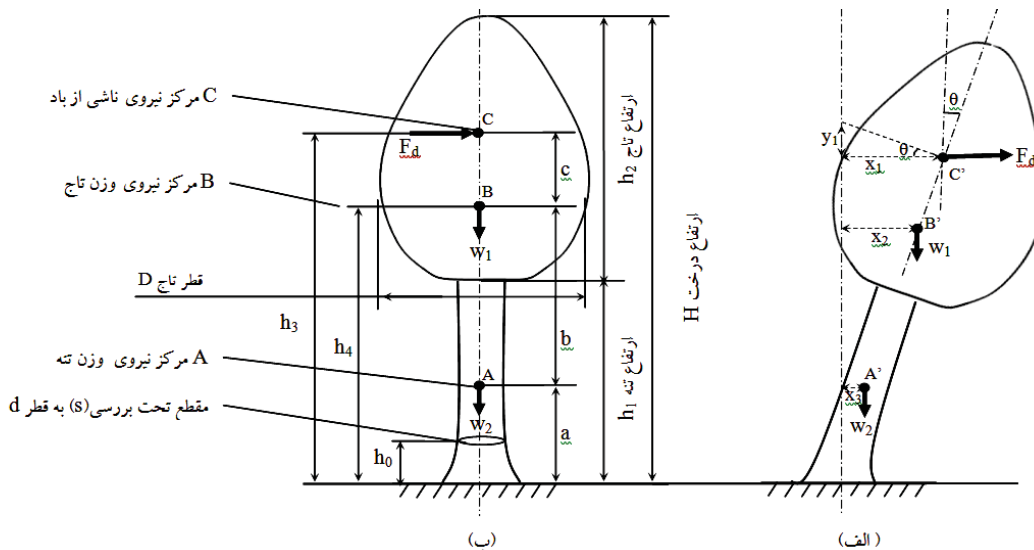
$$x_2 = \frac{F}{6EI} [3h_3h_4^2 - h_4^3] \quad (۴)$$

$$x_3 = \frac{F}{6EI} [3h_3a^2 - a^3] \quad (۵)$$

$$y_1 = x_1 \cdot \text{tg}(\theta) = \frac{Fh_3^3}{3EI} \cdot \text{tg} \left[ \frac{Fh_3^2}{2EI} \right]_{rad} \quad (۶)$$

در این روابط  $h_3$  ارتفاع نقطه اثر نیروی درگ (Fd)، در دو سوم ارتفاع تاج قرار دارد،  $h_4$  ارتفاع نقطه اثر نیروی وزن تاج، در یک سوم ارتفاع تاج،  $\theta$  زاویه خمش درخت تحت اثر نیروهای وارد بر آن،  $a$  ارتفاع نقطه اثر نیروی وزن تنه که در نصف ارتفاع تنه در نظر گرفته می شود،  $x_1$  خمش درخت در محل اعمال نیروی  $F$ ،  $x_2$  خمش درخت در محل نقطه اثر نیروی وزن تاج،  $x_3$  خمش درخت در محل نقطه اثر نیروی وزن تنه،  $y_1$  تغییر وضعیت عمودی نقطه اثر نیروی  $F$  پس از خمش،  $I$  ممان اینرسی مقطع درخت و  $E$  مدول الاستیسیته چوب سبز درخت می باشد.

وزن تنه درخت  $W_2$  و وزن تاج  $W_1$  با در دست داشتن چگالی چوب  $\rho$ ، چگالی حجمی تاج در حالت بدون برگ  $\mu_0$  و حجم تاج  $v_1$ ،  $w_e$  و وزن عوامل متفرقه مانند وزن برگ ها و برف، مساحت مقطع تحت بررسی  $A_s$  و ارتفاع تنه  $h_1$  از روابط ۷ و ۸ قابل محاسبه است.



شکل ۵ - الف) شماتیک یک درخت تغییر شکل یافته در اثر نیروی باد، ب) شماتیک یک درخت، نیروهای وارد بر آن و ابعاد مهم در تحلیل به کمک مدل استحکام تنه

افق) نسبت به درخت تهیه شوند.

دراثر نیروی باد علاوه بر گشتاور ناشی از آن پس از خمش اولیه درخت، گشتاور نیروی وزن تاج و وزن تنه نیز وارد عمل می شوند. هرچه میزان خمش بیشتر شود گشتاورها با زاویه گرفتن تنه افزایش می یابند. و باعث ایجاد تنش در تنه درخت می گردند، لذا تعیین میزان حداکثر تنش در ضعیف ترین مقطع درخت که احتمال شکست بالایی را دارد از اهداف این مقاله می باشد. از این رو ابتدا لازم است نیروی درگ (F)، مدول الاستیسیته  $E$  و ممان اینرسی سطح مقطع مورد نظر تعیین شوند.  $F$  بر حسب نیوتن بر متر مربع با توجه حداکثر سرعت باد در منطقه رویش درخت، مساحت سطح مقطعی از تاج که در مقابل باد قرار دارد و چگالی تاج از جدول ۱ بدست می آید. به منظور تعیین مقدار نیروی درگ، لازم است  $F$  در سطح مقطعی از تاج که در معرض وزش باد قرار دارد ضرب گردد.

$E$  مدول الاستیسیته چوب سبز درخت است که با توجه به نوع و گونه درخت تعیین می شود و  $I$  ممان اینرسی مقطع تحت بررسی است که با توجه به قطر خارجی مقطع  $d_o$  و قطر حفره داخلی  $d_i$  (در صورت وجود) از رابطه ۱ محاسبه می شود. در درختانی که سطح مقطع بحرانی آنها شکل بیچیده ای داشته باشد، به کمک نرم افزارهای مدل سازی مهندسی می توان ممان اینرسی سطح را تعیین کرد.

$$I = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{64} \quad (۱)$$

سایر پارامترهای ابعادی ناشی از تغییر شکل درخت در اثر خمش ناشی از باد از روابط ۲ تا ۶ محاسبه می شود.

### انتخاب و اندازه گیری مشخصات فیزیکی نمونه

معمولاً درختانی نیاز به اجرای برنامه پایش دارند که علاوه بر سن بالا در مناطق حساسی رشد کرده باشند. همچنین درختانی که از نظر ظاهری معیوب به نظر برسند نیازمند بررسی دقیق تر هستند. بدین منظور لازم است ابتدا تنه درخت از نظر وجود حفره داخلی بررسی شده و قطر و محل قرار گیری حفره مشخص شود. ارتفاع درخت (H)، ارتفاع تنه (h<sub>1</sub>)، ارتفاع تاج (h<sub>2</sub>) و قطرتاج (D) توسط متر و بالابرد تعیین می شود. جهت تعیین چگالی سطحی تاج در دو حالت با برگ و بدون برگ به دلیل تغییرات چگالی در نقاط مختلف، روش قطعی ارائه نشده است و از روش های تقریبی استفاده می شود. یکی از روش های تقریبی به منظور تعیین میانگین چگالی سطحی، در سطح مقطع عمود بر جریان باد، عکس برداری موازی از تاج و پردازش تصویر می باشد. توسط نرم افزارهای پردازش تصویر نظیر متلب<sup>۱</sup> می توان به طور تقریبی چگالی سطحی تاج را بر حسب درصد بیان کرد.

$$w_1 = \rho_{Wood} \cdot \mu_0 \cdot v_1 + w_e \quad (7)$$

$$w_2 = \rho_{wood} \cdot A \cdot h_1 \quad (8)$$

گشتاور ناشی از نیروهای اصلی وارد بر درخت در محل مقطع s از روابط ۹ تا ۱۱ محاسبه می شوند. در این روابط M<sub>w1</sub> گشتاور ناشی از نیروی وزن تاج، M<sub>w2</sub> گشتاور ناشی از وزن تنه درخت و M<sub>F</sub> گشتاور ناشی از نیروی باد می باشد.

$$M_{w_1} = w_1 \cdot x_2 = \rho \cdot \mu_0 \cdot v_1 \cdot \frac{F}{6EI} [3h_3 h_4^2 - h_4^3] \quad (9)$$

$$M_{w_2} = w_2 \cdot x_3 = \frac{\rho \cdot A_s \cdot h_1 \cdot F}{6EI} [3h_3 a^2 - a^3] \quad (10)$$

$$M_F = F \cdot \left[ h_3 - \frac{F h_3^3}{3EI} \operatorname{tg} \left[ \frac{F h_3^2}{2EI} \right]_{rad} - h_0 \right] \quad (11)$$

جدول ۱- مقدار نیروی وارد شده بر تاج درخت (نیوتن بر متر مربع) در سرعت های مختلف باد (کیلومتر بر ساعت) و چگالی های حجمی مختلف تاج (۱)

| چگالی حجمی تاج درخت |       |       |       |       |       |      |      |      |      | سرعت باد<br>(km/hr) |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|---------------------|
| %۱۰۰                | %۹۰   | %۸۰   | %۷۰   | %۶۰   | %۵۰   | %۴۰  | %۳۰  | %۲۰  | %۱۰  |                     |
| ۳۱۱                 | ۲۷۹/۷ | ۲۴۸/۵ | ۲۱۷/۲ | ۱۸۶   | ۱۵۴/۸ | ۱۲۵  | ۹۳/۷ | ۶۲/۵ | ۳۱/۲ | ۳۳۸                 |
| ۲۳۸/۱               | ۲۱۴/۳ | ۱۹۰/۵ | ۱۶۶/۷ | ۱۴۲/۸ | ۱۱۹   | ۹۵/۲ | ۷۱/۴ | ۴۷/۶ | ۲۳/۸ | ۲۹۵/۷۵              |
| ۱۷۵/۶               | ۱۵۷/۷ | ۱۳۹/۹ | ۱۲۲   | ۱۰۵/۶ | ۸۷/۸  | ۶۹/۹ | ۵۲/۱ | ۳۵/۷ | ۱۷/۹ | ۲۵۳/۵               |
| ۱۵۱/۸               | ۱۳۶/۹ | ۱۲۲   | ۱۰۷/۱ | ۹۰/۸  | ۷۵/۹  | ۶۱   | ۴۶/۱ | ۳۱/۲ | ۱۴/۹ | ۲۳۶/۶               |
| ۱۳۰/۹               | ۱۱۷/۶ | ۱۰۵/۶ | ۹۲/۳  | ۷۸/۹  | ۶۵/۵  | ۵۲/۱ | ۴۰/۲ | ۲۶/۸ | ۱۳/۴ | ۲۱۹/۷               |
| ۱۱۱/۶               | ۱۰۱/۲ | ۸۹/۳  | ۷۸/۹  | ۶۷    | ۵۶/۵  | ۴۴/۶ | ۳۴/۲ | ۲۲/۳ | ۱۱/۹ | ۲۰۲/۸               |
| ۹۳/۷                | ۸۴/۸  | ۷۵/۹  | ۶۵/۵  | ۵۶/۵  | ۴۷/۶  | ۳۷/۲ | ۲۸/۳ | ۱۹/۳ | ۸/۹  | ۱۸۵/۹               |
| ۷۷/۴                | ۶۹/۹  | ۶۲/۵  | ۵۵/۱  | ۴۶/۱  | ۳۸/۷  | ۳۱/۲ | ۲۳/۸ | ۱۴/۹ | ۷/۴  | ۱۶۹                 |
| ۶۲/۵                | ۵۶/۵  | ۵۰/۶  | ۴۴/۶  | ۳۷/۲  | ۳۱/۲  | ۲۵/۳ | ۱۹/۳ | ۱۳/۴ | ۶    | ۱۵۲/۱               |
| ۴۹/۱                | ۴۴/۶  | ۴۰/۲  | ۳۴/۲  | ۲۹/۸  | ۲۵/۳  | ۱۹/۳ | ۱۴/۹ | ۱۰/۴ | ۴/۵  | ۱۳۵/۲               |
| ۳۸/۷                | ۳۴/۲  | ۳۱/۲  | ۲۶/۸  | ۲۲/۳  | ۱۹/۳  | ۱۴/۹ | ۱۱/۹ | ۷/۴  | ۳/۹  | ۱۱۸/۳               |
| ۲۸/۳                | ۲۵/۳  | ۲۲/۳  | ۱۹/۳  | ۱۶/۴  | ۱۳/۴  | ۱۱/۹ | ۸/۹  | ۶    | ۲/۸  | ۱۰۱/۴               |
| ۱۹/۳                | ۱۷/۹  | ۱۴/۹  | ۱۳/۴  | ۱۱/۹  | ۱۰/۴  | ۷/۴  | ۶    | ۳/۹  | ۱/۹  | ۸۴/۵                |
| ۱۶/۴                | ۱۴/۹  | ۱۳/۴  | ۱۰/۴  | ۸/۹   | ۷/۴   | ۶    | ۴/۵  | ۳/۱  | ۱/۶  | ۷۶/۰۵               |
| ۱۱/۹                | ۱۱/۹  | ۱۰/۴  | ۸/۹   | ۷/۴   | ۶     | ۴/۵  | ۳/۷  | ۲/۵  | ۱/۲  | ۶۷/۶                |
| ۸/۹                 | ۸/۹   | ۷/۴   | ۷/۴   | ۶     | ۴/۵   | ۳/۹  | ۲/۸  | ۱/۹  | ۰/۸۹ | ۵۹/۱۵               |
| ۷/۴                 | ۶     | ۶     | ۴/۵   | ۴/۵   | ۳/۶   | ۲/۸  | ۲/۱  | ۱/۳  | ۰/۷۴ | ۵۰/۷                |
| ۴/۵                 | ۴/۵   | ۳/۹   | ۳/۴   | ۳     | ۲/۴   | ۱/۹  | ۱/۵  | ۱/۰۴ | ۰/۴۵ | ۴۲/۲۵               |
| ۳/۱                 | ۲/۸   | ۲/۵   | ۲/۲   | ۱/۹   | ۱/۵   | ۱/۲  | ۰/۹  | ۰/۶  | ۰/۳  | ۳۳/۸                |
| ۱/۸                 | ۱/۶   | ۱/۳   | ۱/۲   | ۱     | ۰/۹   | ۰/۷  | ۰/۶  | ۰/۳  | ۰/۱۵ | ۲۵/۳۵               |
| ۰/۷                 | ۰/۷   | ۰/۶   | ۰/۶   | ۰/۴   | ۰/۴   | ۰/۳  | ۰/۳  | ۰/۱۵ | ۰/۰۷ | ۱۶/۹                |
| ۰/۱                 | ۰/۱   | ۰/۱   | ۰/۱   | ۰/۱   | ۰/۱   | ۰/۱  | ۰/۱  | ۰/۰۴ | ۰/۰۱ | ۸/۴۵                |



و سوراخ های ناشی از حشرات تحلیل مکانیکی را با مشکل مواجه می کنند. در مدل مکانیکی حاضر، نیروی باد کاملاً افقی و به صورت بار گسترده در نظر گرفته شد. همچنین فقط حفره ها و پوسیدگی های داخلی مد نظر قرار گرفتند. از تنش های فشاری و پیچشی به دلیل اثر قابل اغماض نسبت به تنش های کششی و خمشی صرف نظر شد. تنش ایجاد شده در مقطع S را می توان به ترتیب اهمیت به سه بخش تنش ناشی از نیروی باد  $\sigma_F$ ، تنش ناشی از نیروی وزن تاج  $\sigma_{Mw1}$  و تنش ناشی از نیروی وزن تنه  $\sigma_{Mw2}$  تقسیم نمود (شکل ۶). که از روابط ۱۲ تا ۱۴ محاسبه می شوند.

$$\sigma_{M_{w1}} = \frac{M_{w1}.r}{I} = \frac{\rho.\mu_0.v_1.F.r[3h_3h_4^2 - h_4^3]}{6EI^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{M_{w2}} = \frac{M_{w2}.r}{I} = \frac{\rho.A_s.h_1.F.r[3h_3a^2 - a^3]}{6EI^2} \quad (13)$$

$$\sigma_F = \frac{M_F.r}{I} = \frac{F.r \left[ h_3 - \frac{Fh_3^3}{3EI} \operatorname{tg} \left[ \frac{Fh_3^2}{2EI} \right]_{rad} \right] - h_0}{I} \quad (14)$$

تنش کل بوجود آمده در مقطع S مجموع تنش های فوق می باشد. از آنجا که مقاومت چوب در برابر تنش های فشاری بسیار بیشتر از تنش های کششی است، احتمال شروع شکست در نقطه ای که حداکثر تنش کششی را دارد (نقطه  $k_1$  شکل ۶) بیشتر از سایر نقاط می باشد. حداکثر تنش کل در مقطع S از جمع جبری تنش های موجود (رابطه ۱۵) بدست می آید.

## اثر تغییر قطر حفره داخلی روی تنش کل حداکثر به کمک

### مدل ریاضی

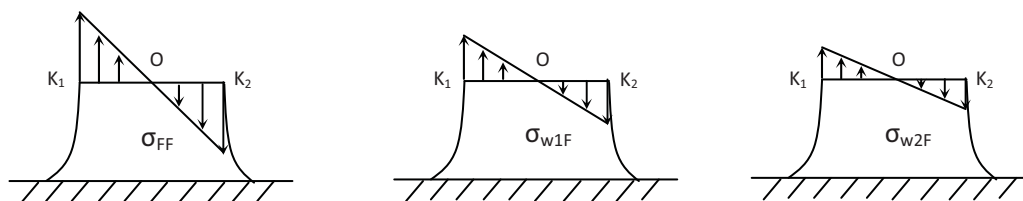
قطر حفره ها و پوسیدگی های داخلی در تنه درخت در اثر شرایط محیطی و رشد درخت هر ساله افزایش می یابد. هرگونه تغییر در قطر حفره داخلی موجب تغییر در استحکام درخت می گردد. در فضاهای سبز شهری درختانی وجود دارند که بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند، در نتیجه حفظ و پایش وضعیت و تعیین ضریب اطمینان آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از پر کاربردترین این درختان می توان چنار را نام برد. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی چوب این درخت در جدول ۲ آمده است. این مقادیر در دو میزان رطوبت ۱۲ درصد و رطوبت چوب زنده، اندازه گیری و ذکر شده اند. به منظور تعیین اثر تغییر قطر حفره داخلی روی تنش کل حداکثر با استفاده از مدل ریاضی حاضر، به عنوان مثال محاسبات روی یک نمونه درخت چنار با قطر تنه ۶۴ سانتی متر، ارتفاع ۱۱/۲ متر، ارتفاع تاج ۷/۸ متر، ارتفاع تنه ۳/۴ متر، چگالی تاج ۷۰ درصد، حجم تاج ۳۱ متر مربع، چگالی تاج در حالت بدون برگ ۱۰ درصد در منطقه ای با حداکثر سرعت باد ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت و سطح مقابل باد حدود ۱۳/۵ متر مربع انجام گرفت.

## نتایج و بحث

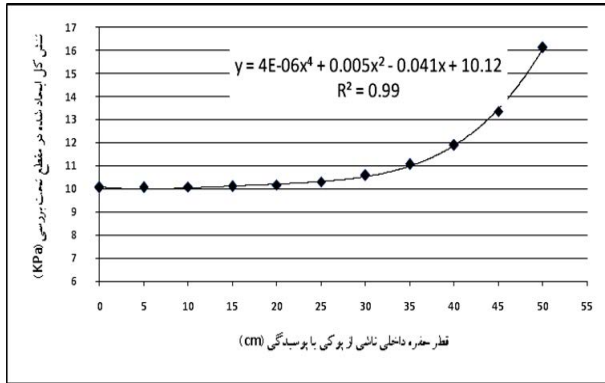
نیروی باد وارد بر تنه و تاج درخت شامل متغیرهای زیادی بوده و تجزیه و تحلیل کامل آنها مقدور نمی باشد. از طرفی چوب درخت ساختار ارتوتروپیک داشته و عواملی نظیر وجود گره، حفره، پوسیدگی

جدول ۲ - پارامترهای فیزیکی و مکانیکی درخت چنار در حالت چوب سبز و رطوبت ۱۲ درصد (۲)

| نام گونه | درصد رطوبت | چگالی $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ ) | مدول شکست (kPa) | مدول الاستیسیته (MPa) E | حداکثر تنش فشاری موازی با جهت آوندها (kPa) | حداکثر تنش کششی عمود بر جهت آوندها $\sigma_{allowable}$ (kPa) |
|----------|------------|----------------------------------|-----------------|-------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| چنار     | سبز        | ۴۶۰                              | ۴۵۰۰۰           | ۷۳۰۰                    | ۲۰۱۰۰                                      | ۴۳۰۰                                                          |
|          | ۱۲٪        | ۴۹۰                              | ۶۹۰۰۰           | ۹۸۰۰                    | ۳۷۱۰۰                                      | ۵۰۰۰                                                          |



شکل ۶- تفکیک تنش بوجود آمده در اثر نیروی باد و خمش درخت در مقطع تحت بررسی



شکل ۶- منحنی تغییرات تنش کل حداکثر نسبت به تغییرات قطر حفره داخلی تنه

### نتیجه گیری

مجموعه ساختار یک درخت که شامل ریشه، تنه و تاج می‌باشد، از نظر هندسی و نیرویی دارای پارامترهای بسیاری بوده، که تحلیل مکانیکی آن راه، در مقابل نیروهای وارده در اثر باد و طوفان پیچیده می‌کند. بدین دلیل در این مقاله جهت گسترش یک مدل ریاضی کاربردی که رفتار و توانایی تحمل درخت را در مقابل نیروی باد پیش بینی کند، لازم بود از بعضی پارامترها نظیر چگونگی گسترش ریشه، زاویه شاخه های اصلی با تنه، کاهش قطر تنه در ارتفاع درخت و غیره صرف نظر کرده و بعضی پارامترهای دیگر را نظیر تغییرات تراکم برگ ها در حجم تاج، سلامت چوب تنه درخت، مساحت در مقابل باد و وزن تاج و تنه و غیره را ساده سازی کنیم (رابطه ۱۶). این مدل می تواند ضریب اطمینان توانایی تنه درخت در مقابل حداکثر سرعت بادهای موجود در منطقه رویش را تعیین کند (رابطه ۱۷). اکثر درختانی که از نظر استحکام مورد بررسی قرار می گیرند، کهنسال بوده و مشکوک به وجود حفره و پوسیدگی داخلی در تنه می باشند. به منظور افزایش کارایی و دقت مدل ریاضی لازم است وضعیت داخلی تنه از نظر وجود حفره و پوسیدگی به کمک روش های رایج مانند اسکن با امواج رادار زمین نفوذ (GPR<sup>۲</sup>)، توموگرافی صوتی<sup>۳</sup> و مقاومت سنجی<sup>۴</sup> مشخص شود.

در این مقاله تغییرات حداکثر تنش ایجاد شده در مقطع درخت را نسبت به افزایش قطر حفره داخلی برای یک نمونه درخت چنار با استفاده از مدل ریاضی بدست آمد (شکل ۶). شکل ۶ نشان می دهد حداکثر تنش کل ایجاد شده در مقطع درخت تحت شرایط یکسان سرعت باد، ارتفاع درخت و چگالی تاج با تغییر قطر حفره از ۴۰ درصد

$$\sigma_{Total} = \sigma_{M_{w_1}} + \sigma_{M_{w_2}} + \sigma_T \quad (15)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{Total_{K_1}} = (\sigma_{M_{w_1}} + \sigma_{M_{w_2}} + \sigma_T)_{K_1} \quad (16)$$

با در اختیار داشتن مدول الاستیسیته، حداکثر تنش قابل تحمل و چگالی چوب درخت به همراه پارامترهای فیزیکی آن و حداکثر سرعت باد در منطقه رویش درخت می‌توان بیشینه تنش وارد بر مقطع حساس تنه را محاسبه و با حداکثر تنش کششی قابل تحمل چوب مقایسه نمود. بدین وسیله می‌توان ضریب اطمینان درخت در مقابل بادهای منطقه رویش را بدست آورد (رابطه ۱۷). چنانچه ضریب اطمینان کوچکتر از یک باشد، درخت توانایی تحمل باد های موجود در منطقه را ندارد و سقوط آن حتمی می‌باشد. ضریب اطمینان بین ۱ تا ۱/۵ به معنی توانایی تحمل باد با حداکثر سرعت پیش بینی شده در منطقه است ولی احتمال سقوط به دلیل شرایط پیش بینی نشده، بالا می‌باشد. در نتیجه این قبیل درختان نیاز به رسیدگی و بررسی های بیشتری دارند. ضریب اطمینان بزرگتر از ۱/۵، وضعیت ایمنی شرایط موجود با قابلیت اطمینان بالا را نشان می‌دهد. در این حالت درخت توانایی تحمل حداکثر سرعت بادهای پیش بینی شده و شرایط پیش بینی نشده متعارف را دارد، در نتیجه می‌توان آن را حفظ کرد.

$$FS = \frac{\sigma_{allowable}}{\sigma_{max}} > 1/5 \quad (17)$$

در این رابطه FS ضریب اطمینان<sup>۱</sup> درخت،  $\sigma_{max}$  حداکثر تنش وارد بر مقطع حساس درخت و  $\sigma_{allowable}$  حداکثر تنش مجاز قابل تحمل توسط چوب گونه خاص درخت مورد نظر می‌باشد. نتایج این تحلیل شامل محاسبه تنش کل حداکثر به صورت پارامتری بر حسب متغییر قطر حفره داخلی که هم مرکز با تنه درخت در نظر گرفته شد، می باشد.

به منظور تعیین اثر قطر حفره داخلی روی حداکثر تنش در تنه درخت که در بخش مواد و روش ها معرفی شد، منحنی تغییرات تنش کل حداکثر نسبت به تغییر قطر حفره داخلی از صفر تا ۵۰ سانتی متر در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود گسترش قطر حفره داخلی تا ۲۰ سانتی متر تأثیر چندانی در تنش کل حداکثر ندارد اما با گذر از ۲۵ سانتی متر تنش کل حداکثر به صورت تابع درجه چهار با  $R^2 = 0.99$  (رابطه ۱۸ و شکل ۶) ناگهانی افزایش می‌یابد. این حد که آستانه افزایش ناگهانی تنش کل حداکثر است، حد آستانه خطر سقوط می نامیم.

$$\sigma_{max} = 4E - 6d_i^4 + 0.005d_i^2 + 10.12 \quad (18)$$

2- Ground penetrating radar  
3- Sonic tomography  
4- Resistography

1- Factor of safety

### سپاسگزاری

بدین وسیله لازم می‌دانیم از مدیریت سازمان پارک ها و فضای سبز شهرداری مشهد و سرکار خانم مهندس هژبری و آقای مهندس وحدتی پناه به دلیل فراهم نمودن امکانات لازم جهت انجام این تحقیق سپاس و قدردانی نماییم.

قطر تنه به صورت تابع درجه چهار به طور ناگهانی افزایش یافت. بدین وسیله در صورت در دست داشتن اندازه قطر حفره یا پوسیدگی داخلی تنه می‌توان تخمینی از درجه خطرناکی درخت بدست آورده که برای مدیران فضای سبز شهری به منظور تشخیص درختان پر خطر بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

### منابع

- 1- Coder K. 2000. Estimating wind force on tree crown. Tree Biomechanics Series, university of Georgia Sep.2000. WEB Site: [www.forestry.uga.edu/warnell/service/library](http://www.forestry.uga.edu/warnell/service/library)
- 2- Green D., Winandy J., and Kretschmann D. 1999. Mechanical Properties of Wood-Forest Products Laboratory. Wood handbook—Wood as an engineering material.chapter4, p1-13.
- 3- Gormally C., McIntosh M., Mucciardi A., and McCarty J. 2011. Ground-penetrating radar detection and three-dimensional mapping of lateral macro pores: II. Riparian application. Soil Physics, Vol. 75 No. 4, p. 1236-1243.
- 4- Hallam C. 2004. Sonic tomograph test and summary report. ENSPEC pty LTD. December 2004.
- 5- James K. 2003. Dynamic loading of trees. Journal of Arboriculture 29(3) p165-171.
- 6- Kahl T., Wirth C., and Mund M. 2009. Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway spruce. European Journal of Forest Research 128 p467-473.
- 7- Shi-igai H. 1988. Measurement of wind drag forces on trees. Natural disaster science 10(2), p 25-33.
- 8- Yang B., Shaw R., and Paw-U K. 2006. Wind loading on trees across a forest edge: A large eddy simulation, Agricultural and Forest Meteorology 141 p133-146.